



Materiais Avançados 2010-2022

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação



Materiais Avançados
2010-2022



cgEE

Brasília – DF
2010

© Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

ISBN 978-85-60755-25-7

Presidenta

Lucia Carvalho Pinto de Melo

Diretor Executivo

Marcio de Miranda Santos

Diretores

Antonio Carlos Filgueira Galvão

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Edição / *Tatiana de Carvalho Pires*

Design Gráfico / *Eduardo Oliveira*

Diagramação / *Hudson Pereira*

Capa / *Camila Maia*

Revisão bibliográfica / *Lilian Thomé Andrade Brandão/ Regina Márcia Castro e Silva*

C389m

Materialias avançados no Brasil 2010-2022. Brasília: Centro de
Gestão e Estudos Estratégicos, 2010

360 p.; il.; 24 cm

ISBN - 978-85-60755-25-7

1. Materialias Avançados - Brasil. I. CGEE. II. Título.

CDU 624.016 (81)

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
SCN Qd 2, Bl. A, Ed. Corporate Financial Center sala 1102
70712-900, Brasília, DF
Telefone: (61) 3424.9600
<http://www.cgee.org.br>

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do Contrato de Gestão CGEE – 14º
Termo Aditivo/Ação: Agenda Estratégica em Materialias Avançados - 51.37.1/MCT/2008.

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta
publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.
Impresso em 2010



Materiais Avançados

2010-2022

Supervisão

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Comitê consultivo

Aloísio Nelmo Klein

Celso Pinto de Melo

Fernando Galembeck

José Carlos Bressiani

Marcio de Miranda Santos

Consultores

Fabio Coral Fonseca

Glória Dulce de Almeida Soares

José Daniel Biasoli de Mello

Leonardo de Souza Menezes

Maurício Pazini Brandão

Victor Rafael Rezende Celestino

Virginia Sampaio Teixeira Ciminelli

Wander Luiz Vasconcelos

Yara Csordas

Equipe Técnica do CGEE

Elyas Ferreira de Medeiros (coordenador)

Lélio Fellows Filho

Co-relatores

Alfredo Miranda de Góes
Ana Paula Bax
Ângela de Mello Ferreira Magalhães
Antonio Azevedo da Costa
Antônio Jorge Abdalla
Carla Valéria Martins Rodrigues
Carlos de Moura Neto
César Augusto Sales Barbosa
Cristina Tristão de Andrade
Eduardo Zapico Mouro
Elita Urano C. Frajndlich
Estevam Vitório Spinace
Fábio do Carmo Bragança
Fátima Maria Sequeira de Carvalho
Francisco Cristóvão Lourenço de Melo
Francisco Jose Correa Braga
Heloisa Cajon Schumacher
Henara Lillian Costa
Humberto G. Riella
Jorge Otubo
Kwadwo Osseo-Asare
Lalgudi V. Ramanathan
Luiz Sérgio Marcelino Gomes
Marcelo Ganzarolli de Oliveira
Márcia Maria Rippel
Maria Fidela de Lima Navarro
Mirabel Cerqueira Rezende
Radovan Borojevic
Rafael Arromba de Sousa
Renato Ribeiro Ciminelli
Ricardo Mendes Leal Neto
Roberto Binder
Rubens Belfort Junior
Taís Munhoz M. G. de Oliveira
Vanderlei Sergio Bergamaschi

Revisores

Alberto Passos Guimarães
Amilton Sinatora
Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
Davi Santiago de Macedo
Eduardo Torres Serra
Nelson Veissid
Roberto Cerrini Villas-Boas
Shigeo Shiki



Sumário

APRESENTAÇÃO	7
INTRODUÇÃO	9
1. MATERIAIS AVANÇADOS PARA DEFESA NACIONAL E SEGURANÇA PÚBLICA	13
2. MATERIAIS AVANÇADOS PARA ELETRÔNICA, MAGNETISMO E FOTÔNICA	61
3. MATERIAIS AVANÇADOS PARA O SETOR ESPACIAL	129
4. MATERIAIS AVANÇADOS PARA ENERGIA	169
5. MATERIAIS AVANÇADOS PARA O MEIO AMBIENTE	203
6. MATERIAIS AVANÇADOS A PARTIR DE RECURSOS NATURAIS	231
7. MATERIAIS AVANÇADOS PARA SAÚDE MÉDICO-ODONTOLÓGICA	297
8. MATERIAIS AVANÇADOS NA TRIBOLOGIA	335



Apresentação

A transformação do Brasil em grande produtor de algumas das principais *commodities* de que depende a humanidade tem esteio na construção de conhecimento e vantagens competitivas resultantes de investimentos de CT&I em Materiais Avançados. Processos de síntese da matéria-prima, com controle das características estruturais do material, e foco em desempenho sistêmico do produto acabado viabilizam engenhos e soluções de grande potencial estratégico.

Esta publicação é resultado de um esforço conjunto do CGEE e da comunidade de cientistas e engenheiros interlocutores no âmbito do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Mais de 200 especialistas oriundos da academia, empresas e governo cooperaram ao longo dos anos de 2008-2009 para oferecer ao público tomador de decisão subsídios para o desenvolvimento de materiais avançados de interesse prioritário em aplicações magnéticas, eletrônicas e fotônicas; energia; defesa nacional e segurança pública; atividades espaciais; meio ambiente; recursos naturais minerais e biológicos, saúde médico-odontológico; e tribologia.

Espera-se que esta obra sirva aos processos de tomada de decisão e de estabelecimento de políticas públicas visando o amadurecimento deste setor. A multidisciplinaridade da engenharia de materiais foi tratada neste esforço de inteligência coletiva e de visão no futuro tangível (15 anos), como um eixo de recomendações que alcançam os ambientes executivos das organizações que planejam e investem em soluções tecnológicas do interesse doméstico e internacional brasileiro. Atentar, portanto, para esse eixo de propostas (peculiares às agendas de PD&I em materiais e às estratégias de mercado das empresas) pode impulsionar a capacidade nacional de atendimento a demandas crescentes de matérias-primas e insumos, dentro de padrões de sustentabilidade, competitividade e responsabilidade ambiental e social.

Lucia Carvalho Pinto de Melo

Presidenta do CGEE



Introdução

Um dos aspectos característicos do progresso da civilização humana foi sua dependência no desenvolvimento e aplicações de novos materiais, o que os levou a servir como marco temporal de diferentes etapas da evolução das sociedades, desde os primórdios de nossa história. Nas últimas décadas, em grande parte por influência da corrida espacial, a relevância dos materiais no desenvolvimento tecnológico tem aumentado significativamente, tornando-os, em muitos casos, fatores determinantes para a introdução de novas tecnologias e agentes fundamentais do processo de inovação. Uma simples observação de nosso cotidiano revela a importância dos materiais em áreas tão diversas como energia, telecomunicações, saúde, defesa e meio ambiente, entre outras.

Por este motivo, a realização de estudos prospectivos sobre Materiais é uma prática frequente em vários países, como parte da estratégia de definição de políticas de financiamento apropriadas para seu desenvolvimento científico e tecnológico.

Uma dificuldade evidente em um estudo desta natureza é a escolha dos temas a serem focalizados e isto certamente ocorreu no presente caso. A seleção final foi determinada com base no atendimento a diversos critérios, entre os quais: a importância para o desenvolvimento tecnológico de setores específicos de interesse nacional ou de aplicação global; o aproveitamento e agregação de valor a recursos naturais do país; e o potencial representado pelo tema como área portadora de futuro. Com base nestes critérios, foram selecionados oito temas voltados para materiais avançados em: defesa nacional e segurança pública; aplicações em eletrônica, magnetismo e fotônica; energia; atividades espaciais; meio ambiente; recursos naturais minerais e biológicos; saúde médico-odontológica; e tri-bologia. Uma descrição sucinta de cada tema é feita a seguir.

Em defesa e segurança pública, o Brasil não pode deixar de se posicionar estrategicamente e de forma categórica, no espectro das possibilidades econômicas e dos compromissos internacionais. Uns poucos programas tecnológicos arrojados na área de defesa poderão tornar-se importante contribuição de forma a gerar diferenciais de capacidades e competências dissuasórias. Tecnologias consolidadas, como soldagem entre metais e cerâmicas, também são gargalos importantes para o setor. Blindagem balística e eletromagnética, materiais metálicos e compósitos especiais, sensores avançados, e simulação computacional em ciência e engenharia de materiais são o foco deste trabalho que destaca os segmentos específicos possíveis de superarem barreiras econômicas e cerceamentos tecnológicos.

Em eletrônica, os materiais avançados estarão no cerne das decisões sobre quais tecnologias são baseadas em princípios físicos fundamentais que, enquanto possibilitem a construção e manufatura de novos dispositivos nanométricos, sejam capazes de permitir a integração de arquiteturas e de operação com a tecnologia atual. Se roteiros estratégicos prevêem a evolução da tecnologia de *chips* CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), até pelo menos o ano 2020, por muito tempo após isso ela deverá permanecer como um componente importante dos dispositivos eletrônicos, em uma transição de talvez várias décadas, até que um novo paradigma tecnológico se torne dominante.

Em magnetismo, nunca antes a vida das pessoas foi tão significativamente dependente do desenvolvimento de novos materiais com propriedades magnéticas especiais. Em muitos aspectos, a sociedade é dependente de processos automatizados que usam materiais ferromagnéticos em quase todas as atividades essenciais. A capacidade de controlar o crescimento de filmes finos e multicamadas em escala atômica, que se atingiu na área de semicondutores, se verifica na área de magnetismo. Os novos materiais devem ser aperfeiçoados para evitar agressão ambiental, devem ser limpos e gastar pouca energia. Uma das aplicações mais promissoras é no desenvolvimento de refrigeradores magnetocalóricos, que poupam energia e evitam o uso de substâncias baseados nos cloro-fluorcarbonos, que destroem a camada de ozônio.

Em fotônica, o século 21 vivenciará incomparáveis impactos tecnológicos na sociedade. Isso devido ao amplo leque de produtos inovadores, como em: mostradores (usados em televisores, câmeras fotográficas, telefones celulares); em sensores de alta sensibilidade (para pesquisa científica, monitoramento de ambientes limpos, medicina e diagnóstico, e sistemas de segurança); em dispositivos luminescentes e células solares de alta eficiência; em lasers industriais para processamento de materiais; e nas tecnologias de informação e comunicação. A biofotônica no Brasil, em particular, fortalecerá seu papel de provedor de alimentos para o mundo.

Em aplicações espaciais, os materiais empregados servem às funções de estrutura, propulsão, proteção térmica, sensoriamento e controle da condição operacional dos sistemas de voo. Foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites e satélites para diversas aplicações, todos em atendimento ao PNAE (Programa Nacional de Atividades Espaciais), e suas dependências em materiais avançados são objeto de recomendações aqui contidas e validadas por instituições oficiais do Programa. Os subsídios orbitam uma diretriz institucional do setor que almeja a criação de uma empresa integradora para sistemas espaciais, capaz de reunir e consolidar diversas tecnologias amadurecidas sob forma de produtos inovadores que possam ser utilizados com dualidade de emprego civil e de defesa.



Em energia, o aumento da demanda (somado ao crescente apelo por fontes renováveis, eficientes, com emissões de gases de efeito estufa reduzidas e segurança no fornecimento energético) impulsiona o desenvolvimento de tecnologias de geração de eletricidade. São descritas, então, as principais necessidades de desenvolvimento de materiais nas frentes de produção em biocombustíveis; eletricidade solar; energia nuclear; energia eólica; produção e armazenamento de hidrogênio; e células a combustível. Alguns destaques vão para a fabricação de filmes e de camadas finas; o desenvolvimento de ligas metálicas especiais; desenvolvimento de materiais cerâmicos estruturais; cerâmicas elétricas; materiais refratários; catalisadores resistentes à desativação; compósitos estruturais reforçados com fibras; materiais para separação; combustíveis nucleares e semicondutores.

Em meio ambiente, o Brasil poderá exibir nas próximas décadas um caráter de âncora tecnológica e contribuir em escala mundial na remediação de uma série de problemas do planeta, seja em decorrência de causas naturais ou por efeitos antropogênicos, tais como: mudanças climáticas, elevação do nível do mar, presença de poluição atmosférica, extinção de espécies animais e vegetais, acidificação dos oceanos, destruição da camada de ozônio, degradação dos solos, chuva ácida, destruição de habitats, super-exploração de recursos hídricos, contaminações por produtos químicos perigosos, contaminação microbiológica e derramamentos de hidrocarbonetos. Tais problemas ao mesmo tempo requerem investimentos no desenvolvimento e produção de materiais e tecnologias de materiais e também representam grandes oportunidades de investimentos pelo governo e pelo empresariado.

Em recursos naturais minerais e biológicos, os recentes desenvolvimentos científicos e tecnológicos têm criado um elevado número de oportunidades de criação de materiais avançados. Essas oportunidades respondem positivamente à necessidade de transição da economia atualmente baseada em matérias-primas e combustíveis fósseis para uma economia caracterizada pelo desenvolvimento sustentável e de baixo uso de carbono, que contribua para a mitigação das emissões de poluentes e, portanto, para a minimização das mesmas contribuições antrópicas já citadas. Com base em matérias primas abundantes ou renováveis, o leitor será norteado pelas importâncias de tópicos tecnológicos, tais como: caracterização de materiais avançados e de suas fontes naturais; rotas alternativas para produção de insumos básicos para fertilizantes; produção de materiais agroquímicos avançados; reaproveitamento de rejeitos da atividade mineral e do agronegócio, como insumos para produção de materiais avançados; e outros.

Em saúde médico-odontológico, a política de desenvolvimento produtivo vigente, que dá sustentabilidade ao ciclo de expansão econômica, abriga metas como a redução do déficit comercial do Complexo Industrial da Saúde para US\$ 4,4 bilhões até 2013 e desenvolvimento de tecnologias para produção local de 20 produtos estratégicos para o Sistema Único de Saúde até 2013. Destaques são

dados às tecnologias de materiais, servindo, portanto, aos implantes ortopédicos; próteses endovasculares; materiais dentários; nanoestruturas para diagnóstico e tratamento de doenças; materiais carreadores para sistemas de liberação controlada; e materiais para engenharia tecidual. Cruciais para o desenvolvimento de qualquer setor, as ações institucionais a serem efetivadas nessa, e nas demais áreas de materiais, incluem a formação de recursos humanos, que devem incluir especializações e cursos técnicos em scale-up e em gestão tecnológica.

Em tribologia, uma área multidisciplinar (de grande interesse industrial quanto ao domínio científico e tecnológico dos fenômenos inerentes aos movimentos relativos de superfícies) as perdas econômicas e o impacto ambiental pelo efeito negativo dos atritos e desgastes chamam atenção nas estatísticas. Cerca de 1% a 6% do produto interno bruto de países desenvolvidos são desperdiçados no desgaste tribológico. 20% dessas perdas podem ser evitadas com aplicação do conhecimento já existente em desgaste, atrito e lubrificação. O relato dos especialistas aponta para a necessidade de se implementar programas estáveis de formação de recursos humanos em tribologia com o estabelecimento de metas a serem cumpridas pelos grupos acadêmicos operando em rede de alcance nacional.



1. Materiais avançados para defesa nacional e segurança pública¹

1.1. Apresentação

Este estudo tem origem na Agenda Estratégica de Materiais Avançados do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), que visa estabelecer o panorama e as perspectivas de ação em áreas estratégicas do Plano de Ação de CT&I 2007-2010 do MCT. Seu objetivo principal é apresentar a análise de dados estratégicos sobre materiais avançados para aplicações em Defesa Nacional e Segurança Pública no Brasil.

Durante o estudo, uma lista de tópicos tecnológicos foi proposta por especialistas do setor, os quais tiveram sua relevância considerada de acordo com alguns critérios estabelecidos (relevância industrial; estágio de desenvolvimento no país e no mundo; dimensões setoriais da C&T de materiais; e aplicações duais), visando estabelecer uma agenda de PD&I de materiais avançados de defesa e segurança no país para os próximos 15 anos:

- Armazenamento de hidrogênio na forma gasosa
- Armazenamento de hidrogênio na forma sólida
- Biomateriais para aplicações aeroespaciais e de defesa
- Celulose
- Ciclo do Combustível Nuclear
- Combustíveis nucleares avançados
- Eletrônica molecular
- Fibras ópticas microestruturadas
- Materiais de penetração balística e blindagem nuclear
- Materiais metálicos para aplicações aeroespaciais e de defesa
- Materiais para blindagem balística

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Maurício Pazini Brandão (coordenador), Víctor Rafael Rezende Celestino (relator), Davi Santiago de Macedo (revisor), Antônio Jorge Abdalla, Carlos de Moura Neto, Eduardo Zapico Mouro, Francisco Cristóvão Lourenço de Melo, Jorge Otubo, Mirabel Cerqueira Rezende (co-relatores).

- Materiais para blindagem eletromagnética
- Materiais para captação de energia solar: eletricidade solar
- Materiais para captação de energia solar: sistemas térmicos solar
- Materiais para produção de biodiesel
- Nanocompósitos
- Nanotubos de carbono
- Novos métodos de inspeção não destrutiva
- Novos processos de junção e soldagem
- Novos processos metalúrgicos
- Processamento de materiais a laser
- Processamento de materiais a plasma
- Sensores avançados
- Simulação computacional em ciência e engenharia de materiais

A partir da relatoria desses critérios, considerados nos trabalhos anteriores, que compõem o Estudo Prospectivo em Materiais Avançados do CGEE, são propostos seis temas tecnológicos e ações estratégicas para alavancar o setor de materiais avançados para a defesa nacional e segurança pública. As ações estratégicas buscam tornar o país mais autônomo no conhecimento de materiais, nos processos da engenharia de materiais; e nos produtos com destacado valor estratégico e socioeconômico, visando elevar o nível de qualidade dos investimentos, nos próximos 15 anos, na infraestrutura de P&D e na indústria do país, nos campos da defesa nacional e da segurança pública.

A análise da conjuntura internacional indica alternativas e iniciativas para o desenvolvimento de produtos de alto valor tecnológico de defesa que transfira o Brasil definitivamente para um patamar diferenciado entre as nações e, por conseguinte, tenha poderes para fazer valer os interesses de seu povo. O Brasil não pode deixar de se posicionar, perante a comunidade internacional, de forma contundente dentro de suas possibilidades econômicas e dos limites dos compromissos internacionais. Para se posicionar e ser respeitado internacionalmente, uns poucos programas tecnológicos ousados na área de defesa poderão vir a ser uma pequena, mas importante, contribuição de forma a gerar uma grande diferença em termos de capacidades e competências militares e intrinsecamente diplomáticas. Tais programas trariam indubitável benefício socioeconômico ao país devido às tecnologias de arrasto que projetos militares proporcionam com a consequente obtenção de mercados para produtos de alto valor agregado.



A área de materiais avançados é, sem dúvida, uma prioridade para esses investimentos, pois os materiais empregados no setor de defesa, que se estendem à segurança pública, possuem no mundo uma pequena quantidade de detentores de tecnologias específicas, os quais dominam o mercado e criam a dependência tecnológica. A dependência brasileira não se restringe apenas aos materiais avançados. Certos processos tecnológicos, como soldagem entre metais e cerâmicas, por exemplo, também são gargalos importantes para o setor de defesa.

Atualmente, o Brasil goza de condições necessárias para um novo longo ciclo de crescimento econômico, o que contribui para a retomada de políticas para o desenvolvimento competitivo da indústria brasileira. O governo está implantando a Política de Desenvolvimento Produtivo (PDP) que define ações integradas para mudar o patamar da indústria nacional. Dentro da PDP foram definidos Programas Mobilizadores em Áreas Estratégicas, entre eles o “Complexo Industrial de Defesa”, que tem como objetivo recuperar e incentivar o crescimento da base industrial instalada, ampliando o fornecimento para as Forças Armadas brasileiras e as exportações.

Um estudo recente, relativo a 50 aglomerados de inovações introduzidas em diferentes países nas últimas cinco décadas, indica que pelo menos em 50% dos casos, a política de compras dos governos teve efeito significativo. A importância dos gastos militares, do ponto de vista da política industrial, decorre, não tanto de seu peso no total das compras governamentais, mas antes, de sua natureza. Uma parcela expressiva desses gastos está associada a programas complexos e de longo prazo, que compreendem desde a contratação da pesquisa e desenvolvimento de novos produtos até a produção efetiva e o fornecimento continuado dos produtos desenvolvidos.

Em relação à blindagem balística, o estudo aponta potenciais para desenvolvimento da produção no país de aços balísticos e materiais cerâmicos, como os carbetos de silício e boro, e compósitos, como a aramida e o polietileno de ultra-alta massa molar. A demanda interna de material para blindagem balística de veículos e de aeronaves é estimada em mais de 600 toneladas/ano. Segundo a Associação Brasileira de Blindagem (Abrablin), em 2008, foram vendidos cerca de 6.900 veículos blindados, com um crescimento projetado de 5% ao ano. No caso dos cerâmicos, a demanda inicial para a nova família de blindados do Exército Brasileiro é de 400 kits de blindagem adicional (cerca de 20% da frota). Como o kit, incluindo o custo de aquisição de um aço balístico compatível, custa cerca de US\$ 53,5 mil no mercado internacional, estima-se uma demanda de curto prazo da ordem de R\$ 40 a 60 milhões. O mercado de blindagem balística é atendido totalmente via importação.

Os materiais mais utilizados para blindagens eletromagnéticas estão na forma de folha, espuma ou gás ionizado (plasma). No caso de aparelhos emissores, como celulares, usa-se uma tinta carreadora

de partículas de níquel e cobre. Outros materiais, mais nobres, são as ligas de permalloy e mu-metal. O Brasil não produz estes materiais em escala industrial. O mercado potencial, só no caso de celulares no Brasil, pode ser quantificado pelo número de cerca de 30 milhões de aparelhos vendidos em 2008.

Entre as diversas iniciativas possíveis no segmento de materiais metálicos de defesa e segurança, uma das principais ações estratégicas recomendadas é recuperar a capacidade anteriormente dominada no país de obtenção de ligas de titânio. Além desta, recomenda-se industrializar diversos materiais metálicos desenvolvidos por institutos de P&D, bem como novos processos metalúrgicos, de junção e de soldagem, utilizados na produção da indústria de defesa, julgados viáveis dos pontos de vista tecnológico e comercial.

As características combinadas de baixa densidade e resistência à corrosão fazem do titânio o material ideal para muitas aplicações. No entanto, seu custo relativamente alto de mineração e fabricação tem reduzido sua aplicação a setores especializados, como o aeroespacial. Pesquisas recentes visando à redução desses custos resultaram no desenvolvimento de mais de 20 novos processos potenciais para a produção de titânio metálico.

É importante notar que a metalurgia do titânio é similar à do zircônio, o que enseja uma forte sinergia no desenvolvimento de ambos os materiais de forma conjunta. Este último tem a sua principal aplicação na indústria nuclear. A sua indústria constitui um mercado oligopolista, cuja capacidade produtiva está concentrada em poucas empresas de atuação multinacional. Como a indústria nuclear brasileira ainda é pequena, o consumo anual previsto para os reatores de Angra I, II e III será da ordem de 60 t/ano. Esta demanda encontra-se muito abaixo da capacidade de unidades industriais no exterior, da ordem de 1.000 t/ano (o que deve estar próximo do *breakeven* deste tipo de processo produtivo). Entretanto, o domínio em escala piloto da metalurgia do zircônio permitirá o desenvolvimento autóctone de componentes estruturais e combustíveis para reatores nucleares de alto valor agregado.

Assim como a expansão do alumínio na década de 1930 foi impulsionada por sua utilização em utilidades domésticas, algumas análises vêm sendo realizadas para identificar novas aplicações potenciais para o titânio, bem como novos processos que poderiam reduzir os custos de produção. Produtos de consumo similares ainda não foram identificados para o uso de titânio, mas avaliam-se quais componentes de veículos seriam candidatos para a substituição dos materiais atuais por titânio, caso o custo desses componentes em Ti sejam significativamente reduzidos em relação aos patamares atuais. Essas pesquisas podem vir a incrementar o mercado do titânio.



Existem muitos tipos de materiais compósitos, conforme o tipo de materiais que são combinados, como plásticos, metais ou cerâmica. Há um tipo especial, cujos estudos e usos têm se expandido significativamente. São os compósitos poliméricos, nos quais os reforços são unidos por uma matriz polimérica. Como exemplos têm-se a fibra de vidro (baixo custo e peso e alta resistência) e as fibras de carbono, estas conhecidas como compósitos avançados, devido apresentarem resistência à fadiga bem maior que o aço e o alumínio, maior amortecimento à vibração e coeficiente de dilatação térmica negativo. As fibras de carbono (FC) são empregadas em diversos produtos, desde disco de freios de veículos até tubeiras de foguetes.

As projeções de crescimento do mercado mundial de FC estimam um crescimento anual da ordem de 15%, fomentando investimentos consideráveis dos principais produtores no aumento de sua capacidade instalada para fazer face a essa crescente demanda. Os sete maiores produtores mundiais tiveram investimentos anunciados em 2007 de mais de US\$ 1,4 bi em expansão ou atualização de suas plantas industriais. O Brasil não é um produtor, em escala comercial, de fibra de carbono de alto desempenho. Possui apenas plantas do tipo piloto para pesquisa. A crescente demanda interna sinaliza a necessidade de investimentos para o desenvolvimento da produção e sua comercialização.

A utilização de fibras de carbono está aumentando no setor de defesa e é cada vez maior na indústria aeroespacial, chegando, em alguns casos, a mais de 50% do peso estrutural da aeronave. Atualmente, a Embraer é atendida apenas por um fornecedor internacional, mas o contrato vigente termina em 2012, abrindo a possibilidade de entrada de um novo fornecedor a partir dessa data.

A exploração e produção de óleo e gás em águas profundas (p.ex.: Pré-Sal) requer o emprego de reforços de fibra de carbono em toda a rede de dutos submarinos. A Petrobras anunciou uma demanda de 45 novas plataformas offshore até 2020, das quais 30 são em águas profundas, resultando em uma demanda estimada de mais de 8 mil toneladas de FC por ano, até 2020.

O uso de componentes estruturais de fibra de carbono em pás de geradores eólicos se torna imprescindível à medida que as pás crescem em tamanho (fibras de vidro passam a ser inviáveis devido ao maior peso). Outro grande mercado para a fibra de carbono no país é a sua utilização como material de reforço estrutural na indústria de construção civil, tanto como reforço de estruturas novas como em reformas. Adicionalmente, as fibras de carbono de qualidade industrial são também utilizadas em núcleos de cabos elétricos de alta tensão.

Por fim, FC de alto desempenho também são utilizadas como material constituinte de partes de ultracentrífugas, empregadas para o enriquecimento isotópico de urânio. Trata-se de um insumo de

alto valor agregado e de venda controlada pelos Estados produtores deste material, o que o torna estratégico para as indústrias de defesa e nuclear.

Estima-se que, em 2020, o mercado brasileiro demandará 17 mil toneladas de fibra de carbono por ano, ou seja, cerca de U\$ 1,2 bilhões/ano. Caso se desenvolva uma estrutura nacional de produção de FC, com capacidade reconhecida e com um produto qualificado no mercado, toda esta demanda interna poderá ser atendida no país. O desenvolvimento de fibra de carbono de alto desempenho produzida no Brasil reduzirá a dependência externa deste insumo estratégico.

Outro material de emprego dual e alto valor agregado é a família de aços maraging. Eles são usados na indústria aeroespacial, óleo & gás e nuclear e têm sua venda controlada pelos Estados produtores.

Há uma grande quantidade de sensores avançados que necessitam de pesquisa na área de materiais de interesse dos setores de defesa e segurança. Em particular, existem componentes de suma importância para diversos vetores e sistemas de armas (de nível elevado e capacidade de precisão e destruição) empregados pelas Forças Armadas do Brasil e do exterior. Estes componentes são partes das chamadas “plataformas inerciais”. Devido à grande capacidade militar que esta tecnologia proporciona, os componentes das plataformas inerciais têm forte controle internacional.

Para se obter autonomia de fabricação do subsistema primário de uma plataforma inercial, chamada unidade de medida inercial (IMU), para empregos táticos e estratégicos (aeronave, míssil, veículo lançador de satélite, submarino, satélite, etc.) é necessário que se tenha o domínio tecnológico dos acelerômetros e giroômetros. No mundo, a tecnologia corrente para acelerômetros usa o conceito do rebalanceamento de forças com sensor tipo junta de quartzo, ou seja, tecnologia eletromecânica. No entanto, a tendência tecnológica para acelerômetros, e que já se encontra à disposição no exterior, é micro-eletromecânica (MEMS, Micro Elettro-mechanical Systems).

O mercado de MEMS com alto desempenho inercial vem crescendo na ordem de 5% ao ano desde 2005, atingindo U\$ 1,8 bilhões em 2008. Como essas aplicações são muito variadas, os programas de desenvolvimento são muito dinâmicos, oferecendo oportunidades para um grande número de atores. O mercado de giroscópios e acelerômetros MEMS tem crescido a taxas anuais elevadas, atingindo U\$ 750 milhões em 2008. As aplicações do mercado de consumo já alcançam cerca de 40% do mercado global de MEMS inerciais. Desde 2006, os controles com sensor de movimento do Nintendo Wii deram visibilidade pública para os MEMS inerciais, que estão penetrando rapidamente o mercado de telefonia celular.



Os mercados emergentes de MEMS têm o potencial de adicionar U\$2,2 Bilhões para o mercado global de MEMS até 2015 (segundo a “Yole Développement”).

O Brasil ainda não possui nenhuma indústria com capacidade de produção de equipamentos MEMS. Um recente estudo da Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras (AIAB), no Grupo de Trabalho sobre Nanotecnologias, indicou a capacidade de se obter no país produtos iniciais MEMS até 2015, com o posterior amadurecimento de produtos finais até 2020.

O aumento do poder computacional, associado ao aprimoramento da capacidade de modelagem vem ao encontro da aplicação da simulação computacional em ciência e engenharia de materiais. Com o aumento acelerado da disponibilidade de infraestrutura computacional, em forma de hardware, principalmente com processamento paralelo, e com o aperfeiçoamento constante das metodologias computacionais na forma de softwares aplicativos para simulação, tem sido possível a caracterização de processos microscópicos que estão no cerne das propriedades macroscópicas em sistemas e materiais complexos.

A computação de alto desempenho (HPC), necessária à viabilização da simulação computacional em Ciência e Engenharia de materiais avançados, iniciou-se na década de 1970 com a introdução dos computadores vetoriais e da supercomputação. A partir de 2000, surgiu o conceito de cluster (sistema operacional classificado como sistema distribuído), mesmo para os sistemas de muito alto desempenho. Desde então, clusters de PCs e estações de trabalho tornaram-se a arquitetura prevaiente para muitas áreas de aplicação de computação de alto desempenho (HPC), em todas as faixas de desempenho.

O mercado de HPC baseado em cluster continua a crescer, com taxas na ordem de 6% ao ano. A estimativa do IDC (International Data Corporation) foi de um mercado anual da ordem de U\$ 6,3 bilhões em 2007. Apesar disso, a indústria não tem um padrão tecnológico nem uma arquitetura para guiar futuras adaptações e refinamentos. A pesquisa na área de clusters computacionais representa uma grande oportunidade para novos investimentos.

Atualmente, existe um amplo interesse renovado na comunidade científica de HPC por novas arquiteturas de hardware e novos paradigmas de programação. Ao contrário do progresso no desenvolvimento de novos hardwares, tem havido pouco progresso, ou até mesmo retrocesso, na construção de sistemas escaláveis, fáceis de programar.

Existem também poucos sistemas desenvolvidos que atendam satisfatoriamente a finalidade da simulação computacional, além das limitações impostas pelo cerceamento tecnológico aplicado pelos países desenvolvidos, que impacta também a importação de computadores com altas capacidades de processamento, equipamentos vitais para realização de experimentos por meio da simulação. Além disso, a área de simulação computacional poderá contribuir significativamente no desenvolvimento de materiais avançados em todos os segmentos, não só na área de Defesa e Segurança, pois é classicamente transversal e permeia todas as demais áreas de interesse em materiais avançados.

O avanço científico e tecnológico do Brasil é um dos suportes da consolidação do nosso país como potência emergente no cenário mundial, que, diante das crises internacionais, tem pautado o seu procedimento pela busca incansável das soluções equilibradas e pacíficas. Barreiras tecnológicas ou comerciais impostas por países centrais dificultam o crescimento brasileiro, em direção ao grande desenvolvimento científico-tecnológico, a fim de evitar progressos nacionais importantes a que venham permitir a aproximação desses países concorrentes.

Hoje, não se pode pensar em uma dependência de tecnologia externa perante os enormes desafios que se apresentam na área da Defesa Nacional. A área de materiais avançados é um desses desafios. Os materiais empregados no setor de defesa, que se estendem à segurança pública, possuem no mundo uma pequena quantidade de detentores de tecnologias específicas, os quais se apossam do mercado e criam a tão indesejável dependência tecnológica.

1.1.1. Visão sistêmica para inovação e industrialização de materiais de defesa e segurança

No setor de materiais avançados para a defesa e segurança, a característica multidisciplinar dos projetos tecnológicos militares impõe uma análise sistêmica das estratégias de inovação e industrialização, assim como dos gargalos existentes no setor, das propostas de soluções, e dos arranjos estratégicos empresariais mais adequados.

A indústria de defesa tem uma longa história de mudanças e incertezas. Além da tecnologia, o ambiente mercadológico da indústria de defesa é afetado por fatores econômicos e políticos, intrinsecamente relacionados pela globalização. As principais tendências do mercado de defesa são:

- Custos crescentes dos produtos, resultantes da P&D e dos custos unitários de produção. Os programas de desenvolvimento de novos sistemas de defesa consomem bilhões de dólares em P&D e requerem pesados investimentos em processos.



- Menores quantidades produzidas e automação. A economia de escala proporciona amortizar o custo de P&D e o aprendizado (redução dos custos de produção). A tendência é buscar contrabalançar os pedidos decrescentes pelo desenvolvimento cooperativo entre nações e forças armadas.
- Custos de transação resultando em diferentes formas de organização industrial (mix entre fazer e comprar). A indústria de defesa do futuro tende a ser uma empresa global focando na atuação como contratada principal (“prime”) / integradora de sistemas, suprindo o mercado mundial e adquirindo tarefas especializadas de fornecedores em todo o mundo. A tendência é a continuidade de fusões entre os fornecedores dos grandes grupos, criando “mini-primers” capazes de projetar, desenvolver, financiar e suprir pacotes completos dos subsistemas principais. A opção ‘fazer versus comprar’ também está refletindo em pressões de terceirização pelos militares.
- Continuidade da importância do poder de compra do governo e da sua atuação reguladora em um ambiente competitivo na indústria de defesa. Os governos têm agido como compradores competitivos, o que incentiva a indústria de defesa a aplicar tecnologia, gestão e experiência produtiva da indústria civil nos negócios de defesa. Os mercados de defesa têm se caracterizado por preços mais competitivos, resultando em riscos maiores e maior necessidade de P&D, onde a típica indústria de defesa tem se envolvido em uma gama de negócios militares e/ou civis, de forma a compensar a eventual perda de algum contrato de defesa importante.
- Restrições e desafios para as bases industriais de defesa nacionais: capacidades especializadas, competição e independência nacional. A alternativa de “offset” na importação de equipamentos e a participação em programas de P&D cooperativos são formas de financiar a manutenção do capital físico e humano, de forma a complementar a carga de trabalho e manter as capacidades especializadas da Base Industrial de Defesa nacional.

Para o sucesso do desenvolvimento tecnológico, a integração entre os setores civil e militar de P&D e o setor produtivo deve ocorrer desde a fase do estudo do estabelecimento de um requisito operacional, visando o ganho em tempo, através do “*Capability Pull*” e “*Research Push*”, capazes de acelerar o processo de aquisição e o domínio tecnológico efetivo do produto pelo setor produtivo.

1.1.2. Ações estratégicas para inovação e industrialização

No âmbito governamental, a Política de Desenvolvimento Produtivo (PDP) está lançando mão de quatro categorias de instrumentos:

- Instrumentos de incentivo: crédito, financiamento, capital de risco, incentivos fiscais e subvenção econômica;
- Poder de compra do Estado: compras da administração direta e de empresas estatais;
- Instrumentos de regulação: técnica, econômica, concorrencial;
- Apoio técnico: certificação e metrologia, promoção comercial, gestão da propriedade intelectual, capacitação empresarial e de recursos humanos, coordenação intragovernamental e articulação com o setor privado.

Dentro da PDP foram definidos Programas Mobilizadores em Áreas Estratégicas, entre eles o “Complexo Industrial de Defesa”, que tem como objetivo recuperar e incentivar o crescimento da base industrial instalada, ampliando o fornecimento para as Forças Armadas brasileiras e para exportações. A partir desses instrumentos, as ações estratégicas poderão ser mais bem estruturadas e viabilizadas, tanto por parte das Instituições Científicas e Tecnológicas (ICTs) como das indústrias envolvidas.

Os poucos projetos de desenvolvimento de novos materiais, hoje, existentes no país, estão, principalmente, nas ICTs militares e são demandados pelas necessidades das Forças Armadas. No entanto, a Segurança Pública e o mercado internacional para esse setor podem dar suporte a uma produção sustentável por parte das indústrias que tiverem condições propícias para investir. A capacidade laboratorial instalada e a massa crítica para esses desenvolvimentos ainda são restritas, mas a previsão de investimentos por intermédio da PDP aumenta a expectativa do setor, e sinaliza a possibilidade de financiamento às empresas brasileiras para industrializarem as soluções já desenvolvidas em materiais avançados, e obterem maiores recursos para P&D de novos materiais.

O maior desafio é a garantia às indústrias da continuidade das compras e das linhas de financiamento da produção, o que exige um aumento do poder de compra governamental na área. A experiência internacional de países desenvolvidos, como o Japão, os Estados Unidos e os da União Européia, evidencia que a política de compras governamentais tem sido utilizada de forma intensiva e generalizada, como instrumento de apoio e promoção à indústria local.

Um estudo recente, relativo a 50 aglomerados de inovações introduzidas em diferentes países nas últimas cinco décadas, indica que pelo menos em 50% dos casos, a política de compras dos governos teve efeito significativo. A importância dos gastos militares, do ponto de vista da política industrial, decorre, não tanto de seu peso no total das compras governamentais, mas antes, de sua natureza. Uma parcela expressiva desses gastos está associada a programas complexos e de longo prazo, que compreendem desde a contratação de pesquisa e o desenvolvimento de novos produtos até a produção efetiva e o fornecimento continuado dos produtos desenvolvidos.



No entanto, é importante ressaltar que o instrumento legal para aquisições, a Lei 8666/93, não é claro para aquisição de itens de alto conteúdo tecnológico, tais como material de emprego militar, bem como não especifica tais aquisições primordialmente na indústria nacional, devendo, portanto, ser regulamentado.

Para se fomentar a industrialização desses materiais, devem-se incentivar arranjos empresariais adequados para a estruturação do setor de defesa e segurança, por meio de:

- Apoio às empresas isoladamente, realizado por meio da Subvenção Econômica à Inovação da Finep/MCT, com recursos do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), com o incremento da parceria com instituições militares e de segurança para P&D e produção de materiais avançados de defesa e segurança;
- Apoio aos arranjos empresa-empresa, com incentivo à promoção da cooperação entre empresas por meio de diversas formas associativas e de alianças, tais como, a consolidação de arranjos produtivos por estruturas de “holdings”, de “joint-ventures”, consórcios, etc. Essas cooperações podem facilitar a conquista de financiamentos por apresentarem maior credibilidade e maior capacidade de cumprimento de metas;
- Apoio às parcerias entre empresas e ICTs, principalmente as militares, para compartilhamento da infraestrutura instalada e do conhecimento específico, aumentando a capacidade de obter novos financiamentos, demonstrando potencial diferenciado em materiais avançados.

Segundo a Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras (AIAB), para assegurar o sucesso do processo de inovação, a Indústria deve participar desde o início da definição da futura missão de uma nova tecnologia, participando nas etapas de pesquisa científica, tecnológica e de engenharia, que antecederão a concepção do projeto. Para incentivar e buscar a participação do setor empresarial na indústria nacional de defesa, deve-se:

- Adquirir primordialmente materiais e serviços de Defesa na indústria nacional, priorizando, em ordem decrescente, os seguintes processos de aquisição:
 - 1) Produto novo, com o seu desenvolvimento e a sua produção totalmente nacionais;
 - 2) Produto novo com o seu desenvolvimento e a sua produção no Brasil, por meio de parcerias internacionais e/ou através de acordos governamentais permitindo o domínio tecnológico completo do produto.
 - 3) Produto já desenvolvido, com a sua produção sob licença no país; e

- 4) Importação de produto, com a obrigação de compensações por parte do fornecedor (“offset”) que aumentem a capacidade tecnológica da indústria brasileira, para que ele possa prioritariamente, conceber, desenvolver, produzir, manter e atualizar produtos para as Forças Armadas.
- Fomentar a capacitação tecnológica nacional da indústria, visando à substituição de produtos importados de interesse da Defesa, ou prepará-la para participar em projetos tecnologicamente avançados.
 - Selecionar encomendas educativas (demonstradores de idéia) junto à indústria, com conteúdo de PD&I, visando futura aquisição de produtos definitivos.
 - Adquirir na indústria nacional, primordialmente na área de defesa, os equipamentos e insumos necessários para os centros militares e civis de P&D.
 - Estabelecer regimes específicos de garantias e de incentivos à exportação de produtos e insumos de interesse da Defesa.
 - Apoiar projetos de desenvolvimento científico-tecnológico da indústria.
 - Buscar a desoneração tributária da exportação de produtos e serviços de interesse da Defesa.
 - Buscar solução para a falta de isonomia quanto a impostos federais da indústria nacional, em relação a seus competidores internacionais, nas aquisições das Forças Armadas.
 - Buscar a desoneração tributária dos impostos estaduais que recaem sobre os produtos brasileiros adquiridos pelas Forças Armadas.
 - Estabelecer regimes específicos de financiamento e de tributação para a importação de produtos e de insumos, não controlados, que sejam considerados de interesse da Defesa.
 - Buscar a colaboração de empresas multinacionais no desenvolvimento conjunto de produtos de interesse da Defesa.
 - Priorizar a capacidade de integração de equipamentos em sistemas de interesse da Defesa e a produção sob o sistema de repartição de trabalho, como forma intermediária de absorver capacidade técnica em tecnologias chaves.

1.1.3. Gargalos em PD&I

Os novos materiais permitem o uso de recursos com maior eficiência estrutural possível e asseguram melhoria dos fatores de segurança dos componentes estruturais de sistemas militares, com uma concomitante redução no peso e consumo de energia. Há expectativa de que significativos benefícios possam ser extraídos da descoberta, produção e aplicação de materiais que tenham propriedades únicas ou que excedam às dos materiais disponíveis atualmente.



Para superar alguns gargalos que o setor de defesa e segurança enfrenta para a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação em novos materiais avançados, sugere-se:

- Para fomentar a capacidade de inovação das empresas brasileiras, deve-se incentivar a elevação do gasto privado em P&D com a ampliação dos recursos não-reembolsáveis para inovação, indispensáveis para agregar valor aos produtos nacionais, ampliar a competitividade das empresas no mercado doméstico e fortalecer a inserção externa do país;
- Para recuperar a capacidade laboratorial das ICTs, tanto militares como civis, deve-se incentivar o aumento do investimento privado e governamental em infraestrutura de P&D, proporcionando às ICTs a capacidade de gerar novas tecnologias de materiais;
- Para alavancar a capacitação de pessoal no setor, deve-se recuperar o investimento na formação e capacitação de pessoal nas áreas específicas de materiais avançados, imprescindíveis para a elevação do nível de conhecimento;
- Para mitigar o cerceamento tecnológico, que dificulta a aquisição de matérias primas e componentes para o desenvolvimento de novas tecnologias, as empresas e instituições cerceadas devem buscar negociações habilidosas com os países e fornecedores estrangeiros, com o envolvimento diplomático do Governo, bem como perseguir soluções inovadoras para superar o cerceamento, por meio de novas soluções tecnológicas brasileiras;
- Para assegurar a sustentabilidade do desenvolvimento do setor de defesa e segurança, deve-se exercer adequada e continuamente o poder de compra governamental. O Governo vem buscando soluções por meio de instrumentos legais e políticos, visando ampliar as compras governamentais de equipamentos nacionais, sobretudo no aparelhamento e modernização das Forças Armadas e Órgãos de Segurança, gerando a credibilidade dos produtos nacionais no mercado internacional e permitindo um crescimento econômico sustentável da indústria.

1.1.4. Fomentos estruturantes

A exigência de demonstração de Poder por uma nação determina o alcance do domínio tecnológico completo, desde a concepção até a operacionalidade, dos meios técnicos usados nesta afirmação política. Considerando que os produtos da área de defesa e segurança, pela evolução tecnológica exigida, não se encontram disponíveis “na prateleira”, mas são baseados em especificações e requisitos, é necessário o seu completo desenvolvimento. Em decorrência, no caso da aquisição no exterior, o contribuinte local estará pagando pela execução de um incremento tecnológico em outro país, portanto determinando perda de Poder, e mais ainda, gerando empregos altamente qualifica-

dos e abrindo mercados de exportação, fora da sua nação. Estes aspectos evidenciam as razões pelas quais as nações com pretensões de predomínio econômico e político aplicam políticas protecionistas e de incentivos ao seu setor industrial de Defesa.

De acordo com os critérios de aplicação dual e estágio de desenvolvimento no País e no mundo, materiais de emprego na indústria nuclear como a fibra de carbono, as ligas de zircônio e de urânio, se apresentam como estratégicos. A Estratégia Nacional de Defesa estabelece a necessidade da propulsão naval como elemento de dissuasão. O Programa Nuclear Brasileiro, ainda não aprovado, mas em discussão avançada no âmbito da Secretaria de Assuntos Estratégicos, enfatiza o domínio do Ciclo do Combustível Nuclear como ferramenta de independência tecnológica e agregação de valor aos recursos minerais brasileiros.

1.2. Materiais para blindagem balística

O Exército Brasileiro (EB) tem em andamento um grande programa mobilizador, que visa o desenvolvimento da família Guarani de novos blindados, sucessores dos antigos veículos Cascável e Urutu da Engesa. Estima-se que serão produzidos cerca de 2.044 unidades, com um investimento da ordem de R\$ 5,4 bilhões. O primeiro produto do programa será uma viatura blindada para transporte de tropa (VBTP).

O referencial de proteção de viaturas blindadas para transporte de tropa exige que os sistemas de blindagens forneçam proteção contra munições perfurantes de armas leves e médias. Mais recentemente, esta categoria de viatura tem enfrentado outras ameaças, tais como as granadas anticarro e os dispositivos explosivos improvisados (Improvised Explosive Device - IEDs).

A blindagem balística é usualmente implementada em camadas, onde cada camada é responsável por um tipo de proteção e tem uma determinada função em um sistema de proteção. No caso das VBTP, a camada básica é de aço. Para as camadas de blindagens adicionais, além do uso de aços de alta dureza como face de impacto, também tem sido utilizado um material ainda mais duro, porém com menor valor de densidade: os cerâmicos. Este tipo de material passou a ser empregado como camada externa da blindagem de carros leves ou integrado aos sistemas de blindagem dos carros de combate pesados.

Além das aplicações militares, aços balísticos e materiais cerâmicos também são necessários para proteção de aeronaves e veículos de segurança pública e para a blindagem em aplicações civis, incluindo matéria-prima para caixas de bancos, carros fortes, condomínios e carros de passeio.



1.2.1. Agenda de ações estratégicas para a sociedade e economia do país

Apesar do ciclo tecnológico da alumina para fins balísticos já ter sido dominado por empresas estrangeiras atuando no Brasil, é necessário que se desenvolva uma empresa nacional capaz de dominar o ciclo dos carbetos, pois estes materiais são controlados pelas potências estrangeiras, seja por regimes de controle ligados à área nuclear, no caso do carbetos de boro, ou pelo MTCR (Missile Technology Control Regime), como os aços para blindagens, tecidos balísticos e carbetos de silício.

O carbetos de silício está presente na indústria petrolífera na forma de selos cerâmicos para bombas de alto desempenho. O carbetos de boro é empregado como moderador de nêutrons em reatores nucleares de uso civil e militar. Isso ilustra bem a natureza dual do uso dos carbetos, pois militarmente o carbetos de silício é o cerâmico de escolha contra munições com núcleo de carbetos de tungstênio ou urânio empobrecido (ou exaurido). Já o carbetos de boro é largamente empregado em coletes e blindagens de aeronaves. Grandes dificuldades vêm sendo encontradas pelos empreendedores que desejam fabricar carbetos no Brasil.

Além disso, ainda não há empresas brasileiras fabricando materiais absorvedores de ondas causadas por impactos ou explosões que possam ser empregados em blindagens. Materiais com estrutura alveolar que no instante do impacto colapsam são boas opções. Além disso, propriedades como a impedância acústica e a plasticidade são bem-vindas e necessárias. Cabe ressaltar que os principais usuários desses materiais seriam os automóveis, pois estes materiais aumentariam a segurança veicular em caso de colisão.

No caso do desenvolvimento de fibras nacionais para emprego em tecidos de proteção balística, recentemente a maior fabricante mundial de resina de polietileno, que é nacional, teve o financiamento para o desenvolvimento de um “não-tecido” de uso para proteção balística negado. Esse é um exemplo de bloqueio ao empreendedorismo, pois como o risco tecnológico é elevado, não se investe. Todo o tecido e não-tecido balístico utilizado no Brasil é importado. Há uma premente necessidade de desenvolvimento local desses materiais para fins de defesa e segurança pública. Os principais materiais, como a aramida e o polietileno de ultra-alto módulo de elasticidade, já têm suas patentes de produção vencidas e podem ser copiados localmente. É consenso que há mercado consumidor e até de reciclagem dessas tecnologias.

Os requisitos do projeto em andamento no EB da nova família de blindados sobre rodas exigem blindagens adicionais que possuam em sua estrutura materiais cerâmicos, amortecedores de ondas e tecidos para retenção de estilhaços.

Atualmente, na indústria de defesa brasileira, não há um segmento industrial dedicado aos materiais de blindagem balística e à industrialização de sistemas de blindagem adicional para veículos e de sistemas de proteção individual para o combatente a pé. Dessa forma, além de projetos de pesquisa para obtenção de materiais avançados para blindagem balística, faz-se necessária a consolidação de um arranjo industrial para integração dos diferentes materiais e meios de produção existentes em produtos de defesa, definidos pelos requisitos operacionais e técnicos das áreas de defesa e segurança.

Nos últimos anos, o Centro Tecnológico do Exército (CTEx) quantificou o investimento necessário para a implantação de uma célula mínima de produção de materiais avançados para blindagens, no tocante às necessidades de material, equipamentos, infraestrutura e pessoal especializado. Estas estimativas foram baseadas em informações obtidas junto às empresas participantes do projeto “Materiais Resistentes ao Impacto Balístico (MARIMBA)”, primeira iniciativa coordenada pelo Ministério da Defesa na área de materiais para blindagens.

O projeto para industrializar o carbeto de silício (SiC) em placas de blindagem adicional, na forma de tecidos balísticos de apoio, incluindo a aquisição de um lote-piloto, foi estimado em 50 milhões de reais. A demanda inicial para a nova família de blindados do EB é de 400 kits de blindagem adicional (cerca de 20% da frota). O custo de aquisição de um aço balístico compatível está embutido na estimativa. Como este kit custa cerca de U\$ 53.500,00 (FOB) no mercado internacional, caso a opção seja pela importação, serão gastos entre R\$ 40 e 60 milhões na compra deste material, sem nenhum ganho tecnológico para a indústria nacional.

De uma forma geral, propõe-se industrializar as soluções nacionais já desenvolvidas em materiais para blindagem balística, a nível de protótipo pelos órgãos de pesquisa nacionais, especialmente a aramida, os carbetos de silício e boro, e o polietileno de ultra-alta massa molar, bem como fomentar o desenvolvimento de novas soluções

1.2.2. Agenda de PD&I

Selecionar materiais para blindagens é uma atividade contínua, pois, envolve novas solicitações a cada nova tecnologia relacionada que surge. Como já mencionado acima, os aços são os materiais mais utilizados tradicionalmente para blindagem balística. No entanto, existe uma forte tendência para o uso dos materiais de natureza cerâmica, combinados ou não com fibras reforçadoras, tais como:

- Alumina (Al_2O_3) - inicialmente empregada para coletes, mas que possui a desvantagem do peso, e conseqüentemente da perda da mobilidade;



- Carbetos de boro (B_4C) - com menor peso e maior eficiência balística (este material também é empregado como absorvedor de nêutrons em reatores nucleares). Entretanto, sua eficiência cai para elevadas pressões de impacto, podendo estilhaçar;
- Carbetos de silício (Si/SiC) - também com menor peso e com melhores condições de ser aplicado em veículos;
- Cerâmicos à base de fibras sintéticas - fibras de vidro, tecidos, aramida e polietileno de ultra-alta massa molar, com vantagens de serem mais leves, mas com limitações contra munições com alto poder de penetração.

A eficiência da blindagem depende da melhor adequação desses materiais e de sua utilização de forma mista. Apesar das vantagens dos materiais cerâmicos, uma limitação de seu uso é a necessidade de trocas constantes das placas cerâmicas, as quais possuem capacidade limitada de resistência a múltiplos impactos.

Apenas como ilustração, a aramida, que é um poliamida (Nylon) desenvolvido pela DuPont, é um dos materiais utilizados na proteção balística. Ela é processada na forma de tecido e mantas e aplicados em anteparos (blindagem) de veículos/aeronaves e na confecção de EPI (Equipamento de Proteção Individual), como coletes. A demanda de aramida para uso em material para blindagem balística de veículos e aeronaves é estimada em mais de 600 toneladas/ano. Segundo a Associação Brasileira de Blindagem (Abrablin), em 2008, foram vendidos cerca de 6.900 veículos blindados, com um crescimento projetado de 5% ao ano. O mercado do fio de aramida é atendido totalmente via importação.

O polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) é produzido por outros três fabricantes no mundo, sendo um brasileiro. É utilizado para material de proteção balística, sendo processado na forma de tecido e mantas, aplicados na confecção de EPI, como coletes a prova de bala. A demanda mundial do tecido balístico derivado deste polímero é de aproximadamente quatro mil toneladas/ano, e atualmente é atendida pelos outros dois fabricantes: DSM e Honeywell. No Brasil, atualmente são vendidos cerca de 200.000 coletes/ano.

Finalmente, sem um bom adesivo não é possível um painel de blindagem eficaz. A tecnologia de união inicialmente empregada era baseada em resinas de poliuretano curadas com umidade. Atualmente, painéis são processados por transferência de resina em molde com auxílio de vácuo (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding – VARTM) e curados com luz ultravioleta, produzindo sistemas com elevado grau de proteção e reprodutibilidade, além de rápida produção industrial. Uma parceria do CTEC com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ demonstrou a viabilidade do processo e a capacidade de resistência balística dos painéis obti-

dos. Ainda é necessário desenvolver fornecedores de resinas locais para suprir uma linha de produção que atendesse às necessidades do Ministério da Defesa.

Algumas empresas siderúrgicas nacionais estão desenvolvendo aços balísticos genuinamente brasileiros, com o objetivo de atender às necessidades do Exército brasileiro, aumentando as oportunidades no mercado de defesa.

1.2.3. Fomentos estruturantes

Neste segmento, outra deficiência notada é a ausência de um laboratório nacional especializado em medições de propriedades mecânicas em altas taxas de deformação e grandes deformações causadas por explosões. O modelamento computacional depende de informações obtidas em equipamentos como barras Hopkinson, canhões a gás leve ou dispositivos de impacto planar. Não é suficiente possuir códigos computacionais, sem os modelos dos materiais produzidos localmente. Bancos de dados de materiais produzidos no exterior não suprem esta deficiência, pois, usualmente, os materiais apresentam características diversas quando submetidos às altas taxas de deformação e carregamento. No CTEx, existe a única barra Hopkinson em operação no Brasil dedicada a materiais para blindagens, que necessita de aprimoramentos.

Ainda na área de laboratórios, o Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA) atua na área de processamento de superfícies a laser e a plasma, o que pode conferir características únicas ao produto, dependendo do material componente. Entre as características alteradas, pode-se citar aumento de dureza superficial pela difusão de dopantes assistida por laser e deposição de filmes finos assistida por plasma. Além deste, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) contribui em PD&I de materiais cerâmicos e metálicos para blindagem balística.

Por último, na fase de produção industrial é importante que exista um adequado modelo de gestão, que integre os diferentes materiais em painéis, visando obter a resistência balística necessária, com a reprodutibilidade e o nível de confiança desejados. Esse modelo de gestão deve permitir o gerenciamento da cadeia, interagindo com os fabricantes das viaturas ou das aeronaves, desde a primeira etapa do projeto. Esse modelo de gestão também deve estabelecer a responsabilidade por submeter tanto o protótipo quanto o lote-piloto à avaliação do Centro de Avaliações do Exército – CAEx, a fim de serem homologados para aquisição.



1.3. Materiais para blindagem eletromagnética

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (Mare) apresentam a característica de poderem ser devidamente ajustados durante o seu processamento, de modo a atenderem requisitos de diferentes valores de massa específica e, principalmente, de atenuação da radiação eletromagnética em diferentes faixas de frequências (2 a 18 GHz).

Os Mare, utilizados na defesa e segurança, como revestimento de superfícies externas e internas de veículos aéreos, terrestres e meios navais militares, visam não ser detectados pelos radares, por meio da redução da refletividade da energia da onda eletromagnética incidente. Alguns materiais avançados são utilizados na construção de estruturas absorvedoras de radar como radomes, casamatas, etc.

Essencialmente, existem três técnicas de construção de absorvedores de radiação eletromagnética, baseadas em: cancelamento de fases da onda eletromagnética incidente, espalhamento da onda eletromagnética incidente em direções diferentes da antena receptora, e utilização de materiais com perdas magnéticas e dielétricas intrínsecas dentro da faixa de frequências de interesse.

1.3.1. Agenda de ações estratégicas para a sociedade e economia do país

O Brasil não produz os materiais Mare em escala industrial. O mercado potencial, só no caso de celulares no Brasil, pode ser quantificado pelo número de cerca de 30 milhões de aparelhos vendidos em 2008.

De uma forma geral, propõe-se industrializar as soluções nacionais já desenvolvidas em materiais para blindagem eletromagnética, em nível de protótipo pelos órgãos de pesquisa nacionais, de forma a gerar inovações e atender a demandas civis e militares reprimidas.

1.3.2. Agenda de PD&I

O uso da radiação eletromagnética na faixa de microondas vem se tornando frequente ultimamente, com suas principais aplicações na área de telecomunicações, em decorrência dos avanços tecnológicos nos setores de telefonia celular, antenas de transmissão e recepção e sistemas de comunicação, de defesa e de segurança empregados em aeronaves, navios e viaturas tanto civis como militares. Com vistas a eliminar ou atenuar níveis de radiação eletromagnética, as atividades de P&D para a área de defesa e segurança vem se expandindo na busca de novos materiais que possuam ca-

racterísticas de absorver a radiação incidente, proporcionando avanços tecnológicos, significativos, às áreas de eletroeletrônica, nuclear, espacial, aeronáutica e naval.

Os materiais para blindagens eletromagnéticas podem ser absorvedores ou refletores (para ondas planas, campo próximo, campo magnético), em reflexões em uma camada ou em múltiplas camadas finas. Os materiais mais utilizados estão na forma de folha, espuma ou gás ionizado (plasma). No caso de aparelhos emissores, como celulares, usa-se uma tinta carreadora de partículas de níquel e cobre. Outros materiais, mais nobres, são as ligas de permalloy (70-90% Ni + Fe) e mu-metal (75% Ni + Fe, Cu e Mo).

A procura por novos materiais que possuam propriedades magnéticas e dielétricas adequadas ao uso em absorvedores de radiação eletromagnética é de grande importância. Entre os materiais em estudo, os polímeros condutores têm sido aplicados como centros de absorção de radiação, devido à possibilidade de variação da sua condutividade com a frequência da radiação das ondas incidentes, sendo esta pesquisa o estado da arte no processamento de materiais MARE.

Os compósitos poliméricos têm atraído a atenção de inúmeros grupos de pesquisa, tanto pela importância científica em se entender os novos fenômenos desses materiais mistos, como pelo potencial em aplicações tecnológicas.

O material têxtil como reforço ou servindo como substrato utilizado na formação de compósitos, como por exemplo, fibra de vidro, carbono, aramida e etc, há algum tempo já é conhecido na literatura. Sendo conhecidos os métodos de preparação e das propriedades de polímeros condutores passa a ser interessante a preparação de compósitos para serem utilizados como absorvedores de radiação, onde um dos componentes seja um polímero condutor, adicionado a uma matriz de polímero convencional de uso geral.

Os tecidos de fibra de vidro por serem produzidos em larga escala mundial e pela sua larga utilização devido às suas excelentes propriedades, como por exemplo: bom isolante acústico e térmico, não inflamável, alta resistência à corrosão, baixa massa específica e boas propriedades dielétricas indicam uma aplicação efetiva na fabricação de materiais compósitos como os polímeros, possuindo ótima adesão entre as superfícies heterogêneas que estão em relativo contato.



1.3.3. Fomentos estruturantes

Apesar de não haver indústria hoje no Brasil, o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) coopera com o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), ambos do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), e atua, em nível de pós-graduação e de iniciação científica, na área de blindagem eletromagnética, no estudo de materiais compósitos estruturais poliméricos e revestimentos de alta absorção de radiação eletromagnética.

1.4. Materiais metálicos com aplicações em defesa e segurança

Os materiais metálicos que, por sua funcionalidade, mais se prestam ao uso em defesa são os aços e ligas ferrosas, entre os quais se destacam os aços inoxidáveis, os aços especiais de ultra-alta resistência, os aços para temperaturas elevadas, os aços para ferramentas, os aços com elevada plasticidade e os aços maraging. Entre as chamadas ligas leves, tem relevância as ligas de alumínio, titânio, magnésio e berílio. Destaque especial é dado às superligas à base de níquel, cobalto e ferro, todas destinadas a aplicações em altas temperaturas, tal como as encontradas nas turbinas de motores aeroespaciais.

1.4.1. Agenda de ações estratégicas para a sociedade e economia do país

Entre as diversas iniciativas possíveis no segmento de materiais metálicos de defesa e segurança, uma das principais ações estratégicas recomendadas é recuperar a capacidade anteriormente dominada no país na obtenção de ligas de titânio. Além desta, recomenda-se industrializar diversos materiais metálicos desenvolvidos por institutos de P&D, bem como novos processos metalúrgicos utilizados na produção da indústria de defesa.

O titânio (Ti) é o nono elemento mais abundante da Terra. Existem poucos materiais que possuem as características do metal de Titânio. Em aplicações onde são requeridas grandes forças o titânio compete com o alumínio, aço e superligas. Para aplicações que requerem resistência a corrosão; alumínio, níquel, aço especial e ligas de zircônio podem ser substitutos por titânio. O dióxido de titânio compete com carbonato de cálcio, precipitados de carbonato de cálcio, caulim e talco, como pigmento branco. Nos EUA aproximadamente 94% dos concentrados provenientes do minério de titânio é destinado à produção de pigmentos de dióxidos de titânio, os 6% restantes são usados em

revestimentos de soldas de hastes e para manufatura de carvão, químicos e metal. Os minérios que apresentam interesse econômico são: Ilmenita, leucóxeno, rutilo, Anastásio, slang e rutilo sintético.

A produção mundial dos concentrados de Titânio vem aumentando ano a ano. O aumento do consumo e da produção de pigmentos de dióxido de Titânio na China tem estimulado o desenvolvimento de projetos minerais de Titânio em diversos países. A China detém as maiores reservas mundiais de Titânio (25%) e o Brasil possui 6% dessas reservas. Os maiores produtores mundiais de Titânio são: Austrália (24%), África do Sul (19%), Canadá (15%) e China (9%).

Apenas para se ter uma idéia do tamanho deste mercado no país, em 2007, a produção interna beneficiada no Brasil totalizou aproximadamente 96 mil toneladas (cerca de 2,3% da produção mundial). O valor total das importações brasileiras (FOB) de 2007 foi de US\$ 296 milhões, em sua maior parte compostos químicos (68,6%), seguidos por manufaturados (28,4%), semimanufaturados (2,1%) e bens primários (1%). Os maiores fornecedores de composto-químico de Titânio para o Brasil foram: EUA (38%), México (20%), China (10%), Ucrânia (7%) e Alemanha (5%). Nos manufaturados de Titânio, os principais fornecedores foram África do Sul e Noruega, correspondendo a 80% e 16% respectivamente do total importado.

Naquele ano de 2007, as exportações brasileiras de Titânio totalizaram 27 mil toneladas, correspondendo a US\$ 43 milhões. A maior parte do valor total das exportações brasileiras de Titânio refere-se a compostos químicos (59,4%), seguido por semimanufaturados (23%), manufaturados (15,8%) e bens primários (1,8%). Os maiores consumidores de compostos químicos exportados pelo Brasil foram: Argentina (41%), EUA (15%), Reino Unido (12%), Chile (5%) e Uruguai (5%). Nos manufaturados o país que mais importou foi os EUA (65%), seguido por Colômbia (13%) e Reino Unido (11%). Os semimanufaturados de titânio possuíam uma demanda menos concentrada do que as demais formas, sendo a Holanda (36%), Japão (30%) e EUA (14%) os maiores importadores. A demanda mais concentrada entre as exportações de Titânio foi a de bens primários, importados exclusivamente pela França em 2007.

Assim, em 2007, o maior consumo do titânio no Brasil foi destinado a fabricação de tintas, esmaltes e vernizes (51,1%), seguido pela siderurgia (35,9%), ferros-liga (11,2%), produção de soldas e anodos para a galvanoplastia (1,2%) e por último pisos e revestimentos (0,5%).

O processo de obtenção de titânio metálico atualmente em uso é denominado Kroll. O antigo Centro Técnico Aeroespacial, atual Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), desenvolveu o processo no Brasil e o vendeu para uma grande empresa brasileira, que por razões de mer-



cado não o implantou industrialmente. Portanto, já houve conhecimento desenvolvido localmente, o qual poderia ser mais facilmente recuperado.

As características combinadas de baixa densidade e grande resistência à corrosão fazem do titânio o material ideal para muitas aplicações. No entanto, seu custo relativamente alto de mineração e fabricação tem reduzido sua aplicação a setores especializados, como o aeroespacial. Pesquisas recentes visando à redução desses custos resultaram no desenvolvimento de mais de 20 novos processos potenciais para a produção de titânio metálico.

O titânio metálico é utilizado amplamente tanto em sua forma comercialmente pura (CP) como em uma série de ligas que otimizam diversas propriedades requeridas para cada uso pretendido. Facilmente soldável e deformável, o titânio CP geralmente tem menor resistência à tração e à compressão que as ligas. Tipicamente, cerca de 30% do titânio é produzido na forma CP, a maior parte na forma em pó.

Assim como a expansão do alumínio na década de 1930 foi impulsionada por sua utilização em utilidades domésticas, algumas análises vêm sendo realizadas para identificar novas aplicações potenciais para o titânio CP, bem como novos processos que poderiam reduzir os custos de produção. Produtos de consumo similares ainda não foram identificados para o uso de titânio, apesar de algumas tentativas (p.ex., tacos de golfe).

Por outro lado, avaliam-se quais componentes de veículos pesados seriam candidatos para a substituição dos seus materiais atuais por titânio, caso o custo desses componentes em Ti sejam significativamente reduzidos em relação aos patamares atuais. Pelas mesmas razões que o titânio pode ser interessante para veículos pesados (redução de emissões, do peso e do consumo de combustível, além de suas propriedades únicas de baixa densidade e desempenho em altas temperaturas em comparação ao aço e às superligas), o mercado também avalia seu emprego na indústria automobilística em veículos leves, caso seu custo de produção seja reduzido significativamente. Essas pesquisas podem vir a aumentar significativamente o mercado do titânio.

Finalmente, como evidenciado neste estudo do CGEE, o titânio tem ainda diversas outras aplicações estratégicas nos setores de Atividades Espaciais e Saúde Médico-Odontológica, as quais corroboram a escolha da ação estratégica relacionada ao metal.

De uma forma geral, propõe-se industrializar diversos materiais metálicos desenvolvidos por institutos de P&D, inclusive ligas de aço balístico para atender às necessidades de blindagem balística men-

cionadas anteriormente, e recuperar a capacidade anteriormente dominada de produção de ligas de Titânio no país na área de defesa. Industrializar, ainda, novos processos metalúrgicos e novos processos de junção e soldagem de componentes estruturais, que possam ser utilizados na produção da indústria de defesa, caso julgados viáveis dos pontos de vista tecnológicos e comerciais.

1.4.2. Agenda de PD&I

As pesquisas nesse segmento estão em contínua evolução e o desenvolvimento de novos materiais metálicos está presente, principalmente, para aplicações estratégicas nos países mais evoluídos. No Brasil, alguns investimentos são realizados mesmo em materiais já desenvolvidos no exterior. A defasagem tecnológica entre os países pode justificar o investimento no Brasil em materiais considerados desenvolvidos no exterior, no sentido de conquistar competências inexistentes ou recuperar capacidades já obtidas, mas jamais industrializadas. Além disso, há ainda um grande potencial de desenvolvimento desses materiais, o que justifica investimentos em P&D nos aços em geral e, em particular, nos aços especiais e avançados.

O atual estágio de conhecimento mundial permite inclusive modelagens computacionais que, em função do desempenho esperado para a liga, estipulam a composição química e os processamentos mais adequados para se obter a estrutura e as propriedades desejadas. No entanto, no Brasil, as informações e as competências ainda se encontram dispersas, faltando investimentos para se atingir esse estágio.

Outro fator interessante é a possibilidade de se associar a boa qualidade estrutural dos aços aos processos de tratamento de superfície disponíveis, melhorando suas propriedades específicas com diversos fins, tais como: proteção contra a corrosão, aumento da dureza e da vida em fadiga, redução do desgaste, entre outros.

Os aços permitem obter uma vasta gama de propriedades devido à combinação das fases em sua estrutura, o que permite ajustar a fração volumétrica e a morfologia das fases às propriedades desejadas. Nesta linha de desenvolvimento, torna-se interessante o estudo e aplicações dos aços bifásicos, multifásicos e de fases complexas. Pode-se ainda associar as propriedades das fases presentes com o mecanismo de precipitação. A produção desses aços está associada à utilização de tratamentos térmicos e termomecânicos, o que possibilita sua aplicação à grande maioria dos aços existentes no mercado. A indústria automobilística tem utilizado bastante o processo de transformação de fases nos aços e, assim, espera-se que o mesmo venha a ocorrer no setor de defesa e segurança.



1.4.3. Fomentos estruturantes

Entre as instituições atuantes em materiais metálicos para o setor de defesa e segurança, que necessitam de fomento, destacam-se, entre outras:

- A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), que atua no desenvolvimento de novos aços ou ligas metálicas não ferrosas, desde o projeto da liga até processamento termomecânico e a caracterização de suas propriedades e microestrutura.
- O Instituto de Estudos Avançados (IEAv), que atua na área de processamento de superfícies metálicas a laser e a plasma, o que pode conferir características únicas ao produto, dependendo do material componente. Entre as características alteradas, pode-se citar aumento de dureza superficial pela difusão de dopantes assistida por laser, ablação de materiais e produção de nanopartículas assistida por laser e deposição de filmes finos assistida por plasma.
- O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que contribui em P&D&I em materiais metálicos, tais como aços maraging (já desenvolvido com a USP/Ipen/CTM), materiais sinterizados (balísticos), componentes em Ti, etc. É necessário, ainda, aprofundar o desenvolvimento dos aços maraging para permitir a fabricação de ligas com melhor desempenho, em especial os aços maraging 350 e 400.
- O Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que desenvolve pesquisa cooperativa com a UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) para o desenvolvimento de materiais avançados, mais especificamente, Ligas com efeito de Memória de Forma (LMF) e compósitos ativos. Estes materiais especiais se caracterizam por uma notável sensibilidade a temperatura e carregamento mecânico que potencializa aplicações em diversas áreas que tradicionalmente demandam novas tecnologias, como os setores aeronáutico e aeroespacial, de petróleo e gás, energia elétrica, médico-odontológico e outros. Desenvolve, também, estudos sobre processos de produção de fios da liga NiTi com Efeito de Memória de Forma (EMF) para aplicações aeroespaciais, mais especificamente eletrodos para fabricação de pontes elétricas para aplicação em dispositivo eletropirotécnico utilizados em Motores-Foguetes a Propelente Sólido. Desenvolve, ainda, em atividade relacionada, pesquisas sobre propriedades físicas de ligas semicondutoras e ligas de semicondutores magnéticos.

1.5. Materiais compósitos com aplicações em defesa e segurança

Material compósito pode ser definido como a combinação de dois ou mais materiais diferentes com distintas propriedades. Juntos formam um novo material que possui as boas qualidades dos materiais combinados e/ou tem suas fraquezas minimizadas. As vantagens apresentadas pelos compósitos são várias, entre elas: a resistência a temperaturas extremas, corrosão e desgaste, especialmente em aplicações industriais. Estas características podem conduzir a custos mais baixos e aumento do ciclo de vida destes produtos.

Materiais compósitos possuem muitas características que os diferenciam dos materiais convencionais (homogêneos e isotrópicos – mesmas propriedades em todas as direções em qualquer ponto). Diferentemente, materiais compósitos são heterogêneos e anisotrópicos ou ortotrópicos, ou seja, apresentam diferentes propriedades em diferentes pontos.

Existem muitos tipos de compósitos, que variam conforme o tipo de materiais dos quais são combinados, como plásticos, metais ou cerâmica. Há um tipo especial, cujos estudos e usos tem se expandido significativamente. São os compósitos poliméricos, nos quais os reforços são unidos por uma matriz polimérica. Como exemplos têm-se a fibra de vidro (baixo custo e peso, e alta resistência) e as fibras de carbono, estas conhecidas como compósitos avançados, devido a apresentarem resistência à fadiga bem maior que o aço e o alumínio, maior amortecimento à vibração e coeficiente de dilatação térmica negativo. As fibras de carbono (FC) são empregadas em diversos produtos, desde disco de freios de veículos até tubeiras de foguetes.

1.5.1. Agenda de ações estratégicas para a sociedade e economia do país

Fibras de Carbono (FC) são materiais de alta resistência mecânica e rigidez que, combinados a uma matriz, normalmente resina epóxi, formam um material compósito avançado. É a combinação de alta resistência e rigidez, conjugada a uma baixa densidade e boa resistência à corrosão, que faz com que os compósitos de fibra de carbono sejam tão atraentes no mercado internacional. As fibras carbônicas produzem filamentos de alta resistência mecânica usados para os mais diversos fins, destacando-se as aplicações nos setores têxteis, automotivos, esportivos, aeroespaciais e de defesa.

Os compósitos reforçados de fibra de carbono possuem uma resistência maior que a do aço, por exemplo, mas são significativamente mais leves, o que explica sua importância tecnológica e econômica e os faz serem utilizados em substituição a peças metálicas em empreendimentos diversos,



que vão da produção aeroespacial a itens esportivos, como raquetes de tênis. O processo de obtenção das fibras de carbono envolve uma tecnologia complexa, considerada um fator chave de sucesso da produção e um segredo comercial dos mais bem guardados pelas empresas que a detêm.

Historicamente, o mercado de fibra de carbono tem passado por ciclos de alta e baixa, tornando difícil para os produtores de fibra prever adequadamente sua necessidade em termos de capacidade. As projeções de crescimento do mercado mundial de fibra de carbono estimam um crescimento anual da ordem de 15%, fomentando investimentos consideráveis dos principais produtores no aumento de sua capacidade instalada para fazer face a essa crescente demanda. Os principais consumidores de fibra de carbono no mundo são América do Norte (35%), Japão (15%) e Europa (30%), mas países como China, Taiwan, Índia, Bangladesh e Vietnã estão apresentando demandas em franca expansão.

Trata-se de um mercado restritivo, altamente complexo do ponto de vista tecnológico e protagonizado por sete grandes produtores, com um predomínio de empresas de origem japonesa, que controlam setenta por cento do mercado. Produtores antigos retiraram-se do mercado ou tiveram suas divisões de fibra de carbono absorvidas por grupos maiores. Altos custos de capital e prazos de retorno do investimento muito longos são tradicionalmente apontados como barreiras à entrada de novos atores nesse mercado. Estes sete maiores produtores mundiais tiveram investimentos anunciados em 2007 de mais de U\$ 1,4 bi em expansão ou atualização de suas plantas industriais concentradas na América do Norte, Europa e Ásia.

O Brasil não é um produtor, em escala comercial, de fibra de carbono de alto desempenho. Possui apenas plantas do tipo piloto para pesquisa. A crescente demanda interna pode incentivar os investimentos necessários para o desenvolvimento da produção e sua comercialização.

Além dos setores de defesa e segurança e de atividades espaciais, contratos significativos de fornecimento de fibra de carbono tem ocorrido para a aviação, para o setor de energia alternativa, principalmente eólica, e para a exploração de petróleo em águas profundas. Esses novos contratos vêm incentivando o mercado mundial de fibra de carbono. Esse novo cenário também levou a um aumento do preço de mercado da fibra de carbono, já que a indústria estava despreparada para um aumento tão grande de demanda.

A utilização de fibras de carbono é cada vez maior na indústria aeroespacial, chegando em alguns casos a mais de 50% do peso estrutural da aeronave. Embora a demanda desse setor não seja a maior em volume, esta tem uma significativa participação em valores monetários. O emprego de compó-

sitos de fibra de carbono é altamente estratégico, pois permite a produção de aeronaves cada vez mais leves, ágeis, com menor consumo de combustível e com maior capacidade de carga. Em menos de 40 anos, o uso de fibras de carbono em aeronaves militares passou de 2% para 40% do peso estrutural das aeronaves, e em aeronaves comerciais, foi ainda mais expressivo, tendo passado de 2% para 50% do peso estrutural das aeronaves.

Atualmente, a Embraer é atendida por um fornecedor estrangeiro, cujo contrato vigente termina em 2012, abrindo a possibilidade de entrada no mercado a partir dessa data. O Programa Embraer KC-390 (novo avião cargueiro militar), que terá demanda de FCs a partir de 2012, elevará significativamente o consumo, considerando-se que cerca de 50% do peso do avião será em FC.

A exploração e produção de óleo e gás em águas profundas (p.ex.: Pré-Sal) requer o emprego de reforços de fibra de carbono em toda a rede de dutos submarinos, pois o peso das estruturas submarinas inviabiliza o emprego de estruturas puramente metálicas. Soluções em Fibra de Carbono já se encontram em uso em águas profundas no mundo todo, especialmente no Golfo do México. Vários componentes totalmente metálicos estão sendo progressivamente substituídos por reforços de fibra de carbono, bem mais leves e resistentes.

Nas plataformas *offshore*, a FC pode ser utilizada em tubos, dutos, *risers*, cabos umbilicais e elementos de plataforma, como pisos, separadores de água/óleo e tanques. A Petrobras anunciou uma demanda de 45 novas plataformas *offshore* até 2020, das quais 30 são em águas profundas. Para esta finalidade, a demanda estimada é de aproximadamente duas mil toneladas de FC por plataforma, e a meta governamental é construir uma nova plataforma de gás por ano a partir de 2010. O transporte de gás natural dos campos marítimos à costa será complementado pelo uso de navios operando com tanques de gás natural comprimido (GNC): os navios gaseiros. Existe a necessidade estimada de três navios gaseiros por plataforma, consumindo mais 900 ton de FC cada navio. Estima-se uma demanda de mais de 8 mil toneladas por ano até 2020.

Com a necessidade de capilarizar o gás natural no território nacional, a alternativa ao uso de gasodutos é o gasoduto virtual, onde o GNC será transportado em cilindros de fibra de carbono em caminhões. Estima-se a conversão de 3 mil cilindros para gasodutos virtuais (300 caminhões) por ano, sendo 90 Kg de FC por cilindro, ou seja, até 270 toneladas de fibras de carbono por ano.

O Brasil tem programas governamentais para o desenvolvimento de energias alternativas. Neste sentido, aproveitando o potencial eólico do país e buscando diversificar a matriz energética brasileira, muitas usinas de geração de energia eólica vêm sendo implantadas. Como identificado no



estudo do CGEE de Materiais Avançados para Energia, o uso de componentes estruturais de fibra de carbono em pás de geradores eólicos se torna imprescindível a medida que as pás crescem em tamanho (fibras de vidro passam a ser inviáveis devido ao maior peso). Considerando apenas os futuros leilões de energia para geração eólica, estima-se uma demanda de uma tonelada de FC por MW de geração. O governo brasileiro tem como meta atingir 10% da geração elétrica nacional proveniente de fontes eólicas até 2020.

Outro grande mercado para a fibra de carbono no país é a sua utilização como material de reforço estrutural na indústria de construção civil, tanto como reforço de estruturas novas como em reformas. Finalmente, as fibras de carbono de qualidade industrial são também utilizadas em núcleos de cabos elétricos de alta tensão.

Ao todo, estima-se que, até 2020, o mercado brasileiro demandará 17 mil toneladas de fibra de carbono por ano, ou seja, cerca de U\$ 1,2 bilhões/ano. Caso se desenvolva uma estrutura nacional de produção de FC, com capacidade reconhecida e com um produto qualificado no mercado, toda esta demanda interna poderia ser atendida no país. O desenvolvimento de fibra de carbono de alto desempenho produzida no Brasil reduzirá a dependência externa desse insumo estratégico.

De uma forma geral, propõe-se industrializar diversos materiais compósitos desenvolvidos por institutos de P&D, especificamente as fibras de carbono, e fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação e processamento de materiais compósitos poliméricos e carbonosos.

1.5.2. Agenda de PD&I

Os estudos e a pesquisa sobre o processamento de materiais poliméricos geram várias aplicações estratégicas nos setores industrial e militar (*spin-offs*). Os materiais poliméricos têm usos convencionais, desde produtos de uso doméstico até aplicações com rígidos requisitos operacionais, como por exemplo, circuitos complexos e sofisticados de equipamentos eletrônicos, presentes em celulares, máquinas fotográficas digitais, filmadoras, HD de computadores, até materiais e componentes de satélites e aviões, civis e militares, motores-foguetes a propelente sólido, mísseis e veículos aeroespaciais.

As fibras de alto desempenho são a base da indústria de compósitos avançados, tornando-se estratégicas para aplicações nas áreas de defesa, pois permitem o transbordamento de tecnologias aos setores produtivos do país. Entre estas, destacam-se as derivadas dos materiais carbonosos.

Os materiais carbonosos, constituídos basicamente do elemento carbono, são encontrados na natureza nas formas de grafite natural, coques, alguns carvões minerais e nas formas sintéticas, como grafite sintético, fibras de carbono, carbono vítreo, compósitos carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC) ou, simplesmente, compósito carbono/carbono (C/C). Estes materiais podem ser obtidos a partir de diversas matérias primas orgânicas nos estados sólido, líquido ou gasoso e a possibilidade desses compósitos conservarem as suas propriedades mecânicas em altas temperaturas permite o seu emprego em componentes para veículos espaciais, gargantas de tuberias de foguete, componentes de turbinas, freios de aeronaves de grande porte e inclusive em ultracentrífugas para enriquecimento de urânio.

A fibra de carbono (FC) é um filamento longo e fino de aproximadamente 0,005-0,010 mm em diâmetro composta em grande parte por átomos de carbono. Os átomos de carbono estão agrupados em cristais microscópicos que permanecem relativamente alinhados paralelamente ao longo do eixo da fibra. Esse alinhamento dos cristais permite que a fibra tenha uma resistência extraordinária. As fibras de carbono são produzidas pela pirólise de fibras orgânicas precursoras, como o piche do petróleo, o *raion* e a poliacrilonitrila (PAN) em uma atmosfera inerte. A pirólise consiste em um método de produção de fibras de carbono em que há decomposição pelo calor de material rico em carbono. Este material retém sua forma fibrosa através de tratamentos térmicos que resultam em carbonização com alto resíduo carbonáceo.

A produção de fibras de carbono veio suprir a necessidade de materiais que combinassem leveza, alta resistência e rigidez, necessários à produção de estruturas com características especiais quanto ao peso e resistência. Como mencionado acima, essa produção ocorre a partir do processamento em alta temperatura de um dos três tipos de fibras precursoras: PAN, piche e raion. Dependendo do tipo de precursor e do processo utilizado, a fibra de carbono obtida possui microestrutura e propriedades diferentes.

Tipicamente, as fibras baseadas na PAN têm uma resistência específica maior e um módulo específico menor do que as fibras feitas a partir do piche e do raion. Fibras baseadas no piche têm, por sua vez, menor resistividade elétrica e maior condutividade térmica. Quanto ao aspecto econômico, as fibras de carbono baseadas na PAN têm custo de produção inferior em relação àquelas obtidas a partir dos outros dois tipos de precursores.

As fibras precursoras são matérias-primas necessárias para a produção de fibras de carbono de qualidade. São polímeros orgânicos caracterizados por longas cadeias de moléculas unidas por átomos de carbono que, mediante processos de tratamento térmico e condições controladas de tensão,



atmosfera, tempo e, principalmente, temperatura, podem originar fibras de carbono de alto desempenho (*high performance carbon fibers*).

A exata composição de cada precursor (PAN, *piche e raion*) varia de uma empresa para outra e é considerada um segredo comercial. A PAN é considerada uma das mais importantes fibras precursoras para a obtenção da fibra de carbono. Cerca de 90% de todas as fibras de carbono comerciais produzidas no mundo são obtidas a partir da conversão térmica de fibras precursoras de PAN. Ela tem uma microestrutura diferenciada que lhe confere uma resistência maior à tensão.

Devido às características especiais de resistência à tensão, menor custo e utilização em projetos similares de outros fabricantes, o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) optou pela utilização da fibra de carbono obtida a partir da fibra precursora de PAN no desenvolvimento de sua nova geração de ultracentrífugas. Tal escolha deveu-se ao fato de que a utilização da fibra de carbono de alto desempenho obtida a partir da PAN se dá nos rotores das ultracentrífugas, em que uma resistência específica de alto nível, combinada a uma maior velocidade do rotor e a uma menor densidade do material, constituem fatores críticos de grande relevância que possibilitam uma maior eficiência na separação isotópica. Além disso, com o dimensionamento adequado, a fibra de carbono possui uma grande resistência à corrosão.

As fibras de carbono baseadas em precursores a partir do piche respondem por cerca de 9% do mercado de fibras de carbono no mundo. São processos energo-intensivos (requerem temperaturas elevadas) e, por isso, mais caros. Elas possuem uma resistência menor por conta do alto grau de grafitação em sua microestrutura (estrutura grafitica). Entretanto, possuem uma condutividade térmica que chega a ser cem vezes maior do que a da fibra baseada na PAN e três vezes a do cobre, o que justifica que sejam utilizadas em aplicações em que a transferência de calor e a rigidez sejam fatores mais relevantes ou críticos como, por exemplo, aeronaves militares e estruturas de satélites espaciais.

O raion, introduzido no final da década de 1960 e início da década de 1970, que foi a matéria-prima predominante para a produção das primeiras fibras de carbono de alto desempenho, hoje responde atualmente por menos de 1% do comércio de fibras de carbono no mundo. Isto se deu devido a seus elevados custos, suas limitadas propriedades físicas e seu baixo rendimento em carbono (20-30%).

Nos últimos anos, ganhos incrementais significativos foram obtidos nas propriedades mecânicas das duas principais fibras precursoras de carbono, embora avanços revolucionários em ambas as tecnologias não tenham sido obtidos, em parte por conta de reestruturações nesse mercado e redução de investimentos em pesquisa.

É importante salientar que o acesso a grande parte desses polímeros é dependente de importação e sujeito a bloqueios comerciais, como é o caso das fibras de carbono e de dióxido de silício (quartzo), ainda não produzidos no país. Naturalmente que o setor mais afetado pelos embargos é o de Defesa, entretanto já existem estudos que evidenciam que os setores de pesquisa acadêmica e industrial também já estão começando a obter denegações para importação destes tipos de materiais, assim todos indicadores apontam para aumento considerável de dificuldades para o avanço das pesquisas brasileiras num futuro bem próximo. Essas denegações são oportunidades para o desenvolvimento dessas tecnologias de forma autóctone.

Vale ressaltar que as propriedades dos compósitos obtidos dependem também de competências tecnológicas empregadas no processo de moldagem e usinagem dos moldes, construídos em aço-liga temperado, necessários para a fabricação das peças. Como mencionado no estudo do CGEE relativo a Materiais Avançados para Atividades Espaciais, acrescentando nanotubos de carbono a esses compósitos, durante a fabricação, obtêm-se melhorias significativas nas propriedades desses materiais, permitindo redução de peso de motores-foguete e utilização de propelentes mais energéticos, resultando maiores velocidades de queima e melhores resultados propulsivos. As pesquisas de aditivação de nanomateriais, o projeto de moldes e a produção de peças em compósito vêm sendo realizadas e produzidas por indústria nacional, em parceria com o Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Estudos para se obter a melhor caracterização das propriedades desses materiais e processos, necessitam ser intensificados.

Somente agora existem no país projetos propostos para a realização de estudos sistemáticos sobre o processamento de compósitos de uso no setor aeroespacial. Isto evidencia um atraso no setor de processamento de compósitos estruturais de pelo menos 30 anos. Vale ainda reforçar que o domínio de novas tecnologias no processamento de compósitos estruturais é considerado como ponto de supremacia mercadológica pelas grandes empresas. Logo, a indústria brasileira que possui uma vertente de exportação acentuada encontra-se em desvantagem e sentirá as primeiras ameaças, caso esta diferença tecnológica não seja diminuída ou mesmo eliminada.

1.5.3. Fomentos estruturantes

Entre as instituições atuantes em materiais compósitos para o setor de defesa e segurança, as quais necessitam de fomento, destacam-se, entre outras:

- A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), que tem foco no desenvolvimento de recobrimentos por técnicas de deposição física, química e eletroquímica.



- O Instituto de Estudos Avançados (IEAv), que atua na área de desenvolvimento de sensores para aplicações aeroespaciais, com grande interpolação com materiais compósitos, visando ao desenvolvimento de estruturas inteligentes. Em particular, a utilização de fibras ópticas como elemento constituinte da estrutura e dopagem de compósitos com nanotubos de carbono são áreas de concentração de pesquisa.
- O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), em São José dos Campos, SP, que vem desenvolvendo processos de misturas de nanotubos de carbono com polímeros e/ou resinas com o propósito de modificar estruturas para aplicações na construção de satélites e outras estruturas aeroespaciais.
- O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que contribui em PD&I em compósitos e nanocompósitos.
- O Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que está envolvido no desenvolvimento de procedimentos de projetos robustos para estruturas aeronáuticas primárias de material compósito, tendo por finalidade a caracterização da resposta estrutural de painéis reforçados de material compósito no regime de pós-flambagem, em ensaios que serão realizados no Laboratório de Estruturas e Compósitos Avançados do ITA. Envolvido, também, no desenvolvimento de procedimentos de ensaios e caracterização de compósitos laminados sujeitos a impacto, que tem por finalidade a fabricação de CDPs (corpos de prova) de materiais compósitos para a realização de testes experimentais no Laboratório de Estruturas Inteligentes e Compósitos Avançados do ITA. Tem previsto o projeto e fabricação de um sistema de infusão de resina do tipo RIFT (*Resin Infusion under Flexible Tooling*). Desenvolve projeto em conjunto com a Embraer e o IPT, focado em fuselagens, no Parque Tecnológico de São José dos Campos. Em termos de projeto, tem interesse em investimentos na modelagem de comportamento estrutural pós-flambagem, critérios de resistência à delaminação, critérios de resistência na presença de concentradores de tensão, projeto de juntas coladas e rebitadas e efeitos termoelásticos. Em termos de fabricação, focaliza o desenvolvimento da tecnologia Fiber Placement (FP) e dos ferramentais associados, que vem sendo cada vez mais utilizada na indústria aeronáutica para a fabricação de fuselagens. São considerados os efeitos de raios na estrutura e aspectos de reparabilidade e inspecionabilidade.
- A Marinha do Brasil (MB), que utiliza fibra de carbono (FC) na fabricação de ultracentrífugas nucleares, nas quais materiais que conjuguem leveza, rigidez e resistência de alto nível são extremamente desejáveis, pois aumentam a eficiência na separação isotópica. A FC importada é baseada na poliacrilonitrila (PAN), comercialmente mais difundida, mais barata e utilizada em aplicações similares. A necessidade de desenvolvimento nacional é decorrência de dificuldades em sua aquisição. Para tanto, foi organizada uma parceria de pesquisa entre o Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP), a Unicamp, a USP e a empresa Radicifibras, com apoio financeiro de uma agência governamental (Finep), para o desenvolvimento nacional da fibra de carbono baseada na PAN e posterior produção em pequena escala.

- O Centro Tecnológico do Exército, que vem desenvolvendo pesquisas para a produção da FC a partir do piche, com financiamento da Petrobras.

1.6. Materiais para sensores avançados

Como apresentado no estudo do CGEE relativo a Materiais Avançados para Aplicações Eletrônicas, Magnéticas e Fotônicas, há uma grande quantidade de sensores avançados e técnicas associadas que necessitam de pesquisa na área de materiais de interesse dos setores de defesa e segurança. A busca do entendimento teórico dos fenômenos envolvidos é parte importante no processo para o desenvolvimento tecnológico. Este tipo de investigação remete para conhecimentos nas áreas de eletromagnetismo, físico-química, termodinâmica, mecânica quântica, supercondutividade, espectroscopia óptica de materiais; e propriedades mecânicas de filmes e superfícies, todas elas aplicadas ao conhecimento para produção de sensores.

Em particular, existem componentes de suma importância para diversos vetores e sistemas de armas (de nível elevado e capacidade de precisão e destruição) empregadas pelas Forças Armadas do Brasil e do exterior. Estes componentes são partes das chamadas “plataformas inerciais” que é um tema de extrema relevância para a Marinha, Exército e Aeronáutica. Os detentores autóctones de tal tecnologia têm sua capacidade militar alavancada, pois seu conhecimento e aplicação conferem a esses países a capacidade de controlar muito mais efetiva e eficientemente seus meios em deslocamento e principalmente tornar seus mísseis “inteligentes”.

Devido à grande capacidade militar que esta tecnologia proporciona, os componentes das plataformas inerciais têm forte controle pela comunidade internacional por meio do Regime de Controle Tecnológico de Mísseis (Missile Technology Control Regime - MTCR), muito embora haja várias outras aplicações civis destes equipamentos e portanto uma enorme possibilidade de mercado nacional e internacional para estes sistemas de navegação e controle. Entre as suas aplicações civis destacam-se as indústrias petrolífera, aeroespacial, aeronáutica e automotiva. A Petrobras por ser consumidora de produtos com essas características e que, naturalmente, são de alto valor comercial, tem grande interesse em que o país obtenha este tipo de tecnologia, por isso já vem sendo uma parceira diferenciada para investimentos que levem ao desenvolvimento destes produtos.

Considerando que há um significativo mercado civil e militar neste segmento, o controle internacional que busca evitar a proliferação de vetores (mísseis) para uso de armas de destruição em massa, acaba também servindo de excelente escusa para se alcançar outro objetivo fundamental, o econômico, uma vez que os poucos países e organizações empresariais que detêm tal conhecimento



bloqueiam ao máximo sua disseminação, pois esta situação contribui muito para a minimização de concorrência dos produtos com estas características.

1.6.1. Agenda de ações estratégicas para a sociedade e economia do país

No mundo, a tecnologia corrente para acelerômetros usa o conceito do rebalanceamento de forças com sensor tipo junta de quartzo, ou seja, tecnologia eletromecânica. No entanto, a tendência tecnológica para acelerômetros, e que já se encontra à disposição no exterior, é a micro-eletromecânica (MEMS, Micro Electro-mechanical Systems), a base de silício ou quartzo ressonante.

Sensores de movimento não são novidades e têm sido utilizados em navegação nos setores aeroespacial e de defesa, desde a década de 1950, mas as versões MEMS de acelerômetros e girômetros só foram desenvolvidas recentemente. A tecnologia MEMS apresenta duas vantagens importantes: custo e redução do tamanho. Apesar de ainda não serem tão acurados quanto os dispositivos usados em aplicações militares, os acelerômetros e girômetros MEMS tem sido amplamente empregados em veículos e em muitos produtos eletrônicos de consumo.

A tecnologia MEMS é a integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores e eletrônica em um substrato de silício comum, por meio da micro-fabricação. Enquanto os eletrônicos são fabricados usando processos em circuitos integrados (p.ex., CMOS, bipolar, ou BICMOS), os componentes micro-mecânicos são fabricados usando processos compatíveis de micro-usinagem, os quais moldam a base de silício, retirando material ou adicionando camadas para formar dispositivos mecânicos e eletromecânicos.

A MEMS promete revolucionar praticamente todas as categorias de produto ao combinar a micro-eletrônica baseada no silício com a tecnologia de micro-usinagem, tornando possível a implementação de sistemas completos em um *chip*. MEMS é uma tecnologia que viabiliza o desenvolvimento de produtos “inteligentes”, aumentando a habilidade computacional da micro-eletrônica com a percepção e o controle de micro-sensores e micro-atuadores, e expandindo o espaço de possíveis designs e aplicações.

Uma vez que os dispositivos MEMS podem ser fabricados usando técnicas de produção seriada similares à produção de circuitos integrados, novos níveis de funcionalidade, confiabilidade e sofisticação podem ser alcançados em um *chip* de silício a um custo relativamente baixo.

O mercado de MEMS com alto desempenho inercial vem crescendo na ordem de 5% ao ano desde 2005, atingindo U\$ 1,8 bilhões em 2008, sendo cerca de 50% em materiais (bolachas ou *wafers* de silício de seis ou oito polegadas) e os outros 50% em equipamentos MEMS. Como estas aplicações são muito variadas, os programas de desenvolvimento são muito dinâmicos, oferecendo oportunidades para um grande número de atores.

O mercado de giroscópios e acelerômetros MEMS tem crescido a taxas anuais elevadas, atingindo U\$ 750 milhões em 2008. Hoje, estima-se que cerca de 65% do mercado seja de acelerômetros. Além disso, as aplicações do mercado de consumo já alcançam cerca de 40% do mercado global de MEMS inerciais (automotivo, médico, industrial, aeronáutico, defesa etc).

Desde 1998, giroscópios MEMS equipam câmeras de vídeo para prover estabilidade ótica. A partir de 2003, acelerômetros MEMS entraram nas aplicações de consumo, em grande escala como proteção de discos rígidos de computadores. Em 2006, os controles com sensor de movimento do Nintendo Wii deram visibilidade pública para os MEMS inerciais, que estão penetrando rapidamente o mercado de telefonia celular.

O segmento de MEMS inercial de alto desempenho segue atualmente três direções principais em sua dinâmica de mercado:

- Entrada de novos players: os mais recentes avanços na tecnologia de giroscópios MEMS abrem novas possibilidades para desenvolvimento de aplicações nos setores aeroespacial e de defesa, em particular, os mercados de aeronaves não tripuladas (UAVs) e munições “inteligentes”;
- Consolidação: com o rápido crescimento do mercado e das aplicações da tecnologia, a tendência é de maior interesse das principais integradoras e fornecedoras na aquisição das empresas especializadas.
- Estratégias de diversificação: a sazonalidade da demanda nos diferentes segmentos de aplicação da tecnologia MEMS (automotivo, médico, industrial, eletrônicos de consumo, aeronáutico, defesa) demonstra a importância das empresas obterem participação em vários desses segmentos.

O Brasil ainda não possui nenhuma indústria com capacidade de produção de equipamentos MEMS. Um recente estudo da Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras (AIAB), no Grupo de Trabalho sobre Nanotecnologias, indicou a capacidade de se obter no país produtos iniciais MEMS até 2015, com o posterior amadurecimento de produtos finais até 2020.



De uma forma geral, propõe-se elevar o nível do fomento ao desenvolvimento e à produção de sensores avançados no país, especialmente de girômetros e acelerômetros, inclusive com tecnologia MEMS, de forma a gerar inovações e atender às demandas civis e militares reprimidas.

1.6.2. Agenda de PD&I

Para se obter autonomia de fabricação do subsistema primário de uma plataforma inercial, chamada unidade de medida inercial (IMU), para empregos táticos e estratégicos (aeronave, míssil, veículo lançador de satélite, submarino, satélite, etc.) é necessário que se tenha o domínio tecnológico dos acelerômetros com sensibilidade melhor que 0,05g (cinco centésimos da aceleração gravitacional), e girômetros com erro de deriva inferior a 1 grau/h (um grau por hora).

Precisões mais degradadas do que estas pertencem às famílias de aplicativos de uso geral, sem restrições à comercialização internacional, porém, ainda de alto valor comercial agregado, como ainda é o caso dos sensores MEMS.

O mercado de MEMS continua sendo impulsionado pela inovação. A P&D de equipamentos MEMS está muito ativa no mundo. Essas pesquisas indicam trabalhos em mais de 150 aplicações de MEMS, que podem ser agrupados em 12 categorias: cabeças de jatos de tinta; sensores de pressão; microfones; acelerômetros; giroscópios; sistemas micro-opto-eleto-mecânicos (MOEMS); micro-bolômetros; micro-displays; micro-fluídicos; radiofrequência (RF MEMS); microconectores (“micro tips”); e outros dispositivos MEMS emergentes.

Na indústria de MEMS, ser capaz de adicionar “inteligência” ao sensor é uma forma de oferecer uma forte diferenciação do produto. Ao invés de suprir apenas um componente, muitos fabricantes estão oferecendo soluções. Algoritmos são comumente integrados ao nível do *chip*, por exemplo, para rotação de tela, ou detecção de toque, etc. Outra forte tendência emergente é a integração de vários sensores MEMS em “clusters”, o que deve ser um *roadmap* para os fabricantes de MEMS. A dificuldade é a fusão de dados de diversos tipos de entrada, requerendo algoritmos complexos.

Unidades IMUs (*Inertial Measurement Units*) que oferecem cinco ou seis graus de liberdade a partir da combinação de acelerômetros e girômetros são comumente empregados nas indústrias aeroespacial e de defesa. Agora que acelerômetros MEMS são mais baratos e que o nível de integração dos giroscópios MEMS foi aperfeiçoado, estima-se uma rápida entrada no mercado de IMUs MEMS, inclusive integrados aos telefones celulares.

No foco da precisão requerida para sistemas de defesa complexos, o projeto do sensor girométrico de alto desempenho (0,01 grau/h), em desenvolvimento no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), com tecnologia de fibra óptica IFOG (Interferométric Fiber Optic Giro), sob o título de SIA (Sistemas Inerciais para Aplicações Aeroespaciais), deverá atingir o domínio tecnológico de protótipos para várias séries de aplicativos táticos e estratégicos do país. A título de comprovação da obtenção de resultados operacionais do projeto SIA, a OPTSENSYS, empresa incubada no IEAv, está fornecendo unidades de bloco girométrico IFOG miniaturizados à Mectron para o míssil antiradiação MAR-1.

O desenvolvimento de acelerômetros de alto desempenho, que junto ao bloco girométrico, integra uma IMU (Inertial Measurement Unit), não tem, paradoxalmente, recebido atenção semelhante à dispensada ao giro. Como também existem restrições à importação destes acelerômetros, considera-se importante focar, paralelamente ao giro IFOG, o desenvolvimento interno de acelerômetros de emprego tático e estratégico. O IEAv também tem a seu cargo um projeto Finep-AOM de um acelerômetro opto-mecânico baseado em grades de Bragg a fibra óptica, que ainda está na fase de prova de conceito.

O mercado nacional de Defesa possui demanda para diversos produtos, que poderiam ser direcionados para a indústria nacional, com vistas ao desenvolvimento da capacidade autônoma:

- IMU (Inertial Measurement Unit), com desempenho de 2 graus/s a 2 graus/h e 1 mili-g;
- AHRS (Attitude and Heading Reference System), incluindo magnetômetro e software indicativos de atitude e direção com desempenho melhor que 2 graus;
- INS (Inertial Navigation System) baseado nas IMU nacionais, com e sem adição de GPS, com desempenho melhor que 2 graus em atitude e direção e 3 metros em posição.

Em adição ao desafio tecnológico da produção de sensores inerciais de alto desempenho, identifica-se também a necessidade de financiamento e fomento da atividade industrial em eletrônica embarcada de alta robustez à vibração, aceleração, temperatura, radiação cósmica, e tempo de vida útil, i.e., características do ambiente de aplicação dos sensores.

Adicionalmente, ao lado das necessidades de sensores inerciais de ponta e eletrônica embarcada robusta, alguns projetos do setor aeroespacial, como a ACDH (sistema de controle de atitude e supervisão de bordo) da PMM (plataforma multimissão) do Instituto de Pesquisas Espaciais (Inpe), estão requerendo da indústria nacional a capacidade de projetar e produzir, com um alto grau de especificidade, subsistemas como magnetômetros, magnetorques, rodas de reação e sensores de estrelas, para autonomia da fabricação do primeiro satélite brasileiro de sensoriamento remoto.



1.6.3. Fomentos estruturantes

Entre as instituições atuantes em sensores avançados para o setor de defesa e segurança, as quais necessitam de fomento, destacam-se, entre outras:

- Além dos projetos mencionados, o Instituto de Estudos Avançados (IEAv) atua na área de desenvolvimento de sensores para aplicações aeroespaciais, com destaque para sensores a fibra óptica, sensores nanoestruturados, sensores MEMS e sensores eletromagnéticos. Estas pesquisas dependem exclusivamente de materiais importados como fonte para os vários sensores, como lâminas e dopantes de semicondutores e fibras ópticas especiais. O suprimento destes materiais não se concentra em apenas um país, mas são passíveis de embargo e controle internacional, que pode comprometer objetivos estratégicos do Brasil.
- Os centros de pesquisa da Marinha (CTMSP e IPQM) vêm desenvolvendo a capacidade de fabricar o acelerômetro APSC (Acelerômetro Pendular com Sensor Capacitivo) e o giro eletromecânico DTG (Dry Tuned Gyro), visando consolidar uma unidade de medida inercial, o que inclui todos os sensores inerciais (acelerômetros e giros), bloco sensor, eletrônica de controle embarcada e algoritmos de filtragem e compensação.
- O Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) desenvolve pesquisas e projetos nas áreas de sensores ativos (principalmente desenvolvimento e aplicações de radar de abertura real, radar de abertura sintética – SAR — e sensores inerciais) e passivo (processamento de sinais de sensores hiperespectrais).

1.7. Simulação computacional em ciência e engenharia de materiais

O fortalecimento da infraestrutura laboratorial, metrológica, científica e de processos para apoio ao desenvolvimento da área de materiais avançados é fundamental. O aumento do poder computacional, associado ao aprimoramento da capacidade de modelagem vem ao encontro da aplicação da simulação computacional em ciência e engenharia de materiais no sentido da busca da redução de custos e de tempo para obtenção de resultados. A simulação dos mais complexos fenômenos na área de materiais contribui para a possibilidade de vencer algumas dificuldades no processo de modelagem.

Com o aumento acelerado da disponibilidade de infraestrutura computacional, em forma de hardware, principalmente com processamento paralelo, e com o aperfeiçoamento constante das metodologias computacionais na forma de softwares aplicativos para simulação, tem sido possível a caracteri-

zação de processos microscópicos que estão no cerne das propriedades macroscópicas em sistemas e materiais complexos. Esta caracterização é um objetivo comum em diversas áreas da ciência, incluindo a química, física, biologia, engenharia nuclear, como também na engenharia de materiais.

1.7.1. Agenda de ações estratégicas para a sociedade e economia do país

A computação de alto desempenho (HPC), necessária à viabilização da simulação computacional em Ciência e Engenharia de materiais avançados, iniciou-se na década de 1970 com a introdução dos computadores vetoriais e da supercomputação. O sucesso inicial desses computadores vetoriais foi baseado somente no desempenho. A partir da metade dos anos 80, a disponibilidade de ambientes de desenvolvimento e de softwares aplicativos tornou-se mais relevante, principalmente para os clientes industriais. Os sistemas paralelos massivos (MPP) obtiveram sucesso, no início dos anos 90, em função de sua melhor relação preço/desempenho, proporcionada pela evolução dos micro-computadores. Na metade da década de 1990, os segmentos de baixa e média demanda implementaram soluções de sistemas de multiprocessadores simétricos (SMP). O sucesso do conceito SMP baseado em microprocessadores (PCs), mesmo para os sistemas de muito alto desempenho, foi a base para o surgimento do conceito de cluster, a partir de 2000. Desde então, clusters de PCs e estações de trabalho tornaram-se a arquitetura prevalecente para muitas áreas de aplicação de computação de alto desempenho (HPC), em todas as faixas de desempenho.

O mercado de HPC baseado em cluster continua a crescer, com taxas na ordem de 6% ao ano. A estimativa do IDC foi de um mercado anual da ordem de US\$ 6,3 bilhões em 2007. Apesar disso, a indústria não tem um padrão tecnológico nem uma arquitetura para guiar futuras adaptações e refinamentos. A pesquisa na área de clusters computacionais representa uma grande oportunidade para novos investimentos.

De uma forma geral, propõe-se fomentar a implantação de ambientes (hardware, software e humanware), inovando com novas arquiteturas computacionais, onde possam ser feitas P&D de novos materiais e processos produtivos via simulações computacionais em ciência e engenharia de materiais

1.7.2. Agenda de PD&I

Três décadas após a introdução do Cray 1, o mercado de HPC mudou bastante. Em lugar de sistemas bem diferentes, o mercado deixou de ser um nicho de sistemas especializados. Componentes



similares são empregados na integração vertical das organizações, desde os PCs individuais até os mais potentes supercomputadores. Ambientes similares de software estão disponíveis em todos esses sistemas. Assim, as pressões de custo diminuiram em muito o mercado para os sistemas de muito alto desempenho, elevando ainda mais os preços e dificultando o acesso aos usuários que precisam trabalhar com aplicações que requerem a integração de supercomputadores. A queda da eficiência dos sistemas de supercomputadores, sua menor produtividade, e a falta de infraestrutura de suporte, tem impulsionado a busca por novas arquiteturas computacionais.

O recente sucesso do sistema vetorial Earth Simulator demonstrou que muitas aplicações científicas podem beneficiar-se por outras arquiteturas computacionais. Existe de fato um amplo interesse renovado na comunidade científica de HPC por novas arquiteturas de hardware e novos paradigmas de programação. O sistema BlueGene/L da IBM é um desses primeiros exemplos de mudança no foco do projeto de sistemas de larga escala. Construído com uma imensa quantidade de sistemas de baixo desempenho, imitando o funcionamento de sistemas biológicos, o BlueGene permite uma integração fina entre um número inusitado de processadores, obtendo níveis surpreendentes de desempenho, adequados para diversas aplicações. Além deste, o programa *High Productivity Computer System* (HPCS) da agência DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) do Departamento de Defesa norte-americano declarou seu objetivo de construir um computador de PetaFlops (1015 pontos flutuantes por segundo) até o final desta década, utilizando novas arquiteturas computacionais.

Ao contrário do progresso no desenvolvimento de novos hardwares, tem havido pouco progresso, ou até mesmo retrocesso, na construção de sistemas escaláveis, fáceis de programar. As direções para desenvolvimento de software (p.ex., CM-Fortran e Fortran de alto desempenho), iniciadas no início dos anos 90, foram praticamente abandonadas. A descoberta de novas formas de programação de tais sistemas para a expansão dos domínios de aplicação é altamente desejável.

Atualmente, existem poucos sistemas desenvolvidos que atendam satisfatoriamente a finalidade da simulação computacional, além das limitações impostas pelo cerceamento tecnológico aplicado pelos países desenvolvidos, que impacta também a importação de computadores com altas capacidades de processamento, equipamentos vitais para realização de experimentos por meio da simulação. Além disso, a área de simulação computacional poderá contribuir significativamente no desenvolvimento de materiais avançados em todos os segmentos, não só na área de Defesa e Segurança, pois é classicamente transversal e permeia todas as demais áreas de interesse em materiais avançados.

A compreensão fundamental de processos elementares exige um conhecimento detalhado das configurações e da dinâmica na escala atômica. Este novo tipo de experimentação tem permitido

a atuação nos mais variados sistemas físicos, com um nível de detalhamento sem precedentes na história. Portanto, a simulação representa uma ferramenta poderosa que permite a observação da evolução de estruturas em escala nanométrica nos experimentos computacionais controlados.

A simulação também pode ser uma alternativa, caso a realização do experimento num laboratório convencional seja muito difícil ou mesmo impossível (exemplo, estudo da solidificação do comportamento de materiais sob condições extremas de pressão e temperatura). Além disso, laboratórios para simulação podem ser considerados complementares aos laboratórios convencionais, pois oferecem o poder de interpretação na análise dos resultados obtidos em paralelo com o experimento realístico.

Adicionalmente, é notório que o custo da simulação computacional é muito menor quando comparado ao custo da pesquisa experimental realística, resultando em economia de dinheiro, tempo, recursos humanos e esforços na tentativa de obtenção de novos materiais e processos.

Por último, consideram-se, também, as dificuldades para se obter informações e dados sobre materiais avançados a respeito dos efeitos do seu envelhecimento por longos períodos, fadiga, vida útil, condições de serviço requeridas, verificação de degradação por agentes químicos ou ambientais (umidade, variações bruscas de temperatura, radiação). Todos esses aspectos podem ser estudados com base em modelagem computacional, minimizando ensaios experimentais caros e demorados, além de permitir repetições do fenômeno investigado, por meio do emprego de ferramentas de análise avançadas.

1.7.3. Fomentos estruturantes

Na área de Defesa e Segurança, são enumeradas as áreas contempladas pela simulação computacional, consideradas estratégicas. Algumas delas com amplo espectro dual com aplicações diretas na aviação, setor aeroespacial e militar como também na engenharia civil, medicina, setor automotivo, setor energético, siderurgia e indústria petrolífera.

Entre as instituições atuantes em simulação computacional para o setor de defesa e segurança, as quais necessitam de fomento, destacam-se, entre outras:

- A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), que tem foco em simulação de processos de laminação de chapas a quente, visando à implantação de novos produtos na indústria metalúrgica.



- O Instituto de Estudos Avançados (IEAv), que possui um Laboratório de Engenharia Virtual (LEV) que dá suporte em simulação computacional, com ênfase nas seguintes áreas: eletromagnetismo, incluindo fenômenos acoplados; transporte de calor e de massa, com ou sem mudança de fase; controle e estabilidade de sistemas; propulsão (aeronáutica e espacial); aplicações da engenharia nuclear.
- O Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), que desenvolve pesquisas em simulação numérica e análise de transição para turbulência em plasmas espaciais: uma abordagem baseada em sistemas dinâmicos. Desenvolve, também, pesquisas em simulação numérica de escoamentos viscosos, onde se visa, primordialmente, atender uma faixa extensa de problemas, desde escoamentos supersônicos, típicos da engenharia aeronáutica, até problemas em baixa velocidade, onde a densidade do fluido varia pouco, ou, eventualmente, permanece constante ao longo de todo o campo de estudo. Nesta última categoria, incluem-se problemas de interesse universal, como por exemplo, cargas aerodinâmicas em edifícios, aerodinâmica de veículos terrestres, escoamentos em torno de dirigíveis e aeronaves de baixa velocidade, poluição ambiental, escoamentos bio-sustentados, geração de energia eólica e solar. Desenvolve estudos da estrutura da chama durante o processo de queima nas condições encontradas na câmara de combustão de formulações de combustíveis e propelentes sólidos através do emprego de pacotes de simulação computacional e que envolvam cinética química detalhada.

1.8. Conclusão

Em relação à área de materiais avançados, considerando a atual conjuntura internacional e com uma visão estratégica para a defesa nacional e para a segurança pública, chega-se às conclusões apresentadas a seguir, que devem propiciar o fomento à pesquisa e aos processos de obtenção de materiais avançados empregados em sistemas militares e civis, os quais compatibilizem as prioridades científicas e tecnológicas com as necessidades de defesa.

As ações estratégicas propostas visam contribuir em seis segmentos de materiais avançados, eleitos prioritários para alavancar o setor industrial brasileiro e garantir certa independência ao país, na produção e desenvolvimento tecnológico de produtos para a defesa e segurança pública.

As ações envolvidas são de caráter eminentemente tecnológico, no que tange a natureza crítica desses materiais, de alto valor agregado e sujeitos a instrumentos de controle internacional, além dos processos associados, e de caráter político-institucional, no que concerne às aplicações que gerarão demandas, dada a difícil obtenção desses materiais no mercado.

As ações estratégicas aqui propostas visam contribuir com os tomadores de decisão do país, no intuito de promover a produção de materiais avançados com foco em oportunidades de negócios e em ações que consideram também as necessidades de infraestruturas, como laboratórios e equipamentos, quais sejam:

- Industrializar as soluções nacionais já desenvolvidas em materiais para blindagem balística, em nível de protótipo pelos órgãos de pesquisa nacionais, especialmente a aramida, os carbetos de silício e boro, e o polietileno de ultra-alta massa molar, bem como fomentar o desenvolvimento de novas soluções.
- Industrializar as soluções nacionais já desenvolvidas em materiais para blindagem eletromagnética, em nível de protótipo pelos órgãos de pesquisa nacionais, de forma a gerar inovações e atender a demandas civis e militares reprimidas.
- Industrializar diversos materiais metálicos desenvolvidos por institutos de P&D, inclusive ligas de aço balístico, e recuperar a capacidade anteriormente dominada de produção de ligas de Titânio no país na área de defesa. Industrializar ainda novos processos metalúrgicos e processos de junção e soldagem de componentes estruturais, que possam ser utilizados na produção da indústria de defesa, julgados viáveis dos pontos de vista tecnológicos e comerciais.
- Industrializar diversos materiais compósitos desenvolvidos por institutos de P&D, especificamente as fibras de carbono, e fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação e processamento de materiais compósitos poliméricos e carbonosos.
- Fomentar o desenvolvimento e produção de sensores avançados no país, especialmente de girômetros e acelerômetros, inclusive com tecnologia MEMS, de forma a gerar inovações e atender a demandas civis e militares reprimidas.
- Fomentar a implantação de ambientes (hardware, software e humanware) com novas arquiteturas computacionais, onde possam ser feitas P&D de novos materiais e processos produtivos via simulações computacionais em ciência e engenharia de materiais.
- Fomentar a implantação de unidades piloto e laboratórios nas ICTs para as áreas em que o mercado ainda não atingiu a sua maturidade econômica, pois o aspecto estratégico, incluindo seu arraste tecnológico, já justifica a continuidade do desenvolvimento. Esta seria, também, uma forma de não perder a capacitação e o conhecimento já conquistados em certas áreas do conhecimento.



Finalmente, como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a realização de um estudo específico, no âmbito do Ministério da Defesa, sobre matérias-primas disponíveis no país, de interesse para a produção de materiais avançados de Defesa e Segurança. Além deste estudo, convém planejar e realizar pesquisas de mercado mais abrangentes para subsidiar os futuros planos de negócios que deverão ser preparados em suporte às ações estratégicas aqui propostas.

Referências

- AMORIM NETO, A.A. (2008). Titânio. DNPM/PB.
- CONCEPÇÃO ESTRATÉGICA PARA A CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DE INTERESSE DA DEFESA NACIONAL – Jul/2003.
- ESTRATÉGIA NACIONAL DE DEFESA – Dez/2008.
- ESTUDO PROSPECTIVO DE MATERIAIS - Relatórios de Situação – Fase I - Relatório Parcial - Tecnologias Sensíveis (Tema V) - Materiais Avançados para Tecnologias Sensíveis – CGEE, Brasília, Dez/2007.
- ESTUDO PROSPECTIVO DE MATERIAIS AVANÇADOS - Fase 2/3 – Perspectivas para ação - Tópicos Tecnológicos Prioritários em C&T de Materiais Avançados – CGEE, Brasília, Jun/2008.
- ESTUDO PROSPECTIVO DE MATERIAIS AVANÇADOS – Manual do Participante – Simpósio em Materiais Avançados para Setores Socioeconômicos – CGEE, Brasília, Ago/2009.
- HARTLEY, K. & SANDLER, T. (2003) The Future of the Defence Firm. KYKLOS, 56, p. 361-380.
- MEMS Accelerometer, Gyroscope and IMU Market 2008-2013. (2009). Yole Development. Disponível em: <http://www.marketresearch.com/product/display.asp?productid=2289891&xs=r>.
- PLANO DE AÇÃO 2007 – 2010 do MCT.
- POLÍTICA DE DESENVOLVIMENTO PRODUTIVO (PDP) – Mai/2008.
- POLÍTICA NACIONAL DA INDÚSTRIA DE DEFESA (PDIN) – Jul/2005.
- QUEIROZ, P.C.B. (2008). Pesquisa Cooperativa: O Projeto de Desenvolvimento de Fibras de Carbono para Aplicação em Ultracentrífugas. Tese de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.
- RODRIGUES JR., J.C.J. & CARDOSO, A.L.V. (2010). Potenciais de Mercado e de Investimentos para Produção no País de Materiais de Defesa na Área de Blindagem. Relatório Técnico n. 02/10-LM. Centro Tecnológico do Exército – CTEX.
- SEMINÁRIO SOBRE DIRETRIZES ESTRATÉGICAS DE C,T&I PARA A DEFESA NACIONAL. MD/MCT/CGEE. Nov/2002.



SETOR AEROESPACIAL BRASILEIRO - OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA SUA COMPETITIVIDADE

- Reunião Plenária – Fórum de Competitividade do Setor Aeroespacial. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras (AIAB) – Nov/2002.

SISTEMA INTEGRADO DE C, T & I: Proposta de Diretrizes Estratégicas para a Defesa Nacional. A visão da Indústria Aeroespacial. Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras (AIAB) – Fev/2003.

STROHMAIER, E. (2005). 20 Years Supercomputer Market Analysis. International Supercomputer Conference (ISC) Series.



2. Materiais avançados para eletrônica, magnetismo e fotônica¹

2.1. Introdução

Este trabalho faz parte da agenda estratégica de materiais avançados do CGEE, que visa a estabelecer o panorama e as perspectivas de ação em áreas estratégicas do PAC de C&T 2007-2008 do MCT. Seu objetivo principal é apresentar a análise de dados estratégicos sobre materiais avançados nas áreas de eletrônica, magnetismo e fotônica, produzidos na fase anterior deste estudo. É essencial pontuar aqui que os materiais de interesse têm aplicações que transcendem o alcance deste documento, e que, já na fase anterior deste estudo, a análise dos materiais, por área, já se observou restrita.

A seguir, situamos cada uma das áreas tecnológicas, nas quais os materiais destacados ao longo deste documento encontram aplicação.

2.1.1. Eletrônica

Uma prática comum no estudo das civilizações tem sido associar um material dominante a cada estágio de desenvolvimento tecnológico. Assim, a partir dos anos 60 do século XX, a sociedade moderna, com suas características em grande parte determinadas pela exploração das propriedades dos materiais semicondutores, poderia ser denominada de “a era do silício”. A revolução da microeletrônica e o vertiginoso desenvolvimento das tecnologias de informação e comunicação (TICs), que vêm tão radicalmente afetando as relações humanas nos últimos anos, tiveram seus marcos iniciais na invenção do transistor, por Shockley, Bardeen e Brattain, em 1949, e do circuito integrado (CI), por Kirby, em 1958 [Cge10].

Em um material semicondutor, a corrente elétrica pode ser retificada e controlada de maneira muito mais eficiente que o permitido pelas antigas válvulas termiônicas, e a um custo de operação significativamente menor. A partir de então, a preparação de novos materiais e o funcionamento dos

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Celso Pinto de Melo (coordenador); Leonardo de Souza Menezes (relator); Alberto Passos Guimarães (revisor); Antonio Azevedo da Costa (co-relator).

componentes eletrônicos passam a explorar a natureza quântica da matéria, enquanto que a integração progressiva de um número cada vez maior de componentes em um mesmo microchip leva a uma compactação crescente e ao contínuo aprimoramento dos dispositivos.

Em 2007, o mercado mundial de semicondutores (largamente dominado pelos componentes à base de silício) é estimado em cerca de 270 bilhões de dólares [Kyu05]. No Brasil, segundo dados da ABI-NEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), em 2006 o total de importações com semicondutores, aparelhos e componentes eletrônicos ficou próximo a 12 bilhões de dólares, em um crescimento de cerca de 20% sobre o exercício anterior [Abio7].

Ao longo dos últimos 40 anos, o paradigma observado nessa evolução é o crescimento exponencial do número de componentes integrados em um mesmo chip, em observância à lei empírica enunciada em 1965 por Gordon Moore, de que – em média – a capacidade de processamento dos dispositivos eletrônicos tenderia a ser duplicada a cada 24 meses. São um testemunho da extraordinária engenhosidade humana os feitos técnicos responsáveis pelo desenvolvimento contínuo de novos materiais e dispositivos que até o momento têm permitido a integração de componentes em escala sempre crescente [Cge10].

Desde o final dos anos 90, porém, analistas do setor têm alertado para a existência de possíveis limites a esse crescimento exponencial, os quais teriam basicamente duas origens distintas [Cge10]. A primeira, de natureza econômica, já fora reconhecida desde os primórdios da indústria eletrônica: a chamada “Lei de Rock” (ou “segunda lei de Moore”) é a constatação que a constante evolução tecnológica demanda que os custos de implantação das fábricas de componentes (as “fabs”) dupliquem a cada quatro anos.

Hoje, quando o estado da arte da tecnologia caminha para a produção de chips de 45 nm, o preço de uma fab supera 3,5 bilhões de dólares, com cada um dos conjuntos de máscaras custando mais do que 1 milhão de dólares [Fee05]. Assim, em um futuro não muito longínquo, o retorno econômico da produção de uma nova geração de chips passaria a resultar insuficiente para cobrir os custos fixos iniciais de implantação das novas plantas industriais e assegurar a margem de lucro para investimentos adicionais em tecnologia.

A segunda limitação, de caráter mais fundamental, adviria da própria impossibilidade da redução continuada das dimensões físicas dos componentes a serem fabricados, com o limite para os modos atuais de projeto e manufatura de circuitos integrados estimado como sendo da ordem de algumas poucas dezenas de nanômetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).



Apesar dos progressos contínuos no desenvolvimento de materiais, design e modos de manufatura, os estudos prospectivos da indústria de microeletrônica listam a demanda em prazos cada vez mais curtos por tecnologias ainda inexistentes (a “parede de tijolos vermelhos,” red brick wall – a barrar o progresso futuro [Krio4]), fazendo antever que até 2015, quando a indústria deverá se tornar integralmente de base nanotecnológica [Fee05], abordagens inteiramente novas devem ser estabelecidas [Itro5, Cge10]. O limite final das dimensões para as plataformas CMOS – do inglês, complementary metal–oxide–semiconductor – atualmente dominantes é estimado em 32 nm [Pus08]. Dentre os desafios a serem enfrentados nos próximos anos, se destaca a necessidade de definir quais dentre as alternativas de novas tecnologias que se apresentam são baseadas em princípios físicos fundamentais que, enquanto possibilitando a construção e manufatura de novos dispositivos nanométricos, sejam capazes de permitir a integração de arquiteturas e de operação com a tecnologia atual, um requisito ao menos temporário na fase de transição entre dois paradigmas conceituais.

Um dado relevante a considerar com relação à transição para uma era pós-silício, é que se a tecnologia CMOS é hoje madura e plenamente estabelecida, isso se fez graças a enormes investimentos realizados ao longo de décadas e envolve uma malha mundial de fabricantes, fornecedores de partes e componentes e de milhões de prestadores de serviço.

Assim, se os sucessivos “mapas de estrada” (roadmaps) prevêem a evolução da tecnologia de chips CMOS até pelo menos o ano 2020, por muito tempo após isso ainda ela deverá permanecer como um componente importante dos dispositivos eletrônicos, em uma transição de talvez várias décadas, até que um novo paradigma tecnológico se torne dominante. No entanto, para assegurar a continuidade na redução das dimensões das plataformas CMOS dentro da complexidade da cadeia de etapas já requeridas para a produção dos dispositivos atuais a partir das amostras brutas de silício [Van07], cenários alternativos precisam ser constantemente considerados [Velo7].

2.1.2. Magnetismo

Nunca antes a vida diária das pessoas foi tão significativamente dependente do desenvolvimento de novos materiais magnéticos com propriedades especiais. A vida moderna é em muitos aspectos extremamente dependente de processos automatizados que usam materiais ferromagnéticos em quase todas as atividades. Por exemplo, utilização de energia elétrica, eletromotores, micromotores, computadores, armazenamento de dados digitais, telecomunicações, navegação, operações aéreas e espaciais, automação industrial, medicina moderna, imagem por ressonância magnética, sensores diversos, indústria automobilística, eletrodomésticos, etc. utilizam de forma intensiva os materiais magnéticos. A

área de pesquisa em materiais magnéticos é considerada estratégica pelos países industrializados e há um esforço contínuo de pesquisa tanto nos laboratórios acadêmicos como industriais.

Em muitos aspectos a pesquisa em Magnetismo e Materiais Magnéticos Avançados está passando por uma fase de muita atividade que se deve principalmente ao desenvolvimento de técnicas sofisticadas na área de preparação e caracterização de materiais. A capacidade de controlar o crescimento de filmes finos e multicamadas em escala atômica, que ocorreu na área de semicondutores, se estendeu à área de magnetismo. Este interesse foi motivado principalmente pela indústria multibilionária de armazenamento de informações. Muitos exemplos podem ser citados para ilustrar a relação próxima que existe entre a física de fenômenos fundamentais em magnetismo e suas aplicações tecnológicas. Um deles foi a utilização do fenômeno da Magnetoresistência Gigante que levou menos de 10 anos entre sua descoberta, puramente científica, e sua utilização em produtos tecnológicos. Esta descoberta, que levou à concessão do prêmio Nobel de 2007 a dois de seus descobridores: Albert Fert e Peter Grunberg. Foi um dos trabalhos seminais do que é hoje conhecido como a Spintrônica. A capacidade de sintetizar novas estruturas magnéticas na escala de dimensões nanométricas tem levado ao descobrimento sucessivo de vários fenômenos em magnetismo com amplas possibilidades de utilização na área de magneto-eletrônica ou spintrônica. A possibilidade de transporte eletrônico com polarização de spin trouxe o magnetismo para o domínio dos dispositivos eletrônicos.

O estado da arte nesta área envolve a fabricação controlada e reprodutível de nano-estruturas magnéticas confinadas nas três dimensões. Estas estruturas em escala nanométrica apresentam inúmeros fenômenos que só são explicados com auxílio da Mecânica Quântica. O uso do spin eletrônico vem sendo cada vez mais explorado em aplicações tecnológicas assim como acontece com a sua carga elétrica, que é fundamental para o funcionamento de dispositivos semicondutores. Efeitos quânticos tais como injeção de spins, tunelamento de spins, espalhamento de spins, corrente de spin, efeito Hall de spin, etc. estão cada vez mais próximos de se transformar em aplicações tecnológicas reais. Tecnologias alternativas para processamento e armazenamento de dados, utilizando paredes de domínio magnético em nanofios, vêm sendo propostas. Estas tecnologias criariam a memória universal que serviria tanto para o processamento em tempo real como para o armazenamento não volátil de informações.

A maior parte deste progresso formidável e do interesse crescente pela área de magnetismo se deve à pesquisa realizada na área de preparação de novos materiais e na utilização intensiva de técnicas de caracterização e fabricação. O desenvolvimento de técnicas de alto vácuo propiciou a popularização de métodos de crescimento, antes só disponíveis em grandes laboratórios acadêmicos e industriais do primeiro mundo. Entre estas técnicas destacamentos a Epitaxia por Feixe Molecular (MBE



na sigla em inglês), a deposição utilizando Feixe de Elétrons e a técnica de deposição por Sputtering. Esta última técnica permite o desenvolvimento de processos que podem ser facilmente escalados em nível de aplicação, pois as indústrias utilizam a técnica de sputtering de forma intensiva.

Na direção de desenvolvimento de novos materiais destacamos os esforços no sentido de descobrir materiais com anisotropias magnetocristalinas extremamente baixas ($0,1 \text{ J/m}^3$) e anisotropias extremamente altas (10^7 J/m^3). Também são de interesse materiais que possuem coercividades extremamente baixas ($0,1 \text{ A/m} \sim 10^{-3} \text{ Oe}$) e extremamente altas ($10^6 \text{ A/m} \sim 10^5 \text{ Oe}$), (Obs. $1 \text{ Oe} = 79,6 \text{ A/m}$). Aliados às características magnéticas desejadas os materiais magnéticos devem ter propriedades otimizadas de condução elétrica, de conformação mecânica, devem ser resistentes à corrosão, e possuir propriedades térmicas adequadas. Além disto, os novos materiais devem ser aperfeiçoados para evitar agressão ambiental, devem ser limpos e gastar pouca energia. Uma das aplicações mais promissoras é no desenvolvimento de refrigeradores magnetocalóricos, que poupam energia e evitam o uso de substâncias baseados nos cloro-fluorcarbonos, que destroem a camada de ozônio.

2.1.3. Fotônica

A fotônica lida com processos que estão ligados à geração de luz, sua transmissão, sua detecção, sua manipulação (amplificação, modulação, deflexão, etc por componentes ópticos, fontes de luz (lâmpadas, LEDs, lasers, etc), fibras ópticas e todo o tipo de dispositivo que possa ter seu princípio de funcionamento baseado na interação da luz com a matéria. Trata-se, sem dúvida alguma, de uma tecnologia capacitadora de outras tecnologias, exercendo influência e causando impacto sobre grande fração dos setores industriais, dentre os quais podemos destacar o de manufaturas, de equipamentos para saúde, segurança, telecomunicações, energia, meio-ambiente, biotecnologia e aeroespacial. Como setor industrial, ela engloba as áreas de fibras ópticas, lasers, displays e elementos optoeletrônicos, bem como todas suas aplicações comerciais práticas tais como: comunicações ópticas (telecomunicações), equipamentos médico-odontológicos a laser, sensores e instrumentações ópticas, lasers industriais, mostradores luminosos, etc.

O século 20 foi amplamente dominado pela eletrônica. Neste período, aprendemos a manipular elétrons, levando à produção de dispositivos e capacitando tecnologias. É fácil verificar que as nações mais bem-sucedidas economicamente são aquelas que dispõem de um parque industrial eletrônico forte. O século 21 será, por outro lado, dominado pela fotônica. A analogia se estabelece quando consideramos que a indústria fotônica, hoje, tem posição análoga à indústria eletrônica quando esta esteve em sua infância, na década de 60, quando algumas das tecnologias básicas estavam à dispo-

sição, porém os seus impactos e conseqüências, que hoje em dia tão bem conhecemos, estavam apenas começando a ser percebidos.

Assim, pode-se afirmar, sem equívocos, que a fotônica causará um enorme impacto científico, tecnológico, econômico e social durante as próximas décadas. O leque de produtos e tecnologias associadas à fotônica tem crescido enormemente. São mostradores, usados em televisores, câmeras fotográficas e de vídeo e em telefones celulares, sensores de alta sensibilidade, usados em pesquisa básica, monitoramento de ambientes limpos, medicina e diagnóstico e sistemas de segurança. Além disto, dentre as aplicações com forte impacto econômico, de evidente importância, podemos citar: dispositivos luminescentes e células solares de alta eficiência, lasers industriais para processamento de materiais e as tecnologias de informação e de comunicações - como lasers passíveis de chaveamento ultra-rápido, multiplexadores e demultiplexadores de sinais ópticos e fibras ópticas (sob forma de dispositivos ou de fibras especiais).

Um bom exemplo de produto fotônico é o aparelho de DVD, que possui um laser de semicondutor, um sistema óptico e um foto-detector como seus componentes essenciais. É de conhecimento geral a batalha industrial que se trava nos dias de hoje com relação à tecnologia a ser usada na nova geração de DVDs com alta capacidade de armazenamento. Argumentos fotônicos influenciam os debates sobre qual das tecnologias será utilizada. Uma das aplicações fotônicas mais presentes nos dias atuais é no setor de telecomunicações, onde ela pode prover volumes enormes de tráfego de dados na internet e/ou em outras redes de dados, quando acoplada a sistemas de chaveamento de alta velocidade.

A fotônica está também consolidada em instrumentos e sensores livres de problemas ligados à interferência eletromagnética e picos de tensão de redes elétricas. A Associação para o Desenvolvimento da Indústria Optoeletrônica dos EUA (OIDA) considera que 35% de todos os dispositivos consumidos no país são fotônicos, o que ilustra a extensão do mercado ao qual a tecnologia já foi incorporada. A penetração de produtos e tecnologias baseados em mostradores/imagens em mercados consumidores, majoritariamente TVs com tela de cristal líquido e telefones celulares com câmeras, é evidente. Não é surpresa que as tecnologias fotônicas tenham levado à criação de muitas companhias desenvolvendo aplicações específicas, que vão de componentes para lasers até software para o projeto de novas soluções ópticas. Dentre as mais novas tendências na fotônica, podemos citar o desenvolvimento de novos materiais. Neste contexto, a fotônica proporcionará dispositivos, componentes e produtos menores, mais rápidos e mais baratos, que consumirão menos energia e terão alta funcionalidade.



A disponibilidade e aplicabilidade das tecnologias fotônicas depende da contribuição da física, da química, da ciência de materiais, das ciências da vida e de diversas áreas da engenharia. Isto caracteriza a fotônica como multidisciplinar, de forma que novas aplicações demandam habilidades que ultrapassam as fronteiras de vários e diferentes departamentos tradicionais em universidades e institutos de pesquisa. Por exemplo, a biofotônica é a combinação de disciplinas da biologia e da fotônica, com aplicações nas áreas de ciências da vida, medicina agricultura e meio-ambiente. Para o Brasil, em particular, que é um país com várias fronteiras agrícolas e que se torna cada vez mais um importante provedor de alimentos para o mundo todo, a importância desta área é indiscutível.

Além de permear várias atividades científicas, tecnológicas e econômicas, pode-se ver que a fotônica é uma atividade que estimula outras tecnologias e atividades, já que elimina tecnologias mais convencionais, e capacita radicalmente novas gerações de produtos e processos já existentes a dominar os mercados de consumo. Mais uma vez, tomando o exemplo do armazenamento óptico de dados, esta tecnologia mudou os paradigmas dos setores de entretenimento e computação domésticos (via DVD) e dos sensores de imagem digitais, baseados em dispositivos de estado sólido, que encontraram uso maciço nas câmaras digitais. Estas, por sua vez, eliminaram quase que por completo o uso de filmes fotográficos.

Estas tecnologias com caráter desbravador podem também capacitar novas classes de produtos e mercados, até então inacessíveis, tal qual computadores portáteis, telefones celulares ou imageamento digital. Novas indústrias e companhias são fundadas e crescem, aquecendo o mercado e gerando novos empregos. Entidades econômicas (companhias, indústrias, governos) previamente existentes podem competir pelo mercado se perceberem as mudanças e aproveitarem novas oportunidades. Mas para isto, é necessário agir e se adaptar rapidamente, o que, infelizmente, ainda não faz parte da cultura brasileira. As entidades econômicas que não o fazem acabam ficando obsoletas em um curto intervalo de tempo, declinando e, por fim, extinguindo-se. No caso de governos, estes passam a ser compradores de tecnologia importada, sacrificando recursos que poderiam ser utilizados para investimento no bem-estar de sua população.

2.2. Materiais para sensores

2.2.1. Introdução

O tema de sensores é extremamente vasto, abrangendo várias áreas científico-tecnológicas e merecendo por si só um estudo estratégico exclusivamente dedicado ao assunto.

Sensoriamento óptico é uma tecnologia-chave para as mais importantes tecnologias usadas em nossas vidas. Por exemplo, sem a existência de procedimentos de medida com alta resolução óptica não seria possível observar o desenvolvimento da miniaturização de estruturas sobre chips semicondutores e discos rígidos, que determinam a velocidade das mudanças em nossa sociedade, baseada na informação.

Mas também coisas banais, que simplesmente fazem a nossa vida mais confortável, têm relação com sensoriamento óptico. Já é uma realidade, sistemas que dispensam o motorista para conduzir o automóvel através da rota, repleta de outros automóveis e de sinais de tráfego. Outra aplicação bastante presente é na vigilância, sistemas de segurança e controle de aparelhos domésticos.

A profilaxia médica foi revolucionada pelo sensoriamento óptico. Parâmetros de saúde de pacientes são medidos em casa, e os dados são enviados pela rede para o médico, no hospital ou em seu consultório. Análise óptica de materiais biológicos depositados sobre arranjos de bio-chips informa pronta e objetivamente sobre o estado de saúde de um indivíduo, proporcionando uma proposta terapêutica altamente personalizada e otimizada.

O monitoramento do ar, da água, do solo e da qualidade de alimentos, assim como da redução de poluentes são tarefas essenciais para que possamos manter o meio ambiente com a mínima qualidade para as gerações futuras. Nestes campos, as técnicas de medidas ópticas (inclusive remotas), contribuem de forma decisiva.

Sensores magnéticos (e elementos sensores) encontram aplicações em diversas áreas da engenharia mecânica, em projetos de locomotivas e automóveis, como detectores de posição, de velocidade, intensidade de campo magnético, de tintas e de distâncias.



2.2.2. Silício Poroso

O silício poroso é obtido a partir do silício monocristalino, através de um processo de anodização em solução aquosa de ácido fluorídrico. Tem como principais características emissão fotoluminescente na região do visível do espectro eletromagnético à temperatura ambiente e elevada razão área-volume. A camada de silício poroso formada é uma complexa estrutura esponjosa, composta por regiões de Si monocristalino, de dimensões que variam da escala micrométrica à escala nanométrica (denominados cristalitos), por poros com diâmetros que também variam nestas escalas de tamanho e por uma superfície interna tipo amorfizada. Os cristalitos de Si confinados nesta estrutura podem ser interconectados por Si ou por pontes de sílica. Por esta razão, o silício poroso é considerado um material particular, não sendo enquadrado nem como silício monocristalino convencional, nem como um material amorfo. Deve-se ressaltar que o Si monocristalino, com um gap indireto, tem eficiência quântica de emissão banda a banda desprezível na região do infravermelho. Já o silício amorfo hidrogenado apresenta uma alta eficiência quântica a baixas temperaturas, mas que decresce bruscamente, tendendo a zero na temperatura ambiente.

No entanto, a aplicação do silício poroso não se restringe exclusivamente aos dispositivos de emissão de luz. O silício poroso tem entre suas características estruturais uma elevada superfície interna e elevada atividade química, podendo-se explorar efeitos de adsorção. Estas características transformam o SP em um material interessante para aplicação em sensores de umidade [And90], gases e vapores químicos [Wat96, Boao0]. Alterações das propriedades ópticas relacionadas à adsorção de diferentes substâncias químicas aumentam sua potencialidade como sensor óptico de gases [Zan97]. Entretanto, conclui-se, através dos resultados apresentados na literatura, que tais dispositivos necessitam ainda de ser aprimorados a fim de melhorarem suas características de sensibilidade e de estabilidade para tornarem-se viáveis comercialmente.

2.2.3. Fibras ópticas microestruturadas

As fibras ópticas há muitos anos vêm sendo aplicadas em uma vasta lista de tipos de sensores, como, por exemplo, giroscópios, magnetômetros, sensores ópticos, sensores de temperatura, acelerômetros, sensores de deformação mecânica (“strain gauge”), sensores de nível e de corrente elétrica. Nos últimos anos, uma nova classe de fibras ópticas, as fibras ópticas microestruturadas, têm sido desenvolvidas, levando a possibilidades de aplicação como sensores com mais alta sensibilidade do que aqueles feitos com fibras ópticas comuns, ou até mesmo a aplicações para as quais as fibras comuns não servem, como aquelas que exploram a microestrutura do novo tipo de fibras ópticas.

Fibras ópticas microestruturadas constituem o mais recente desenvolvimento na área de guias de onda de longo alcance, sendo responsáveis por um renascimento das atividades de pesquisa em fibras ópticas [Bjao3, Knio3, Ruso7]. Estas fibras basicamente consistem de estruturas cilíndricas nas quais buracos ou inserções de escala micrométrica circundam o núcleo e correm ao longo de todo o comprimento da fibra. Uma classe muito importante de fibras microestruturadas são as chamadas fibras de cristal fotônico (PCF), em que os buracos ou inserções são numerosos e se organizam formando uma matriz regular.

PCF's de núcleo sólido guiam a luz por reflexão interna total, já que a presença de buracos na casca reduz o índice de refração desta região com relação ao núcleo. Dependendo do design específico, fibras deste tipo podem possuir núcleos de diâmetros bem reduzidos ($\sim 1 \mu\text{m}$), que confinam enormemente a luz. No caso de PCF's, pode-se também projetar fibras com núcleos que apesar de enormes ($\sim 40 \mu\text{m}$ de diâmetro) guiam a luz em um único modo.

PCF's de núcleo oco guiam a luz devido à existência de um *bandgap* fotônico na casca microestruturada que confina a luz no núcleo. A propagação guiada em um núcleo de ar, ou mesmo evacuado, é atraente devido à possibilidade de se obterem fibras com não-linearidades ~ 1000 vezes inferiores às de fibras comuns [Ouzo3] e perfis de dispersão singulares decorrentes unicamente da existência do *bandgap* na casca (já que a dispersão do ar é desprezível).

Além das características singulares de fibras microestruturadas, o fato de que há superposição entre a luz e os buracos faz com que inúmeras aplicações relacionadas ao preenchimento destes com diferentes materiais sejam possíveis. Exemplos proeminentes de tais aplicações são sensoriamento de biomoléculas em solução [Jeno4] ou de gases [Rito4] com altíssima sensibilidade. Um senso de gases poluentes também foi demonstrado [Mono1]. A grande variação do índice de refração de polímeros com temperatura (sensor de temperatura), por exemplo, foi explorada em uma série de experimentos [Eggo1].

As fibras ópticas microestruturadas podem ser adaptadas para monitorar a deformação de uma estrutura em três dimensões. Isto é feito usando uma única fibra com múltiplos núcleos, em que não há, inicialmente, acoplamento entre estes. Quando a fibra é deformada, a tensão diferencial induzida entre os núcleos resulta em uma diferença de fase entre os feixes de luz que se propagam em cada um dos núcleos. Assim, qualquer deformação/encurvamento da fibra pode ser detectado analisando-se franjas de interferência no campo distante [Bla98].



A inserção de material em PCFs de núcleo oco é ainda mais interessante do que em PCFs de núcleo sólido. Isto porque é possível se inserir material seletivamente no núcleo oco, de forma que a luz se propague diretamente por este. Neste caso, a microestrutura da casca tem um papel fundamental. Como o índice de refração efetivo desta pode ser bastante baixo (~ 1), o material inserido no núcleo pode ter índice igual ou inferior ao da sílica e ainda assim permitir guiamento por reflexão interna total.

Sistemas foram desenvolvidos visando à aplicação de PCFs preenchidas para sensoriamento óptico de fluxo de soluções [Coro06]. Um sensor de pressão baseado nestas fibras também foi proposto recentemente. Aparato semelhante foi utilizado como detector de concentrações muito baixas de determinadas moléculas orgânicas [Smoo07].

Para cada uma das aplicações mencionadas, a fabricação de fibras microestruturadas com determinadas características foi necessária. Para futuras aplicações, para diferentes áreas de sensoriamento, isto continuará sendo verdade.

2.2.4. Materiais para sensores não fotônicos

Pesquisas de novos fenômenos e aplicações de magnetismo e materiais magnéticos constituem uma das áreas de atividades mais férteis e mais ativas tanto nas universidades como nas indústrias em todo o mundo. O mundo contemporâneo está baseado em muitos aspectos na automação que utiliza os materiais ferro- e ferrimagnéticos em quase todas as áreas de atividades, tais como:

- Geração e transformação de energia elétrica; aparelhos domésticos;
- Motores elétricos de alta potência, motores elétricos miniaturizados;
- Armazenamento de dados de alta densidade;
- Sensores automobilísticos etc...

Na área de sensores, os materiais de maior interesse são os ímãs permanentes, cujo mercado mundial é da ordem de US\$ 10 bilhões, e que fomenta um mercado de bens que deles dependem que é uma ordem de grandeza maior. Os ímãs permanentes são tipicamente usados de duas maneiras, como atuador e como fornecedor do campo magnético de polarização. No primeiro modo de operação, o magneto é o próprio atuador, que pode funcionar no regime de movimento linear, onde o sensor detecta a proximidade do magneto, ou no regime de movimento de rotação, onde o sensor detecta a posição e a velocidade angulares do magneto (em forma de anel). Em [Cge10] podemos encontrar ilustrações de ímãs permanentes sendo usados nos modos linear e de rotação.

Os magnetos permanentes possuem uma vasta gama de aplicações que variam de brinquedos e ímãs de geladeiras a motores, geradores, autofalantes, microfones, sensores e em dispositivos de alta tecnologia como os dispositivos de armazenamento de dados. Algumas propriedades são fundamentais para os magnetos permanentes, tais como: alta remanência (M_r), alta coercividade (H_c) e alta retangularidade na curva de histerese. Estas propriedades são sintetizadas pelo chamado produto energia $(BH)_{\max}$ (que é a capacidade que o magneto possui de armazenar energia magnetostática na região fora de seu volume). Quanto maior for esta grandeza mais forte será o campo magnético gerado e menor será o material necessário para produzir fisicamente o magneto. O valor máximo do produto energia é dado por $\mu_0 M_r H_c$ onde M_r é a magnetização remanente e H_c é o campo coercivo. Atualmente, os materiais de alta anisotropia à base de terras-raras são os que apresentam maior produto $(BH)_{\max}$ e suas maiores limitações são a magnetização relativamente pequena e sua sensibilidade a altas temperaturas.

A descoberta, na década de 80, das interessantes propriedades magnéticas das ligas de Nd-Fe-B resultou de trabalhos empíricos de indústrias japonesas e americanas. Nestas ligas o papel dos elementos de terra-rara é produzir uma grande anisotropia magnética, responsável pelo alto valor de H_c , enquanto que a grande magnetização é devida à forte interação ferromagnética entre os íons de Fe. Atualmente, o melhor magneto permanente possui composição $Nd_2Fe_{14}B$. Pesquisas recentes apontam o enorme potencial dos magnetos permanentes baseados na liga $Fe_{65}Co_{35}+X$ (onde X é um aditivo), por ser muito leve, possibilitando aplicação em dispositivos de alta portabilidade. São ainda exemplos de excelentes materiais para fabricação de ímãs permanentes as ligas de $Sm_2Fe_{17}N_3$ e Sm_2Co_{17} .

2.3. Materiais para dispositivos

2.3.1. Introdução

Um estudo comparativo dos efeitos da globalização sobre a pesquisa em materiais nos Estados Unidos, levado a efeito no ano 2000 [Como5], prediz que a pesquisa em eletrônica continuaria focada no desenvolvimento de materiais e processos a ser conduzido globalmente através de colaborações internacionais entre organizações industriais. O documento sugere ainda que para assegurar a supremacia americana em um mercado cada vez mais global de dispositivos de tecnologia de informação baseados em semicondutores, seria fundamental assegurar a continuação de uma política de



fomento à parceria da indústria com academia e governo, com o estabelecimento de centros focais de pesquisa nas universidades.

Na transição de dispositivos para a faixa inferior a 100 nm, o painel estimou que enquanto os EUA contribuiriam para os avanços futuros em pé de igualdade com outros países, sua liderança estaria assegurada nas áreas de semicondutores compostos (GaAs, GaAlAs) e de semicondutores de gap grande (SiC), para uso em dispositivos de potência e transmissores de microondas. A Europa dividiria com os EUA a liderança em sistemas elétricos de potência e aplicações de transistores de potência para controles motorizados.

Projetos em andamento compreendiam processos avançados de arquitetura de transistores para a plataforma de 45 nm com plantas industriais voltadas para a fabricação de pastilhas de 300 mm. Outro objetivo importante era assegurar o domínio de equipamento de litografia de alta resolução e de materiais de alta constante dielétrica e de baixa constante dielétrica [Med]. Os mais recentes desenvolvimentos nas opções tecnológicas para o nó de 45 nm envolvem modificações na arquitetura e geometria dos MOSFETs e a substituição de materiais tradicionais por outros que atendam às mais restritivas demandas feitas quanto à estabilidade térmica, mobilidade de portadores nos canais e características dielétricas [Velo7].

A contínua redução de escala dos dispositivos CMOS traz desafios importantes para o projeto de futuros transistores. Para manter a velocidade de chaveamento a tensões cada vez menores, o comprimento do gate deve ser dramaticamente reduzido, o que por sua vez contribui para o aumento de sua resistência. Para contrabalançar isso, materiais de baixa resistividade, como Si-Ge, devem ser usados, em especial para aplicações em altas frequências. Ao mesmo tempo, a redução na espessura da camada de óxido no gate leva a um aumento na corrente de tunelamento do gate para o substrato, fato que requer a introdução de materiais dielétricos de “alto-k”.

Finalmente, a continuada diminuição na espessura da região fonte/dreno resulta em um aumento da resistência em série, limitando a difusão. No início da década, dispositivos CMOS de geometria planar convencional não apareciam como solução viável no limite inferior a 50 nm, o que levou à consideração propostas de geometrias inovadoras para a construção dos MOSFETs [Ardo2]. Em especial, operação a baixas temperaturas se apresenta como uma possível direção futura para a solução do problema de escala em plataformas plenamente operacionais no limite nanométrico [Den07].

2.3.2. Dispositivos eletrônicos

Materiais para uma nova eletrônica

As propriedades dos materiais disponíveis sempre foram fatores determinantes do progresso tecnológico. Assim, muito embora o primeiro transistor tenha sido fabricado a partir de um cristal de germânio [Ge10], foi o silício que veio a predominar na indústria eletrônica durante os últimos quarenta anos. Apesar ter características elétricas inferiores às do germânio, o ritmo do subsequente avanço tecnológico se baseou na exploração das propriedades especiais da interface silício-(óxido de silício) [Hoe06]. E, de fato, o contínuo progresso no desenvolvimento de novas gerações de componentes, com o consequente aumento na escala de integração, só se fez possível pelo permanente investimento em várias áreas e, em especial, na ciência e engenharia de materiais.

Cada novo requisito de desempenho mais elevado, cada nova especificação técnica no limite do já estabelecido, demandava o desenvolvimento de novos materiais com as características necessárias, com toda a escala subjacente de modificação de métodos de preparação, definição de novos parâmetros de operação, e a análise de estabilidade e da compatibilidade de diferentes materiais atuando em concerto. Os sucessivos estudos ITRS mapearam ao longo do caminho as etapas necessárias de investimento em conhecimento fundamental e tecnologias pré-competitivas, identificando os possíveis gargalos tecnológicos de médio e longo prazo, e distinguindo dentre eles os casos em que o conhecimento básico já era disponível, mas o domínio tecnológico era ainda incerto, e aqueles outros em que tanto o controle da tecnologia quanto os fundamentos básicos eram considerados duvidosos na escala de tempo requerida para a continuada obediência à lei de Moore. Eventuais dificuldades deste tipo, identificadas no futuro, serviam desde já como alerta para a necessidade imediata de investimentos seletivos. Com isso, o domínio do silício na indústria eletrônica moderna parece assegurado por pelo menos mais uma década.

Transistores e a tecnologia CMOS

A revolução da tecnologia de informação se deveu em grande parte a algumas características peculiares do transistor. Dentre elas, merecem destaque:

- a) Um “ganho” elevado, o que permite a um único transistor determinar os níveis lógicos da resposta após cada estágio e direcionar múltiplos transistores subsequentes no circuito eletrônico, e



- b) A capacidade de isolar a saída do dispositivo de eventuais flutuações do sinal de entrada.

É isso que torna possível combinar sinais com amplitude e características irregulares, mas associados a um bit específico de informação, com outros sinais igualmente contendo flutuações, para resultar não apenas em funções lógicas confiáveis, mas também em um sinal de saída que mantém sua integridade em um ambiente pleno de ruídos.

Outros dispositivos, como diodos túnel ressonantes (RTDs) podem também apresentar ganhos; no entanto, por serem dispositivos de dois terminais não têm capacidade de isolamento do ruído de entrada e, portanto, não podem acumular um sinal de saída robusto, encontrando assim uso limitado em operações lógicas [Como2].

Hoje, a tecnologia dominante na fabricação de microprocessadores e micro controladores é a CMOS, que é também usada em outros circuitos lógicos digitais e analógicos, como em transdutores para processamento de dados e imagens e para comunicação. Seu funcionamento se baseia no uso de dois transistores de efeito de campo tipo metal/(óxido de semicondutor), simetricamente dispostos e complementares em suas funções pelo tipo de dopagem (um, tipo p, o outro, tipo n). O metal funciona como porta lógica, colocada sobre a camada isolante do óxido, a qual, por sua vez recobre o semicondutor.

Dessa forma, as características mais importantes dos dispositivos CMOS são sua elevada imunidade a ruídos e o baixo consumo de energia quando em modo estático. Isso, mais a facilidade com que dispositivos assim construídos podem ser fabricados em alta compactação, tornou CMOS a tecnologia dominante produção de chips já por várias décadas. De fato, particularmente para o caso de computadores portáteis ou qualquer aparelho que se utilize de baterias, uma de suas especiais vantagens comparativas está em seu menor consumo de energia, já que apenas um dos tipos de circuitos (polaridade negativa ou positiva) que constituem um dispositivo CMOS se encontra acionado em qualquer instante de tempo [Ramo6].

Semicondutores compostos

Embora o domínio do silício seja absoluto na indústria de semicondutores, há sempre nichos especializados que podem ser explorados pelo uso de materiais que apresentem vantagens específicas, tais como maior mobilidade de portadores e menor ruído. Assim, por exemplo, semicondutores compostos como fosfeto de índio (InP), arseneto de gálio (AsGa) e nitreto de gálio (GaN), que têm gap direto e, portanto, alta mobilidade para elétrons, se constituem em materiais de escolha para

dispositivos que envolvam emissão de luz e/ou aplicações em telecomunicação [Cge10]. Esse é um mercado que cresceu enormemente com o surgimento da tecnologia dos aparelhos telefônicos celulares, e que tende a se tornar ainda maior com a convergência digital e a universalização no uso das redes sem fio [Quio4].

Enquanto a compactação de dispositivos à base de silício se aproxima de fortes limitações físicas e tecnológicas, o aumento da demanda por semicondutores compostos tem levado a uma redução mais acentuada do “custo por função” para esses materiais. Ao mesmo tempo em que decrescem as dimensões para o silício, as tensões de ruptura diminuem. No entanto, para a tecnologia de radiofrequências, os requisitos para tais tensões podem ser tão altos quanto 20 Volts. Se, além disso, há necessidade de dispositivos que operem acima de 100 GHz e tenham maior robustez a radiações aleatórias, AsGa passa ser o material adequado [Quio4].

Em uma época de demanda crescente por transmissão pela internet de conteúdo de áudio e vídeo, os dados podem ser levados ao consumidor por ondas guiadas em cabos ou fibras de vidro ou através de transmissões abertas ou codificadas pelo espaço livre. Muito embora o intervalo de frequências entre 10-100 GHz seja de extrema importância para aplicações comerciais ou militares, poucos sistemas integrados já foram desenvolvidos com esse objetivo, um cenário que pode ser alterado com a introdução dos transistores bipolares de heterojunção (HBTs), uma tecnologia adequada para a integração em grande escala (até 10.000 transistores/chip) levando a dispositivos de desempenho superior [Rag].

Desafios atuais da eletrônica baseada no silício

A predominância da indústria microeletrônica baseada em semicondutores tem repousado em sua permanente capacidade de introduzir a intervalos regulares inovações que possibilitam simultaneamente uma maior funcionalidade aos dispositivos, e uma redução dos custos por unidade de informação armazenada ou processada. A questão de por quanto tempo mais à frente será possível satisfazer as previsões da Lei de Moore será respondida pelo sucesso ou fracasso da indústria em continuar a diminuição do tamanho nominal dos dispositivos.

Embora transistores de menor tamanho consumam menor energia quando em operação, eles costumam apresentar maior corrente “de fuga”, levando a um desperdício de energia quando em estado de desativação (off). Assim, maior número de componentes com maior capacidade de processamento por dispositivo representa maior consumo de energia e, portanto, maior geração de calor no



chip como um todo, o que ultimamente pode vir a ser o fator limitante do nível de integração de componentes possível de ser alcançado com base na tecnologia convencional [Hiro5, Stoo6].

Tem sido mencionado que caso venham a ser mantidas as atuais tendências de aumento da frequência de operação dos processadores e de integração de um número exponencialmente crescente de transistores por chip, em breve a potência consumida por um microprocessador de alto-desempenho chegará a ser da ordem de 10 kW, com uma densidade superficial de cerca de 1000 W/cm², valor equivalente a aquele observado para a superfície do nariz de um foguete em curso [Wono6].

Consideração talvez de ainda maior relevância venha a ser o fato de que as dimensões físicas dos componentes e de sua mútua separação em mesmo chip começam a alcançar os limites nanoscópicos, ou seja, aquele em que efeitos quânticos associados à estrutura mais fundamental da matéria, passam a ser dominantes [Puso8]. A própria equipe técnica da Intel, uma das empresas líderes na fabricação e desenvolvimento de circuitos integrados, prevê que até 2015 a tecnologia terá alcançado os limites atômicos, além do qual os efeitos térmicos tornarão desvantajosa a tecnologia de transistores baseados no silício [Ramo6].

Na verdade, a preocupação permanente da indústria do silício não se restringe a buscar a redução das dimensões físicas dos dispositivos enquanto aumentando sua capacidade de processamento; ao mesmo tempo, ela deve ser capaz de sustentar um crescimento exponencial do nível de integração de componentes em um mesmo chip, enquanto limitando o consumo de energia e minimizando as perdas que levam a efeitos térmicos deletérios. O que as empresas líderes se vêem forçadas então a fazer é dedicar parte de seus recursos à exploração de tecnologias alternativas e ao desenvolvimento de novos materiais que possam fornecer mesmo que apenas parte das respostas necessárias nesse período de transição tecnológica [Hiro5].

Isso inclui desde projetos inovadores na busca de estruturas diferentes (como transistores de 3-portas, de menor consumo) a inovações incrementais na engenharia da compactação dos dispositivos – como melhor qualidade de solda para redução da espessura dos contatos e diminuição da separação entre elementos ativos – e progressos na área de novos materiais. Grande atenção tem sido dada nos últimos anos aos materiais dielétricos, tanto de alta quanto de baixa constante dielétrica: os primeiros podem reduzir a corrente de fuga por um fator de 100 relativamente ao dióxido de silício, enquanto os segundos permitem o uso de trilhas de conexão cada vez mais estreitas.

Mas uma etapa fundamental e preliminar no processamento continua a ser a litografia óptica, da qual resulta o perfil binário contendo a informação sobre o substrato a ser preservado e o padrão

do circuito a ser subseqüentemente tratado. De modo a reproduzir com perfeição as estruturas complexas que caracterizam cada transistor, e as múltiplas conexões que devem ser feitas entre os milhões de transistores em um dado circuito, as etapas litográficas de transferência dos padrões devem ser repetidas dezenas de vezes, com perfeito alinhamento em cada uma delas. Dessa maneira, o processo litográfico corresponde a tipicamente 30% do custo de manufatura.

A litografia mais avançada de hoje permanece confinada à região de 400 nm a 650 nm, ainda no visível, mas o controle da litografia no extremo-do-ultravioleta (EUV) pode representar um avanço qualitativo importante [Hiro05]. Na tecnologia CMOS, ao passar da faixa de 120 nm para 32 nm há uma mudança substancial no regime de tratamento litográfico. Mesmo admitindo que o comprimento de onda permaneça o mesmo, a cada redução de escala o processamento se aproxima cada vez mais do limite teórico de resolução óptica.

Assim, técnicas litográficas como RET (Resolution Enhancement Techniques) e OPC (Optical Proximity Correction) sofreram sucessivos aperfeiçoamentos para assegurar a fidelidade na reprodução dos detalhes mais finos da máscara de interesse [Troo06]. Radiação EUV tem um comprimento de onda de 13,5 nm, capaz de definir máscaras com resolução abaixo de 10 nm, mas como é absorvida pelo vidro, espelhos precisam ser usados no lugar de lentes, criando o seu próprio conjunto de desafios técnicos para o desenvolvimento de uma nova sistemática de produção de máscaras [Tre05a].

Em uma análise inicial do problema, o custo estimado para a transição a esse novo patamar aparece como extremamente elevado, de tal forma que as empresas líderes vêm adiando seus investimentos nesse sentido pelo tempo que lhes é possível [Fee05].

2.3.3. Materiais com alta constante dielétrica (“high-k”) × baixa constante dielétrica (“low-k”)

Com a redução da escala para o limite abaixo dos 90 nm, novos materiais tiveram de ser introduzidos nos processos de fabricação dos componentes. O cobre substituiu o alumínio e dielétricos de high-k se mostraram isolantes mais eficientes. Mas essas mudanças não se fizeram sem conseqüências sobre a integridade estrutural das interconexões dos circuitos integrados (CIs) durante as etapas de processamento e manufatura final. Materiais diferentes têm naturalmente distintas propriedades termomecânicas, de modo que a confiabilidade de um novo metal, liga ou blenda polimérica precisa ser exaustivamente ajustada antes de sua integração em um CI. Por exemplo, no uso de cobre como material de baixa constante dielétrica em trilhas estreitas, problemas como moldagem, solda



e fixação tiveram de ser um a um solucionados antes que a produção em caráter regular de CIs com trilhas de cobre low-k se tornasse possível [Vano7].

A necessidade cada vez maior de compactação dos dispositivos microeletrônicos traz a urgência de desenvolvimento de novos materiais com propriedades mecânicas satisfatórias e constantes dielétricas adequadas a cada função: existem demandas – à primeira vista – contraditórias, por materiais “high-k”, isto é, com constantes dielétricas elevadas, e por outros, “low-k”, de menor constante dielétrica que os atualmente usados nas interconexões [Cge10]. Os primeiros são essenciais para possibilitar que componentes de um mesmo dispositivo, a cada nova geração separados por distâncias ainda menores, possam armazenar grandes densidades de carga sem perda apreciável, enquanto os segundos se fazem necessários para o transporte eficiente de corrente em trilhas cada vez mais estreitas.

O desafio fundamental ao dobrar o desempenho é o do limite prático para a densidade de potência: como reduzir perdas (essencialmente por calor) enquanto compactando número crescente de transistores de menor tamanho em dimensões cada vez menores? Os dielétricos usados na porta (‘gate’) de um transistor devem ter uma espessura mínima, abaixo da qual o isolamento deixa de ser efetivo, com um número inaceitável de elétrons escapando. Embora já tenha sido demonstrada a viabilidade da tecnologia atual para reduzir a espessura a 1,2 nm (o equivalente a cinco camadas atômicas), têm sido exploradas novas soluções em termos de dielétricos não baseados em silício de alta constante dielétrica. Esses dielétricos levaram a uma redução da corrente de fuga por um fator maior que 10.000; no entanto, por não serem tais materiais compatíveis com o silício, sua incorporação nos componentes com a concepção atual demanda toda uma nova tecnologia de manufatura [Ramo6].

A redução da espessura da camada de óxido convencional para cerca de duas camadas atômicas (ou seja, da ordem de 7 Å) não aparece como uma solução viável, devido a problemas como corrente de fuga e ao fato de que as propriedades da interface não se mantêm invariantes com a redução da escala, o que leva, por exemplo, ao aparecimento de armadilhas para portadores [Cge10].

Materiais com maior valor de constante dielétrica, como óxidos metálicos, como o óxido de zircônio (ZrO_2), óxido de titânio (TiO_2), óxido de tântalo (Ta_2O_5) e o óxido de háfnio (HfO_2), quando em espessuras tão delgadas mostram instabilidades em processos CMOS ao serem usados em contato com silício. Enquanto a corrente de fuga no gate aumentou em cerca de 100 vezes nas últimas três gerações de transistores, a solução atualmente encontrada envolve o uso combinado de materiais high-k com uma maior espessura da camada isolante [Boho7]. Finas camadas de nitretos óxidos podem ser uma solução para uso em tecnologias nascentes [Wono6].

Deve ser observado, no entanto, que em transistores de efeito de campo convencionais, tanto a fuga de corrente entre fonte e dreno quanto o tunelamento são controlados pelo nível de dopagem do canal, o que não se faz mais possível em componentes abaixo do limite de 100 nm [Won06] [Cge10].

Outro problema surge como resultado da contínua redução das dimensões dos componentes eletrônicos: o transporte de carga em trilhas estreitas de um dado material pode ser substancialmente diferente daquele observado em suas propriedades de volume [Der07], criando problemas concretos sobre a arquitetura das interconexões [Cge10]. Para fios com espessura menor que 100 nm, o espalhamento nas interfaces e em irregularidades na estrutura pode se tornar um efeito dominante, levando a um crescimento exponencial da resistividade do cobre com o inverso da largura da trilha. Assim, a resistência de linha de um componente de 32 nm é estimada em cerca do dobro daquela observada para um componente semelhante fabricado na tecnologia de 45 nm [Ale06].

O estado da arte: uso de materiais de alta constante dielétrica (“high-k”)

A tecnologia CMOS de 65 nm foi estabelecida em uma rápida conversão da arquitetura anterior de 90 nm [Ram06], sendo o desafio de preparar dispositivos com dimensões da ordem de 45 nm superado pelo desenvolvimento de novas técnicas de deposição de junções e de controle das características da camada de dopante [Lif07].

No início de 2009, a Intel anunciou investimentos da ordem de US\$ 7 bilhões para o começo imediato e produção, ao longo dos próximos dois anos, da nova linha de processadores de 32 nm (denominados de Westmere, ver [Cge10]), que deverão ser mais rápidos, menores e mais eficientes do ponto de vista de consumo de energia [Smio9].

Os transistores correspondentes, que são baseados em materiais de high-k de segunda geração e gate metálico, representam uma sobrevida da lei de Moore para a tecnologia CMOS, com o uso de litografia de imersão para as camadas críticas e uma combinação no uso de cobre e materiais de low-k nas camadas de interconexão [Int09]. Seu desenvolvimento mostra o sucesso da estratégia de “inovar, depois encolher”, adotada pela INTEL em anos recentes: sua micro-arquitetura segue de maneira muito próxima a dos transistores de 45 nm da geração anterior, porém agora compactados de maneira mais eficiente [Int09a].



Alternativas ao silício

Ocasionalmente, novas necessidades técnicas podem ser atendidas pelo uso inovador das propriedades de materiais já conhecidos. Um exemplo disso é o fato de que materiais de alto-k recentemente desenvolvidos reabriram a possibilidade de uso do germânio como um material para canal em MOSFETs, o que por sua vez fez com que o uso de sucessivos gates de Ge/alto-k tenha sido apontado como extremamente promissor em futuros dispositivos nanométricos [Kam08].

Em um recente estudo comparativo sobre a evolução do desempenho de MOSFETs nos próximos anos [Zeio8], o parâmetro-chave foi definido como sendo o atraso intrínseco do transistor $\tau = CV/I$, onde C é a capacitância total (incluindo efeitos capacitivos parasitários) do dispositivo, V é a tensão de alimentação e I a corrente de saturação no dreno; quanto menor o atraso, melhor o desempenho do MOSFET. No ITRS 2007, os transistores foram classificados em três tipos, de acordo com a necessidade lógica: alto-desempenho (HP; usado em sistemas estacionários de alto desempenho e operando em alta frequência, como servidores e microcomputadores), baixo consumo quando em espera (LSTP; preservam tempo de vida de baterias de dispositivos móveis, como celulares) e baixo consumo quando em operação (LOP; dispositivos móveis de melhor desempenho, como notebooks) [Cge10].

Há razões para acreditar que a melhoria do desempenho de τ deva começar a se desviar de sua taxa histórica de 17%/ano, o que se deve basicamente aos seguintes fatores:

- Reduções adicionais da escala dos transistores devem levar a efeitos opostos de crescimento simultâneo de V e de I , como resultado do aumento da corrente de fuga;
- Efeitos de “estreitamento de canal”, como resultado do abaixamento de barreiras pela redução de escala, levando a aumento da corrente de fuga;

Aumentos adicionais de V requerem um maior teor de dopagem do canal, o que leva a uma degradação da mobilidade dos portadores e aumento da corrente de fuga;

Com a redução de escala, aumentam os efeitos de flutuação na dopagem e se tornam crescentes as contribuições das irregularidades na definição dos limites das trilhas, levando a uma variação estatisticamente relevante no valor de V [Zeio8].

A despeito das muitas dificuldades enfrentadas pela tecnologia CMOS em termos das demandas sobre materiais em sucessivas reduções de escala, a expectativa dos ITRS é que ela possa ser leva-

da ao limite do nó de 22 nm, e um pouco mais além. Para isso, os desafios a serem vencidos no controle eletrostático dos canais, correntes off mais baixas e maiores correntes on serão necessárias. Novos transistores, em novas arquiteturas, terão de ser concebidos, com boas características elétricas para comprimentos do gate na faixa de 10-25 nm. Simulações numéricas sugerem que MOSFETS à base de silício podem ser ainda funcionais no limite de 2 nm, de modo que é razoável supor que a tecnologia CMOS deverá ser capaz de conviver com o novo paradigma nano por um bom tempo ainda [Riso6].

Em um horizonte de longo prazo, as inevitáveis mudanças de paradigma tecnológico devem levar à exploração de propriedades ainda não totalmente conhecidas de materiais novos e, em sua maioria, artificialmente produzidos. É sabido que ao longo da próxima década as geometrias de processamento alcançarão os limites físicos das dimensões atômicas, quando efeitos térmicos eventualmente tornarão antieconômicos esforços de redução ainda maior na escala: enquanto ainda seja possível produzir dispositivos CMOS em tais dimensões, eles não necessariamente operarão de maneira mais eficiente ou serão mais baratos para produzir que os da geração antecedente.

O limite nanoscópico

A combinação de características como paralelismo, computação em ponto flutuante e hierarquia de privilégios conferem inovações na microarquitetura de dispositivos que estendem a capacidade inovadora da indústria com base na tecnologia Si/CMOS [All]. Embora já sejam claros os limites temporais do paradigma de uma eletrônica exclusivamente baseada no silício, é ainda muito arriscado assegurar qual daquelas tecnologias hoje apontadas como possíveis alternativas se tornará a dominante dentro de 10 a 15 anos. Mesmo assim, há indicações de que dentro de um seletor número de opções de componentes nanoeletrônicos, moléculas orgânicas, nanotubos de carbono, e processamento à base de elétrons individuais poderão estar na tecnologia subjacente à futura geração de novos microprocessadores [All].

Muito embora o impacto da nanotecnologia deva ser revolucionário nos processos tecnológicos além dos 32 nm, nos próximos anos, ainda de transição, as aplicações nanotecnológicas mais significativas se darão provavelmente nas áreas de displays de baixo-custo e de memórias [Doe08]. De fato, os primeiros mercados a adotarem o novo paradigma devem ser aqueles hoje limitados por custo, e não por desempenho, como displays e armazenamento de informação, que atingiram suas paredes de tijolos vermelhos pelo lado econômico. Assim, para os próximos anos são previstos dispositivos inovadores e de baixo custo com base em memórias nanomecânicas, ferroelétricas e mag-



netoresistivas, além de discos rígidos com armazenamento perpendicular, em um mercado estimado em US\$ 4,2 bilhões por volta do ano 2010 [Doe08].

Por sua vez, tem sido sugerido o desenvolvimento de circuitos híbridos CMOL (do inglês CMOS/nanowire/nanodevice), que combinariam a flexibilidade e a facilidade de processamento da tecnologia CMOS com a enorme densidade de componentes de dois terminais com que nanodispositivos em escala molecular poderiam ser produzidos [Liko8]. A densidade de dispositivos ativos em circuitos CMOL é estimada em até 10^{12} cm², cada um sendo capaz de realizar 10^{20} operações/cm² por segundo, a um baixo consumo de energia.

Por fim, deve ser sempre lembrado que a progressiva diminuição dos lucros pode determinar o fim para a tecnologia CMOS da aplicabilidade da lei de Moore pela redução da escala, antes mesmo que o limite físico último venha ser alcançado [Wono6]. Os custos de uma única máscara requerida em cada etapa do processamento em 90 nm são da ordem de US\$ 86.000,00, com o conjunto completo de máscaras atingindo cerca de 1M US\$. Segundo estudos da SEMATECH, os lucros obtidos por área de pastilha (wafer) produzida têm se mantido aproximadamente constantes desde 1995 [Fee05].

2.4. Dispositivos magnéticos

2.4.1. Ímãs permanentes

Conforme já explicitado no capítulo 1, os ímãs permanentes representam uma classe de materiais estratégicos. Eles também encontram aplicações em dispositivos eletromagnéticos (geradores e motores elétricos, aviões, eletrodomésticos, relógios, computadores, posicionadores), robótica (micromotores, microposicionadores, sensores) dispositivos eletroacústicos (alto-falantes, fones e microfones de telefone), instrumentos de medida (galvanômetros e balanças), dispositivos de torque (ultra centrífugas, medidores de potência elétrica) equipamentos médicos, componentes de micro-ondas e diversos outros instrumentos e equipamentos técnico-científicos.

2.4.2. Magnetos “macios”

Os chamados materiais magnéticos macios são aqueles que podem ser facilmente magnetizados e desmagnetizados. Possuem coercividades intrínsecas muito baixas e são utilizados primariamente para aumentar (ou direcionar) o fluxo de campo magnético. O principal parâmetro que os caracteriza é a permeabilidade relativa μ_r (onde $\mu_r = B/\mu_0 H$). A permeabilidade relativa é uma medida de quão facilmente um material responde a um campo magnético aplicado.

Os materiais macios são utilizados em duas categorias principais: corrente alternada (AC) e corrente contínua (DC). Em aplicações DC, o material é magnetizado para realizar uma determinada operação e em seguida é desmagnetizado ao final da operação, como ocorre, por exemplo, nos relês, nos separadores magnéticos, nos eletromagnetos etc. Em aplicações AC, o material é periodicamente magnetizado e desmagnetizado em sentidos opostos durante todo o período de funcionamento, como por exemplo, nos transformadores de potência.

A alta permeabilidade é uma característica desejável. É importante que a perda de energia por ciclo de operação (quando o material passa por um ciclo de histerese) seja a menor possível. As perdas em aplicações AC têm 3 origens diferentes:

- 1) Perdas por histerese, que estão relacionadas com a área contida dentro do ciclo de histerese. Estas perdas podem ser reduzidas pela diminuição da coercividade intrínseca dos materiais e estão diretamente relacionadas à área varrida durante o ciclo de histerese. Portanto, diminuindo-se a área do material, diminuem-se as perdas por histerese.
- 2) Perda por corrente induzida (correntes de Foucault ou correntes parasíticas). Quando um material ferromagnético é exposto a um campo magnético alternado, correntes elétricas são induzidas dentro do material. A intensidade destas correntes depende da frequência do campo magnético aplicado, da resistividade do material ferromagnético, do nível de indução e da facilidade com que estas correntes circulam através do material. O aparecimento destas correntes resulta em indesejável aumento da geração de calor dentro do material.
- 3) Perdas anômalas: que estão associadas a movimento de paredes de domínio magnético dentro do material. Estas perdas podem ser minimizadas pela obtenção de materiais mais homogêneos, diminuindo-se as barreiras para movimento das paredes de domínio.

Os materiais magnéticos macios são usados extensivamente na indústria eletrônica e na distribuição de potência elétrica nas seguintes aplicações. Na sua maioria, são representados pelas ferritas macias, produzidas com óxidos de Fe, Co, Ni, Mn e Zn. O método de fabricação tradicional é a cha-



mada tecnologia do pó. Os óxidos são prensados de acordo com o perfil desejado e em seguida sinterizados em fornos. As ferritas possuem baixas perdas em frequências de microondas e são muito usadas em telecomunicações (filtros, indutores, transformadores de sinal e de pulso etc), conversão de energia (toróides, flybacks, etc), supressão de interferência e absorvedores de microondas.

Em dispositivos de baixa frequência (motores, geradores, transformadores, reatores), os materiais mais comuns são os chamados aços elétricos, feitos com lâminas de aço com pouca concentração de carbono ou silício; ligas de ferro e níquel ou ferro e cobalto, na forma de material bruto ou de liga amorfa preparada por resfriamento rápido sobre uma superfície metálica fria. Atualmente há uma grande atividade de pesquisa e desenvolvimento em ligas amorfas com o objetivo de reduzir os mecanismos de perda de energia e melhorar os processos de produção de fitas em larga escala.

Em dispositivos de frequência acima de 10 kHz as perdas por correntes parasitas não permitem o uso de aços e ligas metálicas. São então utilizados ferrites diversos, como os hexagonais (estrutura do BaFeO_{19}), os espinélios (MFe_2O_4) e as granadas (do tipo do YIG - $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), nos quais ainda hoje há atividades de pesquisa básica. As principais aplicações desses materiais são em transformadores e indutores de alta frequência, utilizados em equipamentos eletrônicos, dispositivos de microondas usados em telecomunicações e em radar, bem como em cabeças de gravação magnética. O mercado mundial de materiais de alta permeabilidade é da ordem de US\$ 1 bilhão, mas semelhantemente ao que ocorre com os ímãs permanentes, o mercado de bens que dependem diretamente desses materiais é muito maior.

2.4.3. Nanofios

Fios magnéticos em escala nanométrica são estruturas muito investigadas atualmente e que possuem uma vasta gama de aplicações potenciais em nanotecnologia avançada, incluindo meios litografados, gravação de dados com paredes de domínio magnético e processamento de sinais. Em [Cge10] podemos ver um dispositivo feito apenas com nanofios magnéticos, capaz de realizar operações lógicas. Os nanofios vêm sendo fortemente considerados como uma nova tecnologia para armazenamento de dados.

2.5. Dispositivos optoeletrônicos

2.5.1. Silício poroso

As características do silício poroso foram introduzidas na seção 1.2, num contexto de aplicação em sensores. Entretanto, a principal motivação no estudo do silício poroso é sem dúvida seu potencial no desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos baseados na tecnologia do silício convencional, pois esta é amplamente consolidada. Há a expectativa de incluir dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos em um mesmo chip de Si, sem incorporar técnicas sofisticadas e de grande custo, o que torna o silício poroso um material de grande interesse também na área tecnológica. Guias de onda [Mih97], filtros ópticos [Hil97], detectores de UV [Kal99], fotodetectores [Yu97] e LEDs [Pav97, Mcg99] são exemplos de dispositivos apresentados na literatura utilizando este material.

2.5.2. Semicondutores nanoestruturados: pontos quânticos

Uma classe de material nanoestruturado de interesse fotônico é a dos pontos quânticos coloidais [Saro6]. As propriedades ópticas de nanocristais semicondutores, freqüentemente chamados de pontos quânticos ou átomos artificiais (embora a analogia apresente limitações, como demonstrado por Karrai [Karo4], dependem de suas formas e de seus tamanhos. Nestas condições, os níveis eletrônicos não se agrupam em bandas contínuas de energia (como em semicondutores volumétricos) e o confinamento quântico altera os *bandgaps* eletrônicos. Sendo assim, ajustando-se o tamanho das partículas é possível se sintonizar os espectros de absorção e fluorescência para virtualmente qualquer posição. Em particular, a observação de ganho e ação laser na região de 1550 nm já foi demonstrada [Hoo07]. Estas estruturas de dimensões nanométricas “zero-dimensionais” possuem uma variedade de características específicas que não são observadas em estruturas uni ou bidimensionais. O número finito de átomos nos nanocristais, geralmente da ordem de algumas centenas, é responsável por uma grande variedade de fenômenos fotoinduzidos, como efeitos transientes fotoquímicos e fotofísicos, que são bem conhecidos tanto em física atômica quanto em física molecular, mas que não são observados em sólidos volumares. Nanocristais de diferentes materiais são fabricados em várias matrizes hospedeiras ou em soluções usando técnicas de fabricação de vidros ou química de colóides [Roio4]. Além disso, o número reduzido de elétrons capazes de realizar transições ópticas faz com que a absorção seja saturável, e a utilização de pontos quânticos coloidais como chaves ópticas foi proposta [Evio2].



Uma aplicação de particular interesse, devido a questões energéticas que aquecem muitos debates na sociedade moderna, é o desenvolvimento de células fotovoltaicas de ultra-alta eficiência à base de nanopartículas funcionais, cuja aplicação pode ser considerada como um dos principais conceitos disruptivos para o aumento de eficiência com redução de custo de produção de energia solar fotovoltaica. Lidar com este tipo de material e este tipo de aplicação significa, portanto, promover tecnologia e expertise fundamentais para o desenvolvimento de sistemas eficientes de geração de energia renovável e sem emissão de CO_2 .

Segundo estimativas recentes [Sla07], o consumo de energia global da humanidade deverá crescer dos atuais 13 terawatts/ano (TW/a) para aproximadamente 50 TW/a até 2050. O principal desafio não é apenas aumentar a produção de energia. Devido ao aquecimento global decorrente da emissão de gases contendo carbono (efeito estufa), existe uma grande ênfase em processos envolvendo fontes renováveis. Neste contexto, a produção de energia solar fotovoltaica (EFV) tem crescido a uma taxa de $\approx 30\%$ ao ano. Esta produção está concentrada em países como Japão, Estados Unidos, China e países da Comunidade Européia, como Espanha e Alemanha. No ano de 2005, a EFV atingiu um mercado de cerca de US\$ 10 bilhões [May05]. Atualmente, os custos de geração de EFV se encontram na faixa de US\$0,25 a US\$0,65 / kWh. Isto corresponde a um valor aproximadamente 3 a 6 vezes maior do que o custo de produção de energia termoeleétrica com base em carvão. Contudo, na Europa, ações governamentais estão incentivando a produção de EFV, tendo como meta alcançar uma fração da ordem de 10% da produção de energia elétrica total e de 25% do montante de energia de fontes renováveis dentro dos próximos 5 anos [Sla07].

Quatro características básicas credenciam os pontos quânticos semicondutores para aplicações em sistemas fotovoltaicos:

- 1) Multiplicação de portadores, onde um único fóton pode gerar múltiplos éxcitons. Um éxciton é um par elétron buraco ligado, uma excitação elementar em sistemas de matéria condensada. Por exemplo, no caso de nanopartículas de PbSe, foi demonstrado recentemente que um único fóton pode promover a geração de até 7 éxcitons [Sco6, Syo6]. Isto significa um aumento de 700% na eficiência quântica do processo de geração de portadores e o conseqüente aumento de corrente de operação da célula. Para sistemas fotovoltaicos de "gap" único, este processo possui num limite termodinâmico de eficiência de até 45% em regime de irradiação solar equivalente a "um sol", e de 86% em regime de concentração máxima (46.300 sóis). Comparativamente, o limite termodinâmico de eficiência para sistemas de "gap" único de materiais de grandes dimensões é de 31% para irradiação de "um sol" de 41% para irradiação máxima;

- 2) A multiplicação de portadores é um processo muito pouco eficiente em materiais volumares (bulk) ou de energia de “gap” E_g relativamente alta (por exemplo, casos como o do Si ou GaAs). Mesmo para materiais bulk de baixo E_g , onde o excesso de energia dos “excitons quentes” (i.e. excitons com energia bastante superior a E_g) termina sendo dissipada na forma de calor através de interações elétron-fônon.

No entanto, em pontos quânticos, a eficiência dos processos de termalização de excitons via interação elétron-fônon pode ser bastante reduzida, dando chance a interações elétron-elétron que podem provocar um fenômeno tipo “conversão Auger” inversa, fazendo com que o decaimento do excesso de energia dos excitons quentes acarrete a formação de novos excitons. Este processo é particularmente eficiente para o caso de nanopartículas de PbSe, PbS, CdSe e CdS, que são semicondutores a partir dos quais pontos quânticos já vêm sendo fabricados há alguns anos. Além disso, mais recentemente, processos de multiplicação de portadores considerando outros mecanismos físicos também estão sendo considerados [Luq07, Noz05]. Trata-se, portanto, de um problema científico ainda em aberto. Contudo, do ponto de vista das aplicações, os processos de formação de múltiplos portadores pode ser considerado como um fenômeno eficiente principalmente no domínio de nanoestruturas, onde a quebra de simetria introduzida pelas pequenas dimensões modifica interações elementares e possibilita a manifestação mais eficiente de fenômenos que não são observados nos materiais de grandes dimensões;

- 3) Extração de portadores “quentes”, onde se evita a relaxação térmica dos excitons de alta energia (i.e. excitons quentes), possibilitando sua extração no estado de alta energia. Este processo acarreta um aumento da tensão de operação da célula e, conseqüentemente, o aumento de eficiência de produção de energia. Este processo possui um limite de eficiência termodinâmica de 66% para irradiação de um sol e também de 86% para irradiação máxima. Como no caso da multiplicação de portadores, trata-se de um fenômeno resultante da inibição da termalização de excitons quentes. Em outras palavras, o processo de extração de portadores quentes também se manifesta de maneira muito mais eficiente em sistemas de nanopartículas como as citadas acima, e não em materiais de grandes dimensões, e
- 4) Melhor aproveitamento do espectro solar, onde as nanopartículas introduzem níveis intermediários na banda de transparência do semicondutor. Isto possibilita que a absorção sequencial de 2 ou mais fótons de energia $E_i < E_g$ também resultem na formação de excitons. Tal processo pode ser comparado com o de células solares de heteroestruturas [Sla07, Mayo5]. Os limites máximos de eficiência termodinâmica podem atingir a 47% para irradiação com um sol e 63% para irradiação máxima.

Apesar das vantagens decorrentes de limites termodinâmicos de eficiência mais elevados, os dispositivos fotovoltaicos baseados em pontos quânticos ainda não alcançaram um grau de desenvol-



vimento satisfatório, mesmo em escala de laboratório. Atualmente existem várias alternativas de configuração para a confecção de dispositivos fotovoltaicos explorando as vantagens introduzidas pelos pontos quânticos [Prao4, Wogo6]. Entretanto as principais dificuldades tecnológicas ainda se encontram no âmbito do processo de síntese e de incorporação dos pontos quânticos na estrutura física dos dispositivos. Em outras palavras, trata-se de buscar soluções para aprimorar as vantagens funcionais do sistema de nanopartículas e minimizar sua degradação físico-química. Neste sentido, os principais desafios para o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos com pontos quânticos podem ser resumidos nas seguintes questões:

- a) Como controlar as características físicas (e.g. tamanhos, dispersão em tamanho, defeitos cristalinos, características de interface) para aprimorar os processos de geração de portadores?
- b) Como promover a formação de interfaces nanopartícula-meio de forma adequada para aprimorar a extração de portadores?
- c) Como promover uma concentração suficientemente alta de nanopartículas num meio “transparente” e bom condutor (tempo de vida elevado) para explorar eficientemente a multiplicação de portadores ou a extração de portadores quentes?

Conforme exposto acima, tanto o contexto científico como o estado da arte tecnológico põem um conjunto de questões desafiantes para o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos de pontos quânticos. Contudo, os altos limites de eficiência termodinâmica previstos para estes tipos de dispositivo os colocam como paradigma de tecnologia disruptora que tem sido amplamente investigada em nível internacional.

2.5.3. Fibras ópticas microestruturadas

Da mesma forma com que ocorreu para o silício poroso, as características das fibras ópticas microestruturadas foram introduzidas na seção 1.3, num contexto de aplicação em sensores. No entanto, tais materiais apresentam enorme potencial para o desenvolvimento de dispositivos para comunicações ópticas e outras aplicações fotônicas. Neste último caso, polímeros ou sol-gel com dopagens específicas podem ser introduzidos nos buracos da microestrutura da fibra, sendo posteriormente curados para gerar fibras totalmente sólidas [Hua04]. A inserção de material em fibras microestruturadas modifica as características lineares e não lineares de propagação. A vasta maioria dos trabalhos sobre o assunto encontrados na literatura explora apenas a alteração das propriedades lineares. A

grande variação do índice de refração de polímeros com temperatura, por exemplo, foi explorada em uma série de experimentos.

Fibras microestruturadas com núcleos sólidos podem também guiar luz por efeito de *bandgap* se os buracos da casca são preenchidos com um material com índice de refração maior do que o do núcleo. A posição espectral do *bandgap* depende do índice de refração do material inserido. Em um experimento [Lar03], os buracos da casca foram preenchidos com cristal líquido, cujo índice era sintonizado através de aquecimento da fibra. A sintonia do índice levava a uma sintonia do *bandgap* e a fibra foi utilizada como uma chave óptica. A sintonia do *bandgap* de uma PCF com cristal líquido também foi obtida através da aplicação de um campo elétrico, o que leva à possibilidade de dispositivos mais rápidos [Haa05].

As fibras microestruturadas também se prestam à geração de supercontínuo de luz, quando excitadas por pulsos de laser ultra-rápidos, da ordem de dezenas de femtosegundos de duração. Este fenômeno tem aplicações metrológicas importantíssimas, o que representa um papel disruptivo na espectroscopia óptica de ultra-alta resolução [Hono3]. O espectro supercontínuo também pode ser aplicado em sistemas de diagnóstico por Tomografia por Coerência Óptica (OCT), como fonte de luz de banda larga e com pequeno comprimento de coerência [Alfo6, Hsio4]. Estas características são fundamentais para dotar o sistema OCT de uma alta resolução espacial

2.6. Uma olhar no futuro: novos materiais e novas tecnologias

A progressiva percepção das eventuais limitações em um futuro já não mais tão longínquo ao prolongamento da “Lei de Moore” mudou a maneira de encarar alternativas antes consideradas próximas da ficção científica, como o chaveamento de informação pela alteração das propriedades de moléculas isoladas, ou até mesmo pelo controle do fluxo de um único elétron. O desenvolvimento dos nanochaveadores mostrou ser possível sua manufatura a um baixo custo e de maneira controlada. Em um recente documento (Emerging Research Devices – [Huto7]) o consórcio ITRS coloca o ano de 2015 como uma data provável para a conversão da indústria eletrônica para o “paradigma nano” [Fee05], quando processadores e dispositivos de armazenamento de dados (“memória”). Segundo alguns especialistas, o “tipping point” para essa conversão já teria ocorrido, uma vez que nanodispositivos já disponíveis se mostram robustos a flutuações quânticas que inviabilizariam o funcionamento de dispositivos CMOS convencionais em dimensões nanométricas [Mar05].



O controle e detecção de processos envolvendo átomos ou moléculas individuais pelo uso de instrumentos macroscópicos, tal como sondas de varredura, bem como é uma etapa fundamental para demonstrar a viabilidade da eletrônica molecular e da computação quântica [Tre07]. Alguns autores consideram que computação quântica, computação à base de moléculas de DNA e computadores baseados em nanotubos oferecem maiores possibilidades de vir a substituir a tecnologia atual no limite de validade da lei de Moore [Ruto1]. Embora ainda em fase muito experimental, essas tecnologias já experimentaram exemplos de sucesso como na demonstração de transistores elementares e células de memória: mesmo que sua variedade de aplicações não apareça nesse momento tão abrangente quanto a do silício nos dias de hoje, seu potencial de rápido desenvolvimento como tecnologias disruptivas, talvez inicialmente em nichos específicos da tecnologia de informação, não deveria passar despercebido [Ruto1].

2.6.1. A eletrônica molecular

Uma possibilidade que está sob consideração especial é o uso de moléculas individuais para formar os componentes básicos de um processador. Uma molécula pequena, mesmo relativamente simples, pode agir como um transistor, ou mesmo uma porta lógica por inteiro, vindo assim a substituir os transistores à base de silício como componentes fundamentais de um dispositivo computacional. Por serem de tamanho muito menos, moléculas poderiam executar as operações equivalentes às de um dispositivo semiconductor em muito menor tempo e com mais alta compactação [Tre07a]. Dessa maneira, a nova área da “eletrônica molecular” amadurece de maneira muito rápida com contribuições não apenas da Química, Física e Ciência de Materiais, mas também da Biologia.

Eletrônica monomolecular é o nome dado a circuitos lógicos digitais projetados com base no comportamento de moléculas individuais. Pontos-chave a serem mais bem definidos para o desenvolvimento dessa área compreendem:

- a) Que tamanho mínimo deve ter uma molécula para permitir a realização de operações lógicas?
- b) Como a informação pode ser processada internamente?
- c) Quais os requisitos de energia e dissipação associados a esse fenômeno? [Lifo7].

Uma segunda abordagem é a da eletrônica alternativa, que busca dispositivos baseados em materiais de baixa dimensionalidade que venham a substituir a tecnologia CMOS abaixo da fronteira dos 10 nm com desempenho comparável e menores demandas de energia, a custos mais reduzidos.

Nanofios, nanotubos e nanodots, preparados por técnicas como automontagem e resultantes da auto-organização de estruturas complexas, poderiam ser usados em novos paradigmas de arquitetura para produzir nanodispositivos [Lifo7]. Uma terceira oportunidade corresponde aos sistemas nanoeletromecânicos (NEMS): os desafios de lidar novas características mecânicas de materiais em escala nanométrica oferecem novos caminhos em termos de técnicas de fabricação, métodos de detecção e de interfaciamento com outros dispositivos e de operação [Lifo7].

2.6.2. Nanotubos de carbono

Desde sua descoberta no início dos anos 90, os nanotubos de carbono (CNT) têm surgido como materiais promissores em diferentes campos de aplicação [Aja99]. Cada nanotubo pode ser pensado como formado pelo dobramento de uma folha de átomos de carbono dispostos hexagonalmente em um plano (o grafeno): a depender do ângulo quiral de alinhamento da folha, que pode ser definido por dois números inteiros (n e m), o CNT pode vir a ter características metálicas ou semicondutoras, como se vê em [Cge10].

Logo se descobriu [Cge10] que os CNT poderiam existir na forma de um único tubo (SWNT) ou como vários tubos concêntricos (MWNT) [Yuo4]. Muito embora as propriedades elétricas quanto mecânicas dos CNT, em seu conjunto, os façam pertencer a uma categoria à parte entre os materiais com estrutura nanoscópica [Cge10], o fato de que agora estava identificada a existência de uma molécula essencialmente unidimensional com boa condutividade elétrica à temperatura ambiente de imediato despertou o interesse em seu uso em uma eletrônica molecular [Aja99].

O fenômeno de do movimento de elétrons praticamente sem qualquer resistência é conhecido como transporte balístico, e é observado ocorrer em SWNT na forma de estados quânticos discretos que se mantêm coerentes sobre distâncias da ordem de μm . Por sua vez, CNT semicondutores podem vir a funcionar como nanotransistores de efeito de campo, ao conectarem dois eletrodos metálicos apropriadamente dispostos [Cge10]: ao se aplicar uma tensão no gate, o CNT pode chavar de uma forma condutora para isolante à temperatura ambiente [Aja99].

Ao mesmo tempo, MWNT são especialmente convenientes para estabelecer bons contatos, pois além de poderem ser dispostos em paralelo sua condutividade cresce com o aumento de seu diâmetro: estruturas baseadas em MWNT, ou seja, com paredes múltiplas, podem ter condutividade elétrica uma ordem de grandeza maior que um bom contato formado por cobre metálico [Gra04]. Assim, enquanto CNT metálicos podem vir a ser ótimos materiais de “low-k”, em sua forma semi-



condutora (em particular para o caso de SWNT com diâmetros da ordem de 1 nm) têm já encontrado nichos de aplicação como materiais de “high-k” para evitar curto-circuitos em estruturas condutoras [Hoe06].

Nanotubos têm sido progressivamente incorporados à tecnologia do silício. Em [Cge10] é mostrada uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de um transistor por efeito de campo planar baseado em uma conexão por CNT, que é menos afetada por estados interfaciais do que ocorreria em MOSFETs inteiramente baseados em silício. Na mesma figura é mostrada uma proposta de um transistor de potência, onde CNTs são crescidos de forma aleatória para formar as conexões; após os CNTs metálicos serem “queimados” pela aplicação de um elevado pico de tensão entre os eletrodos, restarão apenas os CNTs semicondutores. Em uma realização inicial da idéia, razões de chaveamento da ordem de 100-1000 foram obtidos para produzir uma corrente de vários mA [Gra04].

2.6.3. Dispositivos refrigeradores magnetocalóricos

Ciclos de refrigeração magnetocalóricos, como o mostrado em [Cge10], apresentam um material magnetocalórico, com os seus momentos magnéticos inicialmente orientados aleatoriamente. O processo de resfriamento se dá a partir do momento que eles são orientados por um campo magnético externo, aquecendo o material. Este calor é então removido do material por um processo de transferência de calor usual, através, por exemplo, do emprego de um dissipador. Ao remover o campo magnético externo, os momentos magnéticos do material se orientam aleatoriamente, resfriando o ambiente, num processo inverso àquele que gerou um aquecimento na amostra, por ocasião da aplicação do campo magnético externo.

Recentemente, foi descoberta uma nova classe de materiais magnéticos que apresentam o efeito magnetocalórico gigante à temperatura ambiente em conjunção com uma transição de fase magnética. Entre estes, destacamos os Lantanídeos que apresentam estrutura do tipo RM_2 , (onde $M = Al, Co$ ou Ni): $Gd_5(Si_{1-x}Ge_x)_4$, $Mn(As_{1-x}Sb_x)$, $MnFe(P_{1-x}As_x)$, $La(Fe_{13-x}Si_x)$ e seus hidretos, e as manganitas, com estrutura do tipo $(R_{1-x}M_x)MnO_3$, onde $R =$ lantanídeo e $M = Ca, Sr$ e Ba). A refrigeração utilizando o efeito magnetocalórico é uma tecnologia promissora para as técnicas convencionais baseadas em ciclos de compressão/expansão de gases danosos ao meio ambiente.

2.7. Materiais para memórias

2.7.1. Introdução

Conforme mencionado no início da seção 1.4, pesquisas de novos fenômenos e aplicações de magnetismo e materiais magnéticos constituem em uma das áreas de atividades mais férteis e mais ativas em universidades e em indústrias no mundo inteiro. Em particular, a importância econômica de materiais magnéticos para armazenamento e processamento de dados digitais é enorme. O mercado mundial de armazenamento de dados usando meios magnéticos atingirá 9,3 bilhões de dólares em 2010. Neste último caso, costuma se adicionar o valor agregado de outras tecnologias (como semicondutores, software etc...) necessárias para que os dispositivos de armazenamento magnéticos funcionem.

Portanto, levando em consideração estas tecnologias agregadas, o mercado mundial de armazenamento de dados, utilizando tecnologia e meios magnéticos, deve ultrapassar os US\$ 100 bilhões anuais em 2010. Estes números, embora se refiram a apenas dois segmentos de aplicações de materiais magnéticos, dão uma dimensão da importância desta atividade na tecnologia atual. Em 2008, o mercado brasileiro de computadores pessoais foi da ordem de 13 milhões de unidades o que equivale a um total de aproximadamente 3,2 bilhões de reais apenas considerando o preço dos discos rígidos.

Hoje em dia existem sinais claros de que a tecnologia baseada no controle da carga do elétron, que atingiu o seu apogeu com a era do computador, está chegando próxima de limites intrínsecos determinados por leis básicas da Física. Isto ocorre porque as dimensões dos dispositivos estão próximas daquelas dos comprimentos de onda associados aos estados eletrônicos e neste caso as propriedades quânticas passarão a ser consideradas no desenvolvimento de novos dispositivos. Uma das alternativas mais promissoras que emergiu nos últimos 15 anos é aquela que utiliza o spin do elétron para controle e processamento de informação. Fenômenos de transporte dependentes de spin revolucionaram a tecnologia de armazenamento de informações nos últimos 15 anos.

A introdução de dispositivos baseados no efeito da magnetoresistência gigante tem sido fundamental no aumento da densidade de informação, atualmente disponível em dispositivos comerciais. Este efeito consiste na observação de que em sistemas de multicamadas constituídas de finas camadas ferromagnéticas intercaladas por finas camadas não magnéticas, a resistividade elétrica depende do alinhamento relativo entre os spins das camadas magnéticas adjacentes.



Desta maneira, tem-se a possibilidade de controlar o estado de condução elétrica a partir da configuração magnética destas nanoestruturas. O efeito inverso, onde o estado magnético pode ser controlado pela passagem da corrente elétrica também foi proposto e descoberto experimentalmente nos últimos anos. É o chamado efeito de injeção de spin que não tem nada a ver com o efeito clássico de geração de campo magnético pelo efeito clássico de Ampere-Oersted.

As propriedades de condução dos metais ferromagnéticos variam de acordo com a orientação relativa entre o spin do portador de carga e aquela dos spins responsáveis pela magnetização do meio. Desta maneira, podem-se distinguir dois tipos de portadores de cargas, em analogia com o par elétron/buraco da tecnologia convencional de semicondutores. Esta propriedade se torna marcante em estruturas cujas dimensões são da ordem do comprimento de espalhamento de spin, em que o estado de polarização do spin é preservado, que para alguns materiais como o cromo e o cobre, pode ser da ordem de dezenas de nanômetros.

Como exemplos de materiais de interesse para armazenamento magnético de dados, temos:

- a) Sistemas que apresentam o efeito da magnetoresistência gigante para aplicações em sensores e em cabeçotes de leitura de discos rígidos. Entre estes sistemas, destacamos as válvulas de spin e as junções túnel magnéticas para utilização em memórias magnéticas de acesso aleatório.
A válvula de spin [Cge10] é um dispositivo típico que emprega o uso de corrente com polarização de spin, onde dois ferromagnetos (camada livre e camada presa) são separados por uma camada espaçadora isolante muito fina. A operação deste dispositivo é análoga à de um par polarizador/analizador de luz. A orientação relativa entre as magnetizações das duas camadas modula a corrente elétrica que circula através do dispositivo. A válvula de spin é um dos dispositivos que funciona com base no efeito da magnetoresistência gigante e tem sido fundamental para o aumento da densidade de informação.
- b) Filmes de manganitas (do tipo LaCa-manganitas), que apresentam efeito de magnetoresistência colossal com $\Delta R/R > 100\%$.
- c) Sistemas de multicamadas auto organizadas de nanopartículas de FePt ou FeCo para aplicações de alta densidade de armazenamento na faixa de Tbyte/in².

A spintrônica tem experimentado um forte desenvolvimento, e esta área do conhecimento certamente desempenhará papel fundamental em uma nova era da gravação magnética de dados. Os fundamentos da indústria eletrônica atual repousam no uso de campos elétricos para controlar o movimento de elétrons por uma interação clássica, com sua carga. A spintrônica, ou magnetoelétrô-

nica, por sua vez, depende da ação de campos magnéticos (ou elétricos) externamente aplicados sobre as propriedades de spin, uma característica quântica dos elétrons (ver [Cge10]) [Mcco7, Hulo5].

Um dispositivo muito simples com base na magnetoresistência é mostrado em [Cge10], onde duas camadas de material ferromagnético (FM) envolvem uma camada condutora. A direção de magnetização da camada FM superior pode ser fixa, enquanto que a magnetização da camada FM inferior pode ser chaveada. Quando as duas têm a mesma orientação de spin, o fluxo de elétrons encontra baixa resistência. A resistência aumenta muito quando as duas camadas FM têm magnetizações opostas.

Por sua vez, um dispositivo modulador de spin [Cge10] se baseia no chaveamento da tensão no eletrodo superior, que afeta a direção do spin no material semiconductor. Para tensões nulas, a corrente é alta. Eventualmente para uma orientação de spin fora de fase, nenhuma corrente atravessa o semiconductor.

Várias vantagens podem advir da spintrônica, como a integração em um único chip de memórias de alta densidade e a lógica CMOS. Também, como o spin é um perfeito sistema de dois estados, abre novas possibilidades em termos de redução de escala dos dispositivos lógicos. Finalmente, por seu longo tempo de coerência, efeitos de spin podem ser usados na tecnologia da informação quântica [Wano8]. Materiais ferromagnéticos são usualmente feitos de metais de transição. A maioria dos semicondutores é ou de materiais paramagnéticos ou diamagnéticos. Existem muitas vantagens no uso de materiais que exibam simultaneamente propriedades de semicondutores e ferromagnéticas.

Um circuito lógico pode ser construído de forma que ondas de spin se propaguem através de uma camada ferromagnética isolada dos dispositivos externos por camadas de óxido [Cge10]. A camada ferromagnética é polarizada no plano, enquanto as ondas de spin são perpendiculares ao campo magnético externo. A excitação e detecção das ondas de spin são feitas através das fitas coplanares assimétricas (ACPS) dispostas sobre a camada superior de óxido [Wano8]. Uma alternativa interessante é a construção de válvulas de spin, em que uma magnetoresistência dependente de spin é observada em moléculas orgânicas especialmente selecionadas [Cge10], quando colocadas entre dois contatos magnéticos [Roco5].

2.7.2. Nanoestruturas magnéticas

Nos últimos anos, o interesse pelo estudo de nanoestruturas magnéticas tem aumentado consideravelmente, estimulado pelos recentes avanços na síntese de materiais, pela possibilidade de serem



fabricadas em diferentes formas e geometrias e pelo aparecimento de novas técnicas de caracterização. Além do interesse intrínseco nas propriedades magnéticas, a versatilidade de se produzir estruturas com diferentes formatos levam a funcionalidades adicionais que as tornam potenciais para aplicações tecnológicas. Nunca como antes, as nanoestruturas magnéticas são cruciais para o futuro da indústria de armazenamento de dados de alta densidade. Algumas das geometrias típicas que mais interessam, tanto do ponto de vista tecnológico como científico, estão descritas a seguir.

2.7.3. Nanopartículas e agregados

As nanopartículas magnéticas possuem propriedades magnéticas não usuais quando comparadas com os materiais volumétricos, principalmente devido a efeitos de superfície/interface incluindo quebra de simetria, transferência de cargas e interações magnéticas. Pequenas partículas magnéticas existem na natureza, mas é a possibilidade de fabricá-las artificialmente que as torna de interesse para a ciência e tecnologia modernas.

Nanopartículas possuem tamanhos que variam de alguns nm até dimensões submicrométricas, enquanto os magnetos moleculares são estruturas moleculares bem definidas que contêm alguns átomos magnéticos. Os clusters são estruturas intermediárias muito menos definidas, mas exibem comportamento atômico. Um dos exemplos de nanopartículas naturais são as nanopartículas de magnetitas (Fe_3O_4) sintetizadas por bactérias. Algumas nanoestruturas magnéticas produzidas artificialmente são Fe em Al_2O_3 e apresentam comportamento monodomínio. Outros materiais estratégicos desta classe são Fe_3O_4 , $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, Fe, Co, Ni, com tamanhos típicos de 10 nm.

Um dos grandes desafios atuais na área de gravação e memória magnéticas é o desenvolvimento de super-redes de nano nanopartículas ferromagnéticas auto-organizadas ou arranjos de nanofios em substratos adequados para gravação de dados em escalas de dezenas de Tbyte/in². [Cge10] mostra graficamente a evolução da densidade superficial de armazenamento e o preço por Gbyte de dados. Embora a gravação de dados utilizando meios com anisotropia perpendicular tenha sido lançada no mercado recentemente, a procura por densidades de gravação cada vez maiores deve ser um dos desafios desta área.

Na área de filmes finos magnéticos espera-se um grande avanço na fabricação de materiais com altas coercividade e anisotropia perpendicular para tornar a gravação magnética perpendicular cada vez mais competitiva. Esta é uma área que exige não apenas pesquisa em novos materiais como

também de novos processos que permitam a reversão da magnetização em baixos valores de campos magnéticos.

2.7.4. Arranjos de partículas e componentes funcionais

Arranjos ordenados de nanopartículas magnéticas são de grande interesse científico e tecnológico. Por exemplo, meios avançados para gravação de dados podem ser produzidos como um arranjo complexo de partículas magnéticas em arranjos espaciais de pontos. Além disto, nesta escala de tamanhos os efeitos quânticos não são mais desprezíveis e os estados quânticos passam a ser detectados. Estes efeitos são de interesse em computação quântica e eletrônica de spin. Arranjos submicrométricos (até dezenas de nm) feitos com metais de transição já são investigados e com algumas aplicações tecnológicas anunciadas. Outra classe de nano-estruturas são os antipontos (antidots), que são furos em um filme em vez de pontos (dots). Além da gravação magnética, aplicações potenciais também incluem sensores, computação quântica, dispositivos mecânicos micrométricos e submicrométricos e spintrônica.

2.7.5. Nanofios

Conforme introduzido na seção 2.3.3, nanofios – fios magnéticos em escala nanométrica – representam uma tecnologia com potencial para armazenamento magnético de dados. Esta tecnologia envolve o movimento de paredes de domínio magnético (contorno que separa duas regiões com magnetizações opostas) ao longo de um nanofio. A manipulação da parede de domínio se dá pela passagem de correntes elétricas com polarização de spin. Esta nova tecnologia levará ao desenvolvimento de uma memória universal muito mais rápida do que a memória RAMs (Random Access Memory) de semicondutores com a vantagem de ser não voláteis e não possuir partes mecânicas como os discos rígidos magnéticos. [Cge10] mostra um diagrama de como os bits de informação podem ser criados e manipulados em estruturas de nanofios magnéticos. Em [Cge10] também se pode ver um esquema da tecnologia proposta pela IBM para utilizar os nanofios magnéticos como o meio de armazenamento de dados utilizando as paredes de domínio que podem ser criadas por pulsos de corrente e manipuladas através de correntes com polarização de spin.



2.7.6. Filmes magnéticos e multicamadas

Os filmes e multicamadas também podem ser classificados como nano-estruturas, pois uma das dimensões destes sistemas pode ser da ordem das dimensões atômicas do material. Devido à sua importância científica e tecnológica, os filmes e multicamadas magnéticas normalmente são tratados como uma parte separada em estudos de nanomagnetismo e magnetismo de superfície. Além disto, os filmes e multicamadas têm sido utilizados para desenvolver nanoestruturas com muitas aplicações tecnológicas. Toda a tecnologia de gravação magnética de dados utiliza multicamadas tanto como meio de gravação como também os sensores de leitura e escrita usam nanoestruturas construídas a partir de multicamadas. Atualmente os meios de gravação magnética utilizam materiais magnéticos semiduros que possuem coercividade da ordem de milhares de Oe. Os cabeçotes de leitura magnética utilizam estruturas válvulas de spin compostas de uma multicamada de diferentes materiais magnéticos. [Cge10] mostra de forma esquemática um cabeçote de leitura/escrita utilizado nos discos rígidos dos computadores modernos.

O primeiro material utilizado como meio de armazenamento de informações, inventado por Poulsen em 1898, foi um fio magnético. Até o início da década de 1940, fios de aço foram utilizados em gravações telefônicas e de transmissões de rádio. A fita magnética foi inventada em 1935, foi utilizada em armazenamento de dados para computadores a partir de 1951 e precedeu os discos rígidos dos computadores modernos. A primeira fita de armazenamento de dados possuía uma densidade de informações de $0,002 \text{ Mb/pol}^2$, em comparação com os $2,4 \text{ Mb/pol}^2$ dos HDs dos anos 1990 e cerca de 10^5 Mb/pol^2 nos discos rígidos atuais. Em 2006 a Hitachi (que comprou a divisão de discos rígidos da IBM) anunciou densidade de $0,3 \text{ Tb/pol}^2$ utilizando a tecnologia de gravação perpendicular e prevê que em 2009 os HDs convencionais terão capacidade de armazenamento de 2 Terabytes. Em 2007 a Hitachi lançou um HD de 3,5 polegadas de diâmetro com 1 Terabyte de capacidade de armazenamento utilizando a tecnologia de gravação perpendicular. [Cge10] ilustra a diferença entre os dois tipos de armazenamento de informações. A tecnologia perpendicular só se tornou possível devido ao desenvolvimento de uma multicamada onde o meio de gravação (semiduro) está em contacto atômico com um meio magnético macio. Detalhes podem ser encontrados em: http://www.hitachigst.com/hdd/research/recording_head/pr/index.html.

2.7.7. Reflexão final

A maior expansão na aplicação de materiais magnéticos nos anos recentes foi na área de gravação magnética. Por exemplo, as memórias dos primeiros computadores eram feitas de tambores magnéticos girantes. Posteriormente, eles deram lugar aos núcleos de ferrite. Quando estes começaram a ser suplantados pelos dispositivos semicondutores, houve grande desenvolvimento nas memórias utilizando bolhas magnéticas. Finalmente, os discos magnéticos rígidos ou flexíveis, passaram a dominar a tecnologia de armazenamento. As características dos meios magnéticos para gravação são: a não volatilidade, o rápido acesso e a grande capacidade de armazenamento. Atualmente, consegue-se comprar discos rígidos com capacidade de 2 TBytes por preços que significam menos de 50 centavos de dólar por Gbyte de dados armazenados.

Embora a gravação magnética seja uma tecnologia utilizada há mais de 40 anos, o avanço da indústria de informática está exigindo dos pesquisadores um contínuo avanço na direção de se obter dispositivos com grande densidade de gravação e tempos de acesso cada vez menores. Como resultado dos avanços nesta área, a gravação magnética domina atualmente o mercado de gravação de imagens e de armazenamento de dados regraváveis, principalmente em informática. O sucesso desta tecnologia decorre de vários fatores: a variedade de formatos (fitas, cartões, folhas, discos rígidos ou flexíveis etc.); baixo custo; não-volatilidade; e capacidade quase ilimitada de gravar e regravar informações. Ao contrário das memórias flash, utilizadas nos pen-drives, que possuem um tempo de vida estimado em 10 anos, as memórias magnéticas possuem um tempo de vida estimado em centenas de anos. Este parâmetro se reflete no número de vezes que podemos gravar e regravar dados usando uma ou outra tecnologia, que no caso da tecnologia magnética este número é considerado infinito.

Os meios magnéticos mais usados atualmente para gravação são feitos pela deposição de filmes finos magnéticos, preparados por evaporação a vácuo ou 'sputtering'. No método tradicional, a informação é gravada no meio em movimento (disco) através de um sinal elétrico variável no tempo, produzindo uma magnetização que varia ao longo do material. A fidelidade da gravação de sinais em função da frequência e a capacidade de armazenamento (em bits/in², por exemplo) dependem da qualidade do meio. Os materiais adequados para gravação têm campo coercitivo H_c com valor intermediário entre os dos ímãs permanentes (dezenas de milhares de Oe) e os de alta permeabilidade (alguns Oe). Ele deve ser suficiente para manter a magnetização produzida durante a gravação e ao mesmo tempo possibilitar que a informação seja apagada, sendo atualmente da ordem de 5 kOe.

Os avanços tecnológicos nesta área são, a cada dia, mais impressionantes. Só para exemplificar alguns destes avanços, em 2006 a Hitachi anunciou densidade de 0,3 Tb/pol² utilizando a tecnologia de gra-



vação perpendicular e prevê que em 2009 os HDs convencionais terão capacidade de armazenamento de 2 Terabytes. Em fevereiro de 2009 a empresa americana Western Digital anunciou a venda de discos rígidos de 3,5 in de diâmetro com 2 Terabytes de capacidade de armazenamento utilizando a tecnologia de gravação perpendicular. Isto significa uma densidade superficial de armazenamento de 400 Gb/pol² e taxa de transferência de 3 GB/s. Finalmente, nos últimos dois anos ganhou força a idéia de que será possível fabricar uma memória RAM de efeito túnel magnético que venha substituir as memórias de semicondutores atualmente utilizadas, com a grande vantagem de ser não-volátil.

Avanços tão impressionantes quanto esses só são realizáveis devido a investimentos contínuos e maciços nas áreas de pesquisa teórica e pesquisa experimental em magnetismo e materiais magnéticos. Os esforços de pesquisa e desenvolvimento nesta área têm ocorrido em diversos países tanto nas academias como nos laboratórios industriais. Para citar apenas alguns exemplos recentes, em 1995 foi anunciado a formação de um consórcio de quatro grandes empresas japonesas - NEC, Fujitsu, Hitachi e Toshiba - cujo objetivo era colocar no mercado, em torno do ano 2001, discos rígidos magnéticos usando tecnologia convencional, com densidades da ordem de 20 GB/in². Além de manter a pesquisa em seus próprios laboratórios, as quatro empresas anunciaram também que financiariam grupos de pesquisa em universidades japonesas, com cerca de US\$ 2 bilhões/ano. O que os japoneses decidiram fazer é o que os americanos fizeram há 15 anos, quando criaram três grandes centros de pesquisa em gravação magnética - Carnegie Mellon University, Universidade da Califórnia em San Diego, Universidade de Minnesota em Minneapolis e mais recentemente na Universidade de Stanford. Estes centros foram criados exatamente para fazer frente ao avanço que os japoneses conseguiram no final dos anos 70 e início dos anos 80, quando passaram a dominar o mercado mundial de dispositivos de gravação magnética de dados. Na Europa foi criado um consórcio semelhante ao americano e ao japonês. Enquanto isso, grandes empresas americanas continuaram a desenvolver seus próprios programas na área obtendo resultados surpreendentes.

2.8. Materiais para iluminação

2.8.1. Introdução

Para todos os povos, a luz tem o mesmo significado. Ela está presente em nosso dia-a-dia, seja como simplesmente luz do dia, natural, como luz artificial, em tarefas privadas, nos locais de trabalho ou em transportes. A luz natural possibilita o funcionamento dos relógios biológicos, enquanto que a

luz artificial viabiliza as atividades de uma sociedade industrial. Com a disponibilidade a preços acessíveis de uma enorme gama de tipos de luz artificial, explodiram as atividades sociais e de lazer noturnas. Observadores extraterrestres vêem o lado noturno da Terra como mapas com centros urbanos brilhantes ligados por vias. Em países do porte de França, Inglaterra ou Alemanha, consomem-se a cada ano mais de 40 bilhões de kWh de energia elétrica com lâmpadas, o que representa cerca de 10% da produção de energia de cada um destes países. Do ponto de vista de sistemas de iluminação adaptativos, fontes de luz eficientes são integradas à arquitetura de prédios e construções comerciais, nas quais a luz do dia é aproveitada de forma eficiente através de sistemas de controle relativamente simples, levando a uma nova qualidade de vida no que se refere a uma visão confortável.

A realização de um projeto de iluminação com este enfoque requer a melhoria da tecnologia de fontes de luz, do brilho das fontes e seu controle, e conformação da configuração espectral às necessidades individuais e de cada aplicação. Neste ponto, entra em ação a filosofia da “Arquitetura da Luz” em um prédio ou planta industrial. Desta filosofia também fazem parte técnicas de ganho de energia, como células fotovoltaicas, energia eólica etc... e novos materiais ambientalmente pouco agressivos para a fabricação dos componentes necessários a tais tipos de sistemas e principalmente para a substituição de lâmpadas de descarga elétrica em vapores de mercúrio.

O desenvolvimento técnico e a pesquisa para o aumento do grau de iluminação e de eficácia e a implantação de um sistema de iluminação integrado, como o mencionado anteriormente, podem contribuir decisivamente para aliviar a carga de agressões sofridas pelo meio ambiente. A economia anual que potencialmente se pode obter anualmente, considerando um preço de R\$ 0,50/kWh, é estimada em cerca de 150 bilhões de Reais, para um país como a França, Inglaterra ou a Alemanha.

Outra faceta do tema é a questão da segurança: a luz gera segurança [Cge10]. As aplicações são inúmeras: melhores faróis em veículos de passeio, com distribuição espacial da intensidade luminosa gerada controlada por sensores nas estradas; sistemas ópticos ativos de monitoramento/aviso [Cge10], associados a níveis mais elevados de iluminação nas vias ou nos lugares públicos aumentam sensivelmente os níveis de segurança. Luzes de tráfego e semáforos. Neste ponto, faz-se a introdução de fontes de luz “fria”, como os LED’s (diodos emissores de luz) ou os OLED’s (LED’s feitos com materiais orgânicos).

A luz também é importante em muitos processos de produção, assim como etapas em procedimentos técnicos, biológicos e médicos. Na intrincada tecnologia da relação entre iluminação (uso de lâmpadas) e processos já se adotam procedimentos ambientalmente amigáveis que se utilizam de uma quantidade mínima de água e que dispensam completamente solventes orgânicos. Há ain-



da, na tecnologia industrial para a lida com superfícies, outra área de aplicação de diversas lâmpadas no ultravioleta e no infravermelho para secagem, cura de polímeros, colas e vernizes, para a conformação de plásticos, para limpeza, e também para a ativação de superfícies de componentes

2.8.2. Iluminação com diodos emissores de luz – LED's

A tecnologia da iluminação atual é antiga e ultrapassada. O desperdício de energia elétrica das lâmpadas incandescentes, por exemplo, é incompatível com uma época em que o tema “eficiência energética” está no topo das prioridades dos governos. Não é a toa que já a partir de 2010, parte das lâmpadas que utilizamos atualmente (as incandescentes) começarão a ser banidas de grandes mercados, como do mercado australiano. Outros mercados seguirão com a proibição. Em 2014 não será mais possível se comprar uma lâmpada incandescente nos Estados Unidos, que começarão seu processo de remoção destas lâmpadas do mercado em 2012.

Fato: em nenhuma área tecnológica é tão clara a tendência futura: iluminação eficiente e ambientalmente amigável deve ser feita com diodos emissores de luz - LED's.

Os LED's são estruturas semicondutoras que, ao serem submetidas a uma diferença de potencial elétrico, geram portadores nas chamadas bandas de valência e de condução do material. Estes portadores podem então se recombinar, emitindo luz como resultado.

Os dispositivos LED já estão no mercado há várias décadas. Inicialmente utilizados como indicadores em dispositivos eletrônicos, possuíam brilho limitado e, mais importante, cores limitadas (verde, vermelho, laranja e amarelo). Na década de 80, a descoberta de novos materiais deu impulso a nova tecnologia que passou a se desenvolver rapidamente. O brilho e a vida média aumentaram consideravelmente e, com estes, as aplicações. Com a descoberta do LED azul, o conjunto de cores primárias foi completado e, com isso, o uso de LEDs para iluminação tornou-se possível.

Como a luz do LED é emitida a partir de um dispositivo de estado sólido, ao contrário do que ocorre nas lâmpadas convencionais, onde a luz é emitida de um filamento ou de um plasma de gás, criou-se o termo “iluminação do estado sólido” para se referir à luz gerada por LEDs.

Os LED's utilizam semicondutores inorgânicos como materiais ativos. Em paralelo ao desenvolvimento dos LED's à base de semicondutores inorgânicos, surgiu também a possibilidade de se utilizar semicondutores orgânicos como materiais ativos. A estes, damos o nome de OLED's. O princípio de

funcionamento de ambos é semelhante. No entanto, os valores de mérito (quantidade convenientemente definida para quantificar o quão boas são as diversas características do dispositivo) dos LED's orgânicos (OLED's) são mais interessantes. Ou seja, os OLED's produzem uma luz de melhor qualidade, e as perspectivas apontam para dispositivos mais eficientes e mais baratos.

Os LED's e OLED's irão coexistir no universo da iluminação, pois atendem a demandas distintas. Enquanto que os LEDs produzem uma iluminação relativamente direcional, mais interessante para ambientes externos, os OLED's produzem uma iluminação difusa, mais apropriada para ambientes internos.

É importante enfatizar que as empresas fabricantes de luminárias devam mostrar interesse em investir na área, pois devem perceber a importância destes dispositivos e entender que, no futuro, não haverá mais luminárias convencionais. O motivo é simples: os LED's e OLED's não necessitam deste artefato. De certa forma, o papel da luminária, que é de direcionar a luz do dispositivo, é feito por lentes ou filmes ópticos embutidos no dispositivo. Além disso, o mercado é claro: segundo informações da ABILUX (Associação Brasileira da Indústria da Iluminação), o mercado brasileiro de iluminação é de 420 milhões de lâmpadas.

Em termos de equivalência, observamos que, em dias de hoje, a tecnologia já permite ter LED's que apresentam vida média de cerca de 40 vezes maior do que a das lâmpadas incandescentes e de 6 vezes a das fluorescentes compactas (à base de mercúrio e, portanto, má para o meio ambiente). Em termos de consumo de energia, os LED's são 12 vezes mais econômicos do que as lâmpadas incandescentes e 4 vezes mais do que as fluorescentes compactas. Em ambos os casos, com potências luminosas irradiadas de pelo menos o dobro em relação às tecnologias concorrentes [Kar09]. Com relação aos OLED's, atualmente a sua vida média chega a 150 mil horas. Com esta vida média, estes materiais são fortes candidatos a essencialmente qualquer tipo de aplicação tecnológica que emita luz, principalmente iluminação. A eletrônica orgânica cresceu bastante nos últimos cinco anos, atraindo a atenção de investimentos cada vez maiores devido às aplicações promissoras que serão possíveis utilizando esta tecnologia. A expectativa era de que o pequeno mercado de 650 milhões de dólares, em 2005, iria crescer explosivamente para cerca de 96 bilhões de dólares em 2020. Em [Akco7], encontramos uma estimativa ainda mais promissora: "estudos técnicos prevêem que o mercado global da Eletrônica Orgânica atingirá uma cifra de US\$ 20 bilhões em 2005, e de US\$ 250 bilhões em 2012".



2.8.3. Materiais para iluminação com LED's

Há inúmeras associações possíveis de elementos químicos que resultam em estruturas semicondutoras emissoras de luz na região ultravioleta, visível e infravermelha. Aqui, destacaremos apenas aqueles semicondutores que resultam em emissão na região do visível (comprimentos de onda aproximadamente entre 400 e 700 nm). Estas associações geralmente são entre elementos de grupos diferentes da tabela periódica, que vão de I (metais alcalinos) a VII. É sabido que ligações químicas entre elementos são tais que obedecem à “regra do octeto”, que nada mais representa do que uma configuração eletrônica que minimiza de forma ótima a energia dos elementos envolvidos na ligação, i.e., a configuração eletrônica que leva a camadas eletrônicas completas depois da ligação química. A tabela 4.1 mostra as cores disponíveis produzidas por LED's feitos com alguns dos materiais inorgânicos mais adequados para esta aplicação. Notemos que todo o espectro visível é contemplado.

Os LED's orgânicos baseiam-se no uso de moléculas orgânicas semicondutoras, em que o “gap” de energias, e portanto o comprimento de onda em que a luz será emitida pelo dispositivo, está associado ao grau de confinamento que os elétrons fracamente ligados destes tipos de moléculas (“elétrons π ”) sentem. Dentre as moléculas que compuseram o início da história dos OLED's, destacamos o antraceno ($C_{14}H_{10}$) [Pop63], o poliacetileno (C_2H_2)_n, e o polipirrol (C_4H_4N)_n, puro e dopado com iodo [Bol63]. Anos mais tarde, os primeiros resultados de emissores orgânicos eficientes de luz começaram a surgir, como o poli-para-fenileno vinileno (PPV) [Bur90], o politiofeno (C_4H_4S)_n e seu derivado, o poli-(3,4-etilenodioxitiofeno) poli-(estirenosulfonato) (PDOT:PSS). Nem só de polímeros podem ser feitos os OLED's: há aplicações de quelatos organometálicos, como a 8-hidroxiquinolina alumínio [Tan87] e de dendrímeros conjugados. Há também a classe de moléculas dos polifluorenos, como o poli-spirobifluoreno [Dob85].

A filosofia dos processos de melhoria dos OLED's consiste basicamente em aprimorar os sistemas de injeção de portadores no cromóforo (material orgânico emissor de luz), assim como otimizar a própria molécula do cromóforo, lançando mão de técnicas de engenharia molecular, trabalhando a partir de variações das moléculas que já encontram aplicação, que podem ser conhecidas consultando-se vastos bancos de patentes. A partir deste ponto, o céu é o limite.

Tabela 2.1: Materiais semicondutores usados na fabricação de LED's emitindo nas diversas cores do espectro visível.

Cor	Comprimento de onda (nm)	Materiais semicondutores
Infravermelho	$\lambda > 760$	Arseneto de gálio (GaAs) Arseneto de gálio e alumínio (AlGaAs)
Vermelho	$610 < \lambda < 760$	Arseneto de gálio a alumínio (AlGaAs) Arseneto fosfato de gálio (GaAsP) Fosfeto de índio, gálio e alumínio (AlGaInP) Fosfeto de gálio III (GaP)
Laranja	$590 < \lambda < 610$	Fosfeto arseneto de gálio (GaAsP) Fosfeto de índio, gálio e alumínio (AlGaInP) Fosfeto de gálio III (GaP)
Amarelo	$570 < \lambda < 590$	Fosfeto arseneto de gálio (GaAsP) Fosfeto de índio, gálio e alumínio (AlGaInP) Fosfeto de gálio III (GaP)
Verde	$500 < \lambda < 570$	Nitreto de gálio e índio (InGaN) / Nitreto de gálio III (GaN) Fosfeto de gálio III (GaP) Fosfeto de índio, gálio e alumínio (AlGaInP) Fosfeto de gálio e alumínio (AlGaP)
Azul	$450 < \lambda < 500$	Seleneto de zinco (ZnSe) Nitreto de gálio e índio (InGaN) Carbeto de silício (SiC) como substrato
Violeta	$400 < \lambda < 450$	Nitreto de gálio e índio (InGaN)
Ultravioleta	$\lambda < 400$	Nitreto de boro (BN) ($\lambda=215$ nm) Nitreto de alumínio (AlN) ($\lambda=210$ nm) Nitreto de gálio e alumínio (AlGaInN) Nitreto de índio, gálio e alumínio (AlGaInN)

4.4 – Futuro

Uma nova fonte de luz semicondutora tem sido desenvolvida, que envolve a cobertura de um LED emissor no azul com pontos quânticos semicondutores, que emitem luz branca ao serem excitados pela luz azul emitida pelo LED. Esta técnica produz uma luz “quente” e amarelada, semelhante à que-lá produzida por lâmpadas incandescentes [Livos].

Pontos quânticos são nanocristais semicondutores que possuem propriedades ópticas únicas [Maso2]. A sua cor de emissão pode ser sintonizada desde a parte azul do visível até o infraverme-



lho, usando-se um mesmo material semiconductor, variando-se apenas o tamanho do nanocristal. Isto permite aos LEDs recobertos com pontos quânticos criar praticamente qualquer cor do diagrama CIE (padrão internacional de escala colorimétrica), possibilitando a obtenção de um número maior de opções de cor, podendo vir a gerar luz branca de maior pureza colorimétrica do que os ditos “LED’s brancos”.

2.9. Materiais para mostradores (*displays*)

2.9.1. Introdução

Desde os anos 20 até o final do século XX, o tubo de raios catódicos (TRC) dominou a indústria de displays. A demanda por portabilidade progressivamente levou à busca de outras tecnologias, como os Displays de Cristal Líquido (DCL) que poderiam superar os TRC em termos de qualidade da imagem, tamanho e consumo de energia [Cge10].

Esquemáticamente, um display de tela plana (DTP) consiste de um filme fino de um material eletro-óptico comprimido entre duas placas de vidro, de modo a que o material ativo responda a um sinal elétrico pela emissão de luz ou pela modulação de uma iluminação posterior. As placas de vidro são marcadas por linhas e colunas de condutores elétricos, formando uma malha que define os elementos da imagem, chamados de pixels. Por serem leves e de design compacto, os DCL rapidamente se fizeram presentes em dispositivos como relógios digitais, telefones celulares e computadores portáteis. Razões de ordem econômica forçaram a tecnologia buscar tamanhos cada vez maiores de displays, trazendo os DCL para o mercado antes cativo dos TRC, como computadores de mesa e aparelhos de televisão.

Existem três tipos gerais de DTP disponíveis no mercado: DCL, displays eletroluminescentes e displays de plasma [Cge10]. Neste começo de século, outras tecnologias de display disputam a supremacia, como plasma, emissão de campo, DLP, OLEDs e papel eletrônico [Guro5], que comentaremos a seguir. Além dos DCL, outras tecnologias incluem displays por painéis de plasma (PDPs), nos quais gases ionizados são responsáveis pela emissão de luz, displays de emissão de campo, uma tecnologia aperfeiçoada dos TRC com a tecnologia dos semicondutores; displays eletroluminescentes (ELDs), onde a luz é produzida por camadas de fósforo sanduichada entre eletrodos. Todas essas tecnologias são capazes de exibir grandes quantidades de informação. Usos avançados de displays, como

em TV de alta definição ou monitores de computadores podem conter centenas de milhares de pixels. Há, no entanto, ainda um vasto mercado para DCLs de baixo teor de informação, como em calculadoras, termômetros e utensílios domésticos [Baro3].

Usando milhões de espelhos microscópicos, a tecnologia DLP pode gerar imagens brilhantes de grande porte projetadas em até 35 trilhões de cores. Displays de plasmas geram imagens de excelente qualidade em telas de grande tamanho. Displays de emissão de campo podem produzir imagens de alta resolução e de qualidade comparável aos TRD, ocupando um volume bem menor. Enquanto que os LEDs orgânicos, que são compostos por polímeros emissores de luz, podem emitir sua própria luminosidade e assim permitir a redução da espessura do display e do consumo de energia, os fabricantes de papel eletrônico estão tentando desenvolver displays com propriedades semelhantes às da tecnologia impressa em papel.

Demandas por displays de melhor qualidade continuarão a dirigir a evolução da tecnologia [Cge10]. Essa evolução contínua requererá novas abordagens e idéias inovadoras na forma de apresentar a informação [Guro5].

Apesar dos ditames da lei de Moore [Moo65], considerações econômicas e especificidades de uso e aplicação podem contribuir para que em importantes segmentos da indústria eletrônica rotas alternativas de desenvolvimento tecnológico sejam empreendidas. Nesse sentido, um exemplo a merecer destaque é o da indústria de displays, que não obedece ao mantra da miniaturização exponencial dos produtos finais [Dero8].

Tendo como limite físico aquilo que é perceptível ao olho humano, a redução de custos teve de ser buscada no sentido oposto, pela produção em grandes quantidades, em processos automatizados que contribuíssem para a diminuição de perdas. Silício passou a ser depositado em enormes lâminas de vidro (dimensões típicas superiores a dois metros), usualmente produzidas em subunidades industriais localizadas in situ e incorporadas ao processo produtivo, de modo a eliminar custos de transporte [Cge10]. Com isso, se tornou finalmente possível aos displays de tela plana superar o nicho dos eletrônicos portáteis e competir pelo mercado das telas e mostradores de grande porte. Em algum ponto, porém, o uso de grandes painéis de vidro se tornará menos econômico do que o manuseio de grandes rolos de substratos flexíveis.

A recente tendência de aumento do preço do silício bruto pelo crescimento da demanda [Dero8] também contribui para a continuada análise de possíveis alternativas tecnológicas, seja no uso de novos materiais, seja em propostas radicalmente inovadoras de arquiteturas de componentes e dispositivos. É



nesse cenário que recentemente o uso de materiais orgânicos fotoativos e a incorporação de corantes orgânicos [Lawo5] têm sido considerados na construção de novos tipos de células solares [Dero8a].

Premidos pela necessidade de reduzir custos, de modo a enfrentar a competição da energia tradicional e barata fornecida pelas redes elétricas regulares, os fabricantes de dispositivos fotovoltaicos foram os primeiros a explorar essa variante através da deposição a vácuo de componentes sobre filmes flexíveis. Apesar de estar a eletrônica impressa ainda em seus primórdios, as demandas sobre eficiência mínima (hoje superior a 20%) requerem a superação de desafios como o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, o que torna as especificações sobre pureza e taxa tolerável de defeitos mais rigorosas que as prevalentes para a maioria das aplicações em circuitos integrados.

Em anos recentes, a indústria de displays vem crescendo a cerca de 2 a 3 vezes mais que indústria de semicondutores, emulando a taxa de crescimento desse setor em seus dias iniciais [Cge10]. Em certo sentido, o crescimento do setor nos últimos vinte anos reflete a expansão da eletrônica orgânica como um todo [Cge10].

2.9.2. Semicondutores orgânicos como materiais optoeletrônicos

Os semicondutores orgânicos têm sido alvo de intenso escrutínio científico durante os últimos 50 anos [Foroo]. Constituídos essencialmente por átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, esses materiais apresentavam capacidade de formar superestruturas complexas; apesar disso, esses materiais foram inicialmente considerados como objeto de mera curiosidade, uma vez reconhecida a fragilidade das ligações químicas envolvidas nessas estruturas.

Aos poucos, porém, compostos orgânicos, seja na forma de polímeros ou filmes finos obtidos pela evaporação de moléculas pequenas, foram encontrando nichos de aplicação com base na sucessiva descoberta de suas propriedades especiais, tais como fotocondutividade (ainda nos anos 50) e elevada condutividade elétrica (ao final dos anos 70). Hoje, a eletrônica orgânica se faz presente em escala crescente no mundo comercial, através do uso diversificado de compostos e polímeros orgânicos como sensores, materiais ativos em mostradores (displays) e etiquetas identificadoras por radiofrequência (RFIDs).

É importante frisar que as regras para a obtenção de estruturas orgânicas complexas pode diferir substancialmente daquelas usuais na microeletrônica baseada em cristais semicondutores. Para sistemas com interações predominantemente fracas, as regras da “automontagem”, um processo em

que, sem a intervenção humana direta, moléculas (ou parte de moléculas) espontaneamente se organizam em agregados ordenados, podem levar a estruturas com diferentes níveis de hierarquia organizacional [Cge10].

Embora mais evidentes em exemplos selecionados da química ou biologia, dadas as condições ambientais adequadas, automontagem pode ocorrer na escala molecular ou de galáxias, e já foram identificados muitos nichos para fabricação de estruturas e componentes automontados na nano e na microescala. Três intervalos de tamanho em que automontagem parece ser especialmente importante são a escala molecular, a nanoescala (colóides e nanoestruturas), e a dimensão meso- para macroscópica (objetos com dimensão de micrômetros a centímetros. Em cada caso, as regras de formação das estruturas são similares, mas não idênticas [Whio2].

Na área de displays, enquanto a tecnologia dos diodos eletroluminescentes orgânicos (OLEDs – ver adiante) se apresenta como madura, tendo conseguido ocupar alguns nichos específicos, uma área de promissor crescimento diz respeito ao caso do “papel eletrônico”, uma inovação disruptiva que pode vir a levar a uma profunda mudança nos modos de operação da mídia impressa [Jono7]. Por sua vez, desenvolvimentos recentes mostram ainda que o rendimento de células solares orgânicas está sendo continuamente elevado a patamares recordes, abrindo a possibilidade do surgimento enfim de sistemas fotovoltaicos comercialmente competitivos, de mais alta eficiência e baixo custo.

2.9.3. Diodos orgânicos emissores de luz – OLED’s

A eletrônica orgânica pode claramente não apenas se beneficiar dos progressos simultaneamente alcançados na indústria química e na de semicondutores, mas também contribuir de maneira sinérgica para o desenvolvimento do conjunto de ambas. O reconhecimento do enorme potencial de mercado para dispositivos orgânicos tem levado à formação em diversos países de consórcios entre instituições acadêmicas e grandes e pequenas empresas, com o objetivo de estruturar o desenvolvimento de novos materiais e aplicações como OLEDs para displays em telefones celulares, eletrônicos portáteis e televisores, em um mercado estimado em cerca de US\$ 2,9 bilhões em 2011, o que representa um crescimento de mais de 500% sobre o observado em 2005 [Kha06].

Hoje, em termos dos princípios básicos de funcionamento de um OLED, os principais problemas técnicos foram resolvidos (muito embora progresso continue a ser feito em termos de novas propostas de arquitetura e construção de dispositivos, como é o caso da busca de sistemas mais eficientes baseados em heterojunção de volume [Sht05]). O mais importante desafio para a consolidação



da eletrônica orgânica como uma tecnologia madura está na questão da produção em massa, reduzindo custos e aumentando o rendimento sem comprometer a qualidade dos dispositivos em termos de desempenho e tempo de vida. Enquanto a deposição por sublimação ou por feixes moleculares funciona razoavelmente bem para o caso de moléculas pequenas, uma técnica especialmente promissora também para polímeros – e que permite melhor controle sobre as trilhas depositadas – é a da impressão direta por jato de tinta de circuitos eletrônicos sobre substratos plásticos [Cge10].

Dentre as principais dificuldades ainda encontradas para aumentar a velocidade de impressão está o fato de que para alcançar o brilho adequado e obter o rendimento quântico mínimo, a zona de recombinação entre os portadores positivos e negativos deve ser mantida o mais próximo possível do centro do dispositivo, o que requer o correto alinhamento de trilhas quando da implantação de circuitos mais complexos. Problemas técnicos associados ao controle simultâneo da altura das barreiras e da mobilidade portadores possivelmente ainda demandarão inovações significativas na arquitetura dos dispositivos.

2.9.4. Papel eletrônico

Uma tecnologia inovadora que vem transitando de maneira muito rápida entre a fase conceitual e o uso pelo consumidor final é a dos displays baseados no “papel eletrônico”. Sistemas que usem materiais de baixo peso e elevada resistência ambiental, e explorem as propriedades especiais de condutividade e flexibilidade mecânica de alguns materiais plásticos, oferecem características atrativas em relação às tecnologias já estabelecidas para a área de mostradores. As propriedades peculiares dos plásticos de qualidade óptica, como o poli-metilmetacrilato (PMMA), abrem a possibilidade de técnicas inovadoras como a litografia baseada em moldes e definição de padrões através de soluções dispersas por canais de microfluídica [Cge10]. Com isso um baixo custo de produção pode ser atingido, mesmo quando da formação de displays de largas dimensões [Rog01]. Displays flexíveis podem vir a revolucionar o design de telefones celulares e outros dispositivos portáteis, ao mesmo tempo em que livros ou jornais diários podem vir a ser lidos diretamente em uma conveniente mídia eletrônica cuja visualização que dispensa por completo a tecnologia da imprensa em papel [Kno04].

2.9.5. Cristais líquidos

Embora os cristais líquidos (CL) tenham sido descritos pela primeira vez ainda no século XIX, quando Friedrich Reinitzer estudava o colesterol, apenas na segunda metade do século passado é que os pri-

meios dispositivos baseados nas propriedades eletro-ópticas desses materiais foram desenvolvidos. Embora a imensa maioria das moléculas que formam cristais líquidos sejam orgânicas, há também cristais líquidos inorgânicos, como o cloreto de zinco ($ZnCl_2$). Num dos inúmeros exemplos sobre a vastidão de compostos que a química orgânica nos apresenta, são inúmeras as moléculas deste tipo que podem formar cristais líquidos. Como exemplo, podemos citar a N-(4-Metoxibenzilideno)-4-butilnilina (MBBA) e sabões (moléculas anfífilas) de uma forma geral, i.e., sais de ácidos carboxílicos, como o bitartrato de potássio ($KC_4H_5O_6$). Mostradores à base de cristais líquidos (DCLs) rapidamente encontraram apelo comercial, tendo sido fabricados por empresas sediadas na Europa, EUA e Japão. Fisicamente pequenos e eletricamente simples, a produção desses displays era feita com base em técnicas de manufatura que envolviam grande demanda de trabalho manual. À medida que os aspectos de custo de fabricação passaram a ser fator cada vez mais importante, Coreia do Sul, Taiwan e China se tornaram locais mais vantajosos para hospedar a atividade produtiva em expansão [Bero7].

Ao final dos anos 80's, o Japão controlava 90% do mercado mundial. A razão para isso se deve principalmente ao fato de que as companhias japonesas se concentraram inicialmente no mercado de eletrônica de consumo de mais baixo valor agregado, e as firmas americanas, de maneira errônea licenciaram a tecnologia para empresas estrangeiras interessadas em produzir displays de baixo teor de informação como relógios de pulso, calculadoras e brinquedos. A partir desse começo modesto, as firmas japonesas galgaram rapidamente a escada da tecnologia, com displays mais avançados sendo desenvolvidos durante os anos 80's. Por essa época, duas tendências começavam a convergir, mudando por completo o cenário tecnológico: primeiro, os avanços nas indústrias de computação e de semicondutores estava tornando viável a produção de computadores portáteis, televisões de bolso, além da TV de alta definição e de novos dispositivos industriais e de uso pessoal. Em segundo lugar, mesmo antes do surgimento da internet houve a percepção de que haveria lugar para o uso de displays sofisticados com base em interfaces automatizadas para muitas das interações pessoais e de negócios [Baro3].

No começo dos anos 90's, os produtores japoneses começaram a se tornar os líderes de mercado em dispositivos com base nas tecnologias de DTP. Já em 1993, o Japão tinha 92% do mercado mundial de DCL, 68% de displays de plasma e 47% do mercado de dispositivos eletroluminescentes. Na tentativa de se contrapor a essa tendência, e com o apoio da Administração Clinton [Kri], um grupo de fabricantes americanos de DTP formou o Advanced Display Consortium, uma tentativa de organização horizontal para a pesquisa pré-competitiva voltada principalmente para a melhoria do grau de resolução das imagens dos DTP por parte de competidores que se encontravam em uma situação muito difícil no mercado mundial [Teco1, Fun97].



A imposição de tarifas de proteção anti-dumping não foi de muita valia para a combalida indústria americana de DTPs, mas ao contrário importou em grave conseqüências para a indústria local de computadores e o correspondente mercado de trabalho de alta tecnologia. O preço final dos computadores “made in USA” subiu de imediato, tornando-os menos competitivos, ao menos enquanto os fornecedores de monitores não eram substituídos. A longo prazo, o efeito final foi a partida para o exterior das unidades de produção tanto de fabricantes americanos quanto japoneses, com o conseqüente aumento do desemprego no setor, pois as medidas anti-dumping não se aplicavam a displays montados no exterior. Alguns anos depois, quando o Departamento de Comércio americano finalmente interveio, a situação já havia se tornado irreversível [Baro3].

Progressivamente o Extremo Oriente se tornou o local de maior produção da tecnologia de DTP. Em 2007, quando a venda de TVs baseadas em DCL pela primeira vez superou a de monitores tipo TRC, Taiwan se tornou o maior produtor mundial de DTP, superando a Coréia do Sul e o Japão [Cge10].

DTPs levaram a tecnologia dos displays a um novo patamar, em que cerca de uma dúzia de tecnologias principais são empregadas, de acordo com o uso final do dispositivo, de calculadoras de bolso a monitores de TV. DCL é a tecnologia que agora domina o setor, capaz de oferecer imagens em cores de alta qualidade, rica em contraste e livre de distorções. Por sua vez, OLEDs é considerada a tecnologia de DTP mais promissora [Cge10], por possibilitar a construção de novos painéis extremamente finos, brilhantes e de baixo peso, eficiente sob o ponto de vista de consumo de energia e passíveis de uso sob condições de iluminação natural; por essas vantagens comparativas, a tecnologia de OLEDs se faz muito atraente, especialmente, para o caso de aparelhos portáteis [Mai].

Trabalho de natureza fundamental agora feito no sentido de desenvolver as próximas gerações da tecnologia de display envolve o uso de substratos flexíveis, que representariam uma mudança de paradigma quanto aos locais de produção. Esse é um dos argumentos usados no presente por movimentos institucionais organizados em países como o Reino Unido [Bero8] e a Alemanha [Guro5], onde etapas importantes dessas novas tecnologias têm sido desenvolvidas, no sentido de identificação de nichos que posam trazer de volta a essas regiões uma fatia mais significativa da produção dos displays de um novo patamar tecnológico [Cge10].

2.9.6. Reflexão: a importância dos materiais para o desenvolvimento a tecnologia de displays

Os displays de tela plana formam uma classe de tecnologias de displays avançados que vieram a substituir os TRC pelas vantagens comparativas em termos de preço, consumo de energia, qualidade da resolução, e potencial de integração em sistemas mais complexos. Existem várias tecnologias competindo por uma fração do mercado em busca de ao menos um nicho específico. Durante os anos 80, liderados pelos fabricantes japoneses, DCL se tornaram a tecnologia dominante, especialmente na tecnologia mais avançada de matriz ativa (AMLCDs), em que um transistor está ligado a cada pixel. A crescente presença de componentes de origem japonesa no mercado americano terminou por ser objeto de disputa em ações antidumping dos anos 90's.

Em 2007, a demanda global por materiais eletrônicos representou um mercado de cerca de 86,1 bilhões de US\$ (Tabela 2). Materiais para DTPs se constituíram na maior fatia (29,8%) desse mercado [Ele08], seguido de perto (27,3%) pelo mercado de materiais semicondutores, com especial atenção dada ao segmento de materiais para células solares.

Tabela 2.2: O mercado global por materiais eletrônicos teve em 2007 um crescimento de 10,8% relativo ao ano anterior. A integração dos diferentes setores faz com que a demanda por materiais eletrônicos seja dependente da prosperidade das indústrias a jusante como manufatura de componentes, empacotamento, painéis e displays, baterias solares, etc [Ele08].

Itens	2005	2006	2007(e)	2008(f)	2009(f)	2005-2009 CAGR
IC Semiconducroc	18,309	21,537	23,509	26,597	27,849	11,1
Packaging	12,207	14,191	15,269	16,205	16,884	8,4
PCB	11,084	13,372	14,639	15,664	16,693	10,8
FDP	17,287	22,246	25,683	29,373	33,155	17,7
Sollar Cell	5,681	6,379	7,007	7,815	8,368	10,2
Total	64,568	77,725	86,107	95,654	102,949	12,4
Annual Growth Rate	**	20,8	10,8	11,1	7,6	**

Unit: Million USD; %

O aumento do preço do petróleo em 2007, juntamente com a crescente regulamentação de natureza ambiental estão apontando para um forte crescimento da demanda do mercado de produtos fotovoltaicos e solares. Metas de redução do uso de chumbo foram estabelecidas, ao mesmo tempo em que pressões de preço se fazem sentir sobre matérias primas como ouro e cobre e, em especial,



resina epóxi e outros derivados de petróleo; dessa forma, na fabricação de sistemas integrados de designs inovadores devem ser buscados para redução desses materiais [Eleo8].

Algo peculiar ao mercado de displays é o fato de que muito embora os maiores consumidores de DTP estejam na Europa e na América do Norte, aproximadamente 97% dos dispositivos são atualmente produzidos no Extremo Oriente, principalmente no Japão. O Japão se organizou nos anos 80 com grandes investimentos de base para a expansão da capacidade de produção e uma infraestrutura de grande envergadura com mais de 100 empresas fornecedoras, envolvendo mais de 100.000 empregados. Posteriormente, Coréia, e depois Taiwan, entraram neste setor chave. A Alemanha tem potencial para a produção de CL e dos materiais essenciais para a preparação de OLEDs [Mai].

É certo que os LCDs da próxima geração terão desempenho significativamente melhor que qualquer dos displays anteriores, e que as melhorias adicionais deverão ser centradas em uma manufatura mais eficiente e na redução de custos. Por exemplo, um display de CL requer uma variedade maior de materiais que um equivalente de plasma. Fornecedores na indústria química devem ser capazes de suprir itens como gases industriais, especialmente gases eletrônicos, gases raros, produtos químicos em solução e alta pureza, polarizadores, plásticos à base de metil metacrilato, filtros de cores, CL, camadas de alinhamento e camadas espaçadoras, fotoresistes, e uma lista crescente de outros materiais e componentes [Treos]. Hoje, os materiais representam 60% do custo de fabricação de um DTP [Flao4], conforme ilustrado em [Cge10].

A redução de custos é essencial porque a adoção da tecnologia LCD é extremamente sensível a preços: para cada redução de 1% no preço, as vendas crescem em cerca de 2%. Essa diminuição de preços deve ser concorrente com a redução de custos se margens de lucros devem ser preservadas. Estratégias de redução de custos incluem aumento de escala dos substratos, redução de custos de materiais e melhoria do rendimento. À medida que unidades para fabricação de displays de maior tamanho se fazem necessárias, as plantas industriais correspondentes são rotuladas como de 1ª geração, 2ª geração, etc [Cge10]. As folhas de vidro são cortadas antes da inserção do CL, mas depois de que a maior parte da deposição das diferentes camadas de materiais são depositadas. É necessária uma planta de ao menos 7ª geração para fabricar telas de LCD com 40" ou 42". Uma unidade de 6ª geração pode processar lâminas de vidro de 1,5 m por 1,8 m, enquanto esses valores passam a ser 1,87 m por 2,2 m para o caso de uma planta de 7ª geração [Treos].

O aumento da área do substrato é linear com a receita, enquanto os custos com equipamentos crescem a 30% a cada geração. Nas gerações futuras da tecnologia de displays, há de se considerar a possível existência de um limite prático para o tamanho dos substratos devido ao crescimento

explosivo de tamanhos das plantas industriais (que já têm área equivalente à de vários campos de futebol) e aos custos associados ao transporte [Pye07].

A conclusão geral é de que a tecnologia de displays refaz em sua história o ciclo de desenvolvimento da indústria de semicondutores como um todo, mostrando que os países que souberam aproveitar as suas vantagens comparativas em nichos específicos terminaram por implantar cadeias de produção robustas o suficiente para se manterem competitivas em uma indústria sempre em evolução.

2.10. Conclusão

Em relação à área de materiais avançados, considerando as atuais conjunturas nacional e internacional e com uma visão estratégica de Materiais para Aplicações Eletrônicas, Magnéticas e Fotônicas, chega-se às conclusões apresentadas a seguir, que devem ser resultado do fomento à pesquisa e aos processos de obtenção de materiais avançados correlatos.

- As ações estratégicas propostas visam contribuir para materiais avançados com aplicações em Sensores, Dispositivos, Memórias, Iluminação e Mostradores, eleitos prioritários para alavancar o setor industrial brasileiro e garantir certa independência ao país, na produção e desenvolvimento de produtos com bases tecnológicas afins. Tais ações também têm como objetivo contribuir com os tomadores de decisão do país, no intuito de promover a produção de materiais avançados com foco em oportunidades de negócios e em ações que consideram também as necessidades de infra-estruturais, como laboratórios e equipamentos, e são elas:
- Aumentar de modo prioritário, o investimento na formação de recursos humanos qualificados para a área de microeletrônica, eletrônica, magnetismo e fotônica, como um todo. Isto passa também pela questão de uma valorização das carreiras técnico-científicas, de forma a estimular o engajamento daqueles pesquisadores que de fato produzem C&T, assim como estimular o interesse de jovens pelas carreiras técnico-científicas;
- Criar mecanismos de atração, incentivo e indução do estabelecimento no Brasil de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento de empresas estrangeiras do ramo de materiais eletrônicos, e de microeletrônica em geral, assim como estabelecer mecanismos que favoreçam a criação de cadeias de fornecedores de insumos e suprimentos às indústrias eletrônicas com atuação no País;



- Estabelecer mecanismos de apoio ao consórcio de empresas, universidade e institutos de pesquisa nacionais em ações cooperativas na pesquisa pré-competitiva em materiais eletrônicos, e em microeletrônica em geral;
- Realizar estudos para verificar a possibilidade de implantar no País centros de excelência em P&D em áreas de materiais para a eletrônica (sejam eles semicondutores inorgânicos eficientemente luminescentes, isolantes com alta constante dielétrica, semicondutores orgânicos ou nanotubos de carbono), voltados para o desenvolvimento de mostradores e sistemas eficientes de iluminação. Realizar estudos também para verificar como estabelecer incentivos à criação de empresas nacionais com base tecnológica nesses materiais que possam se tornar competitivas em novos nichos ainda em formação no mercado internacional (como sistemas fotovoltaicos orgânicos);
- Fomentar fabricação de nanoestruturas magnéticas. Realizar estudos para verificar a possibilidade de implantar no País um centro nacional de excelência em nanoestruturas magnéticas, que conte com pesquisadores reconhecidamente atuantes (estejam eles atuando onde estiverem) e que sejam capazes de tornar os projetos realidade;
- Inovar em magnetos permanentes nanocristalinos com temperaturas de Curie acima de 400 °C e magnetização espontânea maiores do que 1,6 MA/m;
- Desenvolver materiais magnéticos moles que apresentem baixas perdas ($<100\text{kW/m}^3$) em frequências acima de MHz;
- Inovar em materiais magnetocalóricos para aplicações em refrigeração;
- Fomentar P&D em materiais semicondutores magnéticos à temperatura ambiente para aplicações em spintrônica. Esta é uma classe especial de materiais, pois possibilita a conexão direta entre sistemas magnéticos de baixa dimensionalidade e as propriedades semicondutoras do meio, com aplicações em dispositivos de memória e processamento de informação;
- Fomentar rede de P&D em nanopartículas ferromagnéticas. Desenvolvimento de super-redes de nanopartículas ferromagnéticas auto organizadas ou arranjos de nanofios em substratos adequados para gravação de dados em escalas de dezenas de TBytes/in²; Fomentar grupos de P&D em filmes finos, com vistas a tornar a gravação magnética perpendicular cada vez mais competitiva;
- Fomentar P&D em técnicas experimentais sofisticadas que sejam sensíveis na escala nanométrica, tanto para medir os tempos de reversão da magnetização como para acompanhar como a magnetização evolui no tempo, o que terá implicações em memórias de alta frequência de gravação/leitura;
- Promover a visita de pesquisadores acadêmicos às empresas que desenvolvem atividades ligadas à utilização de materiais magnéticos, assim como a visita de pessoas ligadas a estas empresas aos laboratórios acadêmicos e de institutos de pesquisa;

- Criar mecanismos específicos para agregar valor às exportações de minérios magnéticos realizadas pelo Brasil. Esta é uma ação que poderá significar em resultados imediatos, pois o Brasil exporta minérios magnéticos em estado bruto que com processamentos relativamente simples poderiam agregar valor à pauta de exportações brasileira;
- Realizar estudos para verificar a possibilidade de implantar no País de um centro nacional de excelência em fotônica, com facilidades de micro- e nanofabricação, que conte com pesquisadores (físicos, químicos, engenheiros...) reconhecidamente atuantes (estejam eles atuando onde estiverem) e que sejam capazes de tornar os projetos realidade; Este centro deve contar com um setor dedicado ao desenvolvimento de sensores fotônicos e outro dedicado ao desenvolvimento de células fotovoltaicas, dentre outros.

Finalmente, como sugestão de trabalhos futuros (e urgentes!), proponho a realização de um estudo prospectivo profundo de oportunidades exclusivamente na área de sensores, utilizando diversas abordagens (química, magnética, eletrônica, fotônica etc..).



Referências

- [Abio7]. ABINEE, Panorama Econômico e Desempenho Setorial 2007 2007, Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. p. 28.
- [Aja99]. Ajayan, P.M., J.-C. Charlier, and A.G. Rinzler, Carbon nanotubes: From macromolecules to nanotechnology. PNAS, 1999. 96(25): p. 14199-14200.
- [Akco7]. AKCELRUD, L. Semicondutores Orgânicos Tecnologia do Futuro. Nota Técnica. Brasília: CGEE. 2007.
- [Aleo6]. Alers, G.B., et al., Containing the Finite Size Effect in Copper Lines. Semiconductor International, 2006(5/11/2006).
- [Alfo6]. "Supercontinuum in Optical Coherence Tomography", em The supercontinuum laser source, Ed. R. Alfano. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [All]. Alliance, I.S., Fifty Years of Microprocessor Technology Advancements: 1965 to 2015, in ISA White Paper. p. 1-12.
- [Allo5]. Allan, A., A History and Overview of the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2005, in DOE Solid State Lighting (SSL) Program Planning Workshop. 2006, ITRS: Orlando, Florida, USA.
- [All07]. Allan, A., Overall Roadmap Technology Characteristics, in 2007 ITRS Public Conference. 2007, ITRS: Makuhari, Japan.
- [And90]. ANDERSON, R.C.; MULLER, R.S.; TOBIAS, C.W. "Investigations of porous silicon for vapor sensing. Sensors and Actuators, A21-23, p. 835-939, 1990.
- [Ardo2]. Arden, W.M., The International Technology Roadmap for Semiconductors — Perspectives and challenges for the next 15 years. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2002. 6: p. 371-377.
- [Asso7]. Assunção, F.C.R., Semicondutores Orgânicos: Proposta para uma estratégia brasileira. 2007, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: Brasília. p. 1-76.
- [Baro3]. Barfield, C., Flat-Panel Displays, in High-Tech Protectionism The Irrationality of Antidumping Laws. 2003, AEI Press: Washington, D.C.
- [Bero7]. BERR, FLAT PANEL DISPLAYS IN THE UK: A guide to UK capability 2008/9. 2007, Department for Business Enterprise & Regulatory Reform.

- [Bja03]. A. Bjarklev, J. Broeng, and A. S. Bjarklev, Photonic crystal fibres. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [Bla98]. Blanchard P M, Greenaway A H, Burnett J and Harrison P. 1998 Two-dimensional bend sensing with a single, multiple-core optical fibre Proc. SPIE 3483 54–8
- [Boa00]. BOARINO, L. et al. NO₂ monitoring at room temperature by a porous silicon gas sensor. *Materials Science and Engineering*, B.69-70, p.210-214, 2000.
- [Boh07]. Bohr, M.T., et al., The High-k Solution. *IEEE Spectrum*, 2007.
- [Bol63]. B. A. Bolto, R. McNeill, D. E. Weiss, Electronic Conduction in Polymers. III. Electronic Properties of Polypyrrole, *Aus. J. Chem.* 1963, 16, 1090.
- [Bur90]. J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burn, A. B. Holmes, Light-emitting diodes based on conjugated polymers, *Nature* 1990, 347, 539–541.
- [Cge10]. Estudo ilustrado de materiais avançados para aplicações eletrônicas, magnéticas e fotônicas no Brasil 2010-2022. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010).
- [Com02]. Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies, N., Implications of Emerging Micro and Nanotechnology. 2002: National Research Council. 266.
- [Com05]. Committee on Globalization of Materials Research and Development, N., Globalization of Materials R&D: Time for a National Strategy. 2005: National Research Council. 216.
- [Con03]. Consortium, U.S.D. Global FPD Industry 2003 Executive Summary. 2003; Available from: http://www.usdc.org/technical/USDCroadmap_ExecutiveSummary.htm
- [Coro6]. C. M. B. Cordeiro, E. M. dos Santos, C. H. Brito Cruz, C. J. S. de Matos, and D. S. Ferreira, *Opt. Express* 14, pp. 8403-8412, 2006.
- [Den07]. Dennard, R.H., J. Cai, and A. Kumar, A perspective on today's scaling challenges and possible future directions. *Solid-State Electronics*, 2007. 51: p. 518–525.
- [Der07]. Derbyshire, K., Interconnect: Future nodes look beyond copper. *Solid State Technology*, 2007. October.
- [Der08]. Derbyshire, K. (2008) What solar cells can learn from electronics. *Solid State Technology*.
- [Der08a]. Derbyshire, K. (2008) Dye-sensitized cells: A different kind of solar. *Solid State Technology*.
- [Dob85]. Dobler, M.; Dumi, M.; Egli, M.; Prelog, V. Chirale Poly(9,9'-spirobifluorenen)-kronenether *Angew. Chem.*, 1985, 97, 793.



- [Doe08]. Doe, P. (2008) Lower-cost displays, memories driving near-term nanotech growth. Solid State Technology.
- [Eggo1]. B. J. Eggleton, C. Kerbage, et al., Opt. Express 9, pp. 698-713, 2001.
- [Eleo8]. Electronic Material Industry, in 2008 Taiwan Industrial Outlook. 2008.
- [Evio2]. "Optical switching applications using PbSe IR-Evidot nanocrystals," technical white paper, Evident Technologies, Novembro 2002.
- [Euro8]. European Technology: Flat Panel Displays, S. Bieller, Editor. 2008, German Flat Panel Display Forum: Frankfurt am Main.
- [Feeo5]. Feeney, J., The Economic Imperative Behind Progress. Future Fab Intl. , 2005. 18.
- [Flao4]. Flat Panel Display Device Materials Industry, in 2004 Taiwan Industrial Outlook. 2004.
- [Flao8]. Flat Panel Display (FPD) Industry, in 2008 Taiwan Industrial Outlook. 2008.
- [Foroo]. Forrest, S., P. Burrows, and M. Thompson, The Dawn of Organic Electronics. IEEE SPECTRUM, 2000(AUGUST): p. 29-34.
- [Fun97]. Funada, F. and M. Hijikigawa, Recent Trend of Display Devices. Sharp Technical Journal, 1997. 1(1): p. 20.
- [Grao4]. Graham, A.P., et al., Towards the integration of carbon nanotubes in microelectronics. Diamond and Related Materials 2004. 13: p. 1296-1300.
- [Guro5]. Gurski, J. and L.M. Quach, Display Technology Overview, in L Y T I C A W H I T E P A P E R. 2005.
- [Haa05]. M. W. Haakestad, et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 17, pp. 819 – 821, 2005.
- [Hato6]. Hatton, B.D., et al., Materials Chemistry for low-k Materials. Materials Today, 2006. 9(MARCH NUMBER 3): p. 22-31.
- [Hil97]. HILBRICH, S. et al. The application of porous silicon interference filters in optical sensors. Thin Solid Films, v.297, p.250-253, 1997.
- [Hiro5]. Hiremane, R., From Moore's Law to Intel Innovation — Prediction to Reality. Technology@ Intel Magazine, 2005(April): p. 1-9.
- [Hoeo4]. Hoenlein, W., et al., Carbon Nanotube Applications in Microelectronics. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, 2004. 27(4): p. 629-634.

- [Hoe06]. Hoenlein, W., et al., Nanoelectronics beyond silicon. *Microelectronic Engineering* 2006. 83: p. 619-623.
- [Hon03]. F.-L. Hong et al., *Opt. Lett.* 28, pp. 1516-1518, 2003.
- [Hoo07]. S. Hoogland, V. Sukhovatkin, I. Howard, S. Cauchi, et al., In: *CLEO/QELS07 - Technical Digest*, paper CPDA7 (2007).
- [Hsi04]. P.-L. Hsiung et al., *Opt. Express* 12, pp. 5287-5295, 2004.
- [Hua04]. Y. Huang, Y. Xu, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, 85, pp. 5182-5184, 2004.
- [Hul05]. Hülsen, B. The spin FET - a spintronics device. 2005; Available from: www.fhi-berlin.mpg.de/~michaeli/member/MaterialsScienceLectures/hulsen-spin-fet.pdf.
- [Hut07]. Hutchby, J., Emergent Research Devices, in 2007 ITRS Public Conference. 2007, ITRS: Makuhari, Japan.
- [Int09]. INTEL. Intel Demonstrates First Working 32nm-based Microprocessor in Both Mobile and Desktop Systems 2009; Available from: http://download.intel.com/pressroom/kits/32nm/westmere/News_Fact_Sheet.pdf.
- [Int09a]. INTEL. Introduction to Intel's 32nm Process Technology 2009 25/02/2009; Available from: http://download.intel.com/pressroom/kits/32nm/westmere/Intel_32nm_Overview.pdf
- [Itro5]. ITRS - International Technology Roadmap for Semiconductors: Emerging research devices, in international technology roadmap for semiconductors. 2005.
- [Itro6]. ITRS, INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS 2006 UPDATE: INTERCONNECT, in INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS. 2006.
- [Jen04]. J. B. Jensen, et al., *Opt. Lett.* 29, pp. 1974-1976, 2004.
- [Jon07]. Jones, S., The Perfect Disruptive Technology? . *Information Display*, 2007. 03.
- [Kal99]. KALTSAS, G.; NASSIOPOULOU, A.G. Novel C-MOS compatible monolithic silicon gas flow sensor with porous silicon thermal isolation. *Sensors and Actuators*, v.76, p.133-138, 1999.
- [Kam08]. Kamata, Y., High-k/Ge MOSFETs for future nanoelectronics. 2008. 11(JAN-FEB 1-2): p. 30-38.
- [Karo4]. K. Karrai, R. J. Warburton, C. Schulhauser, A. Högele, B. Urbaszek, E. J. McGhee, A. O. Govorov, J. M. Garcia, B. D. Gerardot e P. M. Petroff. "Hybridization of electronic states in quantum dots through photon emission". *Nature* 427, 135 (2004).
- [Kar09]. KARNEY, R. Energy Star SSL Program Update. Disponível em: <<http://tinyurl.com/kkdvab>>. Acesso em: 15 jun. 2009.



- [Kha06]. Khan, R.U.A., C. Hunziker, and P. Günter, Perspectives on organic light-emitting diodes for display applications. *J Mater Sci: Mater Electron.* , 2006. 17: p. 467–474.
- [Kni03]. J. C. Knight, *Nature* 424, pp. 847-851, 2003.
- [Kni04]. Knight, W. Most flexible electronic paper yet revealed. 2004; Available from: <http://www.newscientist.com/article/dn4602-most-flexible-electronic-paper-yet-reveal>.
- [Kri]. Krishna, K. and M. Thursby, Whither Flat Panel Displays?
- [Kri04]. Krieg, P. The Red Brick Wall: Computing faces the end of a road.... 2004 [cited 2007; Available from: <http://www.pilesys.com/Red%20Brick%20Wall.pdf>.
- [Kub07]. Kubota, Y.; Watanabe, K.; Tsuda, O.; Taniguchi, T. (2007). "Deep Ultraviolet Light-Emitting Hexagonal Boron Nitride Synthesized at Atmospheric Pressure". *Science* 317 (5840): 932.
- [Kyu05]. Kyu-ho, S. World Semiconductor Market Seen to Grow Through 2008. 2005 [cited 2007; Available from: <http://english.etnews.co.kr/news/print.html?id=200511090001>.
- [Lar03]. T. T. Larsen, A. Bjarklev, D. S. Hermann, and J. Broeng, *Opt. Express* 11, pp. 2589-2596, 2003.
- [Law05]. Law, M.e.a., Nanowire dye-sensitized solar cells. *Nature Materials*, 2005. 4: p. 455-459.
- [Lee]. Lee, W.W., Integration Challenges of Low-k Materials, *Future Fab Intl.*
- [Lif07]. Life Beyond CMOS. 2005 [cited 2007 05/DEZ/2007]; Available from: <http://cordis.europa.eu/ictresults/index.cfm/section/news/tpl/article/BrowsingType/Features/ID/74884>
- [Liko8]. Likharev, K.K., CMOL: Second life for silicon? *Microelectronics Journal*, 2008. 39: p. 177–183.
- [Livo5]. "Accidental Invention Points to End of Light Bulbs". *LiveScience.com*. October 21, 2005. http://www.livescience.com/technology/051021_nano_light.html. Retrieved 2007-01-24.
- [Luq07]. A. Luque, A. Martí, A. J. Nozik, Solar cells based on quantum dots: multiple éxciton generation and intermediate bands, *MRS Bulletin* 32, 236-241 (2007).
- [Mai]. Maiser, E., Flat Panel Displays Innovative Products Open Horizons, German Flat Panel Display Forum: Frankfurt am Main.
- [Mar05]. Markoff, J., Chip Industry Sets a Plan for Life After Silicon in *New York Times*. 2005.
- [Mas02]. "Quantum-dot LED may be screen of choice for future electronics". *Massachusetts Institute of Technology News Office*, December 18, 2002.
- [May05]. P. D. Maycock, *PV News* 24 (2005).

- [Mcc07]. McCray, W.P., Beyond the Red Brick Wall: Spintronics, Novelty, and Over-the-Horizon Technologies, in CHF-Wharton School Nanotech Conference. 2007.
- [Mcg99]. McGINNIS, S.; SINES, P.; DAS, B. Pulsed current anodization. An effective method for fabricating patterned porous silicon p-n junction light-emitting diodes. *Electrochemical and Solid-State Letters*, v.2, n.9, p. 468-471, 1999.
- [Med]. MEDEA. 2T103: Integration of 45 nm CMOS technology (FOREMOST). Available from: http://www.medeaplus.org/web/downloads/profiles/2T103_profile.pdf.
- [Mih97]. MIHALCESCU, I.; LERONDEL, G.; ROMENSTAIN, Porous silicon anisotropy investigated by guided light. *Thin Solid Films*, v.297, p.245-249, 1997
- [Mono1]. T. Monro et al., Sensing with microstructured optical fibers. *Measurement Science and Technology*, v. 12, p. 854-858, 2001
- [Moo65]. Moore, G.E., Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 1965. 38 (8 - April 19).
- [Moo03]. Moore, G.E., No Exponential is Forever. 2003.
- [Niko8]. Nikonov, D.E. and G.I. Bourianoff, Operation and Modeling of Semiconductor Spintronics Computing Devices. *J Supercond Nov Magn*, 2008. 21: p. 479-493.
- [Noz05]. A. J. Nozik, Exciton multiplication and relaxation dynamics in quantum dots: applications to ultrahigh-efficiency solar photon conversion, *Inorg. Chem.* 44, 6893-6899 (2005).
- [Ouz03]. D. G. Ouzounov, F. R. Ahmad, D. Müller, et al., *Science* 301, pp. 1702-1704, 2003.
- [Pav97]. PAVESI, L.; GUARDINI, R.; BELLUTTI, P. Porous Silicon n-p light emitting diode. *Thin Solid Films*, v.297, p.272-276, 1997.
- [Pop63]. M. Pope, H. Kallmann, P. Magnante, *J. Chem. Phys.* 1963 38, 2042.
- [Pra04]. P. N. Prasad, *Nanophotonics* (Wiley, New Jersey, 2004).
- [Pus08]. (2008) Pushing the limits of chip miniaturisation electroline.com.au.
- [Pye07]. Pye, T., LCD Yields Strategies. *Solid State Technology*, 2007(February): p. 45-49.
- [Qui04]. Quinsey, R. (2004) State of the Compound Semiconductor Industry. 1-4.
- [Ramo6]. Ramanathan, R.M. and R. Willoner, Silicon Innovation: Leaping from 90 nm to 65 nm. *Technology@Intel Magazine*, 2006(March): p. 1-9.



- [Rag]. Raghavan, G., M. Sokolich, and W.E. Stanchina. Indium phosphide ICs unleash the high frequency spectrum. Available from: <http://www.spectrum.ieee.org/print/1593>.
- [Riso6]. Risch, L., Pushing CMOS beyond the roadmap. *Solid-State Electronics*, 2006. 50: p. 527–535.
- [Rito4]. T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen, et al., *Opt. Express* 12, pp. 4080-4087, 2004.
- [Roco5]. ROCHA, A.R., et al., Towards molecular spintronics. *Nature Materials*, 2005. 4: p. 335-339.
- [Rogo1]. Rogers, J.A., et al., Paper-like electronic displays: Large-area rubberstamped plastic sheets of electronics and microencapsulated electrophoretic inks. *PNAS* 2001. 98 (9): p. 4835-4840.
- [Roio4]. J. Roither, W. Heiss, D. V. Talapin, N. Gaponik, e A. Eychmüller. "Highly directional emission from colloiddally synthesized nanocrystals in vertical cavities with small mode spacing". *Appl. Phys. Lett.* 84, 2223 (2004).
- [Ros07]. Roster, P., Process, Integration, Devices, and Systems Working Group, in 2007 ITRS Public Conference. 2007, ITRS: Makuhari, Japan.
- [Rus07]. P. Russell, *Optics and Photonics News* vol. 18, nº 7, pp. 26-31, Julho e Agosto 2007.
- [Ruto1]. Rutten, P., et al., Is Moore's Law Infinite? The Economics Of Moore's Law, in Kellogg TechVenture 2001 Anthology.
- [Saro6]. E. H. Sargent, *Adv. Mater.* Vol. 17, pp. 515-522, 2006.
- [Sco6] R. D. Schaller, V. I. Klimov, Non-Poissonian Exciton Population in Semiconductor Nanocrystals via Carrier Multiplication, *Phys. Rev. Lett.* 96, 097402 (2006).
- [Sy06] R. D. Schaller, M. Sykora, J. M. Pietryga, V. I. Klimov, Seven excitons at a cost of one: redefining the limits for conversion efficiency of photons in charge carriers, *Nanoletters* 6, 424-429 (2006).
- [Sht05]. Shtein, M., et al., Method of fabricating an optoelectronic device having a bulk heterojunction. 2005: United States.
- [Sla07]. *Advanced Inorganic Materials for Photovoltaics*, Ed. A. Slaoui, R. T. Collins, *MRS Bulletin* 32, 211-218 (2007).
- [Smio9]. Smith, S.L., 32nm Westmere Family of Processors Intel, Editor. 2009.
- [Smoo7]. Smolka, S, Barth, M, and Benson, O. Selectively coated photonic crystal fiber for highly sensitive fluorescence detection. *Applied Physics Letters* 90, 111101 (2007).

- [Stoo06]. Stokes, J. Understanding Moore's Law. 2003 [cited Published: February 20, 2003 - 08:50PM CT 05/DEZ/2007]; Available from: <http://origin.arstechnica.com/articles/paedia/cpu/moore.ars/5>
<http://origin.arstechnica.com/articles/paedia/cpu/moore.ars/6>.
- [Tan87]. C. W. Tang, S. A. VanSlyke, Organic electroluminescent diodes, *Appl. Phys. Lett.* 1987, 51, 913.
- [Tano06]. Taniyasu, Yoshitaka; Kasu, Makoto; Makimoto, Toshiki (2006). "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres". *Nature* 441 (7091): 325.
- [Teco1]. A Technology Boost for U.S. Manufacturers of Flat Panel Displays. 2001, AMERICAN DISPLAY CONSORTIUM.
- [Thoo6]. Thompson, S.E. and S. Parthasarathy, Moore's law: the future of Si microelectronics. *Materials Today*, 2006. 9(6): p. 20-25.
- [Treo5]. TREMBLAY, J.-F., THINNING FLAT PANELS. *Chemical and Engineering News*, 2005. 83(26): p. 20-25.
- [Treo5a]. TRENDS, R.-T., The 40th anniversary of Moore's Law – can the trend continue? *ECE*, 2005(December): p. 24-25.
- [Treo7]. Trevelyan, T., et al., Controlled manipulation of atoms in insulating surfaces with the virtual atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 2007. 98(2).
- [Treo7a]. Trevelyan, T. Quantum Computing - Yes, no, or both? 2007 [cited 2009 11/01/2009]; Available from: http://www.firstscience.com/home/articles/technology/quantum-computing-yes-no-or-both_34405.html.
- [Troo6]. Trouiller, Y., From 120 to 32 nm CMOS technology: development of OPC and RET to rescue optical lithography. *C. R. Physique*, 2006. 7: p. 887–895.
- [Vano7]. van Driel, W.D., Facing the challenge of designing for Cu/low-k reliability *Microelectronics Reliability* 2007. 47: p. 1969–1974.
- [Vdi]. VDI, Photonics21 Technology Platform, "Photonics for the 21st Century", <http://web13.vdi.net-build.de/>
- [Velo7]. Veloso, A., et al., Advanced CMOS device technologies for 45nm node and below. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2007. 8: p. 214–218.
- [Wano8]. Wang, K.L., Z. Zhao, and A. Khitun, Spintronics for nanoelectronics and nanosystems. *Thin Solid Films*, 2008. 517: p. 184-190.
- [Wat96]. WATANABE, W.; OKADA, T.; CHOE, I.; SATO, Y. Organic vapor sensitivity in a porous silicon device. *Sensors and Actuators*, B33, p.194-197, 1996.



- [Whio2]. Whitesides, G.M. and M. Boncheva, Beyond molecules: Self-assembly of mesoscopic and macroscopic components. PNAS, 2002. 99(8): p. 4769-4774.
- [Wogo6]. U. Woggon, Optical properties of semiconductor quantum dots, (Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 136, 1996).
- [Wono6]. Wong, H. and H. Iwai, On the scaling issues and high-j replacement of ultrathin gate dielectrics for nanoscale MOS transistors. Microelectronic Engineering 83, 2006. 83: p. 1867–1904.
- [Yu97]. YU, L.Z.; WIE, C.R. Study of MSM photodetector fabricated on porous silicon. Sensors and Actuators, A39, p.253-257, 1993.
- [Yu04]. Yu, A., A Study of Carbon Nanotubes and Their Applications in Transistors. 2004.
- [Zan97]. ZANGOIE, S.; BJORKLUND, R.; ARWIN, H. Vapor sensitivity of thin porous silicon layers. Sensors and Actuators, B n.43, p.168-174, 1997.
- [Zeio8]. Zeitzoff, P. (2008) 2007 International Technology Roadmap: MOSFET scaling challenges. Solid State Technology February, 2008.



3. Materiais avançados para o setor espacial¹

3.1. Apresentação

Apesar de foguetes existirem há muitos séculos, a Era Espacial e o correspondente Direito Espacial têm, oficialmente, pouco mais de 50 anos. O marco inicial neste contexto foi a colocação em órbita da Terra, em 4 de outubro de 1957, do satélite Sputnik I, pelos soviéticos. Este satélite rompeu definitivamente a linha de Von Kármán, que separa a atmosfera, este oceano gasoso que nos envolve, do espaço.

Os países da Terra, consoante suas aspirações e contextos políticos, econômicos, sociais, científico-tecnológicos e militares, conceberam diferentes objetivos relativos ao espaço. O Brasil busca atingir, nesta década, o mesmo patamar alcançado por soviéticos e norte-americanos nos anos 1950, ou seja, colocar em órbita, por seus próprios meios, empregando veículos nacionais, lançados de território nacional, satélites para coleta de dados, sensoriamento remoto e outros fins, todos concebidos, desenvolvidos e produzidos por indústrias brasileiras.

Os sistemas espaciais são produzidos pelo ser humano para acessarem o espaço e lá permanecerem executando tarefas úteis aos nossos propósitos. Como sistemas físicos, eles são construídos empregando materiais que são, em sua grande maioria, comuns às aeronaves. Outros materiais, porém, derivam daqueles empregados em aeronáutica, por possuírem características especiais.

Nos seus primeiros 50 anos de existência, a *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa) produziu cerca de 6.400 patentes, o que representa uma média de uma patente a cada três dias. Segundo Pater e Curto (2007), a maioria dessas patentes é relativa ao desenvolvimento de novos materiais. Assim, o setor aeroespacial apresenta-se como um setor prolífico para a geração de inovações em materiais.

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Maurício Pazini Brandão (coordenador e relator), Nelson Veissid (revisor), Antônio Jorge Abdalla, Carlos de Moura Neto, Francisco Cristóvão Lourenço de Melo, Jorge Otubo, Mirabel Cerqueira Rezende (co-relatores).

Este artigo tem como objetivo apresentar propostas que possam impulsionar projetos e atividades de pesquisa, desenvolvimento, inovação e produção de materiais e sistemas para o nosso Setor Espacial. Para atingir este objetivo, que é voltado para a nossa realidade, torna-se útil conhecer um pouco da história, organização, objetivos e características do Programa Espacial Brasileiro.

As atividades espaciais tiveram início no Brasil no ano de 1955. Em 1961 foram iniciados os trabalhos que deram origem ao Instituto Nacional de Atividades Espaciais (Inpe), dentro da estrutura organizacional do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Em 1964 foi lançado o embrião do atual Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), subordinado ao atual Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), órgão da estrutura do Comando da Aeronáutica (Comaer) e Ministério da Defesa (MD).

Em 1965, foi criado o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) no Rio Grande do Norte, dando início ao lançamento de foguetes de sondagem em território nacional. Em 1980 foi criada a Missão Espacial Completa Brasileira (MECB) e, em cumprimento a esta Missão, foi dado início ao desenvolvimento do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) no Maranhão. Em atendimento à MECB, o MCT, através do Inpe, ficou responsável pelo desenvolvimento de satélites e o DCTA, através do CLA e IAE, respectivamente, ficou incumbido de desenvolvimento do Centro de Lançamento e do Veículo Lançador de Satélites (VLS-1).

Em 1994 foi criada a Agência Espacial Brasileira (AEB), à qual foi atribuída a missão de coordenação do tema, seguindo-se o lançamento do Sistema Nacional de Desenvolvimento de Atividades Espaciais (SINDAE), da Política Nacional de Desenvolvimento (PNDAE) e, na execução, do Programa Nacional (PNAE). Desde então, as atividades espaciais brasileiras têm seguido os ditames da PNDAE e do PNAE, com revisões periódicas de objetivos, metas e diretrizes.

A AEB é o órgão central do SINDAE. As atividades do PNAE estão baseadas na busca de autonomia, de capacitação e competitividade industrial, de forma a promover significativos retornos à sociedade, em tese e em realidade, sustenta todo esse esforço.

Os principais temas relacionados à autonomia são o acesso ao espaço, o domínio de tecnologias críticas, a capacitação de recursos humanos e a infraestrutura de fabricação, integração, testes, lançamento, comando e controle.



Em termos de capacitação e competitividade industrial, os principais assuntos são a participação industrial, a normalização, a qualidade, a inovação, a cooperação indústria-academia e a exportação dos produtos espaciais.

Finalmente, os retornos à sociedade envolvem temas como coleta de dados, meteorologia, sensoriamento remoto, ciência e tecnologia espaciais e telecomunicações. As principais aplicações visadas pelos retornos sociais são agricultura, planejamento urbano, planejamento e proteção ambiental, oceanografia, tele-educação, tele-justiça, tele-medicina, controle do tráfego aéreo, navegação e defesa nacional.

O setor espacial tem como características envolver sistemas de alto valor agregado, de alta qualidade e altamente intensivos em tecnologia e inovação. Esses sistemas têm baixa escala de produção, longos prazos de maturação, implicando gestão complexa, multidisciplinariedade, multinacionalidade e multi-institucionalidade. O setor espacial é estratégico para a consecução dos objetivos nacionais. Trata-se de um setor fortemente regulado através de regimes de controle e de tratados internacionais.

A baixa escala de produção dos sistemas espaciais tem como consequência direta um baixo consumo de materiais e um baixo transbordamento econômico e social. Porém, este é um efeito aparente, pois as tecnologias espaciais têm um potencial intangível de estímulo a outros setores da atividade humana. Os setores mais próximos, que tradicionalmente têm se beneficiado deste potencial de *spin-off*, são o aeronáutico e o de defesa.

Os sistemas espaciais que são objetos deste artigo são aqueles que, em atendimento ao PNAE, buscam assegurar o acesso ao espaço e os retornos à sociedade. Esses sistemas são foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites e satélites para diversas aplicações. Os materiais empregados em sistemas espaciais são de natureza diversificada, uma vez que eles servem, entre outras, às funções de estrutura, propulsão, proteção térmica, sensoriamento e controle do status desses sistemas.

As propostas identificadas neste estudo de materiais têm alinhamento com as políticas, programas e diretrizes do setor espacial. Elas foram formuladas tendo por base a busca de autonomia, aumento da capacitação e competitividade industrial e retornos à sociedade brasileira. Essas propostas orbitam uma diretriz primária que visa criar uma empresa integradora para sistemas espaciais, capaz de reunir e consolidar diversas tecnologias amadurecidas em universidades e ins-

titutos de pesquisas sob forma de produtos inovadores que possam ser utilizados no país e no exterior. Seguem-se as propostas:

- 1) Utilizar todos os meios disponíveis para recuperar as competências requeridas para a produção de ligas de titânio no Brasil e para estimular ao menos uma indústria nacional a adquirir essas competências;
- 2) Apoiar as linhas de pesquisa sobre materiais compósitos avançados, pois delas poderão resultar inovações e patentes para aumentar a autonomia em materiais estratégicos do Programa Espacial Brasileiro;
- 3) Apoiar iniciativas de pesquisas e desenvolvimentos de combinações de metais, fibras reforçadoras e matrizes poliméricas, de forma a obter soluções híbridas inovadoras de materiais para aplicações aeroespaciais;
- 4) Fomentar ações de pesquisa e desenvolvimento de materiais de alta densidade energética inovadores, de forma a melhorar os seus desempenhos, baixar os seus custos de produção e reduzir a dependência de insumos importados;
- 5) Adicionar às estratégias montadas para os materiais da cadeia energética solar e ambiental fomentos em pesquisa e desenvolvimento de materiais que sejam menos afetados pelas radiações solares e pelos ciclos térmicos naturais da termosfera terrestre.

3.2. Características do setor espacial

Diferentes países ocupam diferentes patamares na moderna conquista espacial. Faz-se necessário entendermos a posição do Brasil neste contexto, pois esta posição é que acaba determinando quais sistemas espaciais deveremos produzir a médio e longo prazo, de forma que, dessa produção, possamos extrair a futura demanda de materiais estratégicos para o setor espacial.

Tabela 2-1: Escala dos países na moderna conquista espacial

Nível alcançado	Objetivo correspondente	Países ou grupos multinacionais
10	Descida tripulada em Marte, Phobos ou Deimos	Nenhum
9	Base permanente na Lua, com visita aos objetos próximos no Sistema Solar	Nenhum
8	Descida na Lua, com presença orbital contínua	Estados Unidos da América



7	Capacidade independente de enviar astronautas ao espaço	Rússia e China
6	Capacidade de treinar astronautas e conduzir missões científicas	Europa e Japão
5	Capacidade independente de lançar satélites em órbita da Terra	Índia e Israel
4	Existência de uma Agência Espacial Nacional com satélites próprios	Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, Coreia do Sul, Irã, Nigéria, Paquistão, Taiwan e Ucrânia
3	Existência de uma Agência Espacial Nacional sem satélites próprios	África do Sul, Arábia Saudita, Argélia, Bangladesh, Chile, Coreia do Norte, Indonésia, Malásia, Peru, Tailândia e Turquia
2	Existência de Academia de Ciências e formação de recursos humanos relacionados ao espaço	Armênia, Belarus, Cingapura, Colômbia, Croácia, Geórgia, Líbano, México, Nova Zelândia, Sérvia e Venezuela
1	Existência de observatórios, planetários e/ou clubes de astronomia	Albânia, Azerbaijão, Bahrein, Belize, Bolívia, Bósnia, Brunei, Congo, Costa Rica, Cuba, Equador, Egito, Emirados Árabes Unidos, Etiópia, Filipinas, Gana, Jamaica, Jordânia, Kazaquistão, Kuwait, Líbia, Macedônia, Madagascar, Marrocos, Moldávia, Montenegro, Namíbia, Omã, Qatar, República Dominicana, Síria, Sri Lanka, Tadjiquistão, Tunísia, Turcomenistão, Uruguai, Uzbequistão, Vietnã e Zimbábue

Fonte: <http://www.hudsonfla.com/spacerace.htm>

A Tabela 2-1 mostra os países líderes da conquista espacial, em uma escala com dez níveis. Nesta escala, o Brasil aparece no nível 4, como um país que possui uma Agência Espacial e satélites próprios. Esta posição denota um relativo amadurecimento de nossas atividades espaciais face à posição de outros países em desenvolvimento.

É natural nos questionarmos sobre as razões que levam os seres humanos ao espaço. As respostas mais próximas ao nosso nível tecnológico nos ensinam que os satélites propiciam vários resultados interessantes para emprego comercial, científico ou militar. À medida que novos e mais sensíveis sensores são colocados no mercado, aumenta o leque de aplicações possíveis para esses sistemas espaciais. As aplicações mais conhecidas são coleta de dados, meteorologia, sensoriamento remoto, ciência e tecnologia espaciais, telecomunicações, controle de tráfego aéreo e navegação. Portanto, são os retornos à sociedade os motivos mais importantes para que nos dediquemos à conquista espacial.

Em função desses retornos, muitos dos quais não são evidentes ao grande público, é que os países procuram investir em tecnologias aplicáveis em foguetes, satélites e outros sistemas espaciais, de

forma que, com recursos próprios ou compartilhados, possam ter necessidades nacionais supridas por tais sistemas.

O setor espacial possui algumas características que o tornam singular no contexto dos demais setores da atividade humana. Entre essas características, destacam-se as seguintes:

- **Alto valor agregado** - Os sistemas espaciais envolvem, muitas vezes, materiais especiais e, sobretudo, a manifestação da mais sofisticada inteligência humana. São frutos longamente maturados, a altos custos de pesquisa e desenvolvimento, donde resultar os seus altos valores agregados. No caso de satélites, a ordem de grandeza desse indicador é estimada como sendo 50 mil dólares por quilograma de produto.
- **Intensividade em tecnologia e inovação** - Por se destinarem a aplicações sofisticadas, que remetem à fronteira do conhecimento humano, os sistemas espaciais apresentam elevada incorporação de tecnologias inovadoras, muitas vezes em nível de protótipo. Normalmente, têm alto potencial para gerar spin-offs industriais em muitas outras áreas da atividade econômica.
- **Baixa escala de produção** - Os sistemas espaciais são produzidos em pequenos números e, não raro, são únicos. É o caso, por exemplo, do observatório espacial Hubble, uma singularidade em termos de produção industrial, mas de valor intangível quanto à importância, qualidade e quantidade de seus resultados científicos. É o caso, também, do nosso VLS-1, do qual apenas três protótipos de vôo foram fabricados até hoje.
- **Longos prazos de maturação** - O ciclo de vida de um sistema espacial é particularmente longo. Das fases de concepção e especificação à efetiva entrada em operação, passando pelas fases de pesquisa, desenvolvimento e produção, normalmente decorrem muitos anos. Ao longo desse processo, muitas tecnologias são incorporadas ao sistema produzido e muitas outras concorrem para o seu aperfeiçoamento, dentro do mesmo prazo.
- **Gestão complexa** - Pela sua singularidade, o Setor Espacial coloca enormes desafios para as pessoas que se dedicam à sua gestão. Temas como organização, normalização, recursos humanos especializados, pesquisa e desenvolvimento, infraestrutura, operações, financiamento, planejamento e controle requerem atenção especial e apoio político. Para aumentar a complexidade, o setor é altamente regulado, dado o envolvimento de tecnologias sensíveis, de caráter dual (civil e militar).
- **Multidisciplinaridade, multinacionalidade e multi-institucionalidade** - Os sistemas espaciais só podem existir pela convergência de conhecimentos multidisciplinares, os quais raramente são encontrados em um único local. Assim, para a fruição das atividades espaciais, é normal que ocorram parcerias entre várias instituições, dentro de um mesmo país, ou cooperações internacionais, como são os casos do Brasil com a China (satélites) e com a Ucrânia (lançadores).



- **Estratégico para com os objetivos nacionais** - Por envolver um enorme potencial de estímulo econômico e uma rigorosa regulação internacional para controle de tecnologias sensíveis, o setor espacial torna-se estratégico para a consecução dos objetivos estabelecidos pelos estados nacionais. A extrapolação do tema para as relações internacionais é decorrência óbvia, particularmente se temas espaciais e nucleares entrarem em interação. Esta característica explica o fato de existirem políticas nacionais específicas de apoio ao Setor Espacial.
- **Existência de instrumentos de controle** - O Setor Espacial é altamente regulado, em função da sensibilidade das aplicações que podem decorrer de suas tecnologias. Como foguetes de sondagem e veículos lançadores de satélites podem transmutar-se em mísseis, regimes informais como o Missile Technology Control Regime (MTCR) e instrumentos formais como o Tratado de Não-Proliferação Nuclear (TNP) são aplicados para controlar as tecnologias envolvidas e as relações internacionais. Com base nesses regimes e tratados, embargos tecnológicos são impostos pelas nações desenvolvidas às emergentes envolvendo todos os materiais, componentes e sistemas espaciais.
- **Alta qualidade** - Assim como ocorre no setor aeronáutico, atividades de certificação visam garantir a segurança e integridade dos sistemas lançados e das pessoas que os operam e que permanecem na superfície terrestre. Essas atividades envolvem a definição de requisitos de certificação, normas, padrões, infraestrutura laboratorial, de lançamento e de monitoramento, de forma a assegurar a qualidade dos produtos e serviços espaciais. No caso dos materiais, essa qualidade tem início na caracterização de insumos, de forma que as suas propriedades sejam verificadas e metas determinadas possam ser atingidas com satisfação dos requisitos estabelecidos.

3.3. Organização do setor espacial brasileiro

As atividades espaciais no Brasil estão organizadas com base no Sistema Nacional de Desenvolvimento de Atividades Espaciais (Sindae). Este sistema foi instituído pelo Decreto nº 1.953, de 10 de julho de 1996, sendo constituído por três componentes: um órgão central, a Agência Espacial Brasileira (AEB), responsável pela coordenação geral do Sistema, órgãos setoriais, responsáveis pela coordenação setorial e execução das ações contidas no Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) e órgãos e entidades participantes, responsáveis pela execução de ações específicas do PNAE, formalizadas através de convênios de participação.

A AEB – órgão central do Sindae – é uma autarquia federal, de natureza civil, criada por meio da Lei nº 8.854, de 10 de fevereiro de 1994, para coordenar e promover o desenvolvimento de ativida-

des espaciais de interesse nacional. Os órgãos setoriais do Sindae são o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), pertencente à estrutura do Comaer e Ministério da Defesa (MD) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), pertencente à estrutura do MCT, através de sua Subsecretaria de Controle das Unidades de Pesquisa (SCUP).

A última atualização da PNDAE foi realizada através do Decreto nº 1.332, em 8 de dezembro de 1994. Esta política tem como objetivo geral promover a capacidade do País para, segundo conveniência e critérios próprios, utilizar os recursos e as técnicas espaciais na solução de problemas nacionais e em benefício da sociedade brasileira. Deste objetivo geral, surgem os seguintes três objetivos específicos:

- 1) estabelecimento no país de competência técnico-científica na área espacial, que lhe possibilite atuar com real autonomia;
- 2) promoção do desenvolvimento de sistemas espaciais, bem como de meios, técnicas e infraestrutura de solo correspondentes, que venham propiciar ao Brasil a disponibilidade de serviços e informações de sua necessidade ou interesse e
- 3) adequação do setor produtivo brasileiro para participar e adquirir competitividade em mercados de bens e serviços espaciais.

3.4. Uma indústria espacial para o Brasil – reinventando a Embraer

A Empresa Brasileira de Aeronáutica S. A. (Embraer) foi criada em 1969 para produzir uma centena de aviões Bandeirante, atendendo a uma encomenda do então Ministério da Aeronáutica. O poder de compra do Estado brasileiro foi usado nessa ocasião para gerar uma demanda que justificasse, do ponto de vista econômico, a produção seriada desse avião.

A gênese da Embraer foi um projeto iniciado em 1965 no então Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento (IPD) do então Centro Técnico da Aeronáutica (CTA). Nesse projeto, um avião bimotor turboélice robusto foi concebido e desenvolvido para operar em pistas despreparadas no interior do País. Visualizava-se, também, a possibilidade de exportação. Três protótipos foram construídos para demonstrar a viabilidade técnica do projeto. Porém, por quase um ano não houve uma solução industrial para a produção da aeronave.

No projeto do avião Bandeirante, o CTA, organização concebida para formar recursos humanos, realizar pesquisas e desenvolver soluções tecnológicas de interesse do Setor Aeronáutico Brasi-



leiro, teve que fazer o papel de indústria. Nenhuma indústria aeronáutica nacional – e não havia muitas opções na época – arriscou-se a assumir o projeto. Houve quem apresentasse a sugestão de vender o projeto para uma indústria estrangeira. Felizmente, esta não foi a estratégia escolhida pelos gestores da época.

Não é – e nunca foi – missão do CTA fabricar sistemas aeroespaciais. Seu papel institucional sempre foi o de explorar, desenvolver tecnologias e estimular a indústria nacional a capacitar-se para produzir tais sistemas. Antes do avião Bandeirante, dois outros grandes projetos foram desenvolvidos no Centro, mas não foram adiante de demonstradores de conceitos e protótipos: a aeronave mista chamada de Converteplano e o helicóptero Beija-Flor.

Praticamente duas décadas foram necessárias, desde a criação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), para que fosse concebida uma solução industrial aeronáutica definitiva no Brasil. Esse cenário, hoje bastante conhecido, não se repetiu no Setor Espacial.

O DCTA vem desenvolvendo diversos tipos de foguetes de sondagem há mais de quatro décadas e o Veículo Lançador de Satélites (VLS-1) há mais de duas décadas. Em todos esses casos, por falta de uma solução industrial, o Departamento viu-se na imposição de praticar o papel de integrador. Todos os componentes, subsistemas e sistemas foram concebidos, projetados, testados e produzidos ou no próprio DCTA ou sob encomenda do Departamento nas indústrias. Hoje, não existe uma empresa que se responsabilize pelos trabalhos de montar todas as partes produzidas, certificar sistemas e integrar sistemas completos para utilização posterior.

Os trabalhos do Inpe com satélites não apresentam cenários muito distintos dos que já foram aqui descritos para o DCTA. Não existem indústrias integradoras de satélites no Brasil. Com essa carência, vê-se o Instituto na contingência de produzir partes *in-house*, contratar indústrias para manufaturar componentes e fazer ele próprio o papel de integrador. Uma consequência direta desse cenário é que o Inpe tem que possuir recursos humanos, instalações laboratoriais e infraestruturas que, em primeira instância, poderiam estar localizadas em indústrias. Apesar de serem sistemas de altíssimo valor agregado, da ordem de U\$ 50 mil por quilograma, satélites ainda não são produzidos no Brasil em quantidade suficiente para encorajar iniciativas industriais privadas.

Acontece que estamos vivendo um momento particularmente especial na história do Programa Espacial Brasileiro. Temos satélites em órbita há mais de uma década, com bom desempenho, excedendo as expectativas de projeto. Os retornos à sociedade, especialmente no que tange a aplicações de sensoriamento remoto, estabelecem padrões inéditos de excelência, indisponíveis em vários ou-

tros países considerados tecnologicamente mais avançados. Foram retomados com vigor os trabalhos de reconstrução da Torre Móvel de Integração (TMI), necessária para integração e montagem em Alcântara do Veículo Lançador de Satélites. Prosseguem também os trabalhos de melhoria dos sistemas que compõem este veículo, aumentando a sua confiabilidade.

Mas o que tornam os tempos vividos únicos no Setor é que testemunhamos recentemente a conclusão da certificação do primeiro sistema espacial completo do Brasil, segundo normas de reconhecimento internacional. Trata-se do foguete de sondagem VSB-30, desenvolvido no Brasil, com participação da Alemanha.

Os protótipos do avião Bandeirante foram desenvolvidos sem que requisitos de certificação guiassem o projeto, mesmo porque tais requisitos não existiam à época. Havia normas para aviões pequenos (FAR-23) e para aviões grandes, de transporte (FAR-25). Os brasileiros haviam inovado, explorando um nicho comercial para o qual regras de certificação não tinham ainda sido estabelecidas. Apenas na década de 1970, após intensas negociações técnicas, políticas e diplomáticas, é que os norte-americanos decidiram criar uma extensão especial de suas regras de certificação, o SFAR-23, aplicável a aviões do tamanho do Bandeirante. Foi essa certificação que permitiu a entrada do avião no mercado daquele país, ampliando o sucesso comercial do modelo e a consolidação da Embraer como uma nova indústria aeronáutica.

A certificação do VSB-30 significa o reconhecimento oficial pelo Estado brasileiro, por meio do Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI), de que este foguete de sondagem é um produto de qualidade, que atende aos mais rigorosos requisitos estabelecidos para um engenho de sua classe. Este reconhecimento, aliado à já consagrada competência de nosso país em certificação aeronáutica, é um excelente trunfo para que o foguete de sondagem VSB-30 possa ser exportado, como já está sendo para a Alemanha. A ampliação do mercado, em decorrência dessa certificação, pode vir a ter boas repercussões para as indústrias associadas ao setor espacial brasileiro.

Existe uma forma racional para se avaliar a maturidade de tecnologias e permitir uma comparação entre elas. A Nasa desenvolveu, para estes exatos propósitos, uma escala a que chamou de *Technology Readiness Levels* (Níveis de Maturidade Tecnológica). Trata-se de uma sequência de nove estágios, assim identificados:

- 1) Princípios básicos observados e relatados,
- 2) Conceito tecnológico e/ou aplicação formulado(a),
- 3) Função crítica ou prova-de-conceito demonstrada,



- 4) Componente e/ou aplicação desenvolvido(a),
- 5) Componente validado em ambiente operacional,
- 6) Sistema e/ou componente crítico demonstrado,
- 7) Protótipo demonstrado em ambiente operacional,
- 8) Sistema real completo e qualificado em testes e
- 9) Sistema real aprovado em missões operacionais.

Existe um processo detalhado por detrás desta sequência de nove estágios. Aos primeiros estágios, costuma-se associar universidades como lugares típicos de ocorrência. Para estágios intermediários, os lugares típicos devem ser institutos de Pesquisas e Desenvolvimento (P&D). Já para estágios mais maduros, os locais mais apropriados são indústrias.

Detalhes à parte, este tema é levantado aqui para permitir qualificar o VLS-1 como um sistema atualmente em nível 7 – um protótipo demonstrado em ambiente operacional, o VSB-30 como um sistema atualmente em nível 8 – um sistema real completo e qualificado em testes, e nossos satélites desenvolvidos e colocados em órbita como sistemas atualmente em nível 9 – sistemas reais aprovados em missões operacionais. Essas qualificações servem para demonstrar a maturidade do Programa Espacial Brasileiro, maturidade esta que reclama ao menos uma indústria especializada a dar-lhe suporte.

Além dos foguetes de sondagem VSB-30, do Veículo Lançador de Satélites VLS-1 e de satélites, outros produtos estão sendo concebidos e desenvolvidos para o Setor Espacial, com ou sem parceiros internacionais. Existem sinais de que o mercado de pequenos satélites em órbita baixa poderá aquecer-se nas próximas décadas, criando demanda justamente para o nicho de lançadores que estamos desenvolvendo. Portanto, torna-se estratégico que estejamos preparados para aproveitar as oportunidades que surgirem para a produção em indústria nacional desses sistemas espaciais.

Esta discussão presta-se de suporte à apresentação da proposta líder do presente artigo. Isso significa que outras propostas decorrem dela ou concorrem para o seu sucesso. A capacidade mobilizadora desta proposta é que justifica a sua apresentação em primeiro lugar. A lógica utilizada é a de que não deverá haver produção ou consumo de materiais do Setor Espacial sem que sejam criadas razões para isto: a industrialização de foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites, satélites para diversas aplicações e outros sistemas espaciais.

A proposta é criar uma empresa integradora para sistemas espaciais, capaz de reunir e consolidar diversas tecnologias amadurecidas em universidades e institutos de pesquisas sob forma de produtos inova-

dores que possam ser utilizados no País e no exterior. Esta empresa deve ser uma sociedade anônima com forte participação estatal, de forma a receber inicialmente subsídios do Estado Brasileiro que possam assegurar a sua continuidade enquanto mercados de sistemas espaciais sejam conquistados aqui e no exterior. Uma vez consolidada, a empresa poderá ter as suas ações negociadas em mercado, ficando mantido o controle acionário pelo governo e a opção estatal por uma *golden share*, à semelhança da Embraer, para garantir os interesses maiores do Estado nos destinos da empresa.

3.5. Materiais avançados para atendimento ao PNAE

Existem grandes desafios na articulação dos grandes atores institucionais para alinhamento das políticas públicas do setor espacial e para o financiamento da formação de recursos humanos especializados para projetos de pesquisas e desenvolvimento em materiais avançados para aplicações espaciais. No que tange à articulação, as instituições extremas no amplo espectro a ser acionado são, por um lado, a Associação Aeroespacial Brasileira (AAB), que envolve professores e pesquisadores do Setor, e, por outro lado, a Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil (AIAB), que envolve os entes produtivos. No que tange ao financiamento da formação de recursos humanos, a discussão deve necessariamente envolver todas as possibilidades públicas e privadas, além do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Tendo por base os objetivos específicos da PNDAE, o PNAE recebeu em 2005 a sua última revisão, válida para o decênio 2005-2014. Notícias recentes dão conta que estão em andamento trabalhos para mais uma rodada de atualização do PNAE, sob liderança da AEB. A esperança é que este artigo possa contribuir positivamente nas análises, debates e articulações que irão resultar dessa nova revisão do Programa.

Mais especificamente, este artigo tem por objetivo apresentar cinco propostas que possam promover ações na área de materiais em apoio ao Setor Espacial. Para que isso possa ocorrer, essas propostas devem ter um alinhamento com as políticas, programas e diretrizes setoriais, razão pela qual esses elementos norteadores foram dispostos inicialmente nesta discussão.

As próximas cinco seções deste artigo são dedicadas à apresentação das propostas identificadas. Cada seção conta com três partes. A primeira é dedicada à descrição do cenário em que o tema



se localiza. A segunda é dedicada à agenda de P&D relacionada ao tema. Finalmente, a terceira é dedicada à apresentação da proposta do tema, sintetizando a discussão das partes anteriores.

3.6. Materiais metálicos de alta resistência mecânica e térmica

3.6.1. Cenário

Os motores-foguetes de combustível sólidos são empregados nas primeiras fases de vôo em muitos sistemas espaciais. É o caso do *Space Shuttle* e é o caso também dos foguetes em operação no Brasil. Esses motores operam com suas estruturas sujeitas a altas tensões e altas temperaturas. Essas tensões têm origem nas pressões e temperaturas internas, que precisam ser resistidas pelo envelope do motor.

Altas temperaturas também têm uma origem externa, pelo fenômeno do aquecimento aerodinâmico. Isto acontece toda vez que o envelope externo de uma aeronave se desloca com alta velocidade em meio a ar suficientemente denso. É o caso dos foguetes com velocidades supersônicas nas baixas camadas da atmosfera e é o caso de sistemas que reentram a atmosfera com velocidades hipersônicas.

Em resumo, estruturas de sistemas espaciais reclamam o emprego de materiais altamente resistentes a tensões e temperaturas elevadas. Os materiais metálicos são os primeiros candidatos a suprirem essas necessidades. Em primeira linha, temos os aços. Em segunda, as ligas de titânio.

Os aços de ultra-alta resistência são de grande importância em áreas estratégicas. O Brasil enfrentou um desafio tecnológico para dominar o ciclo de produção e tratamento do aço 300M em décadas passadas, ao optar por construir, no projeto do VLS-1, o motor do foguete de sondagem Sonda IV com os aços 300M e 4340.

Conforme demonstram os exemplos de aplicações, os aços de ultra-alta resistência têm grande relevância em projetos aeroespaciais, sendo, portanto, materiais estratégicos. Porém, eles podem ser utilizados também em máquinas pesadas, máquinas agrícolas, automóveis, plataformas petrolíferas, vasos de pressão em usinas nucleares e outros fins estruturais severos, aumentando o potencial de aplicação desses materiais.

Os aços *maraging* despertam também interesses do ponto de vista acadêmico, uma vez que a transformação martensítica nesses materiais é pouco conhecida, contrastando com o conhecimento disponível para os aços convencionais. Como discutido, existem possibilidades de inovar sobre os aços produzidos no Brasil. Mas as possibilidades parecem ser ainda mais interessantes para as ligas de titânio.

O titânio é um dos metais mais importantes para as aplicações espaciais em razão de suas propriedades. Entre elas, destacam-se a elevada relação entre resistência mecânica e peso próprio, a alta resistência a temperaturas elevadas e a elevada resistência à corrosão. Além disso, ligas de titânio apresentam boa biocompatibilidade, recomendando-as para aplicações na área de medicina, particularmente em ortopedia. Esta transversalidade gera demanda adicional e mercado para essas ligas.

Quando, na década de 1960, foram desenvolvidos os primeiros aviões supersônicos para operação em altitudes elevadas, ligas de titânio tornaram-se comuns em aplicações aeroespaciais. Foi este o caso do avião SR-71 *Blackbird*, desenvolvido para missões de reconhecimento estratégico na alta atmosfera, fora do alcance de sistemas tradicionais de defesa empregando mísseis. Cerca de 95% da estrutura deste avião é feita com titânio, capaz de suportar temperaturas da ordem de 300 graus centígrados na altitude de voo.

A produção de titânio é realizada hoje pelo processo Kroll, através da redução do $TiCl_4$ pelo magnésio ou pelo cálcio. O magnésio é o preferido por razões termodinâmicas. É interessante observar que o mesmo processo de produção do titânio metálico também se presta à do urânio metálico, com a substituição do $TiCl_4$ pelo UF_4 , mantidas as mesmas condições de redução utilizadas para o titânio, e com considerações termodinâmicas específicas como, por exemplo, as relativas à energia livre de reação.

Em razão de aplicações como as descritas neste artigo, ligas de titânio passaram a ser consideradas como materiais estratégicos e o desenvolvimento desses materiais por indústrias nacionais passou a ser meta dos países mais desenvolvidos do planeta.

Acompanhando o estado-da-arte, pesquisadores brasileiros sediados no CTA, em São José dos Campos, desenvolveram, a partir de 1965, pesquisas e projetos no sentido de dominar a tecnologia de produção de titânio. A Divisão de Materiais do então IPD desenvolveu com sucesso, como resultado deste trabalho, a única usina piloto para a obtenção de titânio metálico na América Latina.

A usina foi inaugurada em 1968. No início dos anos 1970, essa usina já produzia uma centena de quilogramas de esponja de titânio metálico por corrida. Nos anos seguintes, a produção foi ampliada e os trabalhos foram encerrados, sendo a tecnologia de produção considerada dominada. Em 1977



foi depositado um pedido de patente de processo produtivo junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI).

Passou-se uma década para que o CTA pudesse transferir as tecnologias desenvolvidas na produção de titânio para uma subsidiária da então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). A produção pela CVRD foi iniciada em 1988 em Santa Luzia, nas proximidades de Belo Horizonte. Ali foram produzidas 80 toneladas deste material. Infelizmente, em poucos anos, a Companhia teve dificuldades financeiras e reorientou os seus objetivos, descontinuando este projeto. Em 1994, a CVRD devolveu todos os equipamentos do projeto ao CTA e, desde então, nada mais foi realizado para a produção de titânio no País. O Brasil, que poderia ser um grande produtor e exportador deste material estratégico, regrediu, desde então, à condição de importador.

A patente depositada pelo CTA junto ao Inpi é de um processo inédito em que as etapas de redução e destilação ocorrem em um mesmo equipamento. Este resultado foi reconhecido pela outorga ao Centro do Prêmio Governador do Estado de São Paulo em 1980. Esta mesma tecnologia pode ser empregada para a redução de outros cloretos metálicos e de metais reativos como o zircônio, urânio, nióbio e magnésio. Além desses desdobramentos, o projeto desenvolvido no CTA propiciou aumento na experiência com tecnologias relacionadas ao vácuo para a manufatura de ligas reativas e refino de metais, dando origem a mais uma empresa brasileira dedicada a este tema: a Eletrometal.

Além das aplicações aeroespaciais, o titânio é empregado hoje em elementos de arquitetura, dado o excelente acabamento que o metal apresenta. Também é utilizado em aplicações ópticas, como em armações de óculos, em autopeças, em equipamentos esportivos como raquetes de tênis de alto desempenho e em implantes ortopédicos. Essas aplicações, em diferentes setores, descrevem um potencial animador de mercado para esses materiais.

3.6.2. Agenda de P&D para aços e ligas de titânio

Apesar de alcançar altos limites de escoamento e de resistência, o aço 300M não atinge a tenacidade alcançada por alguns aços que podem ser endurecidos por precipitação. Nessa perspectiva, é fundamental o domínio tecnológico dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação como o 15-5PH e os aços *maraging*. Encontram-se ainda nessa categoria os aços com endurecimento secundário como o HP-9-4-20, HP-9-4-30, HY180, AF 1410 e AerMet100, altamente recomendados para aplicações aeroespaciais.

Considerados como aços especiais, os aços para altas temperaturas de trabalho estão limitados a 1.100 °C, devido à temperatura de fusão do ferro. Eles necessitam de elementos de liga acima de 5% (em alguns casos chegando a cerca de 30%) para evitar a corrosão, melhorar e garantir a integridade do metal. Este item é importante para aumentar o valor agregado dos aços nacionais.

Os aços podem ser divididos em quatro categorias: aços inoxidáveis austeníticos, com alto teor de níquel e estrutura ferrítica, inoxidáveis martensíticos e aços inoxidáveis passíveis de endurecimento por precipitação. Podem ser incluídas neste item as superligas à base de ferro, com elevado teor de elementos de liga, como a liga 16Cr25Ni6Mo. Em termos de P&D, espera-se que melhorias tecnológicas no teor de liga e processamento possam melhorar as características desses aços.

Um dos desenvolvimentos de grande impacto na década de 1960 foi o dos aços *maraging* (contração do termo técnico em inglês *martensite aging*). São aços martensíticos de baixo teor de carbono, altamente ligados, em que a alta resistência mecânica é alcançada por envelhecimento e não no estado martensítico, como nos aços convencionais. Ao contrário de muitos aços de alta resistência mecânica, os aços *maraging* apresentam pouca distorção dimensional nos tratamentos térmicos, boa soldabilidade, boa combinação de resistência mecânica e tenacidade, o que facilita a sua utilização.

A evolução cronológica destes aços é dada pelos aços *maraging* 200, 250, 300 e 350, em que os números significam limites de escoamento em ksi. São aços com limites de tensão de escoamento variando entre 1.030 e 2.400 MPa. Os aços *maraging* experimentais objetivam tensão de escoamento extremamente alta, entre 2.800 a 3.400 MPa (classes 350, 400 e 450). São aços com alto teor de elementos de liga como o níquel, o cobalto e o molibdênio, e baixo teor de carbono. O carbono nessas ligas é impureza, devendo sua participação ser mantida a mais baixa possível.

Os aços *maraging* são de fundamental interesse nos setores nuclear e aeroespacial em razão da elevada resistência mecânica, aliada a uma excelente tenacidade, características altamente desejáveis principalmente para a redução de peso e aumento de segurança. Além disso, os aços *maraging* apresentam boa soldabilidade, propriedade fundamental na produção de componentes. Para garantir propriedades satisfatórias, esses aços requerem processos especiais de fusão e de refusão (VIM, ESR ou VAR) para evitar microsegregação de certos elementos de liga durante a solidificação do lingote.

O Brasil possui infraestrutura operacional, mas pouca experiência na produção dos aços *maraging*, principalmente nos aços de gerações recentes (350, 400 e 450). É de extrema importância para o Bra-



sil que sejam feitos investimentos nesses materiais para que setores como o nuclear e o aeroespacial livrem-se da dependência de importação.

Apesar do insucesso industrial, as pesquisas com titânio não esmoreceram no país nas últimas duas décadas. Trabalhos recentes envolvem o desenvolvimento do processo de fabricação de ligas gama-titânio-alumínio por metalurgia do pó para utilização como barreira térmica em subestruturas de sistemas de proteção térmica de foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites e de plataformas orbitais de reentrada atmosférica. Os requisitos mais demandantes são os de uma reentrada atmosférica sob condições deterioradas, suportando temperaturas superiores a 850°C por longos períodos de tempo.

A etapa de tratamentos térmicos é fundamental para o ajuste da microestrutura dos materiais com as propriedades finais, visando conjugar resistência a altas temperaturas e ductilidade. A efetiva possibilidade de aplicação dos novos materiais obtidos em subestruturas de sistemas espaciais poderá ser avaliada por meio da utilização desses materiais em ensaios mecânicos a quente.

Há necessidade de se prosseguir com investimentos em formação de recursos humanos, pesquisas e infraestrutura laboratorial dedicada ao desenvolvimento de ligas de titânio inovadoras para aplicações espaciais.

3.6.3. Proposta

Além de aços da classe *maraging* e de outros tipos em desenvolvimento para aplicações altamente demandantes em resistência mecânica e em altas temperaturas, torna-se necessário investir em tecnologias associadas à produção de ligas de titânio. A proposta é utilizar todos os meios disponíveis para recuperar as competências requeridas para a produção de ligas de titânio no Brasil e estimular ao menos uma indústria nacional a adquirir essas competências.

A indústria nacional candidata a participar desta estratégia deve, preferencialmente, ser dedicada à produção de materiais metálicos e deve dirigir seus objetivos a um mercado amplo de aplicações, incluindo exportações em bases competitivas. Para isso, ela deverá receber do governo incentivos e encomendas iniciais para viabilizar a absorção das tecnologias desenvolvidas, a formação de recursos humanos especializados, a criação da infraestrutura requerida e o princípio da produção e comercialização desses materiais.

3.7. Materiais compósitos aeroespaciais avançados

3.7.1. Cenário

Ao navegar pelo ar, uma aeronave interage com este meio físico, produzindo forças que, entre outras coisas, viabilizam o seu próprio voo pela atmosfera. Desta interação, surgem esforços de natureza aerodinâmica e propulsiva, os quais devem ser resistidos pela estrutura da aeronave. Além disso, a estrutura deve suportar o próprio peso da aeronave e as acelerações que sobre ela agirem, em caso de manobras.

A estrutura de uma aeronave deve ser leve, mecanicamente resistente e suficientemente rígida para que a sua geometria não se altere significativamente sob ação dos esforços aerodinâmicos. Além disso, a estrutura deve resistir a esforços cíclicos de baixa amplitude e frequência, que podem levar à fadiga dos materiais que a constituem, e à corrosão imposta pelo meio em que a aeronave opere.

Uma aeronave que voa em alta velocidade experimenta um fenômeno adicional: um aquecimento provocado pelo ar. Nas camadas inferiores da atmosfera este aquecimento cresce com o quadrado do número de Mach do voo. Nas camadas superiores, onde o ar é mais rarefeito, este fenômeno decresce em importância, mas não pode absolutamente ser negligenciado. Em resumo, quanto mais veloz for o deslocamento da aeronave, mais ela se aquece. Em consequência desse aquecimento, os materiais das estruturas podem ter os seus desempenhos mecânicos comprometidos.

Os projetistas de aeronaves sempre buscaram identificar materiais de construção de forma a atingir os objetivos já descritos: leveza, rigidez, resistência mecânica, à corrosão e à fadiga, entre outros. As aeronaves do Setor Espacial são velozes, significando que os efeitos térmicos de origem propulsiva e aerodinâmica devem ser levados em consideração. Em razão disso, os materiais empregados na construção das estruturas de foguetes e veículos lançadores devem atender a requisitos bastante restritos.

Os materiais compósitos são naturais substitutos dos materiais metálicos em aplicações que requeiram alta resistência mecânica e térmica, além de resistência à ablação. Esses materiais são mais leves que os metais, tornando-se ainda mais adequados a aplicações aeroespaciais. Porém, o alto custo associado a esses materiais e a baixa disponibilidade deles no mercado para países emergentes ainda restringem as suas aplicações a componentes específicos nos sistemas espaciais, particularmente naqueles que demandem proteção térmica a outros componentes estruturais.



Os materiais compósitos apresentam muitas possibilidades de inovação, tais como:

- inovações no desenvolvimento de fibras reforçadoras e de resinas que servirão de matrizes para essas fibras;
- inovações na seleção e combinação de fibras e resinas, de forma a formar conjuntos mecânica e termicamente compatíveis e com baixa sensibilidade à variação de parâmetros ambientais;
- além de inovação no próprio processo produtivo, combinando recursos, condições e seqüências de passos de produção mais vantajosos, por exemplo, do ponto de vista de custo e de demanda energética.

No Brasil ainda não são produzidos insumos de carbono de qualidade aeroespacial. A dependência de importação prejudica a nossa competitividade industrial na produção de sistemas espaciais em termos de prazo e custo.

3.7.2. Agenda de P&D

O processo de produção de compósitos de carbono consiste na junção de fibras e resina em preformas, seguida de densificação. A densificação é o resultado de ciclos seguidos de impregnação, carbonização e grafitização. O acompanhamento do processo de densificação pode ser feito diretamente através do monitoramento da massa específica do componente ou indiretamente através da medida de resistividade elétrica. O componente pode, também, ser visualizado por tomografia computadorizada.

Pesquisas recentes em materiais da classe carbono-carbono visam criar capacitação técnica para fabricação de compósitos ablativos de alto desempenho aplicados na produção de componentes para tubeiras de foguetes utilizando o processo de bobinagem inclinada de fitas de reforço impregnadas com resina fenólica. Este processo mostrou-se viável para a confecção de componentes de tubeiras aplicados aos foguetes e veículos de sondagem desenvolvidos no IAE. Além disso, o material apresenta excelente resistência à ablação. Nas radiografias realizadas nas peças curadas não foram observados defeitos na estrutura, tais como trincas e delaminação, entre as camadas de reforço do compósito.

Outra linha de pesquisa tem como objetivo estabelecer um protocolo de controle de qualidade e caracterização do processamento de gargantas de tubeira de foguete manufaturadas em compósi-

tos carbono-carbono e proteções térmicas termo-estruturais re-irradiativas por tomografia computadorizada. Além disso, a pesquisa visa avaliar a eficiência do processo pela comparação dos valores teóricos das densificações com os valores obtidos experimentalmente.

As principais aplicações das tecnologias desenvolvidas são o monitoramento via tomografia computadorizada e resistividade elétrica do processo de produção – entenda-se densificação – de compósitos termo-estruturais (C/C, C/C-SiC e SiC/SiC) e proteções térmicas ablativas, bem como o controle de qualidade no recebimento de materiais.

É muito importante que o Setor Espacial disponha da capacidade para caracterizar materiais que operem em altas temperaturas. Para isso, são realizados ensaios mecânicos de tração, flexão, cisalhamento e compressão em temperaturas superiores a 1.000 °C. Os candidatos são materiais compósitos termo-estruturais à base de carbono e carbetos de silício utilizados em sistemas de blindagem térmica de veículos lançadores, incluindo gargantas de tubeiras e escudos térmicos para sistemas de reentrada atmosférica.

Não existe no Brasil nenhum laboratório que possua infraestrutura para caracterização de propriedades mecânicas a altas temperaturas desses materiais. O acesso à informação sobre esses ensaios na literatura internacional é restrito. A montagem de um laboratório com este objetivo permitirá avaliar o desenvolvimento do processo de fabricação, a qualificação final do material obtido e a formação de recursos humanos competentes para esta tarefa.

Além da caracterização dos materiais, será necessária a adequação do instrumental para realização desses ensaios, bem como a definição das normas técnicas a serem utilizadas. Com isso, espera-se que sejam prestados serviços relevantes à indústria nacional, que é carente desse tipo de capacidade.

Veículos lançadores têm utilizado compósitos carbono-carbono com a função de isolante térmico. O carbono é um excelente material refratário. Entretanto, este material apresenta sensibilidade à oxidação em temperaturas superiores a 723 K. Portanto, o desenvolvimento de uma eficiente proteção anti-oxidativa é crucial para a seleção desse compósito para utilização em altas temperaturas e atmosfera oxidante.

Para otimizar as propriedades de isolamento térmica, principalmente em ambiente de reentrada atmosférica, é necessária dotar o compósito carbono-carbono de uma proteção anti-oxidante. Para obter este resultado, o material é tratado com boro (ou carbetos de boro) e/ou com silício (carbetos de silício).



Veículos espaciais utilizam cada vez mais materiais cerâmicos, em especial o carbeto de silício (SiC) ou carbono revestido com SiC. Este material tem a capacidade de suportar maiores temperaturas de operação e é menos ablativo que o carbono-carbono, atualmente utilizado nas gargantas de foguete nacionais. O uso deste material possibilita um menor desgaste das gargantas dos motores, o que propicia uma inserção mais precisa do satélite na órbita desejada. Tal material ainda pode ser utilizado em turborreatores aeronáuticos de pequeno porte, tais como as dos veículos aéreos não-tripulados (VANT) ou em freios de aeronaves. Atualmente, esse material é produzido por poucos países, entre os quais se destacam os Estados Unidos, a Alemanha e a França.

As propriedades ablativas, térmicas e microestruturais dos materiais compósitos espaciais podem ser avaliadas com o emprego de plasmas. Além disso, plasmas podem ser empregados para modificar as propriedades superficiais de elastômeros e de ligas metálicas, segundo propósitos definidos.

O uso da tocha de plasma operando com gases reativos em regime supersônico no vácuo apresenta-se como alternativa bastante atrativa para o processo de ablação de materiais compósitos termo-estruturais, pois simula em parte as condições entálpicas e aerotermodinâmicas do ambiente de testes de gargantas de tuberias.

Uma outra linha de pesquisa consiste em estudar a modificação superficial do elastômero EPDM (etileno-propileno-dieno-monômero), usado como proteção térmica em motores-foguete, utilizando-se técnicas de aplicação de plasma. O aumento da energia de superfície faz-se necessário porque, apesar de o EPDM ter propriedades adequadas à sua aplicação como revestimento de motor-foguete, por ser apolar, sua interação ou adesão ao *liner* e/ou propelente sólido não é satisfatória.

As duas linhas de pesquisa – caracterização de compósitos e modificação de propriedades superficiais por plasma – recomendam a montagem, operação e caracterização no IAE de uma tocha de plasma supersônica para recobrimentos de materiais cerâmicos sobre peças metálicas e materiais termo-estruturais utilizados em sistemas de proteção térmica.

Existem resinas no mercado nacional que não se prestam a aplicações aeroespaciais. Assim, outra linha de pesquisa tem por objetivo a obtenção e caracterização de resinas fenólicas boradas para aplicação em compósitos ablativos. A resina obtida pode ser avaliada também mediante moldagem de compósitos de fibras de carbono e fibras de sílica para uso termo-estrutural.

Compósitos termo-estruturais de matriz de carbono modificadas com SiC e reforçadas com fibras de carbono representam hoje o estado-da-arte em sistemas de proteção térmica ablativa. Entre-

tanto, a disponibilidade de matérias-primas, como os polímeros de silício (polissilanos e polissiloxanos) utilizados no processamento, é prejudicada pelas restrições de aquisição impostas pelos países que manufacturam essas especialidades químicas, além de apresentar elevado custo (superior a US\$ 1.000/kg). Portanto, busca-se viabilizar em pesquisas uma rota de síntese de um precursor de um monômero de polímero de silicônio. Não há produção desses materiais no Brasil e poucos países do mundo detêm essa tecnologia. O produto a ser obtido é estratégico e visa atender especificações para uso em proteções térmicas ablativas de uso no Programa Espacial Brasileiro.

Finalmente, outra linha de pesquisa em andamento visa produzir envelopes motores de grande dimensão empregando materiais compósitos pelo processo de bobinagem filamental. Esta tecnologia já vem sendo utilizada na fabricação do quarto estágio do VLS-1. O desafio é dominar o processo e desenvolver o ferramental para produção de motores de maior porte, conforme está previsto para os lançadores do Programa Cruzeiro do Sul. Neste aspecto, o advento de laboratório de estruturas leves, situado no Parque Tecnológico de São José dos Campos, é uma iniciativa conjunta de diversos atores de fomento científico e industrial que vem ao encontro das necessidades identificadas. Entre esses atores, encontram-se o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), a Empresa Brasileira de Aeronáutica (Embraer), o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

3.7.3. Proposta

Existem diversos aspectos tecnológicos diretamente relacionados a compósitos avançados de aplicação aeroespacial. Entre esses aspectos, destacamos os seguintes: desenvolvimento de novos materiais, desenvolvimento de revestimentos especiais, construção de câmaras de plasma, análise termomecânica de materiais, projeto e fabricação de componentes, montagem e integração.

Além dos aspectos tecnológicos, existem muitas linhas de pesquisa que merecem ser apoiadas pelos órgãos de fomento, se possível, de maneira articulada. Entre elas, destacamos as seguintes:

- Fibra de carbono de alto módulo – para uso na produção de compósitos de carbono em geral, para quaisquer aplicações aeroespaciais e transversais;
- Nanomateriais para compósitos – para uso na produção de compósitos de carbono com propriedades especiais;
- Polímeros termo-rígidos com alto conteúdo de carbono, tipo poliaril acetileno – para uso na produção de compósitos de carbono;



- Polímeros de siliconas e seus derivados – para uso na produção de compósitos termo-estruturais, tipo carbono/carbeto de silício;
- Pós cerâmicos para altas temperaturas, tipo boreto e carbeto de háfnio – para produção de materiais empregados em sistemas de proteção térmica; e
- Resinas poliméricas auto-reparáveis (self-healing) – para emprego inicialmente na indústria aeronáutica, com evolução para o Setor Espacial.

A proposta é apoiar as linhas de pesquisa sobre materiais compósitos avançados identificadas neste artigo, pois delas poderão resultar inovações e patentes para aumentar a autonomia em materiais estratégicos do Programa Espacial Brasileiro, reduzindo a nossa dependência do exterior.

Muitos resultados econômicos poderão advir desta estratégia. O potencial de *spin-off* desses resultados para outras áreas industriais é certamente muito grande, como atesta a história de outros materiais aeroespaciais já consagrados.

3.8. Materiais compósitos híbridos fibra-metal

3.8.1. Cenário

Entre os materiais compósitos avançados, existe uma classe que se destaca pelas suas características especiais e pelo grande potencial de inovação: os compósitos híbridos fibra-metal (CFM). Este destaque é feito aqui, em seção específica, pois o tema revela-se bastante promissor, pela sua novidade.

No sentido de obter materiais que atendessem a requisitos estruturais do Setor Aeroespacial, pesquisadores procuraram produzir novos materiais híbridos que incorporassem as qualidades de dois ou mais componentes individualmente considerados. Por décadas, o tema de materiais compósitos de matrizes metálicas (CMM) foi investigado à exaustão nos países de maior desenvolvimento aeroespacial. A intenção era, por exemplo, embutir fibras de aço em matrizes de alumínio, de forma a obter a resistência estrutural do primeiro e a leveza e resistência à corrosão do segundo.

O tema CMM foi considerado estratégico e tratado de forma sigilosa. Por muitos anos, o acesso de pesquisadores estrangeiros a congressos que tratavam deste assunto foi proibido em países tecnologicamente mais evoluídos. Finalmente, os resultados das pesquisas não se revelaram animadores e

o tema parece estar sendo abandonado. Com exceção de algumas tentativas tímidas, este assunto jamais foi investigado com alguma profundidade no Brasil.

Nos últimos 30 anos, uma alternativa a esta abordagem revelou-se promissora. A linha de pesquisa designada de LFM (Laminados Fibra-Metal) surgiu em 1978, na Universidade de Delft, na Holanda, envolvendo estudos e ensaios de laminados metálicos reforçados com fibras. Esses laminados, denominados de compósitos híbridos fibra-metal, apresentam uma estrutura do tipo sanduíche, que consiste em alternar lâminas de alumínio com camadas de pré-impregnados de compósitos poliméricos de fibras de reforço (aramida, vidro ou carbono) com resina epóxi, obtendo-se materiais com diversas combinações.

Os compostos híbridos associam as características mecânicas dos compósitos poliméricos com as propriedades dos metais. Como resultado, as suas principais características são maior resistência à fadiga, à tração, à compressão e ao impacto, e maior tolerância ao dano, além da redução de peso e de custos com manutenção.

Nos LFM, a tolerância a danos é favorecida pela adição de fibras aos adesivos. As cargas nas camadas de metais eventualmente trincadas são transmitidas para as fibras através dos adesivos, descarregando as camadas de metais. Esse efeito de ligação ou união das fibras produz uma diminuição na velocidade de propagação das trincas nessas camadas, aumentando a tolerância das estruturas ao dano.

No acidente do Boeing 737 da Aloha Airlines em 1988, problemas de fadiga apareceram e tornaram-se aparentes devido ao envelhecimento da aeronave. A presença acumulada de trincas de fadiga em muitos rebites, chamada de danos múltiplos, causou a perda de um terço da fuselagem superior em voo. Com isso, a resistência à fadiga chamou a atenção do grande público, tornou-se um assunto de maior importância e veio a estimular o desenvolvimento de um material da classe LFM chamado ARALL, com fibras reforçadoras de aramida.

A desvantagem do ARALL é a tensão residual nas camadas de metal após a cura devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica dos materiais componentes. Além disso, as fibras de aramida fornecem pouca resistência residual para um laminado tipo *cross-ply*, apresentam absorção de umidade e são sensíveis à degradação ambiental.

Como uma evolução dos produtos de ARALL, no final dos anos 1980 e começo dos anos 1990, foi desenvolvida uma nova versão de LFM com fibras de vidro no lugar das fibras de aramida. O mate-



rial ficou conhecido como GLARE, abreviatura de *Glass Reinforced Aluminum*, ou alumínio reforçado com fibra de vidro.

A aplicação do GLARE em estruturas de aeronaves demorou alguns anos para aparecer, visto que a redução de custos operacionais devido à redução de peso somente não era um argumento suficientemente forte para contrapor-se aos custos de produção do material. No entanto, novas técnicas de produção empregando o conceito de entrançamento significaram uma melhoria para o GLARE. Isto permitiu a produção de grandes painéis, redução do número de partes e, conseqüentemente, redução dos custos de fabricação.

Em julho de 1997, foi iniciado um grande projeto para o desenvolvimento tecnológico do GLARE, subsidiado com 34 milhões de euros pelo Ministério da Economia da Alemanha. O projeto foi iniciado pela *Structural Laminates Industries* e teve a Faculdade de Engenharia Aeroespacial, o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a empresa Stork-Fokker como participantes. O projeto, inicialmente conhecido como GTO (*GLARE Technologie Ontwikkeling*), e posteriormente como GRP (*GLARE Research Program*), foi iniciado em Janeiro de 2003. Durante o período de vigência do projeto, a disponibilidade da tecnologia do GLARE foi comprovada e aceita para aplicação final no novo avião Airbus A380.

O Airbus A380 preencheu um espaço no segmento de grandes aeronaves na família Airbus e promoveu uma forte concorrência com o avião Boeing 747 norte-americano. Este salto à frente do Airbus A-380 no tamanho da aeronave e economia só pôde ser possível com a introdução de novas tecnologias em materiais como o GLARE. Além disso, a redução de peso no Airbus pela adoção do GLARE permitiu aumentar a sua carga paga e competitividade no negócio do transporte aéreo.

O desenvolvimento do GLARE foi baseado na alta carga de tensão de ruptura das fibras de vidro. Os resultados de ensaios de segmento de fuselagem com GLARE submetido a cargas cíclicas de fadiga de pressurização evidenciaram que este material é mais duradouro e resistente do que as ligas de alumínio tradicionalmente empregadas nessas estruturas. Com este resultado, o GLARE mostra-se adequado para outras aplicações além dos revestimentos de fuselagem de aviões.

Em 1993, o GLARE começou a ser fabricado usando a concepção de emendas, com a finalidade de produção de grandes painéis, com baixo custo operacional. O primeiro componente em GLARE voou no avião Galaxy C5-A da *United States Air Force (USAF)*, em outubro de 1995. As primeiras aplicações civis desse material foram feitas no compartimento de carga do avião Boeing 777 e na caverna de pressão do Bombardier Learjet 125.

O compósito híbrido GLARE apresenta não somente excelentes propriedades em fadiga, como também outras propriedades interessantes de resistência ao impacto e ao cisalhamento residual, resistência ao fogo e resistência à corrosão, quando comparado com ligas de alumínio monolítico. Os processos de inspeção, os ensaios não-destrutivos e as técnicas de reparos são simples e similares às utilizadas em estruturas tradicionais produzidas em ligas de alumínio. Já foram testadas com sucesso, por exemplo, a inspeção pela técnica de ultra-som e o reparo de estruturas por fixação mecânica de rebites.

Embora os LFM como o GLARE apresentem um custo mais elevado quando comparado ao de ligas de alumínio (cerca de 5 a 10 vezes maior), a diminuição de 10 a 25% da massa específica e as excelentes propriedades em fadiga, ao impacto e à corrosão reúnem-se para aumentar a vida útil do material processado, diminuindo os custos de manutenção. Essas propriedades tornaram o LFM uma alternativa para produção de superfícies de fuselagens e de outras estruturas aeronáuticas como portas de inspeção, cavernas de pressão, suportes, entre outros componentes.

3.8.2. Agenda de P&D para compósitos híbridos fibra-metal

Embora originalmente desenvolvidos tendo aplicações aeronáuticas como meta, materiais dessa classe podem encontrar grande aplicação em sistemas espaciais. Como se pode observar, o tema é recente e, como tal, surge com desafios e oportunidades. Embora os materiais atualmente produzidos estejam protegidos por patentes, existe um campo enorme de outras combinações a serem exploradas pelos pesquisadores.

Pesquisas com fibras de carbono, que possuem maior rigidez para a mesma razão de peso que as fibras de aramida e de vidro, não foram consideradas ainda devido à maior condutividade elétrica do carbono, o que pode reduzir significativamente a resistência à corrosão desse material, tornando-o inviável para aplicações de longo prazo. Porém, esta possibilidade está aberta para aplicações espaciais, onde é sabido que fatores como resistência à fadiga e à corrosão são menos importantes. Além disso, esta aplicação pode eliminar a atual necessidade de metalização de componentes estruturais não-metálicos para aumentar a segurança de foguetes de sondagem e veículos lançadores de satélites durante o vôo pela atmosfera em condições meteorológicas adversas.

Potencialmente, combinações de outros metais com outras fibras poderão produzir resultados interessantes para aplicações no Setor Espacial. Sistemas espaciais, como foguetes de sondagem e veículos lançadores, devido ao menor ciclo de vida, são menos demandantes quanto à resistência à corrosão e



fadiga, embora mais demandantes quanto ao aquecimento aerodinâmico. Assim, combinações envolvendo titânio e fibras de carbono, por exemplo, apresentam-se como fortes candidatas à produção de materiais que atendam a diversos requisitos e apresentem excepcional desempenho quanto à resistência térmica. A agenda de P&D, portanto, encontra-se aberta a pesquisas e inovações.

3.8.3. Proposta

A história da Ciência e Tecnologia Aeroespacial é pródiga em exemplos de tecnologias que fluíram do Setor Espacial para o Aeronáutico e vice-versa. Aqui temos uma abordagem que frutificou primeiro no Setor aeronáutico, mas que poderá render dividendos no Setor Espacial. A idéia é associar as boas propriedades mecânicas e térmicas de alguns metais a propriedades similares de alguns compósitos (matrizes poliméricas e fibras reforçadoras), formando novos materiais híbridos em sanduíches, com propriedades aprimoradas.

A proposta é apoiar iniciativas de pesquisas e desenvolvimentos de combinações de metais, fibras reforçadoras e matrizes poliméricas, de forma a obter soluções híbridas inovadoras de materiais para aplicações aeroespaciais.

Novas combinações de fibras e metais, ainda não desenvolvidas, poderão dar luz a materiais interessantes e patenteáveis. Este tema abre-se com um enorme leque de oportunidades a serem exploradas. Quem chegar primeiro a um novo e promissor material terá posições privilegiadas de competitividade neste tema.

3.9. Materiais de alta densidade energética

3.9.1. Cenário

Diversos materiais são empregados na construção de um motor-foguete de combustível sólido. Como já discutido nas seções anteriores, o envelope motor é feito em aço da classe *maraging* 300M. A tubeira é feita em compósito de fibra de carbono em matriz de resina fenólica. A mobilidade da tubeira é provida por elastômeros feitos com aço e borracha. Entre o envelope motor e o propelente, encontramos isolantes e *liners*. O propelente é uma mistura de resina polibutadiênica, pó de

alumínio e perclorato de amônio. A proteção térmica é provida em pontos críticos por resinas, sílica, borracha nitrílica, compósitos carbono-carbono e outros materiais.

Motores-foguetes de combustível sólido e líquido empregam como propelentes materiais de alta densidade energética, isto é, materiais capazes de liberar grandes quantidades de energia por unidade de volume. De maneira similar, emprega-se a idéia de impulso específico, ou seja, a propriedade de gerar maior impulso por unidade de volume. Esses mesmos conceitos aplicam-se a materiais pirotécnicos e a explosivos na área de defesa, produzindo uma transversalidade neste tema.

Pode-se definir um propelente como sendo um explosivo deflagrante utilizado para propulsão, composto por uma substância ou mistura de substâncias (oxidante e redutor) que, através de processos químicos controlados (reações exotérmicas), formam grandes quantidades de gases, com altas temperaturas e em tempos relativamente curtos, produzindo empuxo. Os componentes típicos de um propelente sólido são resina polibutadiênica líquida hidroxilada PBLH, perclorato de amônio, pó de alumínio, plastificantes, catalisadores e outros materiais.

Pesquisas recentes sobre esses materiais têm envolvido a caracterização por análise calorimétrica de novos componentes de propelentes sólidos compósitos, com seus valores de calor de combustão e entalpia de formação. Entre esses componentes, encontramos o pré-polímero PBLH, o propelente sólido PCo1, catalisadores de queima, matrizes energéticas como GAP, poliAMMO e poliBAMMO.

Entre os combustíveis líquidos sendo atualmente investigados, encontram-se os de classe hipergólica, à base de dimetil hidrazina assimétrica e tetróxido de nitrogênio, e os não-hipergólicos, como as combinações de querosene e oxigênio líquido e de parafina e ácido nítrico fumegante.

3.9.2. Agenda de P&D

Pesquisas recentes relativas a polímeros envolvem o desenvolvimento e fabricação de propelentes sólidos para foguetes, proteções térmicas rígidas e flexíveis, tratamento de superfície com plasma, estudos de adesão entre componentes e, finalmente, análise e controle de qualidade.

O carregamento de um motor-foguete de combustível sólido é um processo complexo que envolve diversas etapas, tais como preparação de matérias-primas, maceração, carregamento propriamente dito, cura, resfriamento, desmontagem, inibição do topo e do fundo do propelente, montagem final e ensaio em banco de provas ou em voo real.



A ligação do propelente ao casco do foguete (envelope motor) é feita por um material chamado *binder*. É fundamental que ele forneça uma aderência uniforme, sem vazios, e que ele também tenha energia a compor a queima do propelente. Pesquisas recentes no País buscam sintetizar um novo *binder* energético para propelente tipo *casting*.

Novos *binders*, além de um alto desempenho energético, devem apresentar baixa vulnerabilidade, queima virtualmente sem fumaça e redução de risco no uso quando comparados com outros materiais compósitos em uso atualmente. No caso específico de propelentes, o controle de fumaça produzida na queima é um ponto de grande importância, particularmente para a área de defesa. Os materiais energéticos usados são normalmente polímeros com grupos azidos que podem queimar sem oxidantes e produzir um gás energeticamente rico. O impulso específico desses propelentes aumenta consideravelmente com o uso desses materiais propulsivos inovadores.

O DCTA vem trabalhando com um novo *binder* energético que é a combinação do *glycidyl azide polymer (GAP)* com bis-azidometil oxitano (BAMO) que resulta em um produto de viscosidade ideal para a fabricação de propelente compósito em modo *casting*. Ressalta-se que se trata de um *binder* inovador, que atrai grande interesse das nações mais desenvolvidas.

Para o desenvolvimento de materiais eletropirotécnicos, é necessário entender os mecanismos de adesão da interface metal/selagem vítrea. Esses materiais podem ser usados como cargas deflagrantes ou detonantes, tanto para sistemas de ignição, como em sistemas de destruição de motores-foguetes a propelente sólido utilizados no VLS-1 e em foguetes de sondagem. O desafio nesta pesquisa consiste em dominar técnicas de selagem de baixo custo e altamente efetivas, mesmo após exposição dos materiais a ambientes com altas cargas dinâmicas e térmicas.

Um aspecto importante em investigação é o tratamento de superfícies para adesão de polímeros e materiais de proteção térmica. Neste grupo de temas, destaca-se o jateamento e desengraxe de superfícies, a aplicação de *primers* e adesivos e a colagem.

Outro tema importante, já relatado neste artigo na seção de compósitos, é a modificação superficial de compósitos poliméricos por plasma gerado por micro-ondas e rádio-frequência (RF). Este tema evoca tecnologias de plasmas, gerados a partir de diversos gases, e seus equipamentos associados, tais como reator, unidades geradoras, bombas turbo-moleculares, espectrômetros de massa, magnetrons e outros recursos de infraestrutura laboratorial. Assim, as tecnologias de plasma revelam-se importantes para compósitos estruturais e materiais energéticos.

Outros temas de pesquisa praticados como suporte ao desenvolvimento de novos materiais energéticos envolvem novos métodos de inspeção e ensaios não-destrutivos, como aqueles que empregam ultra-som. Materiais absorvedores de energia sonora tornam-se importantes, de forma a reduzir a carga acústica imposta pelo motor-foguete a sistemas embarcados em satélites ou na baía de controle, assim como ignitores acionados por laser, de forma a ampliar a segurança do sistema de partida dos motores-foguetes a combustível sólido.

É importante destacar que, para apoiar a pesquisa e desenvolvimento de temas relativos a materiais de alta densidade energética, grandes investimentos devem ser feitos em equipamentos laboratoriais especializados de química, engenharia química, engenharia de materiais e engenharia mecânica. Entre esses equipamentos, citam-se os seguintes: misturadores, calandras, prensas, *bamburies*, autoclaves, viscosímetros, reômetros, reatores químicos do tipo RPA, câmaras climáticas, dinamômetros, goniômetros, medidores de condutividade térmica e elétrica, cromatógrafos (gasoso, líquido e de coluna), espectrofotômetro de infravermelho com microscópio óptico, analisadores térmicos dos tipos TMA, DTA, TGA E DSC, micromerógrafos a laser, dinamômetros universais, durômetros, refratômetros e outros equipamentos.

Esses equipamentos, além de permitirem a realização de análises físicas e mecânicas de materiais, com as suas respectivas avaliações propulsivas e térmicas, geram elementos para a realização de análises químicas, incluindo sínteses orgânicas, análises granulométricas e análises espectrométricas desses materiais.

3.9.3. Proposta

Os materiais de alta densidade energética incluem os propelentes sólidos e líquidos de motores-foguetes, os pirotécnicos, os ignitores e os *binders* energéticos. A lista de materiais que pertencem a essa classe é muito extensa e variada. De comum, todos eles envolvem algum tipo de polímero orgânico. A cadeia de aplicações desses materiais é igualmente extensa e diversificada, de forma que o transbordamento de ações tomadas sobre este tema para outras áreas econômicas é tido como forte e certo, particularmente para a área de defesa.

A proposta é fomentar ações de pesquisa e desenvolvimento de materiais de alta densidade energética inovadores, de forma a melhorar os seus desempenhos, baixar os seus custos de produção e reduzir a dependência nacional de insumos importados.



A proposta pressupõe ações simultâneas em vários cenários, nas universidades, nos institutos de P&D e nas indústrias, de forma a estimular virtuosamente toda a cadeia de maturidade tecnológica, da Ciência à Inovação. Assim, poder-se-á acelerar o desenvolvimento de novos materiais dessa classe, reduzindo os seus tempos para mercado, eliminando dependências tecnológicas de fornecedores estrangeiros e aumentando a competitividade das indústrias nacionais do Setor Espacial.

3.10. Materiais da cadeia de energia solar para aplicações espaciais

3.10.1. Cenário

O Brasil é certamente um dos países de maior insolação do planeta. Situado entre os paralelos 5 Norte e 34 Sul, tem o seu centro geométrico na região tropical da Terra. Portanto, faz sentido o argumento de aproveitarmos ao máximo esta fonte energética naturalmente disponível, durante todo o ano.

Os mecanismos existentes para aproveitamento da energia solar para diversos fins na superfície do planeta são os mesmos que podem ser empregados para fornecer energia para aeronaves navegando na alta atmosfera ou para satélites em órbita. Já existem veículos aéreos não-tripulados operando em grandes altitudes que empregam células solares como captores de energia. Não diferentemente, os satélites e a própria Estação Espacial Internacional (*International Space Station* – ISS) necessitam de energia para o funcionamento de todos os seus sistemas.

Com este raciocínio, em aproveitamento da transversalidade das estratégias de materiais para os Setores de Energia e Ambiental, faz sentido fazer esforço conjunto em favor dessa opção, pois ela é, sem dúvida, igualmente vantajosa para o Setor Espacial. Os materiais empregados na cadeia da produção energética de origem fotovoltaica para os setores apontados são os mesmos que poderão beneficiar o Setor Espacial. Existem apenas algumas diferenças que irão demandar pesquisas adicionais, que serão comentadas a seguir.

O ambiente espacial é dominado por radiações cósmicas que são filtradas pela atmosfera. Na superfície da Terra essas radiações chegam amenizadas. As radiações cósmicas são, principalmente, partículas de alta energia: 90% são prótons, quase 10% são partículas alfa (nêutrons e prótons) e as

restantes são partículas beta (elétrons). Tendo como principal origem o Sol, essas partículas são absorvidas pelas moléculas da atmosfera, produzindo como resultado diversas reações físico-químicas, ou são aprisionadas nos cinturões de Van Allen do campo magnético ao redor da Terra.

Células solares colocadas em satélites não podem contar com a proteção que os membros da biosfera terrestre possuem. Essas células estão totalmente expostas. Sabe-se que os raios cósmicos possuem energia suficiente para alterar o estado de elementos de circuitos eletrônicos integrados. Possíveis resultados dessa interação são a corrupção de dados de memória e o funcionamento errático de unidades de processamento central (CPU) de computadores de bordo. Antigamente, a preocupação com raios cósmicos limitava-se a circuitos eletrônicos a bordo de satélites ou de aeronaves que fizessem vôos em grande altitude. Hoje, com a redução da dimensão dos componentes eletrônicos, existe preocupação de que esses efeitos possam manifestar-se igualmente sobre a superfície terrestre.

Portanto, é importante que materiais usados para conversão de energia solar em energia elétrica em órbita da Terra possuam alguma proteção contra raios cósmicos. Se assim não for, tais componentes poderão ter o desempenho degradado numa alta taxa e a vida do satélite reduzida drasticamente para poucos dias, inviabilizando o seu emprego como fonte energética no espaço.

O ambiente espacial também apresenta fortes gradientes térmicos. A maioria dos satélites e naves espaciais opera na camada atmosférica chamada termosfera, que se estende de 120 a 690 quilômetros de altitude. Em uma única órbita em torno da Terra (que leva entre noventa minutos até várias horas, dependendo da altitude), neste ambiente, satélites experimentam variações de temperatura da ordem de cem graus centígrados, devido ao fato de que a trajetória do satélite passa pelo cone de sombra da Terra e pelo lado iluminado pelo Sol. Felizmente, o vácuo espacial dificulta processos de transmissão de calor por convecção, mas os outros mecanismos de transferência energética (radiação e condução) estão presentes.

Em razão dessa discussão, os materiais conversores e absorvedores de energia solar devem ser resistentes a choques térmicos e à fadiga térmica, já que a navegação orbital produz cargas cíclicas por variação de temperatura. Sabe-se, por exemplo, que esses ciclos produzem intensidades de carga suficientemente fortes para induzir vibrações nas estruturas de satélites, o que pode transformar um processo de fadiga térmica em fadiga mecânica.



3.10.2. Agenda de P&D

O ambiente espacial representa tanto um desafio como uma oportunidade para os pesquisadores de materiais. Além do vácuo e da radiação ionizante de carga termal variável, os materiais expostos a este ambiente podem encontrar oxigênio atômico, plasma, micro-meteoritos e até sobras de lixo espacial. É sabido, por exemplo, que o oxigênio atômico presente no ambiente espacial de satélites de órbita baixa pode ser adsorvido por materiais usados na construção desses satélites, com alteração de suas propriedades. Assim, testes de longa duração precisam estar na agenda de caracterização desses materiais.

O Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do DCTA, através do seu Laboratório de Radiação Ionizante (LRI), tem condições para, de uma maneira sistemática, investigar os efeitos de radiações cósmicas sobre materiais e circuitos eletrônicos. Por outro lado, o INPE possui infraestrutura como o Laboratório de Integração e Testes (LIT), com condições de investigar os efeitos térmicos cíclicos sobre componentes de satélites. Essas instalações laboratoriais e outras que existam ou que venham a ser construídas no País, são essenciais para o desenvolvimento da estratégia proposta.

3.10.3. Proposta

Equipamentos que entrem em órbita terrestre são sujeitos a radiações por partículas ionizantes e a gradientes térmicos. Tais equipamentos devem ser projetados de forma a manterem um desempenho dentro de determinadas especificações e a terem um ciclo de vida razoável do ponto de vista econômico. Entre esses equipamentos, podem estar células solares e outros materiais da cadeia energética fotovoltaica.

A proposta é adicionar às estratégias montadas para os materiais da cadeia energética solar e ambiental fomentos em pesquisa e desenvolvimento de materiais que sejam menos afetados pelas radiações solares e pelos ciclos térmicos naturais da termosfera terrestre. O resultado esperado desta estratégia é ampliar a faixa de produtos a serem oferecidos pela indústria nacional na área energética solar, de forma que alguns desses produtos possam ser incorporados a sistemas espaciais brasileiros e que se possa aproveitar oportunidades de exportação.

3.11. Conclusões

Adentrar o espaço, ir além da linha de Von Kármán, significa um desafio que poucos países do planeta escolhem enfrentar. O Brasil vem perseguindo este desafio há mais de cinquenta anos. Já atingimos resultados que nos colocam em patamar intermediário na conquista espacial. Porém, esses resultados estão aquém de nossas pretensões e da estatura proporcional a resultados de natureza econômica e geopolítica já alcançados por nosso país.

No que concerne a materiais para emprego espacial, os resultados de P&D já obtidos reclamam urgentemente a criação de uma empresa integradora de sistemas espaciais. Esta é a proposta líder deste artigo. Isso significa que as cinco demais propostas aqui apresentadas decorrem dela ou concorrem para o seu sucesso.

A capacidade mobilizadora desta proposta é que justifica a sua apresentação em primeiro lugar. A lógica utilizada é a de que não deverá haver produção ou consumo de materiais do Setor Espacial sem que sejam criadas razões para isto: a industrialização de foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites, satélites para diversas aplicações e outros sistemas espaciais. A proposta é criar uma empresa integradora, capaz de reunir e consolidar diversas tecnologias amadurecidas em universidades e institutos de pesquisas sob forma de produtos inovadores que possam ser utilizados no País e no exterior. Esta deve ser uma sociedade anônima com forte participação estatal, de forma a receber inicialmente subsídios do Estado Brasileiro que possam assegurar a sua continuidade enquanto mercados de sistemas espaciais sejam conquistados. Uma vez consolidada, a empresa poderá ter as suas ações negociadas em mercado, ficando mantida a opção estatal por uma *golden share*, à semelhança da Embraer, para garantir os interesses maiores do Estado nos destinos da empresa.

Os *stakeholders* do Programa Espacial Brasileiro, partícipes do SINDAE, devem articular-se e agregar todos os meios individuais e institucionais possíveis para ampliar a autonomia nacional na pesquisa, desenvolvimento e inovação e contribuir para o objetivo finalístico de produção de materiais e sistemas espaciais pela indústria nacional. Os temas mais relevantes, identificados pelas suas capacidades mobilizadoras, são apresentados a seguir como sugestões de ações estratégicas que poderão ser adotadas em diferentes níveis decisórios de nossa República.



3.11.1. Materiais metálicos de alta resistência mecânica e térmica

A proposta é utilizar todos os meios disponíveis para recuperar as competências requeridas para a produção de ligas de titânio no Brasil e estimular ao menos uma indústria nacional a adquirir essas competências. A indústria nacional candidata a participar desta estratégia deve, preferencialmente, ser dedicada à produção de materiais metálicos e deve dirigir a sua proposta a um mercado amplo de aplicações, incluindo exportações em bases competitivas. Para isso, ela deverá receber incentivos e encomendas iniciais do governo brasileiro para viabilizar a absorção das tecnologias desenvolvidas, a formação de recursos humanos, a criação da infraestrutura requerida e o princípio da produção.

3.11.2. Materiais compósitos avançados

A proposta é apoiar as linhas de pesquisa identificadas neste artigo, pois delas poderão resultar inovações e patentes para aumentar a autonomia em materiais estratégicos do Programa Espacial Brasileiro. Muitos resultados econômicos poderão advir desta estratégia. O potencial de *spin-off* desses resultados para outras áreas industriais é certamente muito grande, como atesta a história de outros materiais aeroespaciais já consagrados.

3.11.3. Compósitos híbridos fibra-metal

A proposta consiste em apoiar iniciativas de pesquisas e desenvolvimentos de combinações de metais, fibras reforçadoras e matrizes poliméricas, de forma a obter soluções híbridas inovadoras de materiais para aplicações aeroespaciais. Novas combinações de fibras e metais, ainda não desenvolvidas, poderão dar luz a materiais interessantes e patenteáveis. Este tema abre-se com um enorme leque de oportunidades a serem exploradas. Quem chegar primeiro a um novo e promissor material terá posições privilegiadas de competitividade neste tema.

3.11.4. Materiais de alta densidade energética

A proposta é fomentar ações de pesquisa e desenvolvimento de materiais de alta densidade energética inovadores, de forma a melhorar os seus desempenhos, baixar os seus custos de produção e reduzir a dependência de insumos importados. Ela pressupõe uma ação simultânea em vários cenários, nas universidades, nos institutos de P&D e nas indústrias, de forma a estimular virtuosamente

toda a cadeia de maturidade tecnológica, da ciência à inovação. Assim, poder-se-á acelerar o desenvolvimento de novos materiais desta classe, reduzindo os seus tempos para mercado, eliminando dependências tecnológicas do exterior e aumentando a competitividade das indústrias do setor.

3.11.5. Materiais absorvedores de energia solar

A proposta é adicionar às estratégias montadas para os materiais da cadeia energética solar e ambiental fomentos em pesquisa e desenvolvimento de materiais que sejam menos afetados pelas radiações energéticas e pelos ciclos térmicos naturais encontrados em órbitas no interior da termosfera terrestre. O resultado esperado desta estratégia é ampliar a faixa de produtos a serem oferecidos pela indústria nacional na área energética solar, de forma que alguns desses produtos possam ser incorporados a sistemas espaciais brasileiros e que se possa aproveitar oportunidades de exportação.



Referências

- AAB. Página institucional da Associação Aeroespacial Brasileira. São José dos Campos. Disponível em <http://www.aeroespacial.org.br/>, acesso em fevereiro de 2010.
- AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. Programa Nacional de Atividades Espaciais: PNAE 2005-2014. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia. Agência Espacial Brasileira, 2005.
- AIAB. Página institucional da Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil. São José dos Campos. Disponível em <http://www.aiab.org.br/portugues/>, acesso em fevereiro de 2010.
- ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS AEROESPACIAIS BRASILEIRAS. Setor Aeroespacial Brasileiro – Oportunidades e Desafios para sua Competitividade. Fórum de Competitividade do Setor Aeroespacial. Brasília: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2002.
- BRANDÃO, Maurício Pazini. Engenharia Aeroespacial – Reflexos no Poder Nacional. Rio de Janeiro: Escola de Comando e Estado-Maior da Aeronáutica (ECEMAR), 1999 (monografia).
- BRASIL. Congresso Nacional. Lei nº 8.854, de 10 de fevereiro de 1994, Cria a Agência Espacial Brasileira - AEB. Legislação Federal, 1994.
- BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 68.099, de 20 de janeiro de 1971, Cria a Comissão Brasileira de Atividades Espaciais - COBAE. Legislação Federal, 1971.
- BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 1.332, de 8 de dezembro de 1994, Aprova a atualização da Política de Desenvolvimento das Atividades Espaciais - PNDAE. Legislação Federal, 1994.
- BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 1.953, de 10 de julho de 1996, Institui o Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais - SINDAE. Legislação Federal, 1996.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Estudo Prospectivo de Materiais – Relatórios de Situação – Fase I – Relatório Parcial – Tecnologias Sensíveis (Tema V) – Materiais Avançados para Tecnologias Sensíveis. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2007.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Estudo Prospectivo de Materiais Avançados – Fase 2/3 – Perspectivas para Ação – Tópicos Tecnológicos Prioritários em C&T de Materiais Avançados. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.
- DCTA. Página institucional do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. São José dos Campos. Disponível em <http://www.cta.br/>. Acesso em fevereiro de 2010.
- FAPESP. SP terá laboratório de estruturas leves em aviação. Notícia postada em 2 de março de 2009. Disponível em <http://bvs.fapesp.br/namidia/noticia/27832/sp-tera-laboratorio-estruturas-leves/>, acesso em março de 2010.

- HENRIQUES, V. A. R.: Titânio no Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008 (Livro Digital).
- HUDSON CITY. Who's Who in the New Space Race? Disponível em <http://www.hudsonfla.com/spacerace.htm>. Acesso em fevereiro de 2010.
- INPE. Página institucional do Instituto Nacional de Atividades Espaciais. São José dos Campos. Disponível em <http://www.inpe.br/>. Acesso em fevereiro de 2010.
- MANKINS, John C. Technology Readiness Levels – A White Paper. Washington, D. C.: NASA Headquarters. 1995. Disponível em <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>. Acesso em fevereiro de 2010.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Plano de Ação 2007-2010. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007.
- MINISTÉRIO DA DEFESA E MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Concepção Estratégica – Ciência, Tecnologia e Inovação de Interesse da Defesa Nacional. Brasília: Ministério da Defesa e Ministério da Ciência e Tecnologia, 2003.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. Política de Desenvolvimento Produtivo: PDP. Brasília: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2008.
- PATER, R. H. e CURTO, P. A.: Advanced materials for space applications, Nasa Langley Research Center, Acta Astronautica 61(11-12)(Dec 2007), p. 1121-1129.
- RAUSCHENBACH, H. S.: Solar Cell Array Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1980.
- RAWAL, S.: Metal-Matrix Composites for Space Applications. JOM 53(4)(2001), p. 14-17. Disponível em <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0104/Rawal-0104.html>, acesso em fevereiro de 2010.
- SILVA, R. A.: Processamento e Caracterização de Compósitos Híbridos Fibra/metal. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.
- UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. UCS Satellite Database. Disponível em http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html. Acesso em fevereiro de 2010.



Siglas e abreviaturas

AAB	Associação Aeroespacial Brasileira	INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
AEB	Agência Espacial Brasileira	INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
AIAB	Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil	IPD	Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento (extinto)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
CFM	Compósito Fibra-Metal	LRI	Laboratório de Radiação Ionizante do IEAv
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara	MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno	MD	Ministério da Defesa
COMAER	Comando da Aeronáutica	MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
CTA	Centro Técnico Aeroespacial	MTCR	<i>Missile Technology Control Regime</i>
CT&I	Ciência, tecnologia e inovação	NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	PBLH	Polibutadieno Líquido Hidroxilado
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos	PNAE	Programa Nacional de Atividades Espaciais
CMM	Compósitos de Matrizes Metálicas	PNDAAE	Política Nacional de Desenvolvimento de Atividades Espaciais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	RF	Rádio-Frequência
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce	SCUP	Subsecretaria de Controle das Unidades de Pesquisa do MCT
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial	SFAR	<i>Special Federal Aviation Regulations</i>
DLR	Centro Aeroespacial Alemão	SINDAE	Sistema Nacional de Desenvolvimento de Atividades Espaciais
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica S. A.	TMI	Torre Móvel de Integração do VLS
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo	TNP	Tratado de Não-Proliferação
FAR	<i>Federal Aviation Regulations</i>	TR	Termo de Referência
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos	USAF	<i>United States Air Force</i>
GLARE	<i>Glass Reinforced Aluminum</i>	VANT	Veículo Aéreo Não-Tripulado
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço do DCTA	VLS	Veículo Lançador de Satélites
IEAv	Instituto de Estudos Avançados do DCTA	VS	Veículo de Sondagem
IFI	Instituto de Fomento e Coordenação Industrial do DCTA	VSB	Veículo de Sondagem com <i>Booster</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica do DCTA	LIT	Laboratório de Integração e Testes do INPE
LFM	Laminados Fibra-Metal		



4. Materiais avançados para energia¹

4.1. Apresentação

De acordo com o *World Energy Outlook*, publicação da Agência Internacional de Energia, prevê-se o aumento da demanda mundial de energia em cerca de 55% no período entre 2009 e 2030. Projeções da Agência Internacional de Energia indicam que os combustíveis fósseis permanecem dominantes como as fontes primárias de energia no cenário de referência do período 2007 - 2030, contribuindo com cerca de três quartos do acréscimo de energia neste período. Em termos absolutos, o carvão suprirá a maior parcela da demanda energética, seguido pelo gás natural e petróleo. A demanda por carvão e gás natural será impulsionada pelo crescimento dos serviços de energia elétrica nos países em desenvolvimento. Em termos globais deverão ser adicionados 4.800 GW de potência instalada até 2030 para atender ao crescimento da demanda. No cenário de referência observa-se um crescimento significativo das novas fontes renováveis de energia (solar, eólica, marés, ondas, bioenergia), ampliando a participação de 2,5% da geração de energia elétrica observada em 2007 para cerca de 8,6% em 2030. Embora a geração hidrelétrica corresponda a uma energia renovável, em termos globais, prevê-se que a participação da hidroeletricidade se reduzirá de 16% para 14% no mesmo período. O Brasil faz parte do grupo de países em que a energia elétrica é maciçamente proveniente de usinas de geração hidráulica, as quais correspondem a cerca de 75% da potência instalada no país e geram aproximadamente 95% da energia elétrica consumida. Adicionalmente, o potencial hidrelétrico aproveitado no Brasil é de apenas 50% do potencial teórico existente. Estas características indicam que no Brasil a geração hidrelétrica predominará nas próximas décadas, garantindo uma matriz elétrica essencialmente renovável.

O consumo mundial de energia primária tem aumentado ano a ano alcançando cerca de 15 TW.ano atualmente. Este crescimento corresponde a um aumento de, aproximadamente, cinquenta vezes em relação aos níveis pré-industriais, enquanto que neste mesmo intervalo de tempo a população mundial cresceu cerca de cinco vezes. A disponibilidade de energia proporcionou um grande desenvolvimento humano em todo o planeta, e o uso de energia está diretamente relacionado com índices econômicos e de qualidade de vida. É evidente que existe uma relação entre o produto inter-

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: José Carlos Bressiani (coordenador), Fabio Coral Fonseca (relator), Eduardo Torres Serra (revisor), Elita Urano C. Frajndlich, Estevam Vitorio Spinace, Fátima Maria Sequeira de Carvalho, Francisco Jose Correa Braga, Humberto G. Riella, Lalgudi V. Ramanathan, Ricardo Mendes Leal Neto, Vanderlei Sergio Bergamaschi (co-revisores)

no bruto e o consumo de energia no mundo. Geralmente, países com elevado consumo energético correspondem às maiores economias mundiais, como apresentado na Fig 3-1.

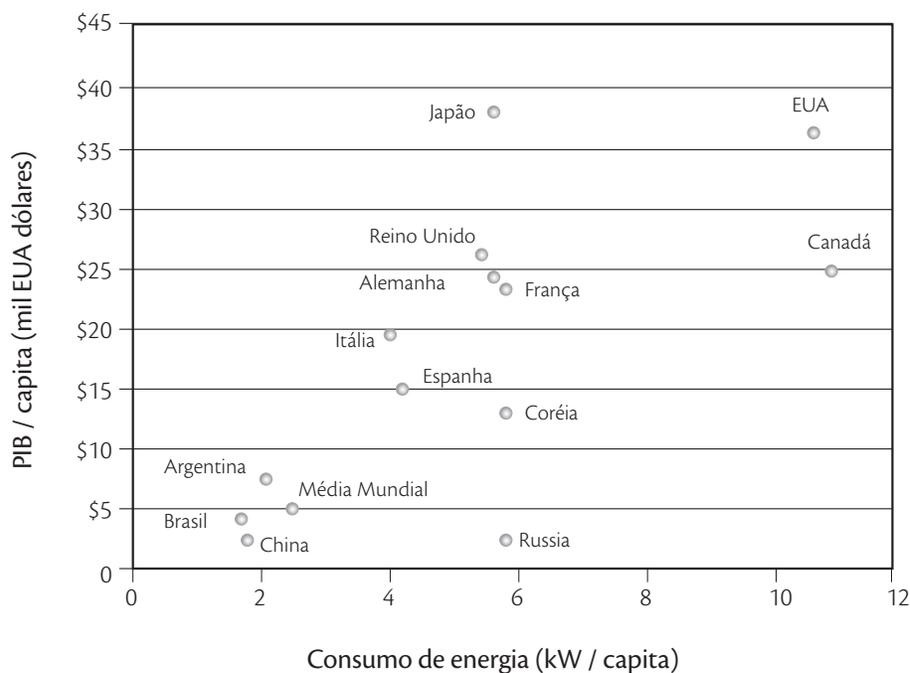


Figura 4-1: Dependência do produto interno bruto com o consumo de energia per capita. Fonte: dados adaptados do relatório da Agência Internacional de Energia (2006).

Por outro lado, as maiores emissões de CO_2 , um dos mais importantes gases de efeito estufa, também estão concentradas nos países com maior consumo energético e, conseqüentemente, têm uma relação direta com os maiores valores de produto interno bruto, como mostrado na Fig 3-2. Neste contexto, é observado que o mercado para energias renováveis tem se expandido rapidamente e vem tomando parte significativa das energias convencionais baseadas em queima de combustíveis fósseis e hidroeletricidade. Estima-se que o mercado mundial para energias renováveis seja cerca de USD\$ 41 bilhões, já em 2008, com um crescimento médio estimado de 9% ao ano.

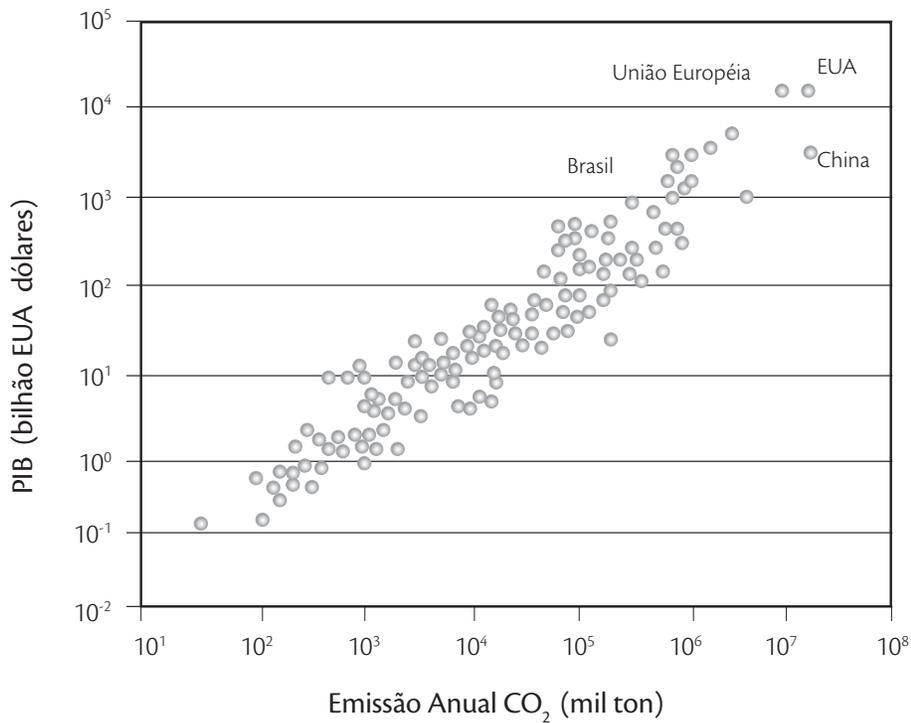


Figura 4-2: Relação entre o produto interno bruto e as emissões anuais de CO₂. Fonte: PIB – Fundo Monetário Internacional (2006) e Emissões de CO₂ - Carbon Dioxide Information Analysis Center (DOE, EUA, 2006).

Com o crescimento acelerado dos países em desenvolvimento a demanda por fontes de energia e infraestrutura tem atingido novos limites. O aumento da demanda, somado ao crescente apelo por fontes renováveis, eficientes, com emissões de gases de efeito estufa reduzidas e segurança de fornecimento energético – devido a uma distribuição desigual dos recursos naturais ao redor do globo – tornam a geração de energia um dos mais importantes desafios que a sociedade moderna enfrenta. Apesar de um esgotamento das reservas de combustíveis não ser considerado um risco iminente, a exaustão dos combustíveis fósseis, mesmo que gradativa, implicará na mudança de paradigmas sobre o uso da energia, alguns deles já vivenciados na substituição da lenha pelo carvão, posteriormente pelo aumento dos combustíveis líquidos e, mais recentemente pelo uso crescente do gás natural. Entretanto, se os

desafios atuais relacionados à energia são analisados, a maior preocupação é a produção de energia de maneira mais limpa e ambientalmente amigável para atender ao aumento do consumo energético. No modelo de geração de energia elétrica predominante, os danos causados pela queima de combustíveis fósseis são muito amplos e implicam em custos significativos para a sociedade, muitas vezes desconsiderados nos estudos de viabilidade de novas tecnologias. Em 2050 é previsto crescimento de consumo que corresponde ao dobro da demanda de 2006, sendo que os países em desenvolvimento, capitaneados pelo Brasil, Rússia, Índia e China, serão responsáveis por cerca de 60% deste crescimento. De toda forma, as fontes de produção de energia buscadas devem ser eficientes, econômicas e disponíveis. O desafio é encontrar rotas eficientes de produzir, armazenar, transportar e usar energia para melhorar a qualidade de vida sem ameaçar o meio ambiente e o clima ou causar tensões geopolíticas.

Materiais e energia têm uma relação de reciprocidade: materiais produzem energia ou permitem que ela seja transformada em formas utilizáveis, e abundância de energia tem tornado possível a produção de uma ampla e variada coleção de materiais. A relação de materiais para energia pode ser visualizada como um contínuo. Materiais extraídos da natureza podem ser o combustível de reatores para produção de energia através de reações químicas ou nucleares; os materiais avançados aproveitam a energia disponível e a transformam para utilização, como por exemplo, o silício fotovoltaico e as pás das turbinas eólicas; a distribuição e armazenamento de energia também são feitos por materiais em fios, baterias, hidrogênio e biocombustível; e, finalmente, os materiais permitem o uso da energia produzida, como nos filamentos de lâmpadas e nas pás de turbinas a jato. Portanto, materiais têm uma relação mútua e direta com energia, desde a produção até seu uso final, e investimentos na área de materiais são cruciais para que sejam superados os problemas envolvidos com a produção de energia.

Este documento apresenta concisamente um levantamento sobre as perspectivas acerca da pesquisa e desenvolvimento (P&D) de materiais avançados para energia. Ele foi elaborado com o objetivo de fornecer dados estratégicos sobre materiais avançados usados em tecnologias de geração de energia elétrica visando embasar a importância de investimentos nos tópicos selecionados. São descritas as principais necessidades de desenvolvimento de materiais para as seguintes tecnologias de geração de energia: (1) Produção de Biocombustíveis; (2) Eletricidade Solar; (3) Energia Nuclear; (4) Energia Eólica; (5) Produção e Armazenamento de Hidrogênio; e (6) Células a Combustível. Cada uma destas tecnologias é analisada e são apontadas as principais limitações e possíveis alternativas relativas aos materiais usados. São apresentadas informações sobre o estágio de desenvolvimento no Brasil e no mundo, e quando cabível, são propostas ações estratégicas e agendas de pesquisa e desenvolvimento visando fundamentar direcionamentos futuros de P&D para a área de materiais para energia no Brasil.



4.2. Produção de biocombustíveis

Em um cenário de produção sustentável de energia, uma opção com grande potencial e em rápido crescimento é a produção de biocombustíveis líquidos a partir da biomassa. O desafio geral de P&D é o desenvolvimento de tecnologias para produzir combustíveis de baixo custo econômico e energético, minimizando o uso de recursos escassos, como terra arável e água. Atualmente, o consumo mundial de biocombustíveis constitui 2% dos combustíveis para transporte, e espera-se um aumento de cinco vezes até 2020. Entretanto, existe uma série de questões a serem consideradas para que os biocombustíveis sejam totalmente sustentáveis. Além de aspectos sociais, o uso de grandes quantidades de água e a emissão de gases de efeito estufa resultante da produção e combustão dos biocombustíveis produzidos a partir de biomassa sugere que no longo prazo as rotas de produção de energia a partir da biomassa deverão considerar a produção de eletricidade e hidrogênio. Diferentes matérias-primas biológicas, ou biomassas, deverão ser convertidas em biocombustíveis que serão transformados em produtos para negócios e aplicações. São considerados como biocombustíveis, principalmente, o álcool e o biodiesel que são produzidos por meio de processos de conversão bioquímica, termoquímica ou biológicos. Estes processos de conversão da biomassa envolvem etapas que demandam várias propriedades dos materiais empregados.

Biocombustíveis têm sido usados, em especial destaque no Brasil, desde a década de 1970, estimulados à época pela crise do petróleo. Mais de 90% da produção atual de biocombustíveis é de etanol, produzido por fermentação. Nos processos de produção e estocagem do bioetanol, a ação ácida e tribológica deste álcool requerem o desenvolvimento de protetores de superfícies. Atualmente, são aplicadas resinas a base de epóxi e ésteres vinílicos que não são consideradas satisfatórias, pois o custo de manutenção de equipamentos, reatores e tubulações, ainda é elevado. O biodiesel é tipicamente produzido pela reação de óleos vegetais ou gorduras animais com álcool, como metanol ou etanol, que na presença de catalisadores geram mono-álquil-ésteres e glicerina, a qual deve ser removida. O grau de pureza do biodiesel é fundamental na obtenção de elevada eficiência de sua combustão. As resinas de troca iônica têm se apresentado como uma solução viável na purificação do biodiesel. Como o processo de obtenção destes biocombustíveis tem caráter termoquímico, materiais quimicamente mais resistentes e refratários para aquecedores, reatores e tubulação devem ser desenvolvidos visando também aumentar a eficiência do processo de produção.

Nos processos termoquímicos de combustão, a eficiência das tecnologias de geração de energia elétrica está na faixa de 20-25%, e considera-se que processos de gaseificação são mais promissores para se obter maiores eficiências. Nos processos de gaseificação, materiais carbonáceos (biomassa sólida ou líquida) reagem com ar, oxigênio ou vapor d'água para produzir gás de síntese (*syngas*), e o pro-

duto gasoso é posteriormente usado para geração de energia. Cerca de 80% da energia contida na biomassa pode ser transferida para a forma gasosa. A gaseificação usando apenas oxigênio é feita raramente, mas suas vantagens potenciais devem fazê-la uma área ativa de desenvolvimentos. Podem ser conseguidos muitos benefícios na gaseificação com a remoção de impurezas e contaminantes por meio do desenvolvimento de materiais e tecnologias de filtração, catálise e lavadores (*scrubbing*). Avanços nas seguintes áreas da ciência de materiais podem contribuir significativamente para a tecnologia de combustão de biomassa e devem constar em uma agenda estratégica de P&D:

- Melhores materiais refratários para paredes de fornos, que resultarão em melhor isolamento térmico e temperaturas mais altas de gases efluentes que promoverão aumento da eficiência térmica;
- Projeto de reatores e métodos de processamento de combustíveis para promover combustão mais completa.

Além dos processos de produção, existem desafios tecnológicos acerca dos biocombustíveis relacionados com o seu uso efetivo como combustível, pois o etanol pode causar a corrosão de peças metálicas e algumas misturas combustíveis podem gerar efluentes poluidores. Outro ponto crucial é desempenho ambiental uma vez que a produção de biocombustíveis gera grandes quantidades de gases de efeito estufa, consome grandes quantidades de água e terra arável e pode causar poluição em algumas áreas. Portanto, a produção sustentável em larga escala de biocombustíveis a partir de produtos agrícolas é limitada a localidades que possuem uma série de condições favoráveis, e espera-se que a produção sustentável futura de biocombustíveis ao invés de usar monoculturas agrícolas seja baseada na utilização de rejeitos e resíduos ou plantas cultiváveis em terras de baixa qualidade. Neste contexto, a produção de biocombustíveis a partir da lignocelulose é considerada o desafio central dos biocombustíveis sustentáveis, que deverá permitir a produção em larga escala de etanol. A biomassa celulósica é a parte estrutural das plantas que pode ser obtida de resíduos agrícolas (bagaço da cana de açúcar), florestais (serragem) e frações apreciáveis de resíduos sólidos municipais (papel). Apesar dos enormes benefícios potenciais do etanol celulósico e dos progressos já alcançados, esta tecnologia ainda precisa ser comercialmente viabilizada.

Processos catalíticos podem ser muito importantes para a produção de biocombustíveis no futuro. A síntese Fischer-Tropsch (FT), reforma a vapor, gaseificação catalítica e biocatalisadores são exemplos de processos catalíticos de produção de biocombustíveis. A síntese FT usa catalisadores à base de Fe, Co e Ru, a reforma a vapor usa tradicionalmente catalisadores à base de Ni suportados em partículas cerâmicas e a gaseificação catalítica tem usado catalisadores $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Desenvolvimentos na área de catálise de interesse para a produção de biocombustíveis incluem: catalisadores mais seletivos (ou condições de processos) para a síntese FT, catalisadores de baixo custo para gasei-



ficação, resistentes à desativação para reforma a vapor e catalisadores para a produção de gás de síntese rico em hidrogênio. O uso de catalisadores nanoestruturados na produção de biocombustíveis visa aumentar a eficiência e a seletividade de processos industriais resultando em um aproveitamento mais eficiente de matérias-primas, com consumo menor de energia e a produção de quantidades menores de resíduos indesejáveis. Os catalisadores também podem trazer vantagens adicionais: propiciar a redução da escala das plantas industriais e permitir a geração do mesmo produto através de um número menor de etapas de produção.

Considerando a físico-química dos processos de obtenção de biocombustíveis e os requisitos exigidos pela engenharia de aplicação, uma agenda de pesquisa e desenvolvimento (P&D) na área de materiais em temas como recobrimentos de superfícies contra a ação ácida e a abrasão, materiais para filtração física e separação química, materiais refratários e resistentes à ação química e materiais poliméricos resistentes a solventes, deverão contribuir de maneira importante para os processos de produção e uso de biocombustíveis. São apontados o uso de cerâmicas nanoestruturadas em aplicações como filtros, compósitos resistentes a abrasão e recobrimentos resistentes a altas temperaturas, e de polímeros para resinas compósitas de revestimentos resistentes à abrasão e ataque químico, membranas nanoporosas e resinas de troca iônica.

Entretanto, é importante considerar que uma grande parte dos esforços em P&D acerca da produção de biocombustíveis está nas áreas biológicas onde processos bioquímicos e biocatalíticos têm sido investigados intensamente. Um exemplo é o uso de algas e enzimas para converter biomassa em biocombustível. Entretanto, mesmo nestes processos são necessários desenvolvimento de materiais e processos para se manter as condições de crescimento das algas e catalisadores para uma eficiente conversão da biomassa.

No Estudo Prospectivo de Materiais Avançados do CGEE foram recomendados como prioritários o desenvolvimento de cerâmicas e polímeros para aumento da eficiência da produção do biodiesel e de recobrimentos protetores de superfícies contra a ação ácida e tribológica dos processos de produção e estocagem do bioetanol. É interessante notar que a produção de biocombustíveis foi identificada nesse estudo com o único tópico de materiais para energia no qual o país exerce liderança mundial. Portanto, o investimento na P&D para a produção dos biocombustíveis, especialmente o bioetanol e o biodiesel, é estratégico para consolidar esta posição que se configura como uma oportunidade sólida de negócios para o Brasil com grande repercussão social, ambiental e envolvimento de vários segmentos da economia.

4.3. Eletricidade solar

Diferentemente de outras fontes, a energia solar é quase ilimitada, não poluidora e disponível em todos os continentes. Uma hora de radiação solar na Terra gera 14 TW.ano de energia, que equivale a praticamente o consumo anual total do planeta. Atualmente, a produção solar contribui com apenas 0.03% do consumo energético mundial, mas o crescimento, liderado pela Alemanha e Japão, é impressionante (~40% por ano). Existem duas principais rotas para geração de eletricidade solar: solar térmica e solar fotovoltaica.

Na solar térmica a radiação solar é convertida em calor que é usado diretamente, por exemplo, em aquecedores de água, ou concentrada para operar geradores a vapor para produzir eletricidade. A eficiência dos concentradores solares é de 10-15%, e os custos de instalação são elevados. A energia solar também pode ser convertida usando-se materiais termoelétricos. A solar fotovoltaica usa semicondutores para converter a radiação solar em eletricidade, que pode ser usada localmente ou conectada à rede de distribuição. Estas células fotovoltaicas (CF) vêm apresentando ganhos de eficiência impressionantes ao longo do tempo. As primeiras gerações, usando silício monocristalino tinham eficiência de 10-15%, e as tecnologias de CF à base de CdTe e CF de filmes finos podem atingir eficiências de 20% e 40%, respectivamente. As diferentes famílias de CF incluem filmes finos, estruturas amorfas e materiais policristalinos, cada uma delas com diferentes vantagens em relação ao custo e eficiência de conversão. Mesmo com bom desempenho a eletricidade solar tem custos intimidadores: média de USD\$ 0.25 kWh, que corresponde a cerca de cinco vezes mais que o custo de vários biocombustíveis. Para que CF sejam competitivas é necessário reduzir os custos de produção por meio do uso de materiais policristalinos e filmes finos que possam ser processados em larga escala.

A seguir são apresentadas brevemente as características das principais tecnologias de eletricidade solar e seus materiais.

O silício é o material mais usado na tecnologia das CFs e é empregado em diferentes estruturas. As CFs de silício policristalino têm menor custo que as de silício monocristalino por exigirem processo de preparação mais simples. Entretanto, a eficiência é um pouco menor quando comparadas ao silício monocristalino. O silício policristalino pode ser preparado pelo corte de um lingote ou depositando-se um filme sobre substrato. A utilização de silício amorfo na confecção de CF tem mostrado vantagens importantes nas propriedades elétricas e no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível (absorve radiação solar 40 vezes mais eficientemente que silício monocristalino) e podendo ser fabricado por meio de deposição sobre diversos tipos de substratos de baixo custo (como plásticos, vidros e metais), o silício amorfo é o material principal de



CF de filmes finos. Células tipo HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layers) consistem de silício amorfo e silício policristalino. Estas células são mais eficientes que CFs de silício amorfo e os processos para fabricação mais econômicos, atraindo cada vez mais atenção e já sendo comercializada por empresa japonesa.

As células fotovoltaicas de filme fino (C3F) apresentam potencial para se atingir os custos competitivos de produção. Com *band gap* adequado e elevado coeficiente de absorção óptica para fótons com energias acima de 1,5 eV, seriam necessários somente alguns microns de material para absorver grande parte da luz incidente. Dois tipos de C3F estão sendo produzidos comercialmente nos EUA e na Alemanha e grandes esforços estão sendo despendidos para aumentar a eficiência da conversão solar destas C3F: (a) CdS/CdTe; e (b) CdS/ CuInSe₂ (CIS) e/ou CdS/ Cu (In, Ga)Se₂ (CIGS). As C3Fs consistem de várias camadas de diversos materiais com funções diferentes. A camada CdS é a camada tipo janela e as camadas de CdTe, CIS (ou CIGS) são camadas absorvedoras. Estas são depositadas por meio de técnicas variadas. A CF com camada absorvedora de sulfeto de cobre-zinco-estanho Cu₂ZnSnS₄ (copper-zinc-tin-sulfide - CZTS) apresenta grande potencial para ser parte de uma nova geração de materiais para CFs devido ao alto coeficiente de absorção do material, abundância e não-toxicidade dos elementos que constituem este composto.

Os compostos III-V como GaAs, InP e GaSb tem um conjunto de propriedades que os tornam excelentes materiais para CF de alta eficiência. Os materiais usados para confeccionar CF uni-junção são GaAs e InP. A principal desvantagem do uso de compostos III-V para CF é o elevado custo para produção dos substratos.

Um competidor relevante das CF inorgânicas são as CF orgânicas, que possuem um mecanismo distinto de operação no qual pares ligados elétron-buraco (éxcitons) são gerados e posteriormente decompostos em portadores de cargas livres nas interfaces. A camada ativa destes sistemas deve ser mantida em dimensões mínimas devido à baixa mobilidade dos portadores de carga. Novos esquemas tentam resolver problemas intrínsecos das CF orgânicas incluindo a adição de corantes para permitir melhor absorção e conversão do espectro solar, compósitos orgânico-inorgânicos e nanocompósitos. Em algumas CF sensibilizadas com corantes a camada ativa consiste de TiO₂ nanocristalino depositado sobre uma superfície transparente e eletricamente condutora. As vantagens deste sistema incluem uso em qualquer condição de insolação. Polímeros orgânicos são candidatos excelentes para uso em CF de baixo custo. Estes materiais são solúveis, permitindo deposições de camadas por várias técnicas e sobre diversas superfícies, inclusive flexíveis. Por outro lado, o tempo de vida útil e a eficiência (5% em testes de laboratório) devem ser melhorados.

Têm sido pesquisados novos mecanismos para aumentar o limite de eficiência das CFs. Um deles consiste na utilização de nanocristais de semicondutores que podem produzir mais de um par elétron-buraco por fóton incidente. Este efeito pode resultar em um novo tipo de CF mais barata e mais eficiente que as CFs disponíveis. O reduzido tamanho dos cristais na escala nanométrica, também chamados de pontos quânticos (*quantum dots*), sugerem novos efeitos quanto-mecânicos, que convertem energia em elétrons. Teoricamente, estas CFs de terceira geração poderão converter mais de 40% da energia da luz em potência elétrica. Em comparação, os painéis fotovoltaicos atuais têm menos de 20% de eficiência e limite teórico de 30%.

Sistemas térmicos solares usam a radiação solar como fonte de calor e podem ser usados para controle do ambiente, gerar eletricidade ou produzir combustíveis químicos. Sistemas térmicos solares de alta-temperatura usam espelhos em várias configurações para concentrar a radiação e depois converter a energia solar em calor. O calor pode ser convertido em eletricidade usando um gerador ou pode ser usado para auxiliar reações químicas. Uma usina baseada neste sistema consiste de três partes: um sistema óptico para coletar e concentrar a luz, um receptor ou reator que converte a luz em calor e um gerador que converte o calor em eletricidade ou um reator que converte o calor em potência química. Existem vários tipos de concentradores solares. Uma vez concentrada a luz solar, vários métodos podem ser usados para converter o calor em energia elétrica. A unidade da conversão de grandes receptores centrais normalmente são turbinas de vapor. Outros métodos são: 1) geração e superaquecimento do vapor no receptor; 2) aquecimento de ar atmosférico no receptor e depois usá-lo para superaquecer o vapor; 3) aquecer ar comprimido e depois usá-lo numa turbina de gás híbrido tipo solar/combustível. Uma área ainda não explorada é o desenvolvimento de motores de calor (*heat engines*) especificamente projetados para integração com o sistema térmico solar. O uso destes novos motores poderia simplificar substancialmente as unidades de conversão de potência, aumentar sua eficiência e reduzir custos.

Sistemas para conversão direta da energia térmica em elétrica que se baseiam em dispositivos termoelétricos e conversores termo-fotovoltaicos abrem novas oportunidades para geradores de potência média e podem até competir com conversão fotovoltaica direta. A tecnologia de conversão termoelétrica de energia baseada nos efeitos Peltier e Seebeck explora a energia térmica dos elétrons (e buracos) para conversão da energia solar em calor e eletricidade. Os melhores materiais termoelétricos disponíveis comercialmente são ligas de Bi_2Te_3 com Bi_2Se_3 (tipo-n) e com Sb_2Te_3 (tipo-p). Estes foram descobertos nos anos 1950. Desenvolvimentos recentes em materiais nanoestruturados ($\text{AgPb}_2\text{SbTe}_{2+m}$) e superreticulados têm demonstrado aumentos significativos em eficiência. O desenvolvimento de materiais termoelétricos (tipo p e n) nanoestruturados com baixas perdas parasi-



tas por efeitos de resistência de contato, de radiação ou interdifusão, que possam atingir eficiências de 30% na faixa entre a temperatura ambiente a 700 °C é considerado alcançável.

Um ponto relevante acerca das técnicas de geração de eletricidade solar é a natureza cíclica da radiação solar. Portanto, o desenvolvimento destas tecnologias é sempre associado à possibilidade de armazenamento de energia. Em usinas convencionais solar-térmica, espelhos parabólicos concentram luz solar em tubos contendo fluídos usados para transferência de calor, como água do mar ou óleo. O fluído é usado para produzir vapor da água que alimenta uma turbina para produzir eletricidade. Sistemas já disponíveis comercialmente utilizam espelhos planos de baixo custo para concentrar luz sobre tubos contendo água, produzindo assim vapor diretamente. Baterias tipo chumbo-ácido têm sido usadas nos últimos anos para armazenar e transportar energia. Este tipo de bateria é uma opção para armazenar energia solar. O desenvolvimento de eletrodos de chumbo no Brasil é necessário para avaliar esta opção de armazenamento. A associação de energia solar para produção de hidrogênio, armazenamento e posterior uso em células a combustível é considerada uma rota importante.

Enquanto as pesquisas visando o aumento da eficiência, novos materiais e diminuição de custos progredem, diversas regiões do mundo têm aderido às tecnologias solares. Na América do Sul e do Norte houve aumento da produção de energia solar de cerca de 25% entre 2006 e 2007, na Europa o aumento neste período foi de mais de 60% e no oriente médio 37%. Programas como a *California Solar Initiative*, que prevê investimentos de US\$ 3,3 bilhões para gerar 3 GW de eletricidade até 2017 por meio do incentivo de instalação de painéis solares em telhados de residências e prédios comerciais, indicam que esta tecnologia aproxima-se de uma aplicação disseminada.

Quanto ao cenário nacional, as variadas técnicas usadas para obtenção de materiais fotovoltaicos na escala de laboratório estão disponíveis em alguns centros de pesquisa e universidades no Brasil. Entretanto, estas instituições talvez não estejam envolvidas no desenvolvimento de materiais solares e poderiam ser integradas em um desenvolvimento coordenado pela formação de redes de pesquisa e desenvolvimento. No momento são poucas as instituições que tem programas de P&D em materiais solares. Para desenvolver CFs na escala laboratorial são necessários melhorias e/ou adaptação das instalações disponíveis no país. Para produzir CF em escala maior é essencial a aquisição e instalação de unidades específicas de fabricação. Além de desenvolver materiais absorvedores para CF tipo filme-fino, ações estratégicas para o país incluem a produção de silício grau solar e a promoção de instalações para produção e/ou montagem de módulos fotovoltaicos e, finalmente, do sistema fotovoltaico completo. A mesma sequência de ações estratégicas precisa ser tomada para desenvolver, testar e produzir em escala maior os materiais, componentes e sistemas relacionados com tecnologias térmico-solar. As universidades devem se posicionar para oferecer cursos voltados à energia solar. São

necessários profissionais de diferentes áreas do conhecimento como a química, física, biologia, matemática e as engenharias, incluindo diferentes especializações dentro destas áreas.

Cabe destacar que, de acordo com a Agência Internacional de Energia, metade da redução dos custos de geração com sistemas fotovoltaicos serão decorrentes P&D diretamente relacionada a materiais, a processos de fabricação e a eficiência da conversão solar-elétrica.

São propostos os seguintes itens para uma agenda de P&D em energia solar fotovoltaica:

- Unidade de produção de silício grau solar e produção nacional de equipamentos para conexão a rede;
- Desenvolvimento de célula fotovoltaica (CF) de silício amorfo em nível de pesquisa básica, aplicada e de instalação de plantas pilotos;
- Pesquisa básica nas seguintes famílias de CF:
 - 1) CF de filmes finos: compostos das famílias III-V (GaAs), II-VI (CdTe-CdS) e compostos CIGS (CuInGaSn);
 - 2) Novas CF baseadas materiais orgânicos: polimérica e sensibilizadas por corantes;
 - 3) CF baseadas em novas arquiteturas na escala nanométrica, como as células de pontos quânticos;

As ações estratégicas sugeridas para esta área são:

- Criar empresa para viabilizar a fabricação de silício grau solar;
- Estabelecer redes nacionais de P&D com modelos gerenciais que permitam flexibilidade na gestão dos recursos financeiros e contratação de recursos humanos, visando o cumprimento de metas bem estabelecidas;
- Estabelecer parcerias coordenadas pelas redes em subáreas específicas (exemplo: CF filme-fino) entre empresas e instituições de pesquisa;
- Equipar e capacitar as redes para desenvolver, testar, avaliar e certificar materiais, tecnologias e sistemas de energia solar fotovoltaica.

Na geração heliotérmica de energia elétrica são propostos os seguintes itens para a agenda de P&D:

- Implantação de plantas de demonstração de geração heliotérmica de energia elétrica (Concentrated Solar Power – CSP) para as tecnologias de cilindros parabólicos, torre central e discos parabólicos;



- Desenvolvimento, fabricação e caracterização de materiais refletivos, refrativos e seletivos para espelhos e absorvedores da radiação solar;
- Desenvolvimento de motores de calor (heat engines) especificamente projetados para integração com o sistema térmico solar;
- Sistemas de armazenamento de calor para otimização operacional das plantas de geração.
- No que se refere às tecnologias de baixa e média temperaturas são propostos os seguintes itens para a agenda de P&D:
- Implantação de projetos de demonstração para avaliação de novas tecnologias e novos materiais;
- Ampliação da capacitação tecnológica da indústria nacional com a finalidade de obter-se ganhos de eficiência energética e reduções de custo.

Deve-se destacar que o tópico de materiais para energia solar foi apontado como o mais prioritário para investimentos com oportunidade de negócio no Relatório de Perspectivas para Ação do Estudo Prospectivo de Materiais Avançados do CGEE. Foi identificado neste relatório que o desenvolvimento da energia solar no país é defasado, em estágio de pesquisa aplicada, enquanto que o resto do mundo está em estágio de aplicação seletiva.

4.4. Energia nuclear

Energia nuclear é a energia liberada numa reação nuclear, ou seja, na transformação de núcleos atômicos pelos processos de fissão ou fusão. A tecnologia atual de aproveitamento da energia nuclear é resultante do processo de fissão do urânio usada para geração de energia elétrica. A energia nuclear não emite gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, hidrofluorcarbonos e outros) ou metais tóxicos. Os aspectos ambientais da indústria nuclear, em sua totalidade, se comparam favoravelmente às alternativas existentes para a produção de energia elétrica em grandes quantidades. Em termos de custo, usinas nucleares podem ter despesas operacionais compatíveis com outras tecnologias, porém a vida útil de uma usina nuclear é menor do que de uma usina térmica convencional e o custo de descomissionamento é enorme. A energia nuclear é baseada em tecnologia madura e comprovada, e é a terceira maior fonte de produção de eletricidade no mundo, gerando 17% da produção global de eletricidade e evitando cerca de 30% de emissões adicionais de CO₂ do setor energético. O projeto político mundial via energia nuclear tem originado projetos ambiciosos. O plano mais ousado é o da China, que pretende construir mais 30 usinas nucleares até 2020. A previsão mundial é de 1400 projetos nucleares até 2050, uma vez que o debate mundial em torno de uma

crecente indústria de geração nuclear tem superado questões tais como segurança, proliferação, rejeitos e aceitação pública. Mundialmente, as mais de 400 usinas nucleares instaladas (370 GW de potência elétrica) têm produzido energia sem acidentes há mais de 20 anos. Entretanto, a segurança de reatores é ainda um ponto relevante no desenvolvimento de plantas nucleares, em conjunto com o gerenciamento de rejeitos e prevenção de proliferação de armamentos.

Às taxas atuais de uso, as reservas comprovadas de urânio, matéria prima do combustível nuclear, são adequadas para mais de 85 anos de operação. Deve-se ressaltar que o Brasil dispõe de reservas de urânio equivalente a 6% das mundiais e domina o ciclo do combustível nuclear. Neste contexto, o Brasil deveria implantar programas estratégicos, tais como:

- O programa IV geração dos reatores nucleares, com o intuito de implantar reatores mais econômicos, seguros e sustentáveis;
- O programa do Ciclo do Combustível Avançado, cujo objetivo seria pesquisar tecnologias avançadas de reciclagem e reprocessamento do combustível usado que seja capaz de extrair substancialmente a energia das fontes de urânio por meio da queimas dos componentes de vida longa do combustível nuclear usado, de modo a não separar o plutônio. Tais tecnologias prometem a redução da quantidade de combustível usado, prolongando a vida do depósito geológico e do combustível usado;

Um programa nacional nuclear poderia ser dividido em setores, tais como:

- Reatores de potência para produção de energia;
- Reatores para produção de hidrogênio;
- Reatores de pesquisa e produtores de radionuclídeos;
- Ciclo do combustível nuclear.

Propriedades gerais acerca dos materiais nucleares incluem resistência a radiação, a corrosão, boas propriedades mecânicas em altas temperaturas, compatibilidade com o combustível e com o refrigerante e facilidade de fabricação. O objetivo de se estender a vida útil de reatores nucleares para mais de 60 anos requer uma reavaliação do comportamento dos materiais usados. A principal consideração na escolha de materiais para os reatores térmicos é uma baixa absorção (seção de choque) de nêutrons. Diversas ligas denominadas Zircaloy, à base de zircônio (Zr-Sn-Fe-Cr-Ni; Zr-Nb, etc.), são os materiais estruturais mais empregados nos núcleos dos reatores térmicos. Entretanto, o aumento das taxas de queima (*burnup*) dos reatores eleva a permanência dos materiais no núcleo do reator e leva a taxas de exposição mais elevadas. Nestas condições, problemas de hidratação, crescimento por irradiação e de fragilização se tornam críticos, exigindo avanços no desenvolvimento de ligas ca-



pazes de atender estas exigências. Em reatores de nêutrons rápidos problemas associados à fluência e inchamento sob radiação das ligas metálicas tem levado ao desenvolvimento de aços ferríticos à base de Cr-Mo. Por outro lado estes aços apresentam fragilização sob radiação. Estratégias para se superar estes problemas incluem controle de impurezas e engenharia de contornos de grão. Com a tendência de aumento da temperatura de funcionamento destes reatores há a necessidade de aços ferríticos com melhor comportamento de fluência térmica, e a dispersão de nanopartículas de ítria ou titânia na matriz metálica tem sido estudada neste sentido.

Nos processos relativos ao ciclo do combustível, a necessidade de materiais resistentes a ambientes corrosivos do reprocessamento exigem aços e ligas à base de titânio e zircônio. Para o desenvolvimento futuro de reatores de alta temperatura são necessários diversos novos materiais incluindo ligas refratárias à base de Nb, Ta, Mo, W e Re, cerâmicas e compósitos como SiC-fibra de SiC, compósitos carbono-carbono e recobrimentos avançados. Estes materiais devem atender a requisitos de estabilidade microestrutural, mecânica e química, e devem ser desenvolvidos conjuntamente com novos processos de fabricação, técnicas de soldagem, métodos de inspeção e monitoramento online. Os desenvolvimentos para os reatores de alta temperatura configuram um extensivo conjunto de avanços na área de materiais.

Considerando o setor de reatores de potência para produção de energia, uma proposta seria desenvolver os conceitos de sistemas nucleoeletrônicos mais promissores, desenvolver um ciclo de combustível mais viável e novos combustíveis. Os combustíveis nucleares atuais são denominados de combustíveis de III geração, sendo os mais conhecidos aqueles utilizados em reatores de potência do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), com pastilhas de UO_2 em tubos de zircaloy. Entretanto, há uma grande variedade de combustíveis na forma de óxidos, ligas metálicas, nitretos, carbetos e materiais compósitos, dependendo das condições específicas de cada aplicação. Os reatores de pesquisa, por exemplo, utilizam ligas metálicas ou cerâmicas dispersas em alumínio e os reatores rápidos têm as ligas de U-Zr e de U-Pu-Zr, além de carbetos e nitretos de U e Pu, como combustíveis mais comuns.

Os combustíveis avançados devem apresentar alta resistência à irradiação, alta resistência do revestimento à corrosão, capacidade de suportar adequadamente os carregamentos termomecânicos provenientes de transientes operacionais e boa compatibilidade com os materiais que o compõem. O combustível deve ser capaz de ser reciclado e ter seus isótopos transurânicos, produzidos no reator, queimados. Outra característica importante é que o combustível permita sua deposição final segura (armazenamento em depósitos acessíveis por centenas de anos). Exemplos de combustíveis que apresentam esta característica são os combustíveis de matriz inerte, propostos para reatores PWR. Tais combustíveis estão sendo convencionalmente chamados de combustíveis de IV geração. Exem-

plificando, devem ser desenvolvidas a tecnologia de fabricação de ligas metálicas do tipo U_4Zr_2Nb e similares com a sua dispersão em matriz metálica de Zircaloy. Paralelamente, é necessário aprofundar os estudos tecnológicos em combustíveis cerâmicos com absorvedores do tipo Urânio/Gadólina e ou Érbia, fundamentando assim a economia e desempenho dos reatores de potência.

Uma das rotas mais promissora de produção de hidrogênio é o processo termoquímico com a aplicação da energia nuclear usando reatores de alta temperatura do tipo HTGR. O reator HTGR de alta temperatura é baseado em um leito fluidizado e refrigerado a gás, e se apresenta como um candidato para a próxima geração de reatores nucleares. O combustível do HTGR é constituído de uma esfera de grafite de alta resistência mecânica. No seu interior existem milhares de microesferas de $(Th,U)O_2$, sendo cada microesfera recoberta com três camadas: a primeira e a terceira de grafite e a segunda de carvão de silício. A tecnologia de fabricação desse combustível se encontra desenvolvida em escala semi-industrial em alguns países. Sabe-se que o processo sol-gel, utilizando soluções de nitrato de urânio e de tório, é empregado na fabricação das microesferas, atendendo as especificações técnicas necessárias.

Os radiofármacos são substâncias radioativas que auxiliam médicos a tomarem decisões importantes nos tratamentos em oncologia, cardiologia, neurologia, entre outras áreas. Entre os radiofármacos, destacam-se: o samário-153, utilizado para atenuar dores nos ossos provocadas por metástases de tumores; iodo-123 ultrapuro para analisar a função tireoidiana; tecnécio-99m, que pode ser combinado quimicamente com diversos complexos orgânicos para avaliações de disfunções hepáticas, ósseas e cerebrais, entre outras; e o tálio 201 para diagnósticos cardíacos. O uso de radiofármacos no país tem crescido continuamente cerca de 10% ao ano. Eles têm sido distribuídos para hospitais e clínicas por todo o país, e atendem a mais de três milhões de pacientes por ano.

Entretanto, a produção destes radiofármacos tem sido prejudicada por uma crise de abastecimento mundial devida a limitações da infraestrutura de produção. Neste contexto, existe um consenso sobre a prioridade da construção de um novo reator nuclear multipropósito no país para atender a crescente demanda de radiofármacos e para funcionar como um laboratório nacional para a pesquisa de materiais usando fonte de nêutrons. Para os reatores de produção de radiofármacos, propõe-se implantar programas de desenvolvimento de combustíveis nucleares tipo placa com elevadas densidades $4,8 \text{ gU/cm}^3$ (U_3Si_2 -Al) a $7,0 \text{ gU/cm}^3$ (urânio –molibdênio 7 a 10%). Espera-se desenvolver tecnologias nas diferentes etapas da fabricação de combustíveis nucleares para reatores de pesquisa e produtores de radionuclídeos, no estudo da reação no estado sólido da liga U-Mo com alumínio e no estudo do tratamento termomecânico da dispersão UMo-Al e U_3Si_2 -Al.



No setor relativo ao ciclo do combustível nuclear, alguns tópicos de fundamental importância para a área nuclear devem ser incluídos em uma agenda de pesquisa e desenvolvimento:

- Desenvolvimento do processo de obtenção de óxido de zircônio, grau nuclear;
- Desenvolvimento do processo de obtenção de zircônio metálico e suas ligas;
- Desenvolvimento de processo de incineradores para resíduos nucleares de baixa e média atividade (radiação alfa e beta);
- Desenvolvimento do ciclo fechado avançado, onde o plutônio e outros elementos do grupo de actínídeos presentes no combustível consumido seriam reprocessados e usados em reatores queimadores especiais, reduzindo enormemente a quantidade de resíduos que exigem armazenagem de longo prazo;

Para geração de energia elétrica nuclear sem preocupações relativas a rejeitos radioativos, pode se considerar a fusão nuclear. Nestes processos dois átomos pequenos se fundem formando um maior e liberando enormes quantidades de energia. O projeto internacional ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), concebido para demonstrar a viabilidade tecnológica e científica da produção de energia por fusão, constitui uma etapa importante para se definir os materiais que serão necessários para conter esta reação. De acordo com publicações do projeto, planeja-se a construção de um protótipo de uma planta piloto de fusão de 1,5 GWe em torno de 2050. Nesta tecnologia serão necessários materiais capazes de suportar altas taxas de irradiação por nêutrons e elevadas cargas mecânica, térmica e eletromagnética. Os requisitos têm direcionado o desenvolvimento de aços ferríticos de baixa ativação, ligas de vanádio e materiais cerâmicos compósitos reforçados com fibras de SiC, e os materiais submetidos ao plasma são essencialmente ligas refratárias à base de tungstênio.

No Brasil, a pesquisa e desenvolvimento (P&D) na área nuclear são realizados quase que exclusivamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, por meio de seus institutos e centros de pesquisas. A empresa INB-Indústrias Nucleares do Brasil atua na cadeia produtiva do urânio, da mineração à fabricação do combustível nuclear que gera energia elétrica nas usinas de Angra 1 e 2. Devido à grande atividade de pesquisa e produção tecnológica alcançada durante a década de 80 e posterior desaceleração das atividades de P&D na área, há uma necessidade urgente de formação e reposição de recursos humanos para se preservar o conhecimento adquirido e promover os desenvolvimentos futuros.

O domínio completo do ciclo do combustível, em conjunto com o domínio tecnológico de materiais da família de ligas como o Inconel, Zircaloy e aços inoxidáveis especiais, e o desenvolvimento de

elementos combustíveis do tipo placa, foram recomendados no Relatório de Perspectivas do CGEE como tópicos prioritários de alta relevância industrial entre os materiais para energia.

Em síntese, para a área de energia nuclear são propostos os seguintes itens para uma agenda de P&D:

- Dominar completamente, em escala industrial, o ciclo do combustível nuclear para suprimento dos reatores de potência e produtores de radiofármacos e de pesquisa de materiais;
- Desenvolver combustíveis avançados para reatores com Gd_2O_3 e Er_2O_3 e combustíveis com alta concentração de urânio, como U-Mo, para reatores produtores de radiofármacos e de pesquisa em materiais.
- Desenvolver materiais nucleares como Inconel, Zircaloy, aços inoxidáveis especiais, fibra de carbono e urânio empobrecido.
- Ações estratégicas para o desenvolvimento da tecnologia nuclear incluem:
- Construção do reator multipropósito brasileiro, para produção de insumos de radiofármacos e para testes de materiais para aplicação em reatores de potência com criação de laboratório nacional de caracterização de materiais com feixe de nêutrons.
- Criação de empresa para absorver e/ou desenvolver tecnologia para produção de fibras de carbono;
- Desenvolvimento de projetos de P&D entre empresas do setor nuclear e instituições de pesquisas visando dotar o país de tecnologia de fabricação de ligas especiais e de combustíveis nucleares avançados;
- Reposição de recursos humanos.

4.5. Energia eólica

A energia eólica é limpa e renovável, sem emissão de quaisquer resíduos durante sua operação e sem a necessidade de uso de qualquer combustível. O principal impacto ambiental negativo durante a fase operacional diz respeito à poluição visual e sonora. Em contraste com a energia solar, e em semelhança a nuclear, a energia eólica é uma tecnologia madura. Com cerca de 170 TWh produzidos em 2007, o setor está em pleno crescimento. Entre 2006 e 2007, houve um aumento da produção de energia eólica de 140% na América do Sul, de 90% na Ásia e de 99% na Europa central. Estima-se que o potencial eólico global pode atingir 72 TW.ano, dos quais cerca de 20% seriam suficientes para atender as necessidades mundiais. De acordo com o *Global Wind Energy Council*, o crescimento da



energia eólica entre 2006-2010 será de 19% ao ano. Entretanto, diversas barreiras práticas impedem esta tecnologia de ser amplamente disseminada.

Mesmo com avanços significativos na engenharia de controle para, por exemplo, melhorar o posicionamento dos rotores na direção do vento, os fatores limitantes desta tecnologia são inerentes à própria natureza dos ventos. A principal desvantagem é que as turbinas geram energia de acordo com a velocidade do vento e não de acordo com a demanda. Neste contexto, a dependência com a localização e a intermitência da geração de energia associam diretamente esta tecnologia com a necessidade de utilização conjunta com outras fontes de energia e o uso técnicas de armazenamento. Neste aspecto, existe espaço para o desenvolvimento de técnicas computacionais para de previsão de ventos e o consequente despacho das plantas eólicas em um sistema de transmissão interligado. Mesmo tendo uma razão de geração (a razão energia produzida/energia consumida) entre 20 e 40, muito favorável ao longo do ciclo de vida, normalmente, o custo associado às turbinas eólicas ainda não é competitivo, e dependem de incentivos para se tornar economicamente atrativo.

No Brasil, estimativas realizadas recentemente, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado ao longo dos cerca de 8,5 mil quilômetros de costa, e áreas interioranas. Atualmente, a capacidade de geração eólica no país é de 230 MW, que corresponde a uma fração relativamente pequena do potencial teórico de geração total estimado em aproximadamente 140 mil MW. A eficiência da energia eólica é de cerca de 20%. Para se aumentar a eficiência o diâmetro dos rotores das turbinas foram aumentados para comprimentos de cerca de 110 m. Estas dimensões demandam materiais com boa estabilidade mecânica e ambiental. Compósitos de carbono têm sido aplicados devido a sua disponibilidade proveniente da indústria aeroespacial.

No entanto, as necessidades das turbinas eólicas são distintas: as pás devem ser rígidas para se evitar deflexão excessiva e resistentes para não fraturar ou estar sujeita a fadiga. O modelo mais comum de turbinas aerogeradoras tem um rotor com três pás montadas em um plano aproximadamente vertical com eixo de rotação horizontal direcionado ao vento. As pás são compostas de plásticos reforçados com fibras, às vezes em combinação com madeira, e tem perfil semelhante ao de asas de um avião. Estes geradores têm potência individual entre 0,75-2,5 MW, e modelos com maiores diâmetros das pás (125 m) podem gerar até 6 MW. Dois importantes desenvolvimentos têm ocorrido nas turbinas eólicas convencionais. Em primeiro lugar as turbinas têm sido aumentadas em suas dimensões, e, em segundo, há uma tendência crescente para localidades marítimas (*offshore*) em relação às baseadas em terra.

A geração eólica é muito influenciada pela escala de potência das turbinas. As máquinas de potência elevada são capazes de produzir energia elétrica a custo menor que as de menor potência. A razão é que o custo das fundações, das vias de acesso, manutenção, conexão à rede e um grande número de componentes da turbina são independentes do tamanho das máquinas. Adicionalmente, as grandes turbinas encontram-se no topo de torres elevadas e aproveitam os recursos eólicos de forma mais eficiente. Em instalações *offshore* há uma maior exposição ao vento e maiores áreas de possível utilização, geralmente, com menor impacto ambiental local. Os principais desafios neste caso compreendem as estruturas de fundação e suportes e o desgaste dos materiais devido ao ambiente marinho.

As pás das turbinas devem ser resistentes para suportar as cargas aplicadas sem ocorrer fraturas; desta forma, a resistência deve ser suficiente para resistir a cargas extremas e a resistência à fadiga deve ser suficiente para suportar a variação temporal de carga ao longo da vida útil. As pás devem ser rígidas para prevenir colisões com as torres em condições extremas, e, em nível mais local, a rigidez deve evitar empenamento das partes sujeitas a tensões compressivas. Para se minimizar os custos da energia gerada, a construção das pás deve ser o mais leve possível. Isto deve ser conseguido por meio da otimização do arranjo estrutural e dimensional, em conjunto com a seleção de materiais. A fabricação dos rotores deve ser suficientemente consistente e confiável para assegurar que o produto final seja compatível com o projeto inicial.

Para se atingir estes requisitos, as pás são normalmente construídas com materiais leves, resistentes e rígidos à base de polímeros reforçados com fibras, madeira e suas combinações. Os reforços são tipicamente tecidos constituídos de fibra de vidro contínua e/ou fibras de carbono. Estes são combinados em construções laminadas com resinas termosensíveis como poliéster, vinilester e epóxi, e os compósitos resultantes são comumente chamados de plástico reforçado com vidro (*glass-reinforced plastic*) e plásticos reforçados com fibra de carbono. Pás de madeira ou compósitos madeira-fibra de carbono são normalmente impregnadas com resina epóxi. Compósitos reforçados com fibras usados em turbinas eólicas são laminados compostos de várias camadas de tecidos reforçadores impregnados e conformados com resina adesiva. Estes laminados são bastante resistentes e rígidos quando as tensões em seu plano axial, mas muito mais frágeis quando as tensões são aplicadas fora do plano principal, pois as camadas podem ser delaminadas.

As propriedades no plano axial são definidas pelas propriedades das fibras, enquanto que fora do plano principal as propriedades da matriz de resina são determinantes. Aspectos importantes nesta tecnologia dizem respeito ao projeto, análise estrutural, testes mecânicos, defeitos de fabricação e projeto contra fadiga. Os principais desafios relacionados à aplicação dos materiais em utilização



estão associados ao desenvolvimento de modelos capazes de prever fadiga, ciclo de vida, efeitos de defeitos de fabricação na resistência e durabilidade das pás das turbinas eólicas.

No longo prazo, é possível melhorar os materiais usados nas turbinas. Duas propriedades dos compósitos laminados reforçados com fibras são as baixas resistências à tração e ao cisalhamento fora do plano principal. Reforços de fibras de carbono têm sido empregados nas pás com objetivo de aumentar a resistência à tração e rigidez ao longo da direção das fibras, em comparação aos materiais contendo vidro, mas o ganho na resistência à compressão é significativamente menor. O desenvolvimento de materiais que possuam melhor combinação de resistência (incluindo boa adesão), rigidez e tenacidade dos que os disponíveis atualmente serão um passo importante. Outro aspecto relevante é a reciclagem e a sustentabilidade dos materiais usados que favorecem o uso de fibras celulósicas naturais para reforço e biorresinas, preferíveis em relação aos materiais poliméricos derivados do petróleo.

A instalação de turbinas eólicas está crescendo rapidamente e é esperado que este crescimento continue por vários anos. A maior parte da produção de turbinas é localizada na Europa e os maiores mercados incluem agora as Américas e Ásia, onde é esperado que ocorra a maior expansão da capacidade de produção. Com o aumento das dimensões das turbinas as propriedades mecânicas continuam sendo as principais propriedades consideradas no projeto das pás. Os maiores desafios serão assegurar consistência na qualidade de produção com o aumento das dimensões e de escala da produção, e aumentar o conhecimento acerca dos defeitos, suas causas e sua influência no comportamento estrutural sobre cargas estáticas e dependentes do tempo. No Brasil existem grupos de pesquisa na área de energia eólica, como o Centro de Energia Eólica e a Associação Brasileira de Energia Eólica e cerca de três empresas produzem equipamentos para geração eólica. Entretanto, as atividades se concentram no levantamento de potencial eólico, conexão com a rede de distribuição e não há ênfase na pesquisa de materiais.

Em termos globais existem algumas prioridades de pesquisa e desenvolvimento que se aplicam ao cenário brasileiro na medida em que aumenta a competitividade da geração eólica no país. Além do refinamento dos procedimentos de identificação de sítios para a instalação de fazendas eólicas, visando à redução das incertezas em relação à potência disponível, destacam-se alguns tópicos que implicam em redução do custo da energia gerada, tais como:

- Refinamento dos modelos para aerodinâmica e aeroelasticidade das pás;
- Estruturas de sustentação fabricadas com ligas leves de alta resistência mecânica;
- Aumento da eficiência dos geradores e conversores;
- Sistemas de armazenagem de energia.

4.6. Produção e armazenamento de hidrogênio

O hidrogênio (H_2) é considerado um vetor energético limpo e versátil que pode ser usado para diversas aplicações e que tem potencial para ser uma alternativa aos combustíveis fósseis. O H_2 é abundante em compostos químicos, como a água, e compostos orgânicos da biomassa. Sua combustão produz apenas água e calor sem gerar poluentes ou CO_2 . Ele pode ser combinado com oxigênio eletroquimicamente em células a combustível para produzir eletricidade. Entretanto, seu uso ainda requer diversas inovações e desenvolvimentos na sua produção, transporte e armazenamento. A maneira mais eficiente de se usar o H_2 é por meio da produção de energia elétrica com células a combustível, atingindo cerca de 60% de eficiência, que significa muito mais energia utilizável por energia primária usada do que, por exemplo, nos motores a gasolina (25%).

O principal desafio na produção do H_2 é encontrar uma fonte capaz de suprir as necessidades de uma economia do H_2 e que não seja dependente de recursos fósseis. Cerca de metade do suprimento global do hidrogênio é fornecida pela reforma do gás natural. A produção de hidrogênio a partir dos resíduos de biomassa é uma alternativa potencialmente viável à prática de reforma do gás natural. O hidrogênio, a partir da biomassa pode ser produzido por pirólise, gaseificação, reforma a vapor de bio-óleos e por processos enzimáticos de decomposição de açúcares. Entre estas tecnologias de conversão destacam-se a gaseificação e a reforma a vapor. No caso do Brasil, considerando a enorme capacidade instalada de produção e distribuição de etanol, o desenvolvimento de reformadores deste álcool, parece ser uma estratégia adequada. A idéia principal é utilizar mais eficientemente um combustível renovável, aproveitando-se da infraestrutura de transporte, distribuição e facilidade de armazenamento. Entretanto, ainda são necessários avanços nas pesquisas em materiais para encontrar novos catalisadores que reduzam as barreiras para a produção de energia a um custo menor. O processo de gaseificação é complexo e caro, necessitando de amplos estudos para a construção de gaseificadores mais adequados e de tecnologias para a captura do CO_2 que será formado.

Pesquisas e inovações tecnológicas para reforma de biomassa para produção de hidrogênio envolvem o desenvolvimento de novos catalisadores, procurando reduzir os subprodutos indesejáveis e a maximização do H_2 . A substituição dos metais nobres por elementos de menor custo é considerada um aspecto econômico importante e pode representar um avanço tecnológico na área de catálise. Pesquisas estão sendo realizadas, em diferentes instituições brasileiras, nas quais catalisadores baseados em cobre, níquel, cromo e outros metais, suportados em diferentes materiais cerâmicos como sílica, alumina, zircônia e céria, estão sendo avaliados. O desafio é desenvolver catalisadores que apresentem alta estabilidade térmica e elevada atividade para a reação de reforma a vapor, com alto rendimento em hidrogênio e resistentes à formação de carbono.



O desenvolvimento de membranas para separação de H_2 de CO e CO_2 é um tópico chave da ciência dos materiais. A mistura gasosa, proveniente de processos da gaseificação e de reforma de biomassa, contém hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano como principais componentes. A deposição de paládio em substratos cerâmicos ou metálicos tem sido objeto de extensas pesquisas e é uma das tecnologias mais atraentes para a produção de hidrogênio puro.

Outras tecnologias de produção de H_2 envolvem a separação das moléculas de água. A água é abundante no planeta e melhor distribuída que os combustíveis fósseis. A separação da água de maneira renovável, usando energia de fontes como eólica e solar, e o uso do H_2 para produzir energia constitui um ciclo fechado. Minimizar as barreiras energéticas para separação e recombinação da água é área prioritária da catálise e nanociência. Eletrolisadores de alta potência já atingem mais de 80% de eficiência e outras técnicas de separação térmicas, fotoquímicas e eletroquímicas estão sendo desenvolvidas em escala laboratorial. A rota do H_2 solar usa semicondutores para produzir elétrons e buracos que promovem a separação das moléculas de água. Semicondutores de banda larga como TiO_2 e WO_3 têm sido os substratos preferidos devido a sua robustez e baixo custo. Sobre eles têm sido consideradas a deposição de nanopontos (*nanodots*) de óxidos semicondutores de banda estreita ou de corantes visando à captação mais eficiente do espectro solar.

Em conjunto com a produção de hidrogênio, é fundamental considerar o seu armazenamento. Os desafios tecnológicos e científicos são muitos e têm sido enfrentados de várias formas: o hidrogênio pode ser armazenado fisicamente pela alteração de suas condições de estado (temperatura, pressão e fase) e quimicamente ou físico-quimicamente em vários compostos sólidos e líquidos (hidretos metálicos, nanoestruturas de carbono, alantatos, borohidretos, metano, metanol, amônia, hidrocarbonetos leves). Armazenamentos gasoso e líquido em tanques são úteis temporariamente, mas uma economia do H_2 madura exigirá maneiras mais eficientes e compactas de estocagem.

As rotas de armazenamento mais promissoras usam materiais sólidos nos quais o H_2 se liga quimicamente ou é adsorvido fisicamente em densidades volumétricas maiores do que o H_2 líquido, com uma cinética elevada de carga e descarga e boa reversibilidade na faixa de temperatura entre 70-100°C. Neste contexto, os nanomateriais apresentam-se com grande potencial, por apresentarem grandes áreas de superfície específica que permitem desempenho multifuncional, tais como baixa energia de dissociação de moléculas de hidrogênio na superfície e rápida difusão de hidrogênio no volume. Entre os principais materiais para armazenamento de H_2 destacam-se os borohidretos $M^+BH_4^-$ ($M=Li, Na$ ou K) e os boranos NH_nBH_n . Os borohidretos têm grande capacidade de armazenamento (cerca de 20%), mas tem limitações relacionadas com altas temperaturas de decomposição e elevadas barreiras para ativação da re-hidrogenação.

Neste sentido, catalisadores como TiO_2 podem ser usados para reduzir as barreiras energéticas. A amônia pode ser um eficiente composto para armazenamento; entretanto, ela também é agressiva ao meio ambiente. Uma possível solução é o uso de sais como $\text{Mg}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_2$ que se decompõe a 150°C em MgCl_2 e NH_3 . Estruturas organometálicas (MOFs, *metal-organic frameworks*) são estruturas abertas que adsorvem fisicamente o H_2 em sítios específicos e permitem fácil difusão para superfície e liberação em baixas temperaturas. Materiais nanoporosos também podem contribuir para avanços na estocagem em sólidos de H_2 .

Recursos humanos são disponíveis no país, mas não direcionados para este tema. É preciso fomentar grupos de P&D voltados para a interação do hidrogênio em materiais, enfatizando-se o caráter multidisciplinar desta área do conhecimento. A agenda de P&D deve incluir fomento para melhoria da infraestrutura relativa ao tema armazenamento e produção de hidrogênio. Há carência de equipamentos para caracterização da absorção e dessorção de hidrogênio, essenciais para a compreensão dos fenômenos envolvidos no armazenamento. Na área de armazenamento na forma gasosa, o investimento poderá ser menor, pois já existe uma competência no país, particularmente em materiais compósitos, cuja utilização é considerada vital na construção de cilindros de alta pressão.

Na área de produção de H_2 existem grupos estabelecidos que desenvolvem pesquisas nessa área, como o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (Unicamp) e vários laboratórios da área de catálise envolvidos com a reforma a vapor do etanol. Projetos em andamento do programa Pro- H_2 do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) prevêem a construção de reformador de etanol conectado a sistema de células a combustível. Nesta área as ações estratégicas devem garantir a continuidade dos investimentos em P&D e promover o envolvimento de empresas, ambos pontos fundamentais para os avanços pretendidos.

As ações de P&D com maior impacto para a disseminação do uso do hidrogênio como vetor energético referem-se à redução dos custos de produção descentralizada de hidrogênio e ao aumento da eficiência dos sistemas de armazenamento.

4.7. Células a combustível

O H_2 pode ser combinado com oxigênio nas reações eletroquímicas de uma célula a combustível (CC) para produzir energia elétrica de maneira limpa, versátil, permitindo a aplicação em diferentes usos incluindo iluminação, refrigeração, comunicação, processamento de informação e transporte.



Para atingir este potencial de um combustível eficiente, sustentável e amigável ao meio ambiente são necessários amplo desenvolvimento e inovações dos meios de produção, armazenamento e uso do H_2 . Entretanto, mesmo que uma economia do H_2 madura, englobando todos os aspectos de sua produção, armazenamento e uso seja o objetivo final, a utilização parcial do H_2 como um vetor energético eficiente e armazenável em CC para aplicações estacionárias e de uso pessoal é um feito desejável e com méritos próprios que se justificam.

A conversão do H_2 em energia elétrica em CC representa uma alternativa energética muito atraente devido sua alta eficiência, versatilidade e baixo impacto ambiental. As CCs produzem energia elétrica com eficiência potencial de 60%, que pode ser convertida em movimento, iluminação ou calor, em contraste com o motor a combustão a gasolina com eficiência de 25% que, quase exclusivamente, é usado para gerar movimento. Vários projetos de demonstração ao redor do planeta vêm mostrando a potencialidade desta tecnologia em diferentes aplicações como transporte, em automóveis e ônibus urbanos, portáteis, como aparelhos celulares e computadores laptop e aplicações estacionárias, gerando energia para prédios e comunidades. Entretanto, questões relacionadas com o custo e durabilidade ainda inviabilizam a comercialização das CCs. Progressos na direção de uma economia do H_2 madura dependem de avanços notáveis no desenvolvimento de novos materiais e no entendimento básico dos fenômenos em escala nanométrica envolvidos na interação do hidrogênio com materiais.

De maneira geral, redução dos custos e aumento do desempenho das CCs representam desafios na pesquisa de materiais para eletrodos, catalisadores e eletrólitos. O custo estimado da presente geração de CCs é cerca de 100 vezes superior ao do motor a gasolina, podendo ser reduzido por um fator de 10 com a produção em massa. Além do custo, a longevidade, frequência de manutenção e o desempenho são temas que necessitam avanços relacionados aos materiais componentes. Duas tecnologias de CCs vêm sendo desenvolvidas com maior atenção, as células a combustível a membrana polimérica (PEMFC) e as células a combustível de óxidos sólidos (SOFC), que serão descritas neste documento.

As células a combustível a membrana polimérica (PEMFC), para aplicações de transporte e portáteis, principalmente, baseiam-se em catalisadores à base de nanopartículas de Pt dispersas em substratos de carbono para promover a reação de prótons, elétrons e oxigênio em água. Entretanto, mesmo sendo o mais eficiente catalisador conhecido, uma economia do H_2 não pode se basear no uso da Pt devido ao seu alto custo e relativa escassez. A atividade catalítica da Pt necessita ser aumentada ordens de grandeza para ser possível reduzir a quantidade utilizada ou novos catalisadores abundantes, de baixo custo e ativos deverão substituir este metal. No anodo, ainda faz-se necessário

encontrar catalisadores a base de Pt que sejam mais tolerantes ao CO e que apresentem melhor desempenho e estabilidade quando se utiliza hidrogênio proveniente do processo de reforma.

Uma alternativa ao uso de catalisadores a base de Pt para a reação de oxidação do hidrogênio tem sido o estudo de enzimas [NiFe]-hidrogenases, as quais apresentam como centro ativo Ni e Fe coordenados por ligantes contendo enxofre. Para o catodo, ainda são buscados catalisadores mais eficientes para a redução do O_2 . Recentemente, foi mostrado que uma superfície de $Pt_3Ni(111)$ apresentou-se 90 vezes mais ativa que o catalisador Pt/C considerado o estado da arte para a reação de redução de oxigênio nas células PEMFC. Outros materiais, que não utilizam Pt, também têm sido considerados bastantes promissores para a reação de redução do oxigênio, como, por exemplo, calcogênios de metais de transição, tais como: compostos com fase tipo Chevrel ($Mo_4Ru_2Se_8$) e compostos com fase amorfa ($Ru_xMo_ySe_z$, Ru_xS_y), e os complexos macrocíclicos nitrogenados de Fe e Co, como ferro- e cobalto-porfirinas, ftalocianinas e nanotubos de carbono nitrogenados.

A busca por novos catalisadores ativos e estáveis é de vital importância se forem considerados combustíveis alternativos ao H_2 , como os alcoóis. A platina sozinha não é suficientemente ativa para a oxidação do CO_{ads} a CO_2 e por isso se faz necessário utilizar materiais alternativos como ligas de platina. Neste sentido, catalisadores binários, como PtRu, PtOs, PtSn, PtW, etc. têm sido investigados a fim de melhorar a eletro-oxidação do metanol. Entre estes catalisadores, os catalisadores a base de PtRu têm sido os mais ativos e são o estado-da-arte para as células PEMFC a metanol direto.

No caso do Brasil, o etanol seria um combustível mais interessante para uso nas células a combustível. Porém, existem ainda poucos trabalhos na literatura sobre a oxidação direta de etanol em CCs. Além disso, a oxidação completa do etanol a CO_2 é mais difícil que a do metanol devido à dificuldade de quebra da ligação C-C e da formação de CO como intermediário que desativa o catalisador de platina. No caso do etanol, os catalisadores nanoestruturados a base de PtSn têm apresentado os melhores resultados. Técnicas de cálculos teóricos são apontadas como sendo uma ferramenta chave para descrever e prever a atividade catalítica de novos sistemas.

As membranas Nafion (DuPont) são resultados da co-polimerização de um co-monômero de vinil éter perfluorado com tetrafluoretileno (TFE), com posterior sulfonação das cadeias laterais, e são as mais usadas em PEMFC. Apesar das vantagens, as membranas Nafion apresentam limitações no que se refere à temperatura de operação e à alta permeabilidade de combustíveis líquidos, tais como metanol e etanol. Um aumento de cerca de $50^\circ C$ na operação resultaria em um ganho significativo de desempenho destas células. Dessa forma, a busca por membranas iônicas que permitam o funcionamento de células a combustível em temperaturas elevadas



(~130°C), torna necessário o desenvolvimento de novos materiais poliméricos ou a otimização das propriedades das membranas já existentes.

Eletrólitos poliméricos alternativos ao Nafion têm sido intensamente investigados. Uma alternativa para a otimização das membranas Nafion é a incorporação de uma fase inorgânica, normalmente óxidos, com propriedades higroscópicas. Esses óxidos atuam diretamente na umidificação da membrana, sem o comprometimento da condutividade iônica em altas temperaturas, e no caso específico de DAFC (Célula a combustível de oxidação direta de alcoóis), a incorporação de óxidos higroscópicos pode contribuir na diminuição do cruzamento (*crossover*) do combustível (metanol, etanol) do anodo para o catodo. Eletrólitos poliméricos alternativos as membranas fluoradas, têm sido intensamente estudados, tais como: PVDF (*polyvinylidene fluoride*), SPEEK (*sulfonated poly-ether ether ketone*), PBI (*polybenzimidazole*), entre outros.

A geração em larga escala de energia distribuída por meio das CCs estacionárias é considerada uma importante aplicação desta tecnologia. Neste caso a célula a combustível de óxidos sólidos (SOFC), operando continuamente em temperaturas entre 600-1000°C, é a tecnologia mais indicada. A SOFC permite a mais eficiente conversão de um combustível químico diretamente em eletricidade, é a única CC de estado sólido e que pode ser projetada para módulos de geração de desde poucos Watts até MW. Os diferenciais desta tecnologia justificam os elevados investimentos mundiais, estimados em centenas de milhões de dólares anuais, em empresas de grande porte nos Estados Unidos, Europa e Japão.

Um exemplo é o programa SECA do Departamento de Energia (DOE) dos EUA, com orçamento de cerca de 170 milhões de dólares para o ano fiscal de 2009, e que prevê o uso de sistemas SOFC operando com carvão gaseificado. Este programa, que conta com a participação de diversas instituições de pesquisa e de empresas, tem metas bem determinadas de potência, durabilidade, eficiência e de custo até 2025 que vêm sendo atingidas pelos times participantes. Recentemente, dezenas de sistemas em operação, com potência de até 100 kW, têm sido noticiados com destaque, comprovando a viabilidade da tecnologia em diferentes aplicações.

Tradicionalmente na SOFC, íons O^{2-} são as espécies transportadas através de membranas cerâmicas para reagir com H^+ , gerando água e calor. As altas temperaturas, necessárias para possibilitar suficiente mobilidade dos íons O^{2-} , limitam a durabilidade dos componentes, promovem fadiga devido à ciclagem térmica e exigem longos tempos para acionamento e interrupção da SOFC. A redução da temperatura de operação da SOFC para a faixa entre 400-600°C é o principal desafio na pesquisa de materiais, exigindo eletrólitos sólidos com elevada condutividade iônica e estabilidade, anodos ativos

para oxidação do H_2 e de outros combustíveis contendo carbono, e catodos ativos para redução do O_2 . Estes materiais devem ser compatíveis física e quimicamente de maneira a se evitar reações de interface e de se preservar a microestrutura e integridade da SOFC. Estimativas mostram que cerca de 50% do custo total de uma SOFC é associada aos materiais. De maneira geral, duas categorias de materiais de importância fundamental para desenvolvimento futuro da tecnologia de SOFC são:

- Desenvolvimento de eletrólitos sólidos cerâmicos. Exemplos: cerâmicas à base de zircônia, céria, apatitas, bismuto, condutores protônicos, etc.;
- Desenvolvimento de condutores mistos (que exibem transporte iônico e eletrônico) para eletrodos: Exemplos: perovskitas à base de lantânio (terras-raras)-metal de transição (Fe, Ni, Cr, Mn, Co), compósitos cerâmica-metal, etc.

Além destes materiais desenvolvimentos de materiais para selagem (vidros, vitro-cerâmicos, cimentos) e metálicos (ligas à base de cromo e aços ferríticos) para interconexão devem ser considerados.

As categorias de materiais citadas compreendem vários compostos (ou compósitos) que podem ser aplicados em outros dispositivos de geração de energia e importantes dispositivos eletroquímicos como sensores de espécies químicas e membranas separadoras de gases, que podem ter ampla utilização em diversos setores. Entre as famílias de materiais foco de intensas pesquisas destacam-se as cerâmicas à base de zircônia e óxidos mistos de terras-raras, e cabe ressaltar que o Brasil possui reservas minerais apreciáveis dos insumos para a fabricação destes compostos.

Entretanto, eletrodos e eletrólitos com alto desempenho não dependem apenas de sua composição química, mas também de sua microestrutura. Neste sentido, o desenvolvimento de técnicas de processamento e de análise destes materiais é primordial para os avanços pretendidos. Muitos esforços são concentrados no desenvolvimento de processos de síntese e de conformação dos componentes que devem possuir elevado rendimento e permitir a fabricação de materiais com propriedades adequadas e controladas. De interesse direto para a tecnologia da SOFC, os métodos de deposição de camadas delgadas com boa homogeneidade e porosidade controlada são muito importantes. Técnicas de baixo custo são preferíveis, como as baseadas na deposição de suspensões cerâmicas, sem, no entanto, desconsiderar as técnicas de deposição física.

Paralelamente aos desenvolvimentos das CCs, é fundamental avançar no conhecimento dos mecanismos básicos envolvidos nas reações eletroquímicas dos eletrodos. Os diversos processos das reações electrocatalíticas ainda não são totalmente compreendidos, e estudos fundamentais acerca destes mecanismos são importantes para o avanço tecnológico pretendido e devem constar na agenda nacional de P&D. A disponibilização de técnicas avançadas de fabricação e de caracterização de ma-



teriais é importante para se estabelecer a capacitação necessária para que o país possa ainda se tornar um competidor nesta tecnologia e deve ser considerada como ação estratégica para esta área.

Cabe ressaltar a relação direta da tecnologia das CCs com diversas indústrias de grande porte do setor energético nacional, desta forma, uma possibilidade conveniente para os financiamentos sugeridos são recursos provenientes dos fundos setoriais pertinentes e/ou diretamente providos por representantes deste segmento. São necessários para o desenvolvimento científico e tecnológico de células a combustível tipo PEMFC e SOFC profissionais de diferentes áreas do conhecimento como a química, física, matemática e as engenharias. Dar continuidade a formação de recursos humanos especializados e promover a inserção destes profissionais nas áreas acadêmica e industrial são fundamentais para o desenvolvimento desta tecnologia. A pesquisa e o desenvolvimento de células a combustível tipo PEMFC e SOFC no Brasil são realizados essencialmente em Universidades e Institutos de Pesquisas governamentais, financiados com recursos das agências de fomento estaduais e federais. A grande maioria das Instituições envolvidas com P&D de CCs desenvolve apenas alguns componentes desta célula, e poucas instituições são efetivamente capacitadas a operar CCs.

Em relação à infraestrutura industrial, existem cerca de três empresas nascentes que vêm desenvolvendo tecnologia própria e fornecendo células PEMFC quase que exclusivamente para instituições de pesquisas e órgãos governamentais. No caso das células SOFC a situação é mais crítica, pois não existe no país infraestrutura de P&D para o desenvolvimento de módulos de potência desta célula. Outro ponto de destaque é a o programa de desenvolvimento do MCT, o Pro-H₂, que possui quatro redes de pesquisas estabelecidas no tema hidrogênio e CCs e que deve ser ampliado e continuado para que seus objetivos sejam alcançados.

O Relatório de Perspectivas para ação do CGEE para os materiais para energia apontou que o grau de desenvolvimento dos materiais para CC tem os maiores índices de afastamento do país em relação ao resto do mundo. Porém, a relevância industrial dos desenvolvimentos relativos aos materiais para CC estão muito próximos aos identificados para as tecnologias de maior relevância observadas neste estudo, como a energia solar e nuclear.

As ações estratégicas propostas para ultrapassar os desafios no desenvolvimento de materiais para produção e armazenamento de hidrogênio e de células a combustível são semelhantes e estão listados a seguir:

- Intensificar as ações das quatro Redes do Pro-H₂ do Ministério de Ciência e Tecnologia existentes, visando atrair novos pesquisadores e indústrias inovadoras para desenvolvimento dos tópicos apresentados;

- Priorizar, na área de produção de hidrogênio, recursos para o desenvolvimento das tecnologias de reforma de etanol, reforma de gás natural e eletrólise visando o emprego em células a combustível;
- Incentivar tecnologias de produção de hidrogênio a partir da gaseificação de biomassa, com pureza compatível com as tecnologias de células a combustível;
- Coordenar, através do ProH₂, ações para a superação ou mitigação do conjunto de barreiras para a inserção das tecnologias de produção de hidrogênio e de células a combustível.
- Ampliar as atividades de normalização de sistemas de produção, transporte, armazenagem e utilização de hidrogênio, bem como dos sistemas de conversão.
- Prospectar os nichos de mercado para células a combustível de alta temperatura para uso no segmento industrial e em co-geração.
- Implementar ações gerenciais que permitam maior flexibilidade de gestão dos recursos financeiros e contratação de recursos humanos para as redes, visando o cumprimento das metas;
- Encomenda de células a combustível pelo estado ou facilitar a aquisição por empresas privadas para promover projetos de demonstração.

4.8. Conclusão

Foram descritos os principais desafios referentes à pesquisa de materiais para energia visando fornecer dados para embasar uma agenda estratégica de investimentos e de pesquisa e desenvolvimento.

Apesar de serem discutidas diferentes tecnologias, podem-se encontrar diversas ligações e pontos em comum no que se refere aos materiais, grau de desenvolvimento e necessidades de investimento. Os pontos mais relevantes são destacados nesta seção:

- É urgente a busca por fontes de energia limpas e sustentáveis para se atender a crescente demanda sem causar degradação ambiental. Não há uma tecnologia única capaz de suprir as projeções da demanda de energia;
- O desenvolvimento da maioria das tecnologias de geração de energia disponíveis tem uma dependência direta com o desenvolvimento de materiais para se superar os obstáculos de desempenho, durabilidade e custos;
- Necessidade de execução de projetos nacionais estratégicos envolvendo empresas e aplicando-se tecnologia desenvolvida no país. Possíveis exemplos são a produção de silício de grau solar, a construção de reator nuclear multipropósito e projetos de demonstração de células a combustível e de energia solar;



- Necessidade de fomentos estruturantes para melhoria da infraestrutura de laboratórios de pesquisa e para formação de recursos humanos especializados para atuar na área de novos materiais para energias;
- Afastamento nacional no desenvolvimento de tecnologias chave como silício, por exemplo, que já se encontram em avançado grau de aplicação no mundo e nas quais o Brasil teria condições de se estabelecer como referência devido a condições favoráveis como clima, reservas minerais e base científica;
- O hidrogênio permeia uma série de tecnologias de geração de energia desde sua produção (nuclear, biomassa, solar, eólica) buscando-se armazenamento energético e maior eficiência no uso por meio de células a combustível. De maneira análoga, a fibra de carbono é material estratégico demandado em diferentes tecnologias, como a nuclear e eólica;
- Algumas áreas apresentam-se mais estabelecidas em relação aos materiais em uso e tem desenvolvimentos ligados a área da biotecnologia (biocombustíveis) e na área de projeto e processos de fabricação (energia eólica);
- Destacam-se como áreas da ciência de materiais que devem ser incluídas em uma agenda de investimento em P&D para as tecnologias de produção de energia: métodos de processamento, incluindo a fabricação de filmes e de camadas finas; desenvolvimento de ligas metálicas especiais (resistentes a radiação, corrosão, altas temperaturas, etc.); desenvolvimento de materiais cerâmicos estruturais para revestimento de proteção a ambientes corrosivos e altas temperaturas; cerâmicas elétricas com propriedades de condução iônica, eletrônica e mista; materiais refratários; catalisadores resistentes à desativação; compósitos estruturais reforçados com fibras; materiais para separação (filtração, peneiras moleculares); combustíveis nucleares e semicondutores;
- Há grandes perspectivas relativas à utilização de nanomateriais para solução de diversos obstáculos tecnológicos para geração de energia;
- Processos e materiais de baixo custo são requeridos para essencialmente todas as tecnologias analisadas, evidenciando a importância de investimentos na pesquisa de materiais para produção de energia.

Referências

- Estudo Prospectivo de Materiais Avançados - Materiais Avançados para Energia no Brasil 2010-2020, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, DF. 2009.
- V.S. Arunachalam, E.L. Fleischer, MRS Bulletin 33 (2008) 264.
- La Recherche 436 (2009) 48.
- Energy Technology Perspectives – Scenarios and Strategies to 2050, IEA, 2006.
- Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, “World Net Nuclear Electric Power Generation”, 1980-2005. (EIA, U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2007).
- International Atomic Energy Agency, “Annual Report for 2006” (IAEA, Vienna, Austria, 2006).
- U.S. Department of Energy, Office of Science, “Basic Research Needs for Solar Energy Utilization, Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization” (U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2005; www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf) (acessado Março 2010).
- G.W. Crabtree, N.S. Lewis, Phys. Today 60 (2007) 37.
- M.A. Green, Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion (Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2004).
- Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, Washington, DC “Solar Energy Technologies Program: Solar America Initiative” (2007).
- C.L. Archer, M.Z. Jacobson, J. Geophys. Res. Atmos. (2005).
- B. Raj, M. Vijayalakshmi, P.R. Vasudeva Rao, K.B.S. Rao, MRS Bulletin 33 (2008) 327.
- B. Hayman, J. Wedel-Heinen, P. Brondsted, MRS Bulletin 33 (2008) 343.
- U.S. Department of Energy, Renewable Resource Data Center, “Wind Energy Resource Atlas of the United States” (USDOE, RRDC; <http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/maps.html>) (acessado Março 2010).
- Global Wind Energy Council, “Global Wind 2006 Report,” (GWEC, 2006; www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/gwec-2006_final_01.pdf) (acessado Março 2010).
- P. Brondsted, H. Lilholt, A.A. Lystrup, Ann. Rev. Mater. Res. 35, 505 (2005).



- A.E. Farrell, A.R. Gopal, MRS Bulletin 33 (2008) 373.
- M. Stanley Whittingham, MRS Bulletin 33 (2008) 411.
- G.W. Crabtree, M.S. Dresselhaus, MRS Bulletin 33 (2008) 421.
- M.S. Dresselhaus, G.W. Crabtree, M.V. Buchanan, Eds. Basic Research Needs for the Hydrogen Economy (Office of Basic Energy Sciences, Department of Energy, Washington, DC, 2003; www.sc.doe.gov/bes/reports/abstracts.html#NHE) (acessado Março 2010).
- The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs (The National Academy Press, Washington, DC, 2004; http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10922) (acessado Março 2010).
- E. D. Wachsman and S. C. Singhal, American Ceramic Society Bulletin 89 (2010) 22.
- G.W. Crabtree, M.S. Dresselhaus, M.V. Buchanan, Phys. Today 57 (2004) 39.
- C. Perkins, A.W. Weimer, Int. J. Hydrogen Energy 29 (2004) 1587.



5. Materiais avançados para o meio ambiente¹

5.1. Apresentação

O desenvolvimento de materiais avançados pode apresentar vantagens competitivas significativas para as empresas brasileiras. Isso ocorre em parte por conta de uma demanda crescente que justifica a produção em larga escala desses materiais. Atualmente a questão ambiental se apresenta como uma grande oportunidade para o país e o desenvolvimento de diversos tipos de materiais com aplicações ambientais se mostra atraente economicamente.

O Brasil exhibe nesse período de 2010 a 2022 uma importante oportunidade para contribuir em escala mundial na remediação de uma série de problemas globais - seja em decorrência de causas naturais ou por efeitos antropogênicos - tais como: mudanças climáticas, elevação do nível do mar, presença de poluição atmosférica, extinção de espécies animais e vegetais, acidificação dos oceanos, destruição da camada de ozônio, degradação dos solos, chuva ácida, destruição de *habitats*, super-exploração de recursos hídricos, contaminações por produtos químicos perigosos, contaminação microbiológica e derramamentos de hidrocarbonetos. Tais problemas ao mesmo tempo requerem investimentos no desenvolvimento e produção de materiais e tecnologias de materiais e também representam grandes oportunidades de investimentos pelo governo e pelo setor empresarial.

O mercado de bens ambientais, assim denominados os produtos que resultam das tecnologias desenvolvidas pelas indústrias ambientais que buscam remediar ou reduzir os efeitos antropogênicos, cresce a altas taxas e se acelerou com os recentes esforços dos países na mitigação dos gases de efeito estufa. A atual crise econômica mundial, que colocou em recessão muitos países, vem se apresentando como uma oportunidade ímpar para a indústria ambiental, não somente no setor de energia renovável, mas todos os outros setores ambientais, num esforço de transição para a economia verde. Investimentos em ciência e tecnologia de desenvolvimento de materiais avançados podem ajudar a constituir no Brasil, um parque industrial ambiental competitivo e entrar num processo de *catching-up* no mercado internacional.

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Virgínia Sampaio Teixeira Ciminelli (coordenadora), Wander Luiz Vasconcelos (relator), Shigeo Shiki (revisor), Ana Paula Bax, Ângela de Mello Ferreira Magalhães, Kwadwo Osseo-Asare, Renato Ribeiro Ciminelli (co-relatores).

Este trabalho apresenta sugestões de temas importantes que representam oportunidades potenciais para criação ou ampliação de negócios no Brasil em materiais de engenharia com aplicações ambientais. O levantamento dos temas foi realizado por iniciativa e coordenação do CGEE por meio de ações indutoras referidas neste documento, as quais contaram com a participação de centenas de especialistas do país.

Procurou-se tornar claras as motivações mais importantes que permitem considerar os materiais com aplicações ambientais como uma grande oportunidade para a realização de estudos científicos, para o desenvolvimento tecnológico, para se obter ganhos econômicos e para a melhoria das condições sociais no Brasil.

A proposta final deste estudo é o financiamento de programas de pesquisa em materiais com aplicações ambientais que acelerem o desenvolvimento de novos produtos e a consolidação de uma cultura intensiva em tecnologia para produtos de classe mundial e competitividade global.

Tendo em vista suas importâncias estratégica, social, científica e econômica, recomenda-se a implantação de programas e ações coordenadas visando desenvolver materiais com aplicações ambientais, enfatizando os seguintes tópicos:

- Materiais para abatimento e sequestro de gases poluentes e geradores de efeito estufa.
- Materiais para produção de água potável e tratamento de efluentes.
- Materiais para reciclagem e reaproveitamento de resíduos.

Cada um dos temas acima é descrito neste documento considerando as seguintes abordagens: descrição da situação; aspectos econômicos; desafios tecnológicos e de infraestrutura; ações sugeridas.

Além dos temas acima, o estudo mostrou a importância e a oportunidade de se investir em outros tipos de materiais, com aplicações no meio ambiente, tais como materiais para produção de energias alternativas, materiais para conforto térmico e outros. As recomendações a respeito de materiais para energias alternativas foram incorporadas no artigo específico que trata deste assunto. Merecem destaque os materiais avançados necessários para a utilização de biomassa, biocombustíveis, energia eólica, célula a combustível, energia solar e energia nuclear.

Estima-se que os valores a serem alocados para apoio ao desenvolvimento de materiais com aplicações ambientais totalizam cerca de R\$ 2,9 bilhões, para todo o período de 2010 até 2022. É interes-



sante comparar este valor com a estimativa de investimento chinês na área de proteção ambiental, que é de U\$ 225 bilhões por ano como mencionado em seu 11º plano quinquenal (BCC, 2009). Esse valor para os investimentos do governo chinês incorpora todas as áreas, sistemas e políticas ambientais e não apenas o desenvolvimento de materiais. No entanto, tal número auxilia colocar a presente proposta em um cenário de elevada viabilidade, além de ressaltar a enorme importância econômica, social, científica e estratégica do tema.

As ações recomendadas foram apresentadas de forma sucinta, pois os planos detalhados dependerão de cada agente financiador ou investidor. No entanto, as áreas foram bem estabelecidas, permitindo o delineamento de propostas efetivas que visem os investimentos necessários em pesquisas básicas, na formação de pessoal e sua necessária inserção nas empresas, no fomento à inovação nas empresas, no apoio ao surgimento de empresas inovadoras e no fortalecimento das fontes de financiamento. Neste sentido, a definição dos temas importantes visa oferecer subsídio para a elaboração de políticas por parte das instituições de ensino e pesquisa, das entidades e agências governamentais e por parte das empresas.

De acordo com o relatório GEO-4 (2007) mais de 50.000 compostos são utilizados comercialmente, outras centenas são criadas anualmente, e a produção química global é projetada para aumentar em 85% durante os próximos 20 anos. A exposição a esses compostos provoca quase um quarto de todas as doenças. Estima-se que mais de dois milhões de pessoas no mundo morrerão prematuramente a cada ano por conta da poluição atmosférica. As mudanças contemporâneas da biodiversidade são as mais rápidas na história humana. Cerca de 60 por cento dos ecossistemas avaliados estão degradados ou são utilizados de forma insustentável. Espécies têm sido extintas em ritmo cem vezes maior do que as taxas encontradas em registros fósseis.

Padrões insustentáveis de utilização da terra estão causando degradação de áreas agricultáveis - ameaça tão grave como as alterações climáticas e a perda da biodiversidade e afetam até um terço da população mundial através da poluição, da erosão do solo, da perda de nutrientes, escassez da água, salinidade, e ruptura do ciclo biológico. A segurança alimentar de dois terços da população mundial depende de fertilizantes, principalmente do nitrogênio. O crescimento populacional, o excesso de consumo e o cultivo de cereais para produção de carne indicam que a demanda por alimentos vai aumentar para 2,5-3,5 vezes o valor atual até 2030.

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para a aplicação ambiental empregando materiais poliméricos, cerâmicos, metálicos e compósitos. Um grande interesse reside na área dos materiais nanoestruturados. Estima-se que se o país passar a utilizar intensamente a nanotecnologia para agre-

gar valor às suas matérias-primas naturais, transformando-as em materiais funcionais e estruturais, oportunidades em vários setores da economia poderão ser apropriadas pela indústria.

A amplitude e a dimensão dos problemas ambientais que chamam para o desenvolvimento de soluções intensivas em tecnologia viabilizam a atuação empresarial nos três tipos principais de liderança competitiva: custos, diferenciação e foco de mercado. Esta situação abre espaço no Brasil para uma ampla diversidade de perfis empresariais. Na medida em que o Brasil já possui massa crítica importante em conhecimentos ambientais e de materiais, a exploração de fatias do mercado ambiental intensivo em tecnologia torna-se viável se induzida através de programas interdisciplinares de cooperação entre instituições e grupos de pesquisa brasileiros e se promovida à aproximação destas instituições com empresas emergentes na produção e comercialização de materiais para aplicações ambientais.

De acordo com o relatório CGEE-Tema III (2007), “as aplicações de materiais emergentes predominam no cenário de oportunidades para o mercado ambiental discutido neste estudo. As pressões são crescentes pela prevenção, redução, controle e mitigação dos impactos ambientais em toda a diversidade investigada pelo GEO4. Investimentos em pesquisa, desenvolvimento e produção de materiais, hoje ainda emergentes e de alto risco, a cada ano se mostrarão mais viáveis e atrativos em termos de volume, retorno e rentabilidade. O Brasil, diante do novo paradigma ambiental, apresenta condições muito competitivas para liderar este novo segmento dado à escala potencial para as soluções ambientais, as vantagens comparativas em biomassa e minerais precursores de materiais para aplicação ambiental e diante de um mercado que é emergente em todos os países - portanto o Brasil pode dar um salto para a liderança mesmo em um setor intensivo em tecnologia.”

Foi observado por meio das etapas de prospecção de dados e de opiniões promovidas pelo CGEE (as quais são representadas pelos relatórios listados nas Referências) que o setor de Meio Ambiente, além de sua destacada importância ainda apresenta muitos e importantes desdobramentos em vários outros segmentos econômicos e do conhecimento. Como resultado disso, materiais que são importantes para a área de Meio Ambiente também são relevantes para outras áreas e vice-versa. Todos os três temas principais mostrados a seguir se enquadram na categoria desses tópicos trans-setoriais por apresentarem importância bastante significativa também em outras áreas, como por exemplo, as de energia, defesa, agricultura, pecuária, recursos naturais, saúde, educação, transporte e habitação.

Para todas as propostas apresentadas, são sugeridas algumas metas comuns a serem alcançadas pelo Brasil até o ano 2022. Tais metas gerais são as seguintes:

- Ter grupos de pesquisa atuantes no tema no país.



- Ter disponíveis recursos humanos no Brasil em quantidade e qualidade suficientes para permitir um adequado desenvolvimento do assunto tanto cientificamente como economicamente.
- Ter disponíveis os materiais avançados apontados como prioritários em cada tema.
- Ter presentes no mercado empresas emergentes e que aplicam essas tecnologias.
- Ter disponíveis estudos e análises de ciclo de vida dos materiais.

Para se alcançar tais metas comuns, há também um conjunto de propostas que se aplicam a todos os temas apresentados. As ações gerais recomendadas são:

- Financiar projetos de pesquisas básica e aplicada (inclusive com participação do setor empresarial) em desenvolvimento dos novos materiais pertinentes a cada um dos temas abordados.
- Consolidar marcos regulatórios que tratam de pesquisa, desenvolvimento e inovação.
- Apoiar a formação de recursos humanos.
- Fomentar a inovação nas empresas.
- Fortalecer as fontes de financiamento reembolsáveis e não-reembolsáveis destinados a instituições privadas.

5.2. Materiais para abatimento e sequestro de gases poluentes e geradores de efeito estufa

5.2.1. Descrição da situação

As diversas atividades humanas têm gerado ao longo da história vários problemas ambientais, os quais se agravaram significativamente nas últimas décadas. Tais problemas incluem a emissão de poluentes dos solos, das águas e da atmosfera, com destaque para a emissão de gases considerados como possíveis responsáveis pelo efeito estufa e acidificação dos oceanos. O domínio das tecnologias de materiais avançados que promovam a separação e o sequestro de carbono e outros gases poluentes é necessário para reduzir a poluição atmosférica e contribuir na amenização de tais efeitos.

A falta de controle e a falha na redução da emissão de CO₂ e outros gases para a atmosfera estão contribuindo para a ocorrência de situações indesejáveis como: secas prolongadas, aumento do

número e intensidade de desastres naturais, indisponibilidade hídrica, transformações de biomas, perda de biodiversidade e maior incidência de radiações solares nocivas. O controle e a redução da emissão de CO₂, CH₄ e outros gases poluentes para a atmosfera contribuirá para o país atingir crescimento sustentado por tornar possível o crescimento industrial sem comprometer ainda mais a frágil qualidade do meio-ambiente. A indústria, especialmente os setores siderúrgico, químico, cimento e petroquímico, geram grandes quantidades de gases poluentes como CO₂, CH₄, NO_x e outros. Prevê-se que em um futuro próximo a capacidade de eliminar ou reduzir a emissão de gases como o CO₂ para a atmosfera determinará a sobrevivência ou não de diferentes segmentos industriais.

A pressão para que a indústria mude seu padrão produtivo provém de compromissos mandatórios para países do Anexo 1 (industrialmente desenvolvidos); e voluntários; para países como o Brasil nas negociações da Convenção de Clima; por enquanto. Mas, o esforço tem que ser global. A Conferência das Partes (COP 15) da Convenção Quadro de Mudanças do Clima das Nações Unidas (UNFCCC) não chegou a um acordo por causa do alto custo de curto prazo que alguns países estão propondo (concentração de 350ppm de CO₂ equivalente, até 2100), mas qualquer que seja o acordo é enorme a tarefa de mitigação e adaptação.

O Brasil aprovou recentemente uma política nacional de mudança do clima (2009) que conta com um fundo (Fundo Nacional de Mudanças do Clima) e um programa ainda em construção, mas que prevê algumas medidas mitigadoras principalmente nos setores que mais emitem gases de efeito estufa, descritos acima. Essa política trata de todos os setores de demanda de inovações, nos quais se incluem os materiais avançados.

Considera-se como destacada oportunidade estratégica e econômica o desenvolvimento de materiais inovadores, com funções de separação, de imobilização e sequestro de substâncias poluentes principalmente em gases, mas também em solos e líquidos. Podem ser citadas como exemplos de materiais nesta categoria as membranas cerâmicas nanoestruturadas, membranas multifuncionais e membranas híbridas.

Entre os tópicos considerados prioritários no contexto de materiais e tecnologias avançados para a área ambiental destaca-se a detecção e o monitoramento de emissões e impactos em todas as dimensões e abrangência dos ecossistemas. A legislação ambiental mais restritiva, aliada à política e demandas da sociedade que priorizam a prevenção sobre a remediação, o bem estar das futuras gerações e a busca de processos limpos, exigem novas tecnologias. Estas, por sua vez, dependem da detecção e do monitoramento de substâncias em níveis de traços e subtraços, e de seus impactos sobre o clima, atmosfera, recursos hídricos, biodiversidade, solo e subsolo.



A nanotecnologia permite a fabricação de sensores cada vez mais compactos, mais seletivos e mais sensíveis para a detecção e o monitoramento de poluentes orgânicos e inorgânicos no meio ambiente. Avanços na fabricação de sensores para a detecção de poluentes implicam diretamente em um melhor controle de processos industriais; na detecção mais precoce e precisa da existência de problemas de contaminação; no acompanhamento, em tempo real, no progresso dos procedimentos de tratamento e remediação de poluentes; no monitoramento mais efetivo dos níveis de contaminantes em alimentos e outros produtos de consumo humano; na capacidade técnica de estabelecer normas ambientais mais rígidas, entre outras. O desenvolvimento de sensores avançados permitirá a detecção e o monitoramento de substâncias nocivas no meio-ambiente para a adoção de medidas preventivas.

5.2.2. Aspectos econômicos

Os nichos de oportunidades de negócios são apresentados pelo desenvolvimento de materiais avançados que contribuam diretamente para mitigação de problemas de poluição ambiental, tais como os gases considerados possíveis responsáveis pelo efeito estufa.

Entre as oportunidades pode-se mencionar a obtenção de membranas via método sol-gel. Estima-se que o mercado mundial para essa tecnologia cresça cerca de 6% ao ano e esta é uma de suas aplicações mais promissoras. Apenas o mercado norte americano consumiu em 2009 cerca de U\$ 7 bilhões em membranas, sendo que é estimado que o mercado para membranas para separação de gases cresça a uma taxa de 10% ao ano.

O desenvolvimento de sensores avançados apresenta destacado potencial comercial haja vista a necessidade desses dispositivos para o efetivo controle de processos e emissões para o meio ambiente. O mercado mundial de sensores avançados é estimado em cerca de U\$ 7 bilhões em 2007, considerando as várias aplicações desses dispositivos. Desse mercado, estima-se que os nanossensores representem cerca de U\$ 0,6 bilhão (em 2009) e estejam crescendo cerca de 50% ao ano.

O levantamento realizado pelo CGEE junto a especialistas no Brasil apontou que a probabilidade deste assunto representar uma atividade de interesse de mercado no período de 2010 a 2022 é estimada em 100%. A relevância industrial (em uma escala de 1 a 5) sugere um valor médio de 3,8 e um crescimento contínuo da importância do tema: 2012 (3,6), 2017 (3,8) e 2022 (4,0). A relevância industrial sugerida pelo proponente do estudo é 5.

5.2.3. Desafios tecnológicos e de infraestrutura

Esta proposta surgiu das observações e contribuições de especialistas, os quais apontaram os seguintes tópicos de interesse trans-setorial:

- Membranas cerâmicas avançadas,
- Desenvolvimento de materiais a partir de resíduos industriais,
- Nanocompósitos,
- Nanotecnologia na produção de materiais de origem natural,
- Análise e caracterização de materiais avançados e respectivas matérias-primas,
- Produção sustentável de materiais avançados,
- Simulação computacional em ciência e engenharia de materiais.

Os sensores podem ser desenvolvidos e aplicados considerando vários elementos de entrada como temperatura, posição, pressão, força, fluxo, nível e presença de elementos químicos. Todas essas habilidades são de importância para as aplicações ambientais.

- Para esta proposta as tecnologias a serem dominadas são:
- Materiais adsorventes,
- Caracterização dos resíduos industriais,
- Desenvolvimento das membranas,
- Métodos de análise,
- Avaliação de desempenho,
- Análise do ciclo de vida,
- Catalisadores.

Há necessidade de formação de recursos humanos para atuar na área de materiais para abatimento e sequestro de gases poluentes e geradores de efeito estufa. Uma forte interação com a indústria é importante para que sejam formados pesquisadores que trabalhem nas empresas e sejam capazes de desenvolver produtos inovadores.

Em uma análise preliminar são identificados como possíveis participantes desta proposta para execução de projetos de P&D as seguintes instituições:

- Universidades (UFMG, UFRJ, UFSCar, UnB, Unicamp, USP e outras ICTs, incluindo os Cefets),
- Institutos de Pesquisa e,



- Empresas de base tecnológica, por exemplo, Petrobras, Cemig, Vale e outros atores da indústria.

5.2.4. Ações sugeridas

Para esta proposta os desafios indicados para ação prioritária são:

- Atualização da base técnico-científica: Capes e CNPq;
- Montagem de infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento dos materiais avançados;
- Criação de Redes de Pesquisa;
- Incubação de empresas; e
- Desenvolvimento de um quadro efetivo nos órgãos do governo para a aplicação das políticas.

Recomenda-se, ainda, a implantação de programas e ações coordenadas visando desenvolver materiais avançados como membranas cerâmicas nanoestruturadas com a finalidade de promover o sequestro de CO₂ e outros gases poluentes e sensores nanoestruturados avançados.

Para esta proposta, são sugeridas as seguintes metas a serem alcançadas pelo Brasil até o ano 2022:

- Ter grupos de pesquisa no país.
- Ter disponíveis recursos humanos no país em quantidade e qualidade.
- Ter disponíveis os materiais avançados como membranas, adsorventes e sensores de nova geração.
- Ter presentes no mercado empresas emergentes e que aplicam essas tecnologias.
- Ter disponíveis estudos e análises de ciclo de vida dos materiais.

Para esta proposta as ações recomendadas são:

- Financiar projetos de pesquisas básica e aplicada (inclusive com participação do setor empresarial) em desenvolvimento de novas membranas cerâmicas (nano-estruturadas ou não), adsorventes avançados e sensores ambientais. Os materiais-chaves são: cerâmicas porosas e funcionalizadas (nanoestruturadas ou não), híbridos inorgânico-orgânicos e recobrimentos cerâmicos avançados.
- Consolidar marcos regulatórios que tratam de P&D.
- Apoiar a formação de recursos humanos.
- Fomentar a inovação nas empresas.

- Fortalecer as fontes de financiamento reembolsáveis e não-reembolsáveis destinados a instituições privadas.

Para esta proposta, estima-se um investimento para o período de 2010 a 2012 de R\$ 270 milhões, para o período de 2013 a 2017 de R\$ 500 milhões e para os anos de 2017 a 2022 de R\$ 600 milhões. Tais recursos incluem o financiamento à pesquisa básica de caráter científico, à formação de pessoal qualificado em todos os níveis, à pesquisa tecnológica, às pesquisas inovadoras das empresas e ao *start-up* de empresas de base tecnológica, considerando tanto fontes governamentais como privadas.

Para esta proposta as instituições responsáveis para a inserção da proposta no mercado são os Ministérios: MCT, MME, MMA, MDIC, MEC, Mapa, MD.

5.3. Materiais para produção de água potável e tratamento de efluentes

5.3.1. Descrição da situação

As diferentes atividades humanas geram vários resíduos que contaminam os lençóis aquíferos. Esses contaminantes podem causar vários efeitos prejudiciais ao meio-ambiente e à saúde humana. Técnicos têm identificado que o Brasil pode ser um ator importante no suprimento de soluções para tais problemas, desde que realize os necessários investimentos em materiais adsorventes avançados cerâmicos, poliméricos e híbridos. Além disso, o desenvolvimento desses materiais contribuirá diretamente para a sustentabilidade de vários segmentos industriais importantes.

As diversas atividades humanas como a agricultura, pecuária, mineração, indústria e vida urbana têm conduzido a crescentes problemas de contaminação dos meios aquosos. O desenvolvimento de materiais adsorventes (à base de argilominerais, minerais industriais e biomassa) permitirá a descontaminação de grandes volumes de meios aquosos complexos e multicomponentes.

Argilas são abundantes e apresentam-se em um número muito grande de formas cristalinas e também de formas das suas partículas. O Brasil possui depósitos importantes de várias argilas, cujo conhecimento ainda é precário. Portanto, esta grande riqueza mineral acaba sendo sub-utilizada ou usada em aplicações pouco nobres, de baixo preço, quando pelo menos uma parte das argilas



poderia ser usada na criação de materiais ou de insumos de materiais avançados, para numerosas aplicações. O mapeamento e a caracterização das principais jazidas, conhecendo a sua nanoestrutura, são chaves para o desenvolvimento de uma intensa cadeia produtiva que vai desde a extração e processamento até a transformação em argilas modificadas e em materiais avançados para vários novos produtos competitivos.

Os trabalhos realizados apontam com oportunidade econômica e estratégica o desenvolvimento de materiais inovadores (cerâmicos, poliméricos, híbridos e outros), com funções de separação, de imobilização e sequestro de substâncias poluentes em líquidos, de modo a permitir a obtenção de água potável e o tratamento de efluentes.

5.3.2. Aspectos econômicos

As áreas que revelam de oportunidades de negócios são:

- Desenvolvimento de materiais avançados que contribuam diretamente para mitigação de problemas de poluição ambiental, tais como áreas contaminadas, gases responsáveis pelo efeito estufa, metais tóxicos e líquidos, incluindo água etc.;
- Parque industrial brasileiro, supridor de materiais e tecnologias de controle da emissão de poluentes.

As indústrias deverão, em um curto intervalo de tempo, se adequar às legislações ambientais (brasileira e internacional). De modo a permitir tal adequação, o desenvolvimento de materiais adsorventes nanoestruturados trará o benefício adicional de fomentar o parque industrial brasileiro supridor de materiais e tecnologias de controle da emissão de poluentes.

Estima-se que o mercado norte americano de adsorventes inorgânicos seja de U\$ 2,2 bilhões em 2009. As expansões das aplicações dos marcos regulatórios ambientais em todo o mundo e as melhorias dos padrões de vida das populações em vários países estão aumentando de forma significativa as demandas para os usos de adsorventes. Dessa forma, este é um mercado em franca expansão e representa grande oportunidade para investimento.

O levantamento realizado pelo CGEE junto a especialistas no Brasil apontou que a probabilidade deste assunto representar uma atividade de interesse de mercado no período de 2010 a 2022 é estimada em 100%. A relevância industrial (em uma escala de 1 a 5) sugere um valor médio de 4,0 e

um crescimento contínuo da importância do tema: 2012 (3,9), 2017 (4,1) e 2022 (4,3). A relevância industrial sugerida pelo proponente é 5.

5.3.3. Desafios tecnológicos e de infraestrutura

Esta proposta contém elementos visando o desenvolvimento de um bem de mercado de importância estratégica para o país. Esta proposta surgiu das observações e contribuições de especialistas de todo o país, os quais apontaram os seguintes tópicos de interesse trans-setorial:

- Materiais adsorventes;
- Materiais adsorventes para descontaminação de meios aquosos,
- Desenvolvimento de materiais a partir de resíduos industriais,
- Produção sustentável de materiais avançados.

Matrizes de origem natural ou sintética podem ser funcionalizadas por meio de grupos químicos específicos. Isso possibilita a fabricação de materiais nanoestruturados com grande capacidade de carregamento e seletividade em relação a várias espécies orgânicas e inorgânicas presentes em meios aquosos e efluentes.

Para acentuar o desempenho no que diz respeito à adsorção de metais dissolvidos em meios aquosos é promissor o uso de cerâmicas porosas. Como exemplos desses materiais podem ser citados os argilominerais naturais e sintéticos, óxidos duplos lamelares, zeólitas, vitrocerâmicas e os vidros de elevada área superficial.

Para esta proposta as tecnologias a serem dominadas são:

- Materiais adsorventes,
- Membranas,
- Métodos de análise,
- Avaliação de desempenho,
- Análise do ciclo de vida,
- Catalisadores.

Há necessidade de formação de recursos humanos para atuar na área de materiais adsorventes.



Uma forte interação com a indústria é importante para que sejam formados pesquisadores que trabalhem nas empresas e sejam capazes de desenvolver produtos inovadores.

Em uma análise preliminar são identificados como possíveis participantes desta proposta para execução de projetos de P&D as seguintes instituições:

- Universidades (UFMG, UFRJ), UFSCar, UnB, Unicamp e outras ICTs, incluindo os Cefets),
- Institutos de Pesquisa e,
- Empresas de base tecnológica, por exemplo, Petrobras, Vale e outros atores da indústria, para gerar inovações e tecnologias.

5.3.4. Ações sugeridas

Para esta proposta os desafios indicados são:

- Atualização da base técnico-científica: Capes e CNPq;
- Montagem de infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento dos materiais avançados;
- Criação de Redes de Pesquisa;
- Incubação de empresas e
- Desenvolvimento de um quadro efetivo nos órgãos do governo para a aplicação das políticas.

Para esta proposta, são sugeridas as seguintes metas a serem alcançadas pelo Brasil até o ano 2022:

- Ter grupos de pesquisa no país.
- Ter disponíveis recursos humanos no país em quantidade e qualidade.
- Ter disponíveis membranas e materiais adsorventes que promovam a descontaminação de líquidos, com ênfase na água e o tratamento de efluentes.
- Ter presentes no mercado empresas emergentes e que aplicam essas tecnologias.
- Ter disponíveis estudos e análises de ciclo de vida dos materiais.

Para esta proposta as ações recomendadas são:

Recomenda-se a implementação de programas e ações coordenadas visando desenvolver materiais cerâmicos, poliméricos e híbridos e outros com funções de separação, de imobilização e sequestro de elementos e compostos causadores de poluição da água.

Para esta proposta, as ações recomendadas são:

- Financiar projetos de pesquisas básica e aplicada (inclusive com participação do setor empresarial) em desenvolvimento de novos adsorventes (nano-estruturados ou não). Os materiais-chaves são: cerâmicas funcionalizadas (nanoestruturadas ou não), híbridos inorgânico-orgânicos, recobrimentos cerâmicos avançados, materiais cerâmicos porosos, argilominerais funcionalizados, minerais industriais funcionalizados e biomassas.
- Apoiar a formação de recursos humanos.
- Fomentar a inovação nas empresas.
- Fortalecer as fontes de financiamentos reembolsáveis e não-reembolsáveis destinados a instituições privadas.

Para esta proposta, estima-se um investimento para o período de 2010 a 2012 de R\$ 135 milhões, para o período de 2013 a 2017 de R\$ 250 milhões e para os anos de 2017 a 2022 de R\$ 300 milhões. Tais recursos incluem o financiamento à pesquisa básica de caráter científico, à formação de pessoal qualificado em todos os níveis, à pesquisa tecnológica, às pesquisas inovadoras das empresas e ao *start-up* de empresas de base tecnológica, considerando tanto fontes governamentais como privadas.

Para esta proposta as instituições responsáveis para a inserção da proposta no mercado são os ministérios: MCT, MMA, MDIC, MEC, MME.

5.4. Materiais para reciclagem e reaproveitamento de resíduos

5.4.1. Descrição da situação

O desenvolvimento de materiais à base de resíduos industriais é necessário para proteger a qualidade do solo, da água e da atmosfera, e ao mesmo tempo permitir o desenvolvimento de ativida-



des econômicas importantes. Este desenvolvimento permitirá a redução do consumo de materiais, contribuirá para diminuir o impacto ambiental causado pelos depósitos de rejeitos e propiciará o tratamento mais adequado de grande volume de rejeitos industriais.

Resíduos da produção agropecuária e mineral frequentemente se tornam problemas ambientais, às vezes graves. Por outro lado, muitos deles podem ser fontes de materiais dotados de propriedades muito desejáveis. Um caso exemplar é o da casca de arroz: sendo queimada é uma fonte de energia e as suas cinzas são ricas em sílica ativa, que é um importante insumo para cimentos especiais.

Um intenso aproveitamento de resíduos de todos os tipos, alongando os ciclos de vida de muitos produtos e aumentando a geração de valor dentro de suas cadeias produtivas, ao mesmo tempo em que se aliviam as pressões ambientais causadas pelo lixo. Uma consequência extremamente importante é a redução na demanda de fertilizantes, aumentando a sustentabilidade de cadeias produtoras.

O Brasil necessita de materiais ambientalmente adequados para permitir o atendimento sustentado da enorme demanda por materiais de construção. O desenvolvimento de materiais ambientalmente corretos visa atingir vários objetivos como: reduzir a emissão de CO₂ para a atmosfera; utilizar materiais abundantes e de elevada disponibilidade em todo o país; promover conforto ambiental aos moradores e usuários; agregar funções aos materiais utilizados em construção; aumentar a durabilidade das construções; reduzir os custos das construções; introduzir benefícios tecnológicos para todas as camadas sociais. Dessa forma, a disponibilização desses materiais poderá simultaneamente atender fortes demandas por materiais apropriados para moradias de baixo custo e edifícios com funções sociais, como escolas e hospitais, e ao mesmo tempo prover o país com novos materiais que agregam funções especiais.

A transição para uma economia verde (sustentável) requer o uso crescente de matérias-primas de fontes renováveis, recicladas ou de matérias-primas obtidas de resíduos. Isso contribui diretamente para a redução da concentração de poluentes nos solos, na água e na atmosfera, ao mesmo tempo em que mostra vantagens econômicas crescentes.

Substâncias tóxicas e nocivas ao ser humano precisam ser imobilizadas em materiais apropriados de modo a evitar a contaminação dos solos, aquíferos e da atmosfera. O encapsulamento e a imobilização de resíduos altamente tóxicos, radioativos ou de risco biológico deve ser feito com o uso de materiais que apresentem elevadas resistências química, térmica e mecânica resultando em comprovadas confiabilidade e durabilidade.

Materiais adequados para encapsulamento e imobilização de substâncias tóxicas e nocivas são necessários para amenizar efeitos da poluição dos solos e permitir a manutenção da qualidade dos solos, aquíferos e da atmosfera para diversos usos (humano, animal, agrícola).

Os objetivos estratégicos são:

- Ter disponíveis materiais avançados que possam ser utilizados na imobilização e encapsulamento de substâncias tóxicas, tanto orgânicas como inorgânicas, etc., tendo presente o conhecimento sobre o ciclo de vida desses materiais,
- Dominar as tecnologias de fabricação de novos materiais a partir de resíduos industriais, do agronegócio e da produção mineral e
- Dominar as tecnologias de separação e encapsulamento de resíduos.

5.4.2. Aspectos econômicos

O uso de resíduos industriais na fabricação de materiais diminuirá os impactos ambientais e econômicos negativos decorrentes da disposição dos resíduos. Além disso, o desenvolvimento de materiais a partir de resíduos permitirá o aumento de atividades econômicas importantes, com alcance social significativo.

O mercado de materiais obtidos a partir de reciclagem é imenso. Por exemplo, estima-se em cerca de U\$ 650 bilhões o mercado mundial associado a metais secundários em 2008. Apenas o mercado ligado a resíduos de materiais eletrônicos chega a U\$ 17 bilhões em 2009. A quantidade de plásticos reciclados no mundo em 2009 é estimada em mais de 1,3 milhões de toneladas.

Os materiais obtidos a partir de resíduos apresentam elevado potencial econômico para vários segmentos. O mercado norte americano para “materiais verdes” utilizados em construção civil foi cerca de U\$ 21 bilhões em 2006. Considerando apenas os edifícios, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estima que eles sejam responsáveis por 39% do consumo total de energia daquele país, 12% do consumo de água, 68% do consumo de eletricidade e ainda por 38% da emissão total de CO₂.

Observa-se hoje no país o estabelecimento de diversas empresas que atuam diretamente no ramo de utilização de resíduos industriais para a produção de materiais. Isso se passa, por exemplo, com atividades ligadas à indústria siderúrgica.



O levantamento realizado pelo CGEE junto a especialistas no Brasil apontou que a probabilidade deste assunto representar uma atividade de interesse de mercado no período de 2010 a 2022 é estimada em 100%. A relevância industrial (em uma escala de 1 a 5) sugere um valor médio de 4,0 e um crescimento contínuo da importância do tema: 2012 (3,7), 2017 (3,9) e 2022 (4,4). A relevância industrial sugerida pelo proponente é 5.

5.4.3. Desafios tecnológicos e de infraestrutura

Esta proposta contém elementos de estratégia com enfoque trans-setorial para P&D. Esta proposta surgiu das observações e contribuições de especialistas de todo o país, os quais apontaram os seguintes tópicos de interesse trans-setorial:

- Materiais para encapsulamento e imobilização de substâncias tóxicas,
- Desenvolvimento de materiais a partir de resíduos industriais,
- Argilas,
- Rejeitos do agronegócio e da produção mineral,
- Nanocompósitos,
- Ciclo do combustível nuclear,
- Materiais de penetração balística e blindagem nuclear,
- Análise e caracterização de materiais avançados e respectivas matérias primas,
- Membranas para células a combustível de baixa temperatura,
- Sensores avançados,
- Processamento de materiais a plasma,
- Simulação computacional em ciência e engenharia de materiais,
- Fibras ópticas microestruturadas,
- Materiais inteligentes para construção.
- As tecnologias a serem dominadas são:
- Análise e caracterização de novos materiais,
- Análise e caracterização de resíduos industriais,
- Simulação e monitoramento computacional,
- Tecnologia de sensores,
- Novos materiais para encapsulamento,
- Processamento de materiais a partir de resíduos.

Há necessidade de formação de recursos humanos para atuar na área de materiais obtidos a partir de resíduos. Uma forte interação com a indústria é importante para que sejam formados pesquisadores que trabalhem nas empresas e sejam capazes de desenvolver produtos inovadores.

Em uma análise preliminar são identificados como possíveis participantes desta proposta para execução de projetos de P&D as seguintes instituições:

- Universidades (UFMG, UFRJ, UFSCar, UnB, Unicamp e outras ICTs, incluindo os Cefets),
- Institutos de Pesquisa (CDTN, Ipen, IPT e outros) e
- Empresas de base tecnológica para pesquisa e desenvolvimento, como por exemplo, Petrobras, Usiminas, Vale e outros atores da indústria, para gerar inovações e tecnologias.

5.4.4. Ações sugeridas

Para esta proposta os desafios indicados são:

- Atualização da base técnico-científica: Capes e CNPq;
- Formação de recursos humanos;
- Montagem de infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento dos materiais avançados;
- Criação de Redes de Pesquisa;
- Incubação de empresas e
- Desenvolvimento de um quadro efetivo nos órgãos do governo para a aplicação das políticas.

Para esta proposta, são sugeridas as seguintes metas a serem alcançadas pelo Brasil até o ano 2022:

- Ter grupos de pesquisa no país.
- Ter disponíveis recursos humanos no país em quantidade e qualidade.
- Ter disponíveis materiais obtidos a partir de resíduos industriais, materiais que possam ser utilizados na imobilização e encapsulamento de substâncias tóxicas, tanto orgânicas como inorgânicas etc.
- Ter presente no mercado empresas emergentes e que aplicam essas tecnologias.
- Ter disponíveis estudos e análises de ciclo de vida dos materiais.



Recomenda-se a implantação de programas e ações coordenadas visando desenvolver materiais à base de resíduos industriais.

Recomenda-se ainda formar redes de empresas e ICTs para a identificação de resíduos específicos, fomentando atividades de P&D pré-competitivas e também competitivas para o seu aproveitamento. Neste caso sugere-se não promover nenhuma centralização de esforços e o fomento deve ser disseminado, seja geograficamente, seja considerando-se os tipos de resíduos. É essencial a existência de uma base de dados.

Para esta proposta, as ações recomendadas são:

- Financiar projetos de pesquisas básicas e aplicadas (inclusive com participação do setor empresarial) em desenvolvimento de materiais avançados obtidos a partir de resíduos industriais, materiais que possam ser utilizados na imobilização e encapsulamento de substâncias tóxicas, tanto orgânicas como inorgânicas etc.
- Os materiais chaves são: materiais para construção, materiais estruturais, cimentos, absorventes, cerâmicas vermelhas, adobes, recobrimentos funcionais, concretos avançados, vidros, compósitos, materiais cerâmicos com porosidade controlada, materiais cerâmicos nanoestruturados, polímeros avançados e materiais de base mineral.
- Apoiar a formação de recursos humanos.
- Fomentar a inovação nas empresas.
- Fortalecer as fontes de financiamentos reembolsáveis e não-reembolsáveis destinados a instituições privadas.

Para esta proposta, estima-se um investimento para o período de 2010 a 2012 de R\$ 150 milhões, para o período de 2013 a 2017 de R\$ 300 milhões e para os anos de 2017 a 2022 de R\$ 360 milhões. Tais recursos incluem o financiamento à pesquisa básica de caráter científico, à formação de pessoal qualificado em todos os níveis, à pesquisa tecnológica, às pesquisas inovadoras das empresas e ao *start-up* de empresas de base tecnológica, considerando tanto fontes governamentais como privadas.

As instituições responsáveis são: MCT, MDIC, MMA, MEC, MME, Mapa, MD.

5.4.5. Coordenação de políticas industrial e de ciência e tecnologia

A coordenação de políticas é um dos maiores desafios na implementação de programas de governo com a necessária parceria com o setor privado para constituir um parque industrial ambiental intensivo em inovações e fornecedor de bens ambientais para os mercados nacional e internacional. As propostas apresentadas neste texto branco constituem uma estratégia para que o desenvolvimento de materiais nas três áreas temáticas, além de outras áreas igualmente mencionadas (energia, defesa, agricultura, pecuária, recursos naturais, saúde, educação, transporte e habitação), mas não detalhadas aqui, redundem em investimentos crescentes em produtos ambientais competitivos.

Embora o desenvolvimento de materiais avançados nos diversos temas constituam interesse direto de aplicação tratados pelos diversos ministérios e instituições responsabilizados nesta proposta, enquanto política, recaem fortemente em dois campos de política: industrial e de ciência e tecnologia.

Além disso, como o instrumento principal indutor da política é o financiamento por meio do qual se veiculam subvenções de diversas naturezas e intensidades, a Capes, o CNPq, a Finep e o BNDES, fazem recair em três ministérios, o MEC, O MCT e o MDIC a responsabilidade como principais players em que a coordenação deva ocorrer em níveis mais altos de decisão.

Outros ministérios têm função de demanda, enquanto os três primeiros, de oferta. Isto significa estabelecer metas de longo prazo - 2010/2022, nas propostas de ações avançadas acima. Estas podem ser reunidas em projetos, instrumento de planejamento típico, incluindo:

- Formação de recursos humanos,
- Montagem de infraestrutura,
- Criação de redes de pesquisa específicas, e
- Adequação e fortalecimento dos mecanismos de financiamento.

A materialização das propostas depende também de uma eficiente estrutura de governança do programa ou conjunto de ações para o acompanhamento das metas e decisões corretivas. O PDP é um bom exemplo dessa estrutura desejada.

Outro requisito básico para o sucesso de empreendimentos de inovação é a facilitação da construção de parcerias público-privadas. Entre as formas de facilitação estão as condições de financiamento disponibilizados para o setor privado, já operados pela Finep e pelo BNDES.



Para isso está sendo sugerido o fortalecimento do sistema de financiamento público, que significa mais recursos, maior facilidade de acesso e taxas de subvenção maiores. Este fortalecimento é justificado por duas razões, a primeira porque meio ambiente é investimento de risco em si; a segunda, porque o *start-up* de empreendimentos industriais e ambientais é substancialmente maior do que o de outros empreendimentos industriais. Altos custos de *start-up* impedem a entrada de novas indústrias por causa dos altos riscos embora altamente benéficos para o meio ambiente e para a sociedade. Daí a necessidade de forte apoio do governo.

Os financiamentos públicos para investimentos privados com essas características de mercado devem ser bastante atrativos, assim como requer condições de transação facilitadas de parceria público-privada.

Finalmente, recomenda-se que os outros temas mencionados neste estudo sejam tratados em conjunto com os três detalhados aqui, para ter ganhos de escala num mercado ambiental emergente no Brasil mas que cresce num ritmo sem precedentes, dados os estímulos existentes.

5.5. Conclusões

O Brasil exibe uma histórica oportunidade de contribuição em escala mundial para contribuir na remediação de uma série de problemas globais importantes tais como: mudanças climáticas, elevação do nível do mar, presença de poluição atmosférica, extinção de espécies animais e vegetais, acidificação dos oceanos, destruição da camada de ozônio, degradação dos solos, chuva ácida, destruição de *habitats*, super-exploração de recursos hídricos, contaminações por produtos químicos perigosos, contaminação microbiológica e derramamentos de hidrocarbonetos. Tais problemas ao mesmo tempo requerem investimentos no desenvolvimento e produção de materiais e tecnologias de materiais e também representam grandes oportunidades de investimentos pelo governo e pelo setor empresarial.

A amplitude e a dimensão dos problemas ambientais que chamam para o desenvolvimento de soluções intensivas em tecnologia viabilizam a atuação empresarial nos três tipos principais de liderança competitiva: custos, diferenciação e foco de mercado. Esta situação abre espaço no Brasil para uma ampla diversidade de perfis empresariais. Na medida em que o Brasil já possui massa crítica importante em conhecimentos ambientais e de materiais, a exploração de fatias do mercado ambiental intensi-

vo em tecnologia passa a ser viável se induzida através de programas interdisciplinares de cooperação entre instituições e grupos de pesquisa brasileiros e se promovida a aproximação dessas instituições com empresas emergentes na produção e comercialização de materiais para aplicações ambientais.

De acordo com o relatório CGEE-Tema III (2007), “as aplicações de materiais emergentes predominam no cenário de oportunidades para o mercado ambiental discutido neste estudo. As pressões são crescentes pela prevenção, redução, controle e mitigação dos impactos ambientais em toda a diversidade investigada pelo GEO4. Investimentos em pesquisa, desenvolvimento e produção de materiais, hoje ainda emergentes e de alto risco, a cada ano se mostrarão mais viáveis e atrativos em termos de volume, retorno e rentabilidade. O Brasil, diante do novo paradigma ambiental, apresenta condições muito competitivas para liderar este novo segmento dado à escala potencial para as soluções ambientais, as vantagens comparativas em biomassa e minerais precursores de materiais para aplicação ambiental e diante de um mercado que é emergente em todos os países - portanto o Brasil pode dar um salto para a liderança mesmo em um setor intensivo em tecnologia.”

Foi observado por meio das etapas de prospecção de dados e de opiniões promovidas pelo CGEE que o setor de meio ambiente, além de sua destacada importância ainda apresenta muitos e importantes desdobramentos em vários outros segmentos econômicos e do conhecimento. Como resultado disso, materiais que são importantes para a área de meio ambiente também são relevantes para outras áreas e vice-versa. Todos os três temas principais mostrados neste trabalho se enquadram na categoria desses tópicos trans-setoriais por apresentarem importância bastante significativa também em outras áreas, como por exemplo, as de energia, defesa, agricultura, pecuária, recursos naturais, saúde, educação, transporte e habitação.

A proposta final deste estudo é o financiamento de programas de pesquisa em materiais com aplicações ambientais que acelerem o desenvolvimento de novos produtos e a consolidação de uma cultura intensiva em tecnologia para produtos de classe mundial e competitividade global.

Tendo em vista suas importâncias estratégica, social, científica e econômica, recomenda-se a implantação de programas e ações coordenadas visando desenvolver materiais com aplicações ambientais, enfatizando os seguintes tópicos:

- Materiais para abatimento e sequestro de gases poluentes e geradores de efeito estufa.
- Materiais para produção de água potável e tratamento de efluentes.
- Materiais para reciclagem e reaproveitamento de resíduos.



De uma maneira geral as ações recomendadas para cada um dos tópicos sugeridos incluem o financiamento de pesquisas básicas, a formação de pessoal e sua inserção nas empresas, o fomento à inovação nas empresas, o apoio ao surgimento de empresas inovadoras e o fortalecimento das fontes de financiamento.

Os temas acima são de natureza transsetorial. Conforme indicado nos respectivos capítulos, cada um dos tópicos incorpora diferentes temas de destacado potencial econômico e com desdobramentos em diversos setores como energia, defesa, agricultura, pecuária, recursos naturais, saúde, educação, transporte e habitação.

Os valores de financiamento apontados como estimativas em cada capítulo referem-se a todos os agentes participantes dos temas. O valor total estimado para todos os materiais recomendados chega a R\$ 2,9 bilhões para o período de 13 anos. Tais recursos incluem o financiamento à pesquisa básica de caráter científico, à formação de pessoal qualificado em todos os níveis, à pesquisa tecnológica, às pesquisas inovadoras das empresas e ao *start-up* de empresas de base tecnológica, considerando tanto fontes governamentais como investimentos das empresas privadas e estatais. Esse montante equivale a um dispêndio médio anual de cerca de R\$ 220 milhões, o equivalente a aproximadamente 0,05% do investimento anual chinês no tratamento de problemas ambientais (US\$ 225 bilhões por ano, de acordo com o BCC, 2009).

As ações recomendadas foram apresentadas de forma sucinta, pois os planos detalhados dependerão de cada agente financiador ou investidor. No entanto, as áreas foram bem estabelecidas, permitindo o delineamento de propostas efetivas que visem os investimentos necessários em pesquisas básicas, na formação de pessoal e sua necessária inserção nas empresas, no fomento à inovação nas empresas, no apoio ao surgimento de empresas inovadoras e no fortalecimento das fontes de financiamento. Neste sentido, a definição dos temas importantes visa oferecer subsídio para a elaboração de políticas por parte das instituições de ensino e pesquisa, das entidades e agências governamentais e por parte das empresas atuantes nas áreas ambiental e correlatas.

Referências

- United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook – GEO 4: environment for development. Valletta, 2007. Disponível em: <<http://www.unep.org/geo/geo4/media>>. Acesso em 6 abril 2009. 540 p.
- Estudo prospectivo de materiais. Relatórios de situação – Fase I. Novas tecnologias de materiais para aplicações ambientais (Tema III). Brasília: CGEE, 2007. 71p.
- Estudo prospectivo de materiais. Relatórios de situação – Fase I. Relatório parcial. Recursos naturais (Tema I). Dados estratégicos sobre tecnologias emergentes de aproveitamento sustentável de biomassa e de recursos naturais e a inovação em materiais avançados deles derivados. Brasília: CGEE, 2007. 98p.
- Estudo prospectivo de materiais. Relatórios de situação – Fase II. Relatório parcial. Materiais avançados para a produção de energia. (Tema II). Brasília: CGEE, 2007. 75p.
- Estudo prospectivo de materiais avançados. Relatório de perspectivas – fase II. Brasília: CGEE, 2008. 80p.
- Oportunidades em materiais avançados a partir dos recursos naturais brasileiros. Agenda estratégica em materiais avançados. Brasília: CGEE, 2009. 93p. (Relatório).
- McKinsey & Company - Pathway to a Low-Carbon Economy for Brazil.
- J.L. Acero, F.J. Benitez, A.I. Leal, F.J. Real, F. Teva. Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse. *Journal of Hazardous Materials*, v. 177 (1-3), p. 390-398, 2010.
- N. Moulai-Mostefa, M. Frappart, O. Akoum, LuHui Ding, M.Y. Jaffrin. Separation of water from metal working emulsions by ultrafiltration using vibratory membranes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 177 (1-3), p. 978-982, 2010.
- K. Keizer, A.F.M. Leenaars, A.J. Burggraaf. Inorganic, Porous Membranes - Preparation, Structure and Potential Applications. In: *Ceramics in Advanced Energy Technologies*, H. Kröckel, M. Merz, O. Van der Biest, eds., Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Co., p.367-385, 1982.
- H. Fan, C. Hartshorn, T. Buchheit, D. Tallant, R. Assink, R. Simpson, D.J. Kissel, D.J. Lacks, S. Torquato, C.J. Brinker. Modulus–density scaling behaviour and framework architecture of nanoporous self-assembled silicas. *Nature Materials*, v.6, p. 418-423, 2007.
- G. Xomeritakis, N.G. Liu, Z. Chen, Y.B. Jiang, R. Kohn, P.E. Johnson, C.Y. Tsai, P.B. Shah, S. Khalil, S. Singh, C.J. Brinker. Anodic alumina supported dual-layer microporous silica membranes. *Journal of Membrane Science*, v.287 (2), p.157-161, 2007.



- Y.B. Jiang, G. Xomeritakis, Z. Chen, D. Dunphy, D.J. Kissel, J.L. Cecchi, C.J. Brinker. Sub-10 nm thick microporous membranes made by plasma-defined atomic layer deposition of a bridged silsesquioxane precursor. *Journal of American Chemical Society*, v.129, p.15446-15447, 2007.
- G. Xomeritakis, C.Y. Tsai, C.J. Brinker. Microporous sol-gel derived aminosilicate membrane for enhanced carbon dioxide separation. *Separation and Purification Technology*, v.42 (3), p. 249-257, 2005.
- C.Y. Tsai, S.Y. Tam, Y.F. Lu, C.J. Brinker. Dual-layer asymmetric microporous silica membranes. *Journal of Membrane Science*, v.169 (2), p.255-268, 2000.
- Y.F. Lu, G.Z. Cao, R.P. Kale, S. Prabakar, G.P. Lopez, C.J. Brinker. Microporous silica prepared by organic templating: Relationship between the molecular template and pore structure. *Chemistry of Materials*, v.11 (5), p.1223-1229, 1999.
- V. Cannillo, C. Leonelli, T. Manfredini, M. Montorsi, A.R. Boccaccini. Computational simulations for the assessment of the mechanical properties of glass with controlled porosity. *Journal of Porous Materials*, v.10, p.189-200, 2003.
- E.R. Geus, J. Schoonman, H.v. Bekkum. Preparation of ceramic molecular sieve membranes. In: *Proc. Materials Research Society*, v.20, p.231-236, 1991.
- W.R. Lima, G.F.B.L. Silva, A.M.M. Santos, W.L. Vasconcelos. Obtenção de membranas cerâmicas pelo processo sol-gel. *Cerâmica*, v.42 (278), p.857-860, 1996.
- R.F.S. Lenza, W.L. Vasconcelos. Synthesis and properties of microporous sol-gel silica membranes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v.273 (1-3), p.164-169, 2000.
- R.F.S. Lenza, R.O.R. Costa, W.L. Vasconcelos. Obtenção e caracterização de membranas assimétricas via sol-gel. *Cerâmica*, v.48 (306), p.49-53, 2002.
- R.F.S. Lenza, W.L. Vasconcelos. Study of the influence of some DCCA's on the structure of sol-gel silica membranes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v.330, p.216-225, 2003.
- BCC Research, Disponível em: <<http://www.bccresearch.com>>. Acesso em 13 abril 2009.
- A.M. Lakaniemi, L.M. Nevatalo, A.H. Kaksonen, J.A. Puhakka. Mine wastewater treatment using Phalaris arundinacea plant material hydrolyzate as substrate for sulfate-reducing bioreactor. *Bioresource Technology*, v. 101 (11), p. 3931-3939, 2010.
- M.A. Bustamante, F. Suárez-Estrella, C. Torrecillas, C. Paredes, R. Moral, J. Moreno. Use of chemometrics in the chemical and microbiological characterization of composts from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology*, v. 101 (11), p. 4068-4074, 2010.

- G. Kassab, M. Halalshah, A. Klapwijk, M. Fayyad, J.B. van Lier. Sequential anaerobic–aerobic treatment for domestic wastewater - A review. *Bioresource Technology*, v. 101 (10), p. 3299-3310, 2010.
- E. Uggetti, I. Ferrer, E. Llorens, J. García. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresource Technology*, v. 101 (9), p. 2905-2912, 2010.
- Z. Li, S. Imaizumi, T. Katsumi, T. Inui, X. Tang, Q. Tang. Manganese removal from aqueous solution using a thermally decomposed leaf. *Journal of Hazardous Materials*, v. 177 (1-3), p. 501-507, 2010.
- E.M. Cuerda-Correa, J.R. Domínguez-Vargas, F.J. Olivares-Marín, J.B. Heredia. On the use of carbon blacks as potential low-cost adsorbents for the removal of non-steroidal anti-inflammatory drugs from river water. *Journal of Hazardous Materials*, v. 177 (1-3), p. 1046-1053, 2010.
- M. Abduljawad, U. Ezzeghni. Optimization of Tajoura MSF desalination plant. *Desalination*, v. 254 (1-3), p. 23-28, 2010.
- C. Shen, S. Song, L. Zang, X. Kang, Y. Wen, W. Liu, L. Fu. Efficient removal of dyes in water using chitosan microsphere supported cobalt (II) tetrasulfophthalocyanine with H₂O₂. *Journal of Hazardous Materials*, v. 177 (1-3), p. 560-566, 2010.
- L. Mercier, C. Detellier. Preparation, characterization and applications as heavy metals sorbents of covalently grafted thiol functionalities on the interlamellar surface of montmorillonite. *Environmental Science Technology*, v. 29, p. 1318-1323, 1995.
- R. Celis, M.C. Hermasin, J. Cornejo. Heavy metal adsorption by functionalized clays. *Environmental Science Technology*, v. 34, p. 4593-4599, 2000.
- M.G. Fonseca, C. Airoidi. Híbridos inorgânico-orgânicos derivados da reação de filossilicatos com organossilanos. *Química Nova*, v. 26 (5), p. 699-707, 2003.
- M.G. Fonseca, C.M. Cardoso, A.F. Wanderley, L.N.H. Arakaki, C. Airoidi. Synthesis of modified vermiculite by interaction with aromatic heterocyclic amines. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 67, p. 1835-1840, 2006.
- N.L. Dias Filho, D.R. Carmo, A.H. Rosa. Selective sorption of mercury(II) from aqueous solution with an organically modified clay and its electroanalytical application. *Separation Science and Technology*, v. 41, p. 733-746, 2006.
- A.M.F. Guimarães, V.S.T. Ciminelli, W.L. Vasconcelos. Surface modification of synthetic clay aimed at biomolecule adsorption: synthesis and characterization. *Materials Research*, v. 10, p. 37-41, 2007.
- J. Viguri, A. Andrés, C. Ruiz, A. Irabien, F. Castro. Cement-Waste and Clay-Waste Derived Products from Metal Wastes: Environmental Characterization. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 79 (1), p. 38-44, 2001.



- R. Pusch. Chapter 11.4 Clays and Nuclear Waste Management. *Developments in Clay Science*, v. 1, p. 703-716, 2006.
- I. Demir, M. Orhan. Reuse of waste bricks in the production line. *Building and Environment*, v. 38 (12), p. 1451-1455, 2003.
- R. Menezes, H.S. Ferreira, G.A. Neves, H.L. Lira, H.C. Ferreira. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 25 (7), p. 1149-1158, 2005.
- C.S. Poon, D. Chan. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, v. 20 (8), p. 569-577, 2006.
- R.D. Toledo Filho, J.P. Gonçalves, B.B. Americano, E.M.R. Fairbairn. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research*, v. 37 (9), p. 1357-1365, 2007.
- R.D. Toledo Filho, J.P. Gonçalves, B.B. Americano, E.M.R. Fairbairn. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research*, v. 37 (9), p. 1357-1365, 2007.
- V. Ducman, B. Mirtič. The applicability of different waste materials for the production of lightweight aggregates. *Waste Management*, v. 29 (8), p. 2361-2368, 2009.
- F. Pacheco-Torgal, S. Jalali. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 24 (5), p. 832-838, 2010.
- M. Zakaria, J. G. Cabrera. Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates. *Waste Management*, v. 16 (1-3), p. 151-158, 1996.
- S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira. Effect of oily waste addition to clay ceramic. *Ceramics International*, v. 31 (2), p. 353-358, 2005.
- S.N. Monteiro, F.A.N. Silva, C.M.F. Vieira. Microstructural evaluation of a clay ceramic incorporated with petroleum waste. *Applied Clay Science*, v. 33 (3-4), p. 171-180, 2006.
- I.B. Singh, K. Chaturvedi, R.K. Morchhale, A.H. Yegneswaran. Thermal treatment of toxic metals of industrial hazardous wastes with fly ash and clay. *Journal of Hazardous Materials*, v. 141 (1), p. 215-222, 2007.
- W. Acchar, B.M. Rulff, A.M. Segadães. Effect of the incorporation of a spent catalyst reject from the petroleum industry in clay products. *Applied Clay Science*, v. 42 (3-4), p. 657-660, 2009.
- W.J. Baumol. Environmental industries with substantial start-up costs as contributors to trade competitiveness. *Annual Review of Energy and the Environment*, v. 20, p. 71-81, 1995.



6. Produção de materiais avançados a partir de recursos naturais²

6.1. Apresentação

Os recentes desenvolvimentos científicos e tecnológicos têm possibilitado um elevado número de oportunidades de criação de novos materiais, produzidos com insumos originários de fontes sustentáveis, renováveis e abundantes. Estas oportunidades respondem positivamente à necessidade de transição da economia atualmente baseada em matérias-primas e combustíveis fósseis para uma economia caracterizada por um desenvolvimento sustentável, com baixo uso de carbono, assim contribuindo para a mitigação e redução de emissões poluentes e, portanto, evitando e minimizando a parcela antrópica à mudança climática global, bem como maximizando a satisfação social daí resultante.

Este trabalho apresenta um conjunto de oito temas escolhidos como subsídios para políticas públicas e para estratégias empresariais de desenvolvimento de materiais avançados, agregadoras de valor a produtos e resíduos de cadeias produtivas vigorosas no Brasil e baseadas em matérias primas abundantes ou renováveis.

Os tópicos dos temas são os seguintes:

- 1) Caracterização de materiais avançados e de suas fontes naturais;
- 2) Rotas alternativas para produção de insumos básicos para fertilizantes;
- 3) Produção de materiais agroquímicos avançados;
- 4) Reaproveitamento de rejeitos da atividade mineral e do agronegócio como insumos para produção de materiais avançados;
- 5) Produção de materiais avançados a partir de óleos e gorduras;
- 6) Produção de materiais avançados a partir de argilas;
- 7) Produção de materiais avançados a partir de fibras naturais;
- 8) Produção de materiais avançados a partir de borracha de látex natural.

² Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Fernando Galembeck (coordenador), Yara Csordas (relatora), Roberto Cerrini Villas-Boas (revisor), César Augusto Sales Barbosa, Fábio do Carmo Bragança, Heloisa Cajon Schumacher, Márcia Maria Rippele, Rafael Arromba de Sousa (co-relatores).

O tema (1) discorre sobre a estratégia necessária para identificar características diferenciadas em insumos do agronegócio que possam promovê-los como matérias-primas para produção de materiais avançados, além da aquisição de informação experimental sobre os materiais em questão.

Os temas (2) e (3) tratam de grandes grupos de insumos essenciais à produção agrícola em base durável.

O tema (4) aborda o reaproveitamento de rejeitos de processos produtivos do agronegócio e da atividade mineral como fontes de matérias-primas.

Nos últimos quatro temas, são apresentadas as justificativas, objetivos e estratégias de aproveitamento de importantes e abundantes matérias-primas brasileiras, cujo potencial vem sendo explorado para a produção de novos materiais avançados, sendo três delas derivadas do agronegócio e uma da mineração.

A criação e a produção competitiva de materiais têm um papel decisivo no desenvolvimento tecnológico e social e na consolidação de estruturas de poder nacional e econômico, em toda a história humana. O século 20 foi pródigo em exemplos dessa afirmação: plásticos, borrachas, semicondutores, metais e cerâmicas.

O momento atual oferece uma miríade de novos conceitos e ferramentas experimentais para a exploração de novas e de antigas estratégias de criação, desenvolvimento, produção e comercialização de materiais. Nas últimas décadas, a nanociência e, em consequência, a nanotecnologia, vêm demonstrando um elevado número de possibilidades de construção de materiais fascinantes, dotados de conjuntos de propriedades até aqui desconhecidas, obtidos a partir da própria - e nova - auto-organização de matérias-primas triviais em materiais nano-estruturados. - A estruturação de materiais em várias escalas de tamanho está permitindo a superação de paradigmas bem estabelecidos, derivados das propriedades das substâncias puras ou isoladas. Dessa forma, estão sendo criados numerosos exemplos de amplo impacto, como os meta-materiais. Além disso, deve-se destacar a atual possibilidade de criação de novas matérias-primas e materiais a partir de processos biotecnológicos.

Uma importante batalha a ser vencida nos processos de inovação é a necessidade de se desenvolver materiais avançados que tenham baixo risco e não tragam impactos adversos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Ao longo destes últimos anos foram relatados casos de introdução de novos materiais, que inicialmente pareceram dotados de propriedades maravilhosas, e que foram posteriormente identificados como danosos à saúde dos seres vivos (exemplo: as nanopartículas de zinco



aplicadas em protetores solares e cosméticos). O risco está sempre presente no desenvolvimento e adequação de qualquer material, avançado inclusive; portanto é imprescindível que seja feita a análise de risco de um novo material antes de sua fabricação e aplicação, assim evitando vultosas perdas econômicas, ambientais ou humanas.

Os insumos agrominerais básicos que foram selecionados para este estudo e discutidos neste documento são todos muito familiares à sociedade, que conta com séculos de experimentação no seu uso e na avaliação dos seus impactos. Isso não permite afirmar que haverá ausência de risco no desenvolvimento de materiais avançados a partir destas matérias-primas, uma vez que novas nanoestruturas poderão sempre produzir resultados inesperados. Entretanto, a base histórica de conhecimento sobre estes insumos, como por exemplo, as argilas, é muito maior do que a que hoje existe sobre os vários tipos de nanotubos e outras nanopartículas.

A produção de materiais avançados a partir de matérias-primas abundantes é um forte instrumento para a eventual solução de um problema global emergente, que é o aumento da demanda de amplas faixas da população humana por melhores condições de vida. O atendimento dessas necessidades, dentro dos atuais padrões de consumo, é traduzido pela aplicação econômica destes materiais em habitação, saúde e higiene, transportes, vestuário e segurança alimentar, criando pressões imensas sobre recursos naturais não-renováveis. Essas pressões podem ser drasticamente reduzidas pelo uso dos materiais renováveis – ou muito abundantes – na crosta terrestre, exemplificados neste artigo. O sucesso no desenvolvimento de materiais a partir de recursos minerais e do agronegócio deve aumentar a qualidade de vida destas populações, como também atender às principais demandas coletivas da humanidade, hoje traduzidas pela mitigação da geração de poluentes primários e das emissões de gases causadores do efeito estufa, pelo consumo de água potável, pela redução no volume dos descartes de efluentes sólidos e líquidos e por outros mecanismos de proteção do meio-ambiente. Além disso, contribui para o aumento da oferta de alimentos (pela produção de fertilizantes e outros aditivos agroquímicos avançados a custo competitivo), e de energia (pelo uso de fontes alternativas e pelo aumento na eficiência de produção de biocombustíveis e do processamento de biomassa).

Há – e este trabalho mostra – existência de sinergia entre a produção de alimentos, de energia e de matérias-primas quando feita de forma sustentável, quando consciente social e ambientalmente, quando fundamentada em ciência e tecnologia e quando sustentada por critérios éticos e uma legislação competente. No Brasil, há vários casos de impacto positivo e favorável da atividade agrícola sobre o meio-ambiente através do uso consciente do espaço, de um ordenamento territorial adequando e da eliminação da miséria humana, razão de imensas agressões ambientais. Um

exemplo desta afirmação é o projeto de desenvolvimento sustentável de plantação e exploração de seringueiras desenvolvido entre a Michelin e a comunidade de Igrapiúna, BA.³

O Brasil parece desfrutar hoje de uma posição muito singular e confortável: com a exploração do pré-sal, poderá vir a se tornar um dos maiores produtores de petróleo do mundo, ao mesmo tempo em que é líder na produção de *commodities* agrícolas consumidas como alimentos, fontes de energia (biocombustíveis) e matérias-primas para materiais. A exploração de petróleo e gás requer investimentos expressivos, atraindo grandes grupos internacionais; da mesma forma, a produção de *commodities*, pela excelente oportunidade comercial que oferece, igualmente traz grandes investimentos externos, que muito frequentemente são usados para a aquisição de ativos de empresas nacionais com liderança tecnológica.

Reproduz-se hoje com os recursos agrominerais o que ocorreu com o petróleo nos países mais desenvolvidos durante o século 20: uma matéria-prima inicialmente destinada para combustíveis e energia tornou-se a principal fonte para produção de uma larga quantidade de substâncias químicas que possibilitaram a fabricação de outros tantos produtos e compostos, dando origem à vasta indústria petroquímica de segunda e terceira gerações. A produção de combustíveis a partir da agricultura, no Brasil e em outros países, em grande escala e a preços vantajosos face aos dos competidores fósseis, criou semelhante situação na qual a cana de açúcar e o milho deixaram de ser exclusivamente alimentos para se transformarem em matérias-primas para plásticos e resinas.

Diferentemente do petróleo, o fator de estímulo ao uso de matérias-primas derivadas da agricultura é a sua crescente disponibilidade, graças ao aumento da produção e do uso de biomassa para a geração de energia.^{4,5} Estes são elementos que demonstram que a transição para uma economia de aproveitamento de recursos naturais e de baixo consumo de petróleo será extremamente desejável para a estratégia de sobrevivência humana em longo prazo. Sob o ângulo ambiental, é também um importante passo para que se reduzam as emissões de carbono e outros poluentes primários para a atmosfera. Como sabido, no entanto, o destino de um insumo do agronegócio para matéria prima de um material avançado será função do custo da energia e do preço do próprio insumo quando consumido como alimento. Sempre que houver um aumento da demanda nestes segmentos e conseqüente aumento de preços, os produtores provavelmente destinarão seus produtos para estes segmentos, assim prejudicando os consumidores finais dos materiais avançados. No caso dos rejei-

³ <http://www.seringueira.com/artigos/?p=225>

⁴ GALEMBECK, F. Synergy in Food, Fuel and Materials production from Biomass. *Energy Environ. Sci.*, 2010. First published on the web: 08 February 2010.

⁵ GALEMBECK, F.; BARBOSA, C. A. S.; SOUSA, R. A. Sustainable use of Biomass and Natural Resources for Chemical Innovation. *Química Nova*, v. 32, p. 571-581, 2009.



tos, o raciocínio é semelhante, dependendo da relação favorável (ou não) entre o custo do processo de transformação do rejeito em material avançado versus o custo do seu processo de descarte ou de tratamento para redução do seu potencial de impacto ambiental.

Assim como os custos da indústria química dependem do preço da nafta, que tem baixo impacto frente aos preços e volumes das outras frações do petróleo, basicamente destinadas para produção de energia, o custo de produção dos materiais avançados dependerá dos custos dos fertilizantes e dos demais insumos agroquímicos usados na manutenção das lavouras e produção dos alimentos. As poucas exceções (caso das fibras naturais, que são coletadas), dependerão do custo da mão-de-obra. Logo, o sucesso de um programa de produção industrial e contínuo de materiais avançados a partir de recursos naturais dependerá, obviamente, de garantias de fornecimento das matérias-primas.

Pelas considerações expostas, a opção pelo uso de recursos naturais e de matérias-primas obtidas a partir de fontes renováveis e de minerais abundantes como insumos para a indústria de combustíveis, química e de transformação é um caminho muito atraente e, dadas as dimensões do negócio, obrigatório para a inovação em materiais no Brasil, sendo integrador e viabilizador de políticas públicas, empresarialmente atrativo e apresentando possibilidades de impactos econômicos, sociais e ambientais altamente favoráveis.

6.2. Caracterização de recursos naturais e materiais avançados deles derivados

Esta é uma proposta de capacitação (infraestrutura, pessoal qualificado e redes de relacionamentos) para a caracterização de insumos, no estado da arte, essencial para a implantação das propostas de aproveitamento de matérias-primas oriundas da agricultura ou da atividade mineral. Trata-se de capacitação para a identificação, com suficiente detalhe, das características especiais de materiais comuns, que lhes agreguem valor ou que os diferenciem, aumentando sua competitividade global. A proposta também compreende a aquisição de informação experimental sobre os materiais avançados produzidos a partir dos insumos em questão.

A composição, a estrutura e as propriedades físico-químicas de um insumo são fatores determinantes para sua aplicação industrial e seu posicionamento no mercado, além de determinar o seu preço. Como exemplo, carbonatos de cálcio provenientes de jazidas de calcário com baixos teores de sílica são preferencialmente consumidos por empresas fabricantes de papel, pois sua baixa

abrasividade abrevia o desgaste dos componentes mecânicos das grandes e caras máquinas usadas na produção do papel. Por outro lado, para as indústrias produtoras de tintas, é importante que o carbonato de cálcio tenha um baixo teor de óxido de ferro. Um tratamento de purificação dado ao carbonato de cálcio para reduzir as impurezas descritas, em qualquer dos casos, implicará em um sobrepreço ao produto.

O exemplo também se estende para materiais produzidos a partir de fontes orgânicas. Fibras semi-sintéticas podem ser produzidas a partir da dissolução de celulose em dimetilformamida na presença de cloreto de lítio, seguida da sua fiação em banhos coagulantes. A eficiência do processo e as propriedades de absorção de água, tingimento e resistência mecânica e química das fibras produzidas dependem criticamente da solubilização da celulose, que é função da composição da celulose e de como a sua espécie fonte foi processada. Para esta aplicação, celuloses de alta especificidade, com arranjos micro e nano-estruturais podem fornecer uma vantagem estratégica comparativamente às tradicionais celuloses de eucalipto e *pinus* amplamente usadas pela indústria de papel.

Portanto, o domínio da informação sobre características de uma matéria-prima de origem mineral ou vegetal determina os beneficiários dos ganhos que dela podem derivar. Como anteriormente citado, o preço a ser pago por um consumidor a um insumo dependerá de suas características diferenciadas. O produtor do mineral pode, conhecendo cada aplicação que dele é feita, aplicar-se a selecionar os lotes que irá fornecer a um determinado comprador. O rejeito de um processamento de um produto, como a sílica durante a purificação do carbonato de cálcio, indesejada pelo produtor de papel, poderá ser inócua ou interessante para um fabricante de tintas ou um produtor agrícola ou cerâmico.

Consequentemente, a efetividade do trabalho de caracterização estará estreitamente vinculada às necessidades do cliente de cada produto e principalmente dos processos em que ele será utilizado. Trata-se de características para as quais um produtor de matéria-prima, isoladamente, dificilmente desenvolverá a competência suficiente para reconhecer e avaliar. A aquisição da informação relevante dependerá, portanto, da existência contínua e permanente de laboratórios de caracterização e análise dotados de equipamentos e pessoal qualificado para realização da caracterização desejada. E, igualmente, da existência de protocolos de análise que tenham sido estabelecidos por pessoas que compreendam cada aplicação do produto.

A competência na caracterização de materiais e matérias-primas depende de infraestrutura, recursos humanos e mecanismos de gestão apropriados, considerando planejamento e acompanhamento. Segue um diagnóstico sucinto sobre estes três tópicos no Brasil:



- **Cenário.** Devido às facilidades de importação nos últimos anos e a abertura de linhas de crédito voltadas para aquisição de novos instrumentos, a grande maioria dos instrumentos existentes no país deve estar próxima do estado da arte. As aquisições vêm sendo estimuladas pelo CNPq, Fapesp e outros órgãos de apoio e sempre justificadas por projetos aprovados por pares ou pela Finep. Existem hoje no Brasil instrumentos voltados à caracterização de materiais em todos os níveis de sofisticação, implantados principalmente em universidades. Esses grupos de pesquisa, em sua grande maioria, não têm como atividade principal a caracterização de materiais, sendo esta apenas uma atividade de apoio paralela aos objetivos gerais dos grupos. Um conjunto importante deles está alocado em centros de pesquisa públicos e/ou privados e em laboratórios de âmbito nacional; mas neste caso, infelizmente, poucos instrumentos estão em uma situação que permita uma intensa utilização na caracterização de materiais e matérias-primas por grupos interessados no uso prático dos resultados dos ensaios, pois os mesmos estão preferencialmente voltados para estudos científicos. Uma boa parcela de instrumentos está implantada em centros de pesquisa de empresas multinacionais com destacado histórico em PD&I, porém as informações sobre os mesmos são apenas parcialmente disponibilizadas para conhecimento público. Ainda não temos critérios e mecanismos bem definidos para viabilizar o uso do imenso patrimônio representado pelo atual parque de instrumentação científica no Brasil para as atividades de caracterização requeridas pelo desenvolvimento tecnológico. Este trabalho vem sendo feito pelo Sibratec, mas ainda em um ritmo lento.
- **Recursos Humanos.** Uma importante limitação da infraestrutura é o pequeno número de operadores competentes e experientes em uma determinada técnica. Há várias razões para isto, ligadas às deficiências estruturais do modelo de formação de recursos humanos que vêm sendo praticado no Brasil. A valorização de indicadores de “produtividade” desencoraja os estudantes de aprenderem profundamente técnicas instrumentais sofisticadas e se aperfeiçoarem no seu domínio. Este conhecimento requer tempo e não se mostra interessante para o aluno que procura uma especialização. Em consequência, técnicos competentes de alto nível são muito menos frequentes do que docentes e pesquisadores.
- **Gestão.** Devido aos investimentos necessários para sua implantação e aos seus custos de manutenção, equipamentos mais sofisticados geralmente se localizam nas universidades; equipamentos menores, mas de uso intenso, começam a ser implantados em laboratórios oficiais de grande porte. Infelizmente são raros exemplos de gestão contínua, especialmente por prazos de ordem de dez ou mais anos, de unidades que realizem atividades de pesquisa e de prestação de serviços em todos os níveis com sucesso e apresentando custo/

benefício. Nenhum dos casos conhecidos de bom desempenho inclui unidades de grande porte. Portanto, os modelos de gestão terão de ser bem testados, antes de se decidir por um modelo ou outro. Como também não há acompanhamento efetivo e abrangente de desempenho, seja das atividades de caracterização, seja da sua gestão, a memória das iniciativas mal-sucedidas é rapidamente perdida e erros graves se repetem. Em resumo, há espaço, no Brasil, para a instalação e operação de organizações especialmente voltadas à caracterização de matérias-primas e materiais em geral, tendo em vista o porte e as aspirações do país. Essa construção deve envolver ambos os lados: oferta e demanda.

6.3. Agenda estratégica e de PD&I

Esta não é uma agenda radicalmente nova, mas sim a reafirmação da premente necessidade de estratégias semelhantes às que têm sido repetidamente reiteradas – e ineficazmente implantadas – embora tenham sido exemplificadas em alguns poucos exemplos empresariais notáveis ao longo do século 20.

A agenda compreende produzir e disseminar informação de caracterização de materiais e matérias-primas, relevante para a sua adequação aos usos pretendidos, com os seguintes atributos:

- 1) Conter dados que informem sobre a composição elementar, molecular e estrutural, bem como sobre a morfologia, desde a escala macroscópica até a escala atômica, de matérias-primas e materiais. Deve ser dada especial atenção à detecção de nanoestruturas funcionais ou que confirmam funcionalidade aos materiais;
- 2) Permitir o relacionamento dos dados com informações sobre produtos e/ou processos de produção ou de utilização dos materiais e matérias-primas, com especial atenção às características agregadoras de valor. Isso só é possível se as pessoas envolvidas, ou pelo menos as lideranças profissionais, conhecerem os produtos e processos envolvidos, ao mesmo tempo em que saibam interpretar os resultados obtidos. Portanto, os trabalhos devem ser realizados sob protocolos de caracterização interdisciplinares e bem conduzidos sob uma atmosfera dinâmica e rica em informações atualizadas e não em regimes estanques de prestação de serviços;
- 3) A informação obtida deve poder ser disseminada, respeitados os direitos de propriedade intelectual e sigilo industrial ou empresarial. A disseminação terá empresários, pesquisadores, estudantes e professores como alvo, para criar uma cultura bem fundamentada em casos reais e relevantes.

São sugeridas estratégias em duas diferentes escalas de tempo, para se atingir os objetivos acima:



1) **Consolidação de laboratórios de caracterização de materiais e matérias-primas já existentes, capacitando-os a atuar como unidades de prestação de serviços de caracterização.**

Esta estratégia poderia ser implantada através de lançamentos de editais, nos próximos cinco anos, que necessitam ser elaborados de forma a produzir as seguintes consequências:

- a) Criar, manter ou estabilizar equipes de técnicos competentes na área de atuação do laboratório, em projetos de médio prazo, renováveis, utilizando os mecanismos da CLT e, apenas eventualmente, bolsas;
- b) Manter e/ou melhorar a infraestrutura existente, garantindo a manutenção dos instrumentos e de suas instalações e a disponibilidade de materiais de consumo;
- c) Criar, manter ou estabilizar a organização com uma gestão contínua, eficiente e, quando possível, de longo prazo, capaz de responder às demandas dos usuários;
- d) Estimular, conforme o caso, instrumentos de captação de recursos e/ou de remuneração dos serviços prestados, como instrumento de avaliação e premiação da organização e das pessoas envolvidas.

2) **Criação de novos laboratórios**

Esta estratégia deveria começar o mais rapidamente possível, preferivelmente a partir de unidades já existentes e que tenham sido consolidadas através da estratégia anterior, tendo mostrado excelente desempenho. O país tem um retrospecto negativo de criação de organizações com forte centralização de gastos, como foi o exemplo da Codetec e Codequartzo, em Campinas. A primeira está hoje transformada em sucata, enquanto a segunda se volatilizou. O insucesso deste modelo confirma que o mesmo não deve ser repetido.

As áreas de atuação dos novos laboratórios precisam cobrir um espectro voltado para técnicas especialmente poderosas na caracterização de materiais orgânicos e inorgânicos, relacionadas a seguir em ordem aproximada de importância:

- a) Microscopias eletrônicas (TEM, SEM, FIB-SEM), principalmente quando associadas à espectroscopia de elétrons (EELS), são as técnicas mais poderosas atualmente utilizadas na caracterização dos materiais que são objeto desta proposta. O uso de microscópios de alta resolução (ex.: HRTEM), devido à sua complexidade, poderá ser concentrado em Universidades.
- b) Técnicas de difração, fluorescência e espalhamento de raios-X em grande ângulo.
- c) Reologias adequadas às classes de produtos atendidas pelo laboratório.
- d) Espectrometrias de massa, de ressonância nuclear magnética, infravermelho, Raman, vis-UV, fluorescência.

- e) Cromatografias, especialmente as associadas a espectrometrias.
- f) Espalhamento de luz, estático e dinâmico.
- g) Técnicas específicas de classes ou cadeias de produtos, principalmente quanto sejam objetos de normas e exijam equipamentos de valor unitário elevado.
- h) Infraestrutura computacional adequada para modelagem molecular, voltada para desenvolver e simular a estrutura, dinâmica e termodinâmica de sistemas inorgânicos, poliméricos e biológicos em diversas situações, como em catálise, estabilidade de compostos e de microorganismos quando submetidos a condições extremas, atividade biológica e enzimática em solo e águas e outras aplicações.

Os laboratórios necessitarão também contar com facilidades e infraestrutura para preparação de amostras para os ensaios que serão realizados, evitando situações bem conhecidas no país, em que a utilização de um instrumento de alto valor é inviabilizada pela falta de equipamento periférico.

Os sistemas de interesse, para os quais estes laboratórios precisam estar preparados, são os tratados nas propostas deste conjunto: minerais abundantes (tais como argilas, calcário, macro e micronutrientes para fertilizantes e outros), madeiras, fibras naturais, celulose e demais materiais lignocelulósicos, óleos, ceras e gorduras e seus derivados e látexes naturais.

Esta lista não é exaustiva e, na verdade, a caracterização de materiais se apresenta como uma necessidade interdisciplinar básica e fundamental para todas as aplicações onde se poderão usar materiais avançados, cobertas pelo CGEE em seu programa (como materiais avançados para saúde, para geração de energia, uso em segurança e defesa, em tribologia, em meio ambiente e demais propostas).

6.4. Produção de insumos para fertilizantes

Nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são essenciais para o desenvolvimento das plantas e constam em todas as formulações de fertilizantes. Estas, eventualmente, poderão ser complementadas por micronutrientes, como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn).

A indústria de fertilizantes consome 99% do potássio comercializado na forma de cloreto (KCl) no país. O KCl restante e alguns outros sais de potássio são consumidos como matéria-prima pela indústria química para aplicações finais diversificadas, como vidros especiais, sabões e detergentes. De 1998 a 2007 o consumo do potássio no Brasil cresceu 9,1% ao ano, sendo que em 2006 o consu-



mo interno aparente deste macronutriente, isoladamente ou em suas formulações, foi próximo de 3,6 milhões de toneladas. Projeções para 2015 indicam um consumo de potássio pelo agronegócio brasileiro pelo menos duas vezes e meia maior do que o consumo do ano 2000. Indicadores de tendências econômicas apontam para o aumento progressivo do consumo de potássio nos próximos 15 anos, ou seja, até 2025, acompanhando proporcionalmente o crescimento vegetativo da população brasileira. A produção brasileira de potássio, iniciada em 1985, está restrita a uma única mina de silvinita ($KCl + NaCl$) localizada no município de Rosário do Catete (SE), denominada Complexo Taquari/Vassouras. Esta unidade é atualmente operada pela Vale S.A., e suas reservas estimadas são de 14 bilhões de toneladas, o que representa uma vida útil de mais 11 anos para o Complexo (2020).⁶

Não existe substituto para o fósforo na agricultura e as rochas fosfáticas são a única e principal fonte de P_2O_5 . O Brasil conta com reservas de 319 milhões de toneladas destas rochas, que são exploradas principalmente pela Vale S.A. em minas existentes em SP, MG, GO e BA. Embora as reservas de fosfato sejam suficientes para garantir o atual consumo interno por mais 30 anos, a produção interna não cresce no mesmo ritmo da demanda. Como exemplo, em 2007 o Brasil produziu 6,2 milhões de toneladas de fosfato, mas neste mesmo ano 50% do consumo brasileiro foi suprido por importações, devido ao crescimento de 8,8% na demanda do concentrado de rocha para fertilizantes e de 4,5% na demanda de ácido fosfórico. Fosfatos também são usados para outros produtos importantes, como a indústria de refrigerantes, de detergentes e de ração animal. Nestes segmentos, a demanda de fosfatos foi ainda maior: um crescimento de 33% no mesmo período.⁷

A principal matéria-prima para produção dos compostos nitrogenados mais comumente usados na agricultura é a amônia (NH_3), que é transformada em uréia para gerar derivados absorvíveis pelas plantas, como o nitrato e o sulfato de amônio, os fosfatos de mono e diamônio e os nitratos de cálcio e de potássio. A FAFEN, subsidiária da Petrobrás, em Laranjeiras (SE), é a maior produtora de amônia e uréia no país (respectivamente 0,45 milhões de toneladas/ano e 0,65 milhões de toneladas/ano) e está ampliando sua capacidade produtiva em sulfato de amônio. Entre janeiro e maio de 2008, o consumo aparente de uréia no país para fins agrícolas foi de 1,1 milhões de toneladas, projetando um consumo de 2,65 milhões de toneladas/ano. Portanto, 72% da uréia para fins agrícolas no país são importados. Neste cálculo, não está inclusa a uréia técnica, que é também consumida como importante matéria-prima nas indústrias de móveis, de alimentação animal, farmacêutica, cosméticos, têxtil e química, principalmente na produção de resinas uréia-formaldeído, melamina e explosivos.

⁶ AGROCONSULT, seminário apresentado em Jul/07. Em www.agroconsult.com.br, acesso em 12/Maio/09.

⁷ Fosfato. DNPM, 2007. Em: www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/fosfato.pdf

Na Tabela 6-1, o leitor pode ter uma idéia dos investimentos necessários para projeto e montagem de novas minas dos principais macronutrientes. Estes custos se baseiam em um histórico dos custos de implantação de minas na província de Saskatchewan (Canadá), e são apontados como *benchmarking*, já que o Canadá é hoje o país líder do estado da arte no processamento de potássio e fósforo. O investimento para produção de fósforo (P) considera a construção de unidades industriais integradas, possibilitando, no mesmo local físico, a extração e o processamento da rocha fosfática e a produção de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e monofosfato e difosfato de amônio (MAP/DAP). O investimento para produção de nitrogênio (N) envolve a construção de uma planta de amônia / uréia. O investimento para produção de potássio (K) compreende o beneficiamento da silvinita com NaCl como subproduto. Nestes investimentos são considerados somente dispêndios diretamente ligados à tecnologia da construção da planta de beneficiamento do minério, não tendo sido incluídos gastos com a necessária infraestrutura de apoio logístico (armazéns, ferrovias, estradas ou instalações portuárias marítimas ou fluviais) e o investimento necessário na geração de energia e fornecimento de utilidades para a mina, como água e vapor.

**Tabela 6-1: Investimentos necessários para novas minas
(Saskatchewan, Canadá)**

Macronutriente	Tempo necessário para projeto básico e montagem da mina	Investimento previsto
N	3 a 4 anos	US\$ 1 bilhão para cada 1 milhão de toneladas de NH_3
P	3 a 4 anos	US\$ 1,5 bilhões para cada 1 milhão de toneladas de P_2O_5
K	5 a 7 anos	US\$ 2,5 bilhões para cada 2 milhões de toneladas de K_2O equivalente

Os investimentos são altos devidos às quantidades necessárias para permitir o ganho de escala e, portanto, os projetos têm longo prazo de execução. A atual tecnologia permite a produção de unidades menores e mais flexíveis, mas estas possuem baixas produtividades e custos de instalação por tonelada de nutriente maiores do que as grandes plantas. Ainda, os altos custos envolvidos na extração e no refino destes macronutrientes limitam o universo de empresas que podem explorá-los, enxugando o número de integrantes do setor e concentrando o negócio nas mãos de empresas estatais ou de alguns poucos *players*.

Todos os fatores relatados mostram o quanto o agronegócio brasileiro está vulnerável na hipótese de uma explosão do consumo interno de fertilizantes em curto prazo ou de uma restrição do fornecimento ou colocação de obstáculos à aquisição de P,K e outros nutrientes provenientes de subsolos



alheios. Isso justifica claramente a necessidade de revisão das políticas públicas e de ações voltadas para inovação, pesquisa e desenvolvimento para que seja possível obter estes macronutrientes a partir de fontes alternativas, visando, na medida do possível, a redução das importações e o desenvolvimento de processos com baixo custo de implantação e de processamento e com resultados a curtos prazos, de forma a garantir a sobrevivência e a competitividade do agronegócio brasileiro.

Outras questões diretamente ligadas com esforços de PD&I estão relacionadas com a minimização das perdas e da indisponibilidade dos macro e micronutrientes para as culturas agrícolas, que ocorrem devido à lixiviação do solo pelo regime tropical de chuvas ou pela evaporação das formas gasosas dos sais orgânicos dos nutrientes (principalmente do nitrogênio) para a atmosfera, quando o solo atinge temperaturas muito elevadas.

Apesar de não estar diretamente ligada à questão da produção de insumos e materiais avançados, uma agenda de ações tecnológicas voltada para correção de solos e/ou para ajuste de formulações contribui para reduzir o consumo de fertilizantes e encontrar a dosagem ótima para cada lavoura em função das necessidades da planta e do solo. Nos solos brasileiros, a necessidade de adubação fosfatada é muito maior do que a potássica, devido à alta capacidade de fixação do P dos nossos solos altamente intemperizados. Em geral é difícil, com as formulações padrão do mercado, que o produtor supra a necessidade do solo sem que se ultrapassem as concentrações recomendadas de N e K, havendo, na maioria das lavouras, excessos e muitas perdas na aplicação dos formulados.

Recomendações de PD&I também colaboram para reduzir os desbalanceamentos da qualidade dos solos devido a práticas agrícolas incorretas, que causam não só o desperdício, mas sérios problemas ambientais, especialmente em solos argilosos, susceptíveis à percolação, com erosão e contaminação de lençóis freáticos. A Embrapa vem dando uma enorme atenção sobre estas questões em seu programa de PD&I, com diversos estudos e publicações sobre aplicações de fertilizantes e seus efeitos sobre o solo brasileiro.

6.4.1. Agenda estratégica e de PD&I

Como diretriz básica, o desenvolvimento de um processo de inovação ligado à exploração de macro e micronutrientes para uso em fertilizantes, outros aditivos e complementos nutricionais para o agronegócio, para a indústria química e para usos avançados necessitará seguir as diretrizes do desenvolvimento sustentável, privilegiando a exploração de minérios fundamentais em áreas de mínimo impacto ambiental e o uso de processos de transformação que

gerem a menor quantidade de efluentes, com correta destinação de descarte e/ou com baixo custo de tratamento para os produtores.

Sugere-se uma agenda de PD&I com esforços direcionados para as seguintes rotas tecnológicas:

1) **Exploração de potenciais rochas abundantes do solo brasileiro.**

Nas décadas de 70 e 80 foram realizadas pesquisas para o aproveitamento do K presente em determinados tipos de rochas brasileiras, como o feldspato potássico⁸, a kalsilita⁹ e o verdete de Abaeté¹⁰ e rochas ricas em feldspatos alcalinos (compostas predominantemente por silicatos de Al, K e Na) e em silicatos de potássio, muito comuns no Cerrado brasileiro. Para extrair o K e outros elementos são usados processos hidro ou pirometalúrgicos, ou seja, a dissolução das rochas é feita em soluções aquosas e temperaturas elevadas. Este tratamento tinha, na época, um elevado custo energético de produção e baixa competitividade frente ao KCl importado, tornando o processamento economicamente inviável e fazendo com que esta rota de pesquisas fosse abandonada. Se forem desenvolvidas rotas tecnológicas para aumentar o potencial de liberação de potássio, tornando-o mais solúvel, e depois concentrá-lo, a custo competitivo, as rochas brasileiras poderiam ser exploradas, substituindo a importação de cloreto de potássio. Além dos processos hidropirometalúrgicos, outra tecnologia no processamento de rochas é sua quebra e solubilização por ação de microorganismos, que se mostra bastante promissora, pois a seleção adequada de microorganismos poderá também colaborar na fixação de K nos solos. Todo o raciocínio acima descrito se aplica igualmente para as rochas fosfálticas (apatitas).

2) **Reaproveitamento de rejeitos ou resíduos do agronegócio.**

Rejeitos da mineração de pedras preciosas para uso ornamental e em joalheria, cuja extração ocorre principalmente nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais, apresentam teores significativos de potássio, cálcio e magnésio. Existe imenso potencial de extração de potássio a partir de rejeitos da extração de diamantes, que estão encravados em rochas sedimentares ígneas (ou vulcânicas) conhecidas como kimberlitas, lamproitas e lamprofitas e que são denominadas *ultrapotássicas*. Como as rochas já se encontram parcialmente fragmentadas, a moagem e processamento mecânico das rochas é facilitada, reduzindo o custo de produção. Após o processamento mecânico dos rejeitos de rochas, os macronutrientes podem ser extraídos das mesmas através das rotas hidro ou pirometalúrgicas

8 DA SILVA, J. E.; RITCHEY, K. D. Adubação potássica em solos de Cerrado. Em: Simpósio sobre potássio na agricultura brasileira, Londrina, 1982. Potássio na agricultura brasileira: anais... Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1982. Pag. 323-338.

9 VILELA, L.; DE SOUSA, D. M. G. Avaliação agronômica de fontes de potássio para solos de cerrado. Em: GOEDERT, W. J.; DIAS FILHO, A. (Ed.). Relatório bienal (1984/1985). Embrapa/PETROFÉRTIL, Brasília, 1986. p. 131-134.

10 LEITE, P. DA C.; LOPES, A. S. Efeitos de tratamentos térmicos e misturas de rocha potássica (Verdete do Abaeté), fosfato de Araxá e calcário magnesiano na disponibilidade de potássio e fósforo. Em: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 20., 1985, Belém. Programas e resumos... Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1985. Pag. 77-78.



acima descritas ou elas podem ser lançadas diretamente a sulco nas culturas, no processo conhecido como *rochagem*. A decomposição das rochas (mecânica ou microbiológica) libera os macronutrientes no solo, atuando os rejeitos como fertilizantes naturais de liberação lenta. Esforços em PD&I podem ser direcionados para detalhar e quantificar a composição dos rejeitos de rocha e as dosagens requeridas para cada cultura, devido às suas diferentes necessidades, incluindo a presença de contaminantes indesejáveis. Um acompanhamento agrônômico adequado poderá estabelecer os limites de lançamento dos diferentes rejeitos de rocha nas culturas, dentro de critérios sustentáveis. Rejeitos de culturas ricas em K, como talos do fumo, raízes da batata e o bagaço da laranja, podem ser reaproveitados diretamente no solo ou lançados à compostagem para produção de adubo potássico orgânico pelo produtor. Resíduos do processamento de carnes e dejetos de aves e suínos também são ricos em nitratos e potássio e podem ser reaproveitados, desde que sejam biologicamente monitorados. Para este item, esforços de PD&I estão embutidos nas metas descritas no Tema 4 – *Reaproveitamento dos Rejeitos da Atividade Mineral e do Agronegócio*. Um subproduto predominantemente inorgânico do processamento ou queima total de compostos orgânicos industriais ou agrícolas, inovador e alternativo para adubação, são as cinzas. É um material relativamente abundante, alcalino e rico em óxidos de K, Na, Ca e Mg, e que apresenta uma boa capacidade de fornecer nutrientes e de corrigir o pH do solo, promovendo uma elevação do pH de forma mais rápida do que o gesso ou o calcário agrícola. As cinzas podem ainda ser enriquecidas nos macronutrientes P e N, caso sejam adicionados ossos e cartilagens de animais aos fornos durante a torrefação ou calcinação do material orgânico. Como exemplo do potencial deste rejeito, 3,5 milhões de toneladas de eucaliptos são processados anualmente em siderúrgicas dos estados de MG, PA e SC, e suas cinzas são hoje destinadas para aterros, com alto custo de descarte, quando poderiam ser reaproveitadas como fertilizantes a lanço direto. Pesquisas nesta área poderiam focar as melhores fontes para produção de cinzas, processos sustentáveis e econômicos de produção e o controle da sua composição química pela possibilidade da presença nas mesmas de metais pesados ou outras substâncias tóxicas.

3) **Desenvolvimento de processos de redução de perdas de macronutrientes quando aplicados ao solo e lavouras.**

Solos, especialmente os argilosos, perdem muito N devido à migração das formas nitrogenadas para os lençóis freáticos ou pela sua volatilização como amônia, gerada por reações irreversíveis nas camadas mais superficiais do solo quando ele está sujeito a um pH muito básico, alta temperatura e umidade. Entre as alternativas tecnológicas que poderiam ser mais profundamente usadas para minimizar as perdas de N, cita-se o encapsulamento da uréia (ou de outras formulações fertilizantes provedoras de N), aditivos nas formulações de uréia para reduzir a sua higroscopicidade, a mistura de uréia com gesso agrícola ou outros componentes (ex.: agentes de complexação) para formação de sulfatos ou outros

compostos de menor solubilidade e maior fixação no solo, a redução do pH do solo ou a redução da volatilidade da uréia através de agentes de correção (sais inorgânicos), granulometrias ótimas para a uréia e derivados em função de cada cultura ou tipo de solo, o uso de uréases e as mantas de proteção de solos e outras possibilidades listadas no Tema 3, conforme descrito a seguir. Uma rota desafiadora, porém muito promissora, compreende a adição de microorganismos específicos ao solo para promover o aumento da absorção dos nutrientes pelas lavouras, reduzindo o consumo de fertilizantes. Esta rota interdisciplinar requer forte investimento na identificação das necessidades de cada cultura e no desenvolvimento de microorganismos específicos em conjunto com agrônomos, biólogos e engenheiros bioquímicos.

Desafios e necessidades para atendimento das sugestões:

- 1) Estímulo a projetos de acompanhamento agrônômico para uso de boas práticas agrícolas nas fazendas, voltados para redução de perdas de macronutrientes na aplicação dos fertilizantes;
- 2) Desenvolvimento de aditivos e materiais avançados (como as mantas de contenção sugeridas no Tema 3 deste estudo: Produção de Materiais Agroquímicos Avançados) para conter perdas de macro e micronutrientes por lixiviação ou evapotranspiração;
- 3) Esforços mais profundos em projetos de mapeamento geoambiental e de re-estudo da potencialidade de rochas, pois há pouco conhecimento sobre as reservas agrominerais não-convencionais brasileiras e pouca abordagem integrada entre o setor mineral e o agronegócio, apesar da existência de muitos grupos de pesquisa nas diversas áreas do conhecimento ligadas aos temas. Há necessidade de se integrar, em um possível plano de PD&I, as novas rotas de conhecimento (microbiologia, nanotecnologia, biotecnologia) e de uso racional de recursos e processos de elevada eficiência energética;
- 4) Desenvolver análises químicas de acompanhamento da caracterização químico-mineralógica dos resíduos sólidos e processos de tratamento para remover contaminantes indesejáveis das rochas potássicas ou fosfáticas que possam representar riscos ao ambiente e à qualidade dos produtos agrícolas, como metais pesados e elementos radioativos;
- 5) Criação de laboratórios aplicados com unidades piloto para desenvolvimento de processos hidro e pirometalúrgicos e scaling-up;
- 6) Uma revisão do presente Código de Mineração voltada para estas sugestões de PD&I removeria diversos entraves hoje existentes para a exploração de rochas ricas em macronutrientes, o seu processamento através de novas rotas de transformação ou a aplicação das mesmas como fertilizantes por rochagem por pequenos e médios produtores. Como exemplo, o prazo entre a solicitação de uma pesquisa e o direito de lavra pode levar até nove anos ou mais, tempo excessivo para que possam ser obtidos resultados dentro do horizonte sugerido neste estudo;



6.4.2. Fomentos e subsídios

O investidor privado de pequeno porte que deseja explorar diretamente pequenas jazidas necessitará de grande capacidade financeira devido à existência de despesas irrecuperáveis, como a necessidade de qualificação da mão-de-obra. Os recursos financeiros poderiam provir de empréstimos a curto/médio prazo com baixos juros ou de acesso a um financiamento diferenciado. O investidor voltado para a exploração de jazidas de médio e grande porte necessita de fomentos e subsídios contínuos, com um maior dispêndio inicial, para engenharia e construção da infraestrutura básica da mina. Apesar dos órgãos de fomento terem que aguardar um prazo maior para retorno do projeto devido aos elevados prazos de construção e de operação da planta, o risco é baixo, pois o capital empregado constituirá negócios de longa duração que gerarão empregos estáveis e perenes.

O governo federal olha com atenção a questão dos macronutrientes, fomentando projetos de desenvolvimento tecnológico em todo o país através dos Fundos Setoriais CT-Mineral e CT-Agro e do edital MCT/CNPq/CT-Agronegócio nº 43/2008, que apóia projetos de pesquisa voltados para o uso eficiente de fontes alternativas de nutrientes na agricultura. Porém, os recursos públicos destinados para PD&I nesta área são modestos perante às necessidades do país e à urgência desta particular agenda. A lista a seguir exemplifica alguns esforços em curso: a Rede de Pesquisa de Insumos Mineiros para a Agricultura, com o projeto *Novas fontes e rotas tecnológicas para obtenção de fertilizantes fosfáticos, potássicos e corretivos de solos*; a oficina de trabalho *Fertilizantes no Brasil* conduzida pelo MCT e o CGEE em Dez/2008; a publicação do livro *Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade* pelo Cetem/MCT; o projeto *Produção de agrominerais a partir de rejeitos de rochas ornamentais* proposto pelo Cetem-Caci, pela Universidade Federal do Espírito Santo e pelo Cefet-ES e os INCTs voltados para pesquisa mineral, entre outros. Soluções para o potássio, o elemento mais crítico, vêm sido estudadas e propostas pela Rede de Pesquisa Potássio, criada em 2003.

Empresas privadas, como a Vale S.A., a Fosfértil e outras, têm destinado um bom volume de recursos para PD&I e se preocupam enormemente em proteger o seu patrimônio intelectual através do patenteamento do produto das suas inovações.¹¹ Devido ao alto grau do estado da arte atingido por estas empresas, sugerem-se incentivos à formação de um maior número de parcerias tecnológicas entre a indústria e centros de pesquisa.

¹¹ Veja um exemplo na Patente BR PI 0803212-2A2 - Processo de concentração de minérios de apatita.

6.5. Produção de materiais agroquímicos avançados

O agronegócio global tem sofrido uma explosão de consumo de fertilizantes, defensivos agrícolas e outros produtos de apoio ao agronegócio desde o início de 2008. A demanda mundial de produtos deste segmento em 2009 foi 17% maior do que a oferta. A demanda brasileira duplicou entre 1991 e 2001, acompanhando a duplicação da produção de alimentos com aumento de apenas 20% na área cultivada.

O Brasil é um forte exportador de alimentos *in natura* e dos seus produtos processados, porém não é auto-suficiente em fertilizantes e materiais agroquímicos. Como mostrado no tema anterior, Produção de Insumos para Fertilizantes, princípios ativos dos defensivos e importantes insumos agrícolas são importados para produção local das formulações para pronto uso e venda no mercado. A despesa de importação com fungicidas, herbicidas e inseticidas foi de U\$ 1,30 bilhões FOB em 2009, ocupando a 22ª posição na lista de importações da Decex e representando 1,02% de toda a despesa com importações do país. Se tomarmos somente as importações de produtos químicos (sem considerar o petróleo, nafta e seus combustíveis derivados), estes itens ficam somente atrás de compostos heterocíclicos (usados como matéria-prima para indústria farmacêutica) e do cloreto de potássio.

A dependência das importações prejudica o desempenho da balança comercial brasileira e introduz o risco da possibilidade de variações cambiais na cadeia produtiva, que podem amplificar os efeitos de súbitas elevações das cotações internacionais dos produtos. Há também o peso crescente do custo dos fretes marítimos internacionais no custo dos ingredientes importados e do custo da mão-de-obra local, que são transferidos para o formulador de fertilizantes e defensivos e, conseqüentemente, para os agricultores. A cadeia logística dos insumos opera no limite de capacidade, pressionada pela baixa qualidade da infraestrutura de transporte e armazenamento do país. O alto grau da dependência da indústria deste setor mostra a conseqüente vulnerabilidade à qual o país se sujeita quando da hipótese de uma restrição do fornecimento ou de uma colocação de obstáculos à importação de insumos.

Os preços do mercado local são altamente impactados por esta questão estratégica e pela alta carga tributária sobre as formulações e o mercado acaba sofrendo outras conseqüências, como a falsificação de produtos. Denúncias sobre o contrabando de fertilizantes e defensivos entre o Brasil e seus países limítrofes são correntes. Além da evasão de divisas e das perdas econômicas pelo uso de produtos com baixo teor de princípios ativos, o país sofre riscos ambientais e de saúde pública, pela contaminação dos produtos falsificados com poluentes e subprodutos indesejáveis.



A manutenção da nossa competitividade no agronegócio dependerá de se fornecer insumos agroquímicos locais, economicamente viáveis, eficientes e específicos para as lavouras brasileiras, atendendo suas demandas e desenvolvendo novos nichos de mercado. Também compreende desenvolver processos mais adaptados a uso e recomendar as melhores práticas agrícolas. Todas estas considerações ratificam a premência de se desenvolver programas de incentivo no Brasil à pesquisa básica e aplicada em materiais agroquímicos inovadores, para que seja aprofundado o conhecimento sobre formulações e sistemas de liberação de nutrientes e defensivos e haja a criação de novos produtos de apoio ao plantio.

- **Cenário.** Os esforços científicos e, portanto, a evolução tecnológica na produção de novos materiais agroquímicos aumentou consideravelmente nos últimos 15 anos, principalmente devido ao aumento das exigências de sustentabilidade e de proteção ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores. Hoje o foco de inovação se dirige para produtos com diferenciais que venham a aumentar a produtividade das culturas, o lucro dos produtores e manter a vantagem competitiva do agronegócio. Com exceção da produção de macronutrientes básicos para os fertilizantes, não houve programas tecnológicos ou políticas públicas voltadas para produção de novos defensivos e aditivos para a agricultura. Uma das possíveis razões está ligada à complexidade da estrutura do mercado. Os princípios ativos são, em sua maioria, produzidos por multinacionais ou oligopólios empresariais e os processos de transformação destes princípios ativos ou de outros insumos base em materiais agroquímicos são realizados por indústrias privadas de menor envergadura ou por subsidiárias das multinacionais, em geral licenciando a tecnologia das matrizes. Aquisições e fusões são frequentes entre as mesmas, visando escala de produção e verticalização da cadeia produtiva.

Na aquisição dos materiais agroquímicos, os consumidores estão sujeitos a monopólios de fornecimento ou vendas casadas dos mesmos com fertilizantes. Os produtos são, em geral, padronizados e suas fórmulas não são tropicalizadas para se adequar às diferentes exigências dos cultivos e às variabilidades dos solos das regiões geológicas do país. Ocorre também o fato de muitas embalagens não poderem ser fracionadas, nem sempre atendendo às expectativas e necessidades de consumo dos produtores brasileiros.

- **Recursos humanos.** Existem poucos grupos de pesquisa na comunidade científica brasileira que atuam e que publicam especificamente dentro desta esfera de conhecimento. Possíveis razões para tal compreendem um baixo número de graduandos interessados na especialização em desenvolvimento, aplicação e produção de defensivos, um alto investimento necessário para montar e manter laboratórios de pesquisa, caracterização e aplicação de princípios ativos e um baixo retorno de resultados – ou até mesmo a inexistência - de parcerias entre a Universidade e a Indústria. A se notar que, no exterior, a maior parte das inovações no estado da arte neste segmento provém justamente das associações en-

tre pesquisadores dos centros de pesquisa das multinacionais e das universidades, e todas as novidades são fortemente protegidas por patentes.

- **Gestão.** Um dos problemas do setor reside na falta de boas práticas agrícolas, em parte resultantes da indisponibilidade de informação confiável sobre defensivos, da distância existente entre as multinacionais e os pequenos produtores e do baixo nível de escolaridade destes últimos. Existe baixo feedback sobre os resultados obtidos pelos produtores no uso de materiais agrícolas. O sucesso na aplicação de uma política de materiais avançados para a agricultura dependerá de um rigoroso e contínuo suporte técnico e de marketing ao consumidor, que justifique o uso de um novo produto.

6.5.1. Agenda estratégica e de PD&I

Seguem exemplos de inovações tecnológicas em materiais agroquímicos baseadas em insumos naturais:

- 1) **Aditivos encapsulados:** O encapsulamento minimiza perdas e possibilita liberação lenta ou controlada de importantes nutrientes para as culturas. Ou o polímero envolve o princípio ativo ou vice-versa, em diversas escalas de tamanho de partícula, desde mm a nanomoléculas. Historicamente os revestimentos mais usados pelo homem para encapsulamento são biopolímeros, naturalmente extraídos de algas, plantas ou partes de animais. Portanto, macro e micronutrientes de fertilizantes, herbicidas, fungicidas, acaricidas e inseticidas, surfactantes, agentes coalescentes, colóides e antiespumantes podem ser encapsulados com biopolímeros e/ou outras substâncias para melhora da dissolução de uma formulação, aumento da absorção da mesma pelo solo ou para outros objetivos específicos. Feromônios e outros hormônios de crescimento e floração podem ser encapsulados para se depositar por mais tempo sobre a superfície das folhas e flores, aumentando a longevidade das mesmas e as oportunidades de polinização por insetos;
- 2) **Filmes poliméricos biodegradáveis para revestimento de flores, frutas e vegetais:** Películas protetoras antimicrobianas impedem a instalação de fungos, ácaros e outros tipos de microrganismos nas cascas das frutas, possibilitando suas exportações dentro de parâmetros de controle biológico internacional. Revestimentos poliméricos promovem sobrevivência das frutas pela redução da permeabilidade da sua casca ao oxigênio e reduzem a sua velocidade de maturação. Diferentes substâncias químicas podem ser adicionadas aos filmes poliméricos para modificar cor, textura, sabor, tempo de maturação e quantidade de açúcares nas frutas, protegê-las da ação dos raios ultravioleta e de baixas temperaturas e também prepará-las para posteriores processamentos, como a produção de vinho;
- 3) **Embalagens:** Compósitos de amido e celulose com argilas ou fibras vegetais têm se mos-



trado excelentes opções para produção de embalagens semi-rígidas para acomodação de alimentos e sua conservação a baixas temperaturas;

- 4) **Mantas para impermeabilização de solos e proteção contra erosão:** Compósitos de biopolímeros com plásticos tradicionais, borrachas naturais ou argila produzem excelentes mantas para impermeabilização da superfície do solo, retendo a umidade e impedindo a lixiviação. As mantas poderiam ser enriquecidas com nutrientes específicos ou outros componentes de interesse para a cultura em questão. Lavouras localizadas no agreste e no semi-árido, cujos solos são pobres e estão sujeitos a intensas variações climáticas (secas prolongadas no verão ou lixiviação pelas chuvas durante o inverno) seriam os principais usuários desta aplicação;
- 5) **Invólucros para mudas:** Compósitos biopoliméricos substituem tubetes de plásticos convencionais (confeccionados em polipropileno e polietileno) e a espuma de poliuretano atualmente usada como substrato para mudas em reflorestamento, na produção de frutas e flores em estufas e na hidroponia. As mudas podem ser diretamente plantadas na terra, evitando contaminações e reduzindo a perda média de 20% pela manipulação humana. Macro e micronutrientes e outros aditivos específicos para as mudas podem ser incorporados aos tubetes, projetados para efetuar liberação controlada dos mesmos aos solos.

Destacam-se as seguintes culturas no agronegócio brasileiro que seriam beneficiadas com estas possibilidades de uso de materiais avançados: citricultura, hortaliças, flores, viticultura e produção de vinho, frutas tropicais, hidroponia, cafeeicultura, batatas e a produção de mudas, principalmente eucalipto e *pinus*, para reflorestamentos e para a indústria de celulose e papel.

São recomendadas as seguintes estratégias para se atingir as propostas de PD&I acima listadas:

- 1) **Estímulo à pesquisa de biopolímeros:** O Brasil possui vantagem competitiva para produção de biopolímeros, dada a disponibilidade de matérias primas abundantes, acessíveis e com custos de produção (energia, insumos e mão-de-obra) competitivos frente aos países desenvolvidos. Os biopolímeros à base de amido poderiam ser produzidos a partir de mandioca, os polissacarídeos a partir de cana, os polilactatos (PLA) a partir de soro de queijo, a inulina a partir da frutose de citros e os polihidroxialcanoatos (PHX) a partir de cana e soja, entre outros potenciais recursos naturais brasileiros.
- 2) **Estímulo à aplicação da nanotecnologia na agricultura:** Dedicar um maior volume de subsídios ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA), criado em 2006 pela FINEP/MCT/Embrapa e que gerencia, hoje, a Rede de Nanotecnologia para o Agronegócio, integrando laboratórios de 16 Unidades da Embrapa + 12 Universidades. Além de desenvolver boa parte das rotas tecnológicas acima descritas, a ação deste grupo interdisciplinar permite não só elevar tecnologicamente o estado da arte dos processos e

produtos da cadeia produtiva do agronegócio, mas também monitorar a qualidade e produtividade dos mesmos, através da aplicação de nanocircuitos e nanocódigos de barras aos produtos do agronegócio e do desenvolvimento de nanosensores de solos.

- 3) **Estímulo à formação de parcerias Universidade-Indústria:** Essas associações contribuiriam para criar a massa crítica mínima de tecnologia necessária para que as pesquisas possam se conduzir futuramente sem requerer elevados investimentos ou vultosas linhas de fomento, além de promover os canais de distribuição e de colocação dos materiais agroquímicos avançados a custo competitivo no mercado, apoiados em fortes campanhas de marketing institucional.

Há uma lista exaustiva de ações que poderiam ser realizadas e de possíveis órgãos que poderiam ser envolvidos no processo de atendimento aos itens sugeridos pela agenda de PD&I, não sendo possível listar todas as alternativas por questões de espaço. Portanto, segue uma breve lista de idéias que poderiam ser tomadas como base para aprofundamento dos estudos e futuros trabalhos:

- 1) Simplificar parcerias universidade-indústria, anseio reivindicado pelas empresas do setor, que se queixam da burocracia, dos longos prazos e dos custos envolvidos no processo de formação de parcerias. Esta ação poderia envolver não só as universidades, agências de inovação e o SEBRAE, mas também as fundações estaduais e público-privadas de tecnologia e pesquisa.
- 2) Incentivo a congressos, fóruns e encontros nacionais e internacionais sobre defensivos e materiais agroquímicos de apoio.
- 3) Investimentos em novas instalações piloto, modernas e automatizadas, nas Universidades e Centros de Pesquisa público-privados, como exemplo, os institutos da APTA/SP, Embrapa Jaguariúna e outras unidades, Centro de Tecnologia Canaveira, IPT, Centro de Biotecnologia da Amazônia, entre outros (BNDES, Finep, linhas de crédito públicas e privadas).
- 4) Treinamento de profissionais técnicos competentes em nanotecnologia, do nível técnico até o pós-doutorado. Capacitação de Engenheiros Bioquímicos e de Materiais com habilidades técnicas e industriais, para atendimento das estratégias (1) e (2). Os atuais cursos de graduação poderiam sofrer modificação em seu currículo para inclusão de um módulo prático ao final do curso, seguindo um modelo que pudesse ser personalizado de acordo com a característica e a cultura de cada escola. Cursos de extensão e pós-graduação nas Universidades poderiam ser fomentados de forma a privilegiar a publicação de patentes e a transferência de tecnologia pelos grupos de pesquisadores (Ministério da Educação, MCT, CNPq, Capes, Fundações estaduais de pesquisa, universidades).
- 5) Linhas de crédito para aquisição de máquinas e equipamentos para produção dos novos materiais por empresas de menor porte com juros reduzidos e baixos custos de financia-



mento, a prazos mais longos (Finep, BNDES, Bancos públicos e privados, Fundos setoriais)

6.6. Reaproveitamento de rejeitos da atividade mineral e do agronegócio

O agronegócio é uma atividade que gera uma grande quantidade de resíduos, pois a eficiência de aproveitamento das matérias-primas ou insumos necessários para a produção do produto desejado, através dos seus mecanismos característicos de produção, é geralmente baixa.

Estatísticas de 2004 indicam a geração de 470 milhões de toneladas de rejeitos provenientes da atividade mineral e agropecuária no Brasil, considerando palhas, cascas e bagaços de colheita de cana, soja, milho, laranja, mandioca, arroz, café e outras culturas e resíduos de processos de alta escala de produção, como a indústria de carnes, aves e suínos, cervejarias e mineração de ferro e bauxita. Cálculos da Petrobras apontam que os rejeitos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) seriam suficientes para dobrar a produção de álcool no Brasil, com a inclusão de mais de 13 bilhões de litros/ano.

A instituição de programas de PD&I voltados para reaproveitamento de resíduos é estratégica, pois contribuirá para o desenvolvimento de processos agroindustriais que gerem uma quantidade de resíduos menor do que a capacidade de absorção ambiental ou para a busca de um sistema integrado de produção onde os resíduos possam ser reaproveitados no mesmo ciclo produtivo, em novos ciclos ou em ciclos de diferentes produtos. Isto reduz ou elimina o passivo ambiental, diminui despesas com descarte e tratamento e pode gerar novos produtos de alto valor agregado. O resíduo deixa de ter a conotação ambientalmente desfavorável para se transformar, eventualmente, em um rejeito de oportunidade.

Inúmeros órgãos governamentais, produtores, indústrias e a sociedade serão diretamente impactados por novas tecnologias de reprocessamento dos rejeitos e pelos materiais avançados que poderão ser obtidos através dos mesmos; desta forma, considerações relativas aos riscos e vantagens competitivas decorrentes da seleção, logística de coleta e processamento dos rejeitos potencialmente interessantes devem ser colocadas para discussão antes da proposição de programas estratégicos.

Esforços de pesquisa, desenvolvimento e marketing dirigidos à identificação das necessidades do mercado, na mudança da percepção do consumidor, na caracterização, identificação e seleção dos rejeitos mais adequados e no desenvolvimento de processos de transformação sustentáveis e economicamente viáveis podem gerar importantes matérias-primas e produtos finais para que o país

garanta a continuidade da liderança no agronegócio, alcance vantagens competitivas em outros segmentos e inove em novos negócios e aplicações.

- **Cenário.** Falta uma meta comum sobre reprocessamento de rejeitos e inexistente um sistema centralizado ou canal oficial de informação sobre geração de rejeitos agroindustriais no país. As informações hoje disponíveis são de baixa confiabilidade para uma tomada de decisão com relação ao estabelecimento de um programa tecnológico, pois são extremamente pulverizadas devido à falta de comunicação interdisciplinar entre o alto número de agentes do setor. Muitas culturas possuem safras de produção, logo alguns rejeitos precisam ser pré-processados ou estocados por longos períodos antes da sua transformação. Grande parte destes potenciais resíduos se degrada ou perde suas propriedades diferenciadas para a produção de materiais inovadores por falta de silos adequados. A estocagem inadequada dos resíduos propicia formação de odores, proliferação de insetos e outros vetores de doenças, além de gerar efluentes líquidos potencialmente poluidores do solo e águas.
- **Recursos humanos.** O país possui grupos de pesquisa em institutos federais e estaduais (como exemplo, o Centro de Biotecnologia da Amazônia, o Inpa, o IPT/SP, a APTA/SP e o Iapar/PR, entre outros) que atuam em pesquisas voltadas para o reaproveitamento de resíduos da cadeia oleoquímica. Foram também criados INCTs qualificados para suportar pesquisas com rejeitos agroindustriais. O reaproveitamento de resíduos por processos biotecnológicos é estudado por diversos grupos de pesquisa acadêmica no país e pela Embrapa, nas suas unidades Agroindústria Tropical (CE) e de Alimentos (RJ) e Agroenergia (DF).

Embora os pesquisadores do país venham contribuindo para a publicação de artigos em revistas científicas de relevância internacional, ainda assim há um baixo envolvimento da comunidade científica na temática da reciclagem. Deveria ser incentivada uma parceria universidade–indústria também neste setor.

- **Gestão.** Como citado no item Cenário, ainda não há um programa que administre rejeitos no país. As legislações em curso que regem sobre resíduos tiveram, até o presente momento, um foco na proteção ao meio ambiente. Elas determinam que o produtor tenha responsabilidade pelo destino do resíduo, pelo processo de tratamento para redução do potencial poluente (seja próprio ou terceirizado) e pelo descarte final de embalagens e outros itens, porém não versam sobre o reprocessamento ou a comercialização de rejeitos. No caso de rejeitos de processos biotecnológicos, as legislações ainda apresentam controvérsias sobre sua classificação, seu tratamento e suas formas de manipulação e descarte, e limitam a sua possibilidade de reaproveitamento, por definirem que produtos oriundos de processos biotecnológicos não podem ter proteção industrial, exceto quando provindos de microorganismos transgênicos (neste caso, serão protegidos por um prazo de 20 anos, aplicando-se a Lei de Propriedade Industrial).



6.6.1. Agenda estratégica e de PD&I

O reaproveitamento de rejeitos pode apresentar oportunidades de geração de materiais avançados através de seu processamento pelas seguintes rotas tecnológicas:

- 1) **Processos fermentativos:** Grande parte dos rejeitos pode ser reaproveitada com sucesso através da sua fermentação em meio sólido e semi-sólido. Ácidos cítrico e giberélico, amilases, lipases e celulasas, bebidas fermentadas, bioinseticidas, esteróides, lisina, pigmentos e corantes, aromas, alimentos (shoyu e cogumelos), princípios farmacêuticos (penicilina) e combustíveis (etanol) estão entre a gama de produtos produzidos a partir de rejeitos de algas, soja, arroz, chá, café, laranja e outras frutas, fibras de babaçu, sisal e coco verde e resíduos da indústria sucro-álcoolera;
- 2) **Compósitos e nanocompósitos a partir de resíduos animais e minerais e do processamento de fibras vegetais:** argilas, sílica, areia e outros resíduos do processamento de minérios (ferro e especialmente a bauxita) podem ser misturados com látex de borracha natural e outros biopolímeros para produção de compósitos com propriedades mecânicas diferenciadas;
- 3) **Processos de sinterização e de queima controlada de resíduos:** a queima controlada de madeira e cavacos, ossos, bagaços, cascas e palhas de grãos e leguminosas ou escórias de siderúrgicas, além de gerar energia e carvão vegetal, produz matérias-primas passíveis de transformação em materiais avançados e produtos de oportunidade, como sílicas (aditivos para cimentos), gases de pirólise, zeólitos, produção de cimento, porcelanas e cerâmicas especiais;
- 4) **Técnicas avançadas de estocagem e processos mecânicos de transformação dos rejeitos:** a produção de matérias-primas avançadas depende de um correto tratamento dos resíduos, para que os mesmos não percam suas propriedades diferenciadas. No final da cadeia produtiva, o sucesso dependerá não somente da inovação na transformação química ou biológica, mas também de processamentos mecânicos que produzam produtos fortes, resistentes e duráveis, de design elegante e arrojado, práticos para uso e de baixo custo.

O reaproveitamento de rejeitos tem custos elevados, dada a complexidade de seus processos e a necessidade de alto grau de capacitação em infraestrutura e recursos humanos. O retorno de investimentos neste segmento poderá se dar em um prazo mais longo do que um projeto comum, pois pesquisas nesta área requerem em média 5 a 10 anos para gerar resultados concretos. Porém, as perspectivas de sucesso futuro são sólidas e compensam possíveis riscos.

Há uma lista exaustiva de ações que podem ser realizadas e de possíveis órgãos que podem ser envolvidos no processo de atendimento aos itens sugeridos pela agenda de PD&I, não sendo possível listar todas as alternativas por questões de espaço.

Segue uma breve lista de recomendações a serem avaliadas como base para se atingir os objetivos acima listados ou para um futuro aprofundamento dos estudos:

- 1) **Inventários de resíduos:** Hoje não se sabe quanto, onde, quando e como se produz rejeitos e qual o grau de importância e impacto dos mesmos dentro da cadeia do agronegócio para a produção de materiais avançados. Há urgência de um inventário confiável e prático sobre a geração de resíduos agroindustriais no país que disponibilize dados periódicos sobre ocorrência, quantidade e destino dos rejeitos. A preparação e divulgação do inventário devem ocorrer em prazos adequados e confiáveis, em compasso com ações e investimentos de órgãos governamentais estaduais e municipais.
- 2) **Caracterização dos rejeitos:** Rejeitos podem se transformar em subprodutos para alimentação animal ou compósitos inovadores para aplicações médicas, veterinárias, cosméticas ou farmacêuticas; assim, precisam ter sua composição monitorada. Contaminantes devem ser identificados, limites de tolerância devem ser estabelecidos e devem ser desenvolvidos métodos para controle de qualidade. Interações que possam existir com o meio ambiente, o homem, animais e com potenciais substratos precisam ser estudadas. As análises podem ser feitas por profissionais de nível técnico, enquanto que a determinação das interações e estabelecimentos de protocolos demandam profissionais especializados. Sugere-se que os governos estaduais, através de suas fundações, venham a apoiar as escolas técnicas para aprofundamento das capacitações em Química e Biotecnologia, pois uma das dificuldades encontradas pelos centros de pesquisa é a contratação de técnicos qualificados para apoio às suas atividades. Novos cursos técnicos deveriam ser abertos nos estados ou municípios estratégicos para o agronegócio pelo menos até o ano de 2015, para que seja possível haver uma massa crítica mínima de profissionais formada a partir de 2018.
- 3) **Construção de Centrais de Resíduos:** Centrais de Resíduos, a serem construídas o mais próximo possível das culturas produtivas, poderiam pré-classificar, tratar e estocar rejeitos sob condições tecnológicas e de sustentabilidade ótimas para que sejam transformados posteriormente em materiais avançados. Sugere-se avaliar a viabilidade de construção de duas Centrais por Região Geográfica do país até 2020.

Além deste objetivo primordial, as Centrais trariam benefícios indiretos e atenderiam importantes demandas sociais, como a criação de empregos formais e a inclusão econômica de parte da população de baixa renda que hoje sobrevive em condições sociais e de higiene precárias com a exploração informal de rejeitos. A legalização do emprego desses



trabalhadores reduziria os gastos dos governos com práticas assistencialistas e aumentaria suas receitas fiscais, reduzindo a evasão de tributos. No caso das Centrais produzirem energia, pela queima direta e sustentável da biomassa ou do carvão que possa ser produzido através dela, a energia poderia retornar para uso dos moradores ou produtores da comunidade ou ser comercializada para comunidades ou municípios vizinhos, revertendo seus lucros para projetos de infraestrutura e bem-estar comum.

Um modelo organizacional para as Centrais poderia compreender uma parceria entre cooperativas ou grupos de produtores e estados ou municípios (preferencialmente). As Centrais, licenciadas e monitoradas pelas Cias. de Tecnologia e Saneamento Ambiental das Secretarias de Meio Ambiente de cada estado, teriam seu desempenho avaliado através do atendimento de programas de responsabilidade corporativa e metas ambientais a serem estabelecidas pelas associações de produtores e pela sociedade, que fará uso do Ministério Público para a defesa dos seus direitos em caso de transgressões legais.

As associações de produtores que optassem pela criação de uma Central poderiam ter disponíveis linhas de crédito ampliadas em prazos e limites de pagamento, incentivos fiscais, depreciação imediata ou acelerada de equipamentos, desoneração de tributos, oferta de fundos especiais, expansão de seguro agrícola, facilidades de financiamento na aquisição de insumos agrícolas e equipamentos, subvenção pela Lei do Bem e Lei Parceria Empresa ou outros mecanismos de suporte financeiro.

As empresas de base tecnológica interessadas no processamento e transformação dos rejeitos pré-tratados pelas Centrais em materiais avançados poderiam ser estimuladas pelos órgãos governamentais e de fomento a montar suas unidades de produção fisicamente próximas às Centrais e assim desfrutar, além das ofertas de fomento listadas acima, de suporte para capacitação de seus pesquisadores (Bolsas RHAE/CNPq e de Fundações Estaduais de Tecnologia, entre outras). As empresas de logística e transporte poderiam contar com facilidades em empréstimos e suporte para modernização de suas frotas e instalações.

- 4) **Revisão das legislações ambientais:** Com a agregação de valor aos resíduos, a responsabilidade legal precisa se estender aos demais membros da cadeia produtiva que tiverem operações ligadas ao processamento dos resíduos, pois o transformador os estará utilizando como matéria-prima para produção de um novo produto. Portanto se sugere que as legislações sejam revistas para inclusão deste novo conceito legal antes que se institua uma estratégia de PD&I no reaproveitamento de rejeitos (Ministério do Meio Ambiente, MCT, Órgãos de classe, Poder Legislativo)
- 5) **Capacitação de pesquisadores em gestão ambiental e de qualidade:** Pesquisadores e produtores responsáveis pela geração, logística de coleta e estocagem e/ou pelo processamento dos rejeitos necessitarão não só de capacitação técnica, mas também de habilidades de gestão, que poderiam ser adquiridas pelo treinamento como auditores nas principais normas: ISO 9000 (Qualidade), ISO/IEC 17025 (Credenciamento de Laboratórios), ISO

14000 (Gestão de Meio Ambiente) e ISO 14042 (Análise e Impacto do Ciclo de Vida). Essa formação poderia ser facilitada aos interessados por órgãos como o Sebrae.

- 6) **Infraestrutura em máquinas e equipamentos:** Para caracterização dos rejeitos, os laboratórios precisam de instrumentação analítica adequada para análise de poluentes primários, metais pesados e outros elementos de interesse até partes por bilhão, além de investimentos em infraestrutura básica. Os grupos que optarem pela rota de queima controlada ou produção de compósitos cerâmicos ou biopoliméricos necessitarão de microscópios adequados para análise de estruturas nanométricas e equipamentos para medição de propriedades térmicas e mecânicas. Laboratórios que optarem por rotas biotecnológicas precisarão implantar plantas-piloto com reatores fermentativos e diversos equipamentos semi-industriais para operações unitárias de separação. Portanto, linhas de crédito de longo prazo e fomentos para desenvolvimento de fornecedores locais de equipamentos (especialmente bioreatores e fermentadores) seriam de grande valia para o desenvolvimento desta rota tecnológica.
- 7) **Produção de microorganismos específicos:** Seria muito importante também destinar recursos, em especial, para grupos de pesquisa em Engenharia Genética voltados para a produção de microorganismos específicos para os processos biotecnológicos acima citados e para biodigestores (BNDES, Finep, CNPq, bancos estatais e privados, órgãos de fomento nacionais e internacionais).

6.7. Produção de materiais avançados a partir de óleos e gorduras

O processamento de óleos vegetais por diferentes rotas químicas de transformação gera importantes matérias-primas para a indústria química, têxtil, plásticos, cosméticos, tintas e para produção de biocombustíveis (biodiesel e bioquerosene). O Brasil é o segundo maior produtor e processador mundial de soja em grão com uma área plantada de 21 milhões de hectares. Desde 1977 a produção cresce em média 3.2% ao ano. A produção interna em 2008 foi 58,1 milhões de toneladas (28% do mercado mundial) e somente o estado de MT (maior produtor brasileiro) produz 8% de toda a soja mundial. O país é também o segundo exportador de farelo e o segundo produtor e exportador de óleo de soja no mundo. O Brasil mostra, com a soja, economia de escala, administração profissional, usinas de esmagamento e de refino competitivas e, principalmente, tecnologia avançada, após 30 anos de pesquisa no setor e inúmeras parcerias produtor/indústria. Assim como foi conseguido com a soja, o governo vem investindo esforços em outras leguminosas como babaçu, palma, algodão e mamona, para aumento das áreas plantadas de forma sustentável, competitiva e sem ameaçar a integridade das matas nativas. A grande extensão territorial e as variedades de climas e solos, aliadas à diversidade de espécies vegetais do nosso bioma, ampliam as possibilidades brasileiras para a produção economicamente viável destas e de outras espécies que poderão ser usadas como fontes de materiais avançados.



Gorduras animais são insumos para uma extensa cadeia produtiva que engloba sabões e intermediários químicos. Em 2004 a produção mundial foi de 4,1 milhões de toneladas. O Brasil é o segundo produtor mundial neste mercado, com aproximadamente 0,68 milhões de toneladas/ano. Os produtores mundiais estão direcionando suas produções de sebo e banha para produção de biocombustíveis, o que fez o preço do produto duplicar nos mercados internacionais. Hoje a demanda global pelo produto é duas vezes maior do que sua oferta. Estimativas do Grupo Bertin mostram que, se em 2010 forem montadas quatro novas usinas de biodiesel no Brasil a partir de gordura animal, com capacidade produtiva de 100 mil ton cada, haverá o total desabastecimento de matéria-prima no mercado interno para a produção de glicerina, estearina e oleína.

O processamento de óleos e gorduras compreende um dos possíveis destinos a serem tomados pela Química para obtenção de polímeros e especialidades, em se considerando o provável desabastecimento de petróleo nos próximos séculos e o decorrente aumento de preço dos derivados petroquímicos de 1ª e 2ª geração. Portanto países que estabeleçam políticas de incentivo à produção de oleaginosas e ao desenvolvimento de produtos e processos inovadores, de alta eficiência e de baixo custo a partir de óleos e gorduras terão importante vantagem estratégica para garantir a continuidade da sua competitividade industrial e da liderança no agronegócio.

- **Cenário.** O destino de óleos e gorduras para materiais avançados depende das ofertas e demandas do mercado interno, do preço do próprio insumo quando consumido como alimento e do custo da energia e combustíveis, havendo um canibalismo entre essas aplicações. Não existe uma política de estoques reguladores para garantir o suprimento contínuo e preços competitivos de óleos e gorduras para aplicações químicas. A velocidade de colheita e processamento dos grãos é alta, gerando óleos que não possuem qualidade suficiente para produção de materiais avançados, que necessitam de óleos com processos de refino e purificação mais rigorosos. A maioria dos processos de transformação em matérias-primas, intermediários e materiais avançados ainda possui menor eficiência comparativamente aos processos petroquímicos. Óleos mais puros e maior produtividade podem ser conseguidos com o uso de espécies geneticamente modificadas ou transgênicas, porém estas espécies são mais caras, seu fornecimento é controlado e há restrições e resistências ao uso destes híbridos em algumas regiões do país.
- **Recursos humanos.** A Rede de Estudos em Oleoquímica integra grupos de pesquisa representativos do setor em catálise, bioprocessos e físico-química de óleos, transesterificação, oleoquímica aplicada, melhoramento genético das espécies, manejo e alimentação animal e espécies nativas.

Pesquisas com gorduras animais vêm sido feitas pela UnB, Faenquil-USP (craqueamento catalítico e biocatalítico) e Viçosa (enriquecimento de rações animais). Por questões de

propriedade intelectual e baixa viabilidade econômica das pesquisas, a indústria costuma se afastar dos Institutos de Pesquisas e Universidades e geralmente possui grupos próprios de pesquisa, próximos aos produtores de óleos.

- **Gestão.** Programas governamentais suportam a produção, subsidiam o mercado, provêm investimentos, regulamentam qualidade e determinam diretrizes para a cadeia produtiva, como a Lei 11.097/2005, o Plano Nacional de Agroenergia (introdução na matriz energética do Brasil de biocombustíveis produzidos de oleaginosas e do reaproveitamento de resíduos e dejetos) e o Progeren (subsídio a empresas que gerem empregos na cadeia produtiva do setor), porém existem poucos planos voltados exclusivamente para melhorias tecnológicas, com exceção de esforços em curso para produção de óleo e materiais avançados pelo processamento da mamona (Desenvolvimento de novos materiais poliméricos e insumos químicos a partir do óleo de mamona e seus derivados - UFPR/Tecpar/MCT/Finep/FNDCT; Projeto de Cooperação Técnico-Científica Brasil-Índia – Embrapa/Indian Council of Agricultural Research)

6.7.1. Agenda estratégica e de PD&I

A produção de materiais avançados a partir de óleos, ceras e gorduras é uma consequência não só do processamento destes insumos por novas rotas tecnológicas, mas também do estudo de novos potenciais de diferenciação, como exemplo, a identificação de novas espécies oleaginosas e a posterior geração de óleos com características especiais e do desenvolvimento de novas aplicações nos mercados consumidores. Portanto, a seguinte agenda de PD&I poderia ser aplicada:

- 1) **Investigação da processabilidade de espécies nativas:** o bioma brasileiro, especialmente na Amazônia e no Cerrado, é pródigo em espécies que fornecem óleos e ceras cujos princípios ativos garantem aos mesmos propriedades diferenciadas para produção de materiais avançados. A Tabela 6-2 mostra alguns exemplos. Muitas espécies ainda são desconhecidas ou não exploradas comercialmente e, por questões de safra e processabilidade, seus produtos podem ser oferecidos a preços altos, tornando seu custo inviável para desenvolvimento de novas aplicações. Pesquisas aplicadas para minimização destas dificuldades reverteriam esta questão de custo-benefício.



Tabela 6-2: Exemplos de espécies produtoras de óleos diferenciados e suas aplicações

Óleo ou cera	Aplicação
Açaí	Antioxidante, antienvhecimento, loções pós-sol
Andiroba	Repelente de insetos, cicatrizante, controle de celulite, solvente de outros óleos e gorduras
Buriti	Crems para recuperação da elasticidade de pele, regeneração de tecidos biológicos, produção de vitaminas A e E
Butiá	Alimentação, produção de plásticos
Babaçu	Produção de sabonetes e sabões especiais, estimulante do sistema imunológico humano, pomadas e cremes farmacêuticos, óleo e creme para massagens
Castanha do Pará	Alimentação, lubrificantes industriais, saboaria, xampus
Castanha de caju	Produção de resinas epóxi, isolante elétrico, plastificante, revelador de fotos, biocida, vermífugo veterinário, secante para tintas e vernizes, esmaltes, líquidos abrasivos
Óleo ou cera	Aplicação
Carnaúba	Ceras para madeiras, filmes plásticos e fotográficos, vernizes impermeabilizantes, surfactantes, fármacos, revestimento e cobertura de alimentos
Coco	Alimentos funcionais, substituto de manteiga de cacau em chocolates, estimulador do sistema imunológico, regularizador de funções intestinais, fármacos termogênicos, cremes emolientes e de antienvhecimento da pele
Copaíba	Pomadas, loções e remédios para acne, xampus para caspa, biocida, fixador para perfumes
Cupuaçu	Crems emolientes e hidratantes, bases farmacêuticas, produtos para bebês, tratamento de úlceras
Jojoba	Sabões, cremes, xampus para crescimento de cabelos, óleos anti-inflamatórios e para massagens
Macaúba	Alimentação, fluidos de corte e usinagem, sabões especiais
Murumuru	Emulsões farmacêuticas, xampus, sabonetes, hidratantes

- 2) **Decomposição catalítica de óleos:** este processo ocorre em presença de zeólitas ou outros catalisadores e produz hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, que podem ser reduzidos para BTX (benzeno, tolueno e xileno) através da ciclização das olefinas e parafinas ou pela quebra dos metil, etil e butilbenzenos formados. O domínio da tecnologia de catálise e de decomposição é estratégico, pois, com uma redução na oferta de petróleo, dispõe-se de uma fonte renovável e ambientalmente sustentável de monômeros. Investimentos po-

deriam ser centralizados na pesquisa de catalisadores seletivos (maior produtividade em aromáticos) e em processos com menor consumo de energia.

- 3) **Melhoramento genético:** além de genótipos mais resistentes, mais produtivos por hectare plantado e melhor adaptados aos solos e climas regionais, reduzindo o custo do óleo como insumo para materiais avançados e para biocombustíveis, o melhoramento genético de algumas espécies poderá eliminar ou reduzir substâncias tóxicas ou alergênicas, aumentar o teor de ácidos graxos monoinsaturados, princípios ativos e outras substâncias de interesse nos óleos, controlar a sua cor, viscosidade e outras propriedades físicas e possibilitar um melhor reaproveitamento dos subprodutos do processamento dos grãos (tortas e fibras).
- 4) **Processos de tratamento e refino de óleos com novos solventes:** investigação de opções para substituição da hexana (principal solvente de refino de óleos vegetais) por solventes de baixo custo e mínimo impacto ambiental, permitindo que sejam obtidos óleos ultra-puros economicamente viáveis para uso como matéria-prima para bioplásticos.

Há uma lista exaustiva de ações que podem ser realizadas e de possíveis órgãos que podem ser envolvidos no processo de atendimento aos itens sugeridos pela agenda de PD&I, não sendo possível listar todas as alternativas por questões de espaço. Portanto, segue uma breve lista de recomendações a serem avaliadas como base para se atingir os objetivos acima listados ou para um futuro aprofundamento dos estudos:

- 1) Subsídio e estímulo a linhas e grupos de pesquisa em universidades e institutos de pesquisa com capacitação em Química Orgânica, Química de Produtos Naturais, Farmácia e Bioquímica e, principalmente, em Engenharia Química, voltados para desenvolvimento dos produtos e processos listados. Poderiam ser destinados fomentos também para projetos de Marketing voltados ao desenvolvimento de novos nichos e mercados. Assim, projetos viáveis poderiam ser apresentados em curto prazo por todos os grupos acima citados e por novos grupos;
- 2) Subsídio e estímulo a linhas e grupos de pesquisa voltados para desenvolvimento genético de sementes e híbridos com características desejadas para produção de materiais avançados, privilegiando oleaginosas não-alimentícias ou de baixo consumo alimentar (mamona, babaçu, palma, pinhão-manso, girassol e amendoim). Também poderia ser criado um programa governamental de incentivo para disponibilizar estas espécies à classe produtora;
- 3) Incentivo à pesquisa de processos de reaproveitamento de óleos e gorduras residuais originários de cozinhas domésticas e industriais, processamento industrial de suínos, aves e bovinos e outras fontes como insumos para biocombustíveis e materiais avançados. Esse projeto deve ser interdisciplinar, com a participação de órgãos públicos de governo, seguindo as recomendações propostas no Tema 3;
- 4) Subsídios, linhas de empréstimo em longo prazo, incentivos fiscais e outros mecanismos



de fomento financeiro poderiam ser fornecidos às empresas do final da cadeia produtiva da oleoquímica, como os produtores de biopolímeros, para modernizar suas unidades produtivas e possibilitar a aquisição, estoque e transformação, de acordo com a disponibilidade logística, dos óleos nobres em materiais avançados (Finep, BNDES, bancos privados e estatais, fundações estaduais).

6.8. Produção de materiais avançados a partir de argilas

As argilas são uma ampla e diversificada classe de matérias-primas de origem mineral cuja importância cresceu nos últimos anos, por comporem a base de produtos nanotecnológicos inovadores. Ao mesmo tempo, continuam sendo usadas em suas aplicações industriais tradicionais, onde foram observadas inovações incrementais importantes, tais como a produção de cerâmicas especiais.

O uso crescente das argilas em materiais avançados é semelhante ao que ocorre com talcos, micas, silicatos, sílica, calcário, gesso e outras matérias-primas obtidas de minerais abundantes. Essas novas aplicações são motivadas pelos ganhos tecnológicos e econômicos obtidos pelas indústrias que os utilizam em seus processos e produtos, dentro de novos paradigmas de conhecimento e de *design* de produtos e processos. No lado da oferta (produtores e beneficiadores de minerais), as inovações são estimuladas pelas possibilidades de agregação de valor a minerais abundantes e baratos. Na demanda, os fatores de estímulo são os ganhos tecnológicos, econômicos e ambientais advindos do uso destas matérias-primas.

Argilas constituem hoje a principal fonte de nanopartículas lamelares usadas na indústria. Sua disponibilidade, segurança ecotoxicológica e elevada razão de aspecto motivam sua incorporação em numerosos tipos de nanocompósitos poliméricos, hoje parte de muitas cadeias produtivas. Estão amplamente disponíveis por toda a superfície terrestre, sendo extraídas de minas e jazidas subterâneas ou a céu aberto. Vários compostos minerais existentes na argila bruta afetam suas propriedades e podem reduzir seu valor, porém existem exemplos de argilas positivamente diferenciadas nas suas propriedades e no seu preço, devido exatamente à presença de substâncias que são, a rigor, impurezas da sua composição cristalográfica e/ou presentes na massa mineral. Por isso, a agregação de valor às argilas dependerá muito da sua caracterização face às necessidades do mercado e do seu beneficiamento, que deverá ser feito tendo em vista as aplicações e os mercados nos quais elas serão utilizadas.¹²

¹² SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de Argilas. Vol. 3, 2nd, São Paulo, Edgard Blücher, 1089 p., 1989.

A Tabela 6-3 mostra o consumo aparente dos principais minerais comercializados no Brasil no ano de 2007 e como se encaixam as argilas, podendo-se observar grandes diferenças de valor unitário entre minerais brutos e beneficiados.

Tabela 6-3: Estatísticas sobre os principais minerais comercializados no Brasil - 2007¹³

Mineral	Reservas BR (10 ³ t)	Produção (10 ³ t)	Importação (10 ³ t)	Exportação (10 ³ t)	Consumo Aparente (10 ³ t)	Preço médio (FOB, US\$/t)
Argila (Bentonita)	41.400	Bruta: 329,6 Beneficiada: 238,7	Bruta: 221,1 Beneficiada: 6,7	Bruta: 9,5 Beneficiada: -	Bruta: 541,2 Beneficiada: 245,4	Bruta: 7,75 Moída seca: 125,70 Ativada: 186,50
Caulim	7.300.000	Beneficiado: 2.527	Beneficiado: 14,4	Beneficiado: 2.364	Beneficiado: 177,4	Beneficiado: 128,40
Talco	106.900	Beneficiado: 401,2	Beneficiado: 7,2	Beneficiado: 8,2	Beneficiado: 400,2	Beneficiado: 247,00
Mica	5.000	Bruta: 4,0 Beneficiada: 2,3	Bruta: 1,3 Beneficiada: 1,0	Bruta: 1,7 Beneficiada: 2,2	Bruta: 3,6 Beneficiada: 1,1	Bruta: 353,35 Em pó/ beneficiada: 855,40

O valor intrínseco das argilas pode ser medido por estatísticas do Departamento de Comércio dos Estados Unidos, que mostram que o preço médio das bentonitas modificadas – importadas – alcança praticamente o dobro do preço das bentonitas exportadas.¹⁴ No mercado internacional, argilas modificadas chegam a ser oferecidas por mais de US\$ 10/kg para pequenos consumidores industriais.

Bentonitas são as argilas mais importantes do grupo, devido a suas diferentes aplicações nas indústrias de tintas, adesivos, revestimentos, papel e cosméticos, além de serem amplamente consumidas pelas empresas produtoras de petróleo. As bentonitas produzidas no Brasil são em sua grande maioria cálcicas, portanto o Brasil é um dos maiores importadores mundiais de argilas sódicas, entre elas, a montmorillonita. A montmorillonita é a principal bentonita purificada, podendo ser direta-

¹³ Compêndio dos itens Bentonita, Talco, Mica e Caulim. Sumário Mineral Brasileiro, 2008 - DNPM

¹⁴ <http://www.nrcan.gc.ca/smm-mms/busi-indu/cmy-amc/2008revu/htm-com/cla-arg-eng.htm>



mente obtida de algumas jazidas, e é aplicada principalmente na fabricação de nanocompósitos e de cosméticos de última geração.

As principais reservas de bentonita conhecidas no Brasil estão no Paraná (40,3% do volume brasileiro), na Paraíba (24,9%) e em São Paulo (27,3%).¹⁵ Pressões ambientais em São Paulo e no Paraná, restringindo a mineração, fazem com que os estados do Nordeste (especialmente a Paraíba) detenham 92,4% da produção nacional. Em 2007, os investimentos na mineração de bentonita brasileira alcançaram R\$ 4,98 milhões, dos quais 86,5% foram aplicados na Bahia, 9,2% em São Paulo e 4,3% na Paraíba. Os investimentos previstos para os próximos três anos na mineração e beneficiamento da bentonita no Brasil estão previstos em R\$ 6 milhões.

A indústria petrolífera é o principal mercado consumidor de bentonita *in natura* no país, seguida pelo setor metalúrgico (pelotização, fundição e siderurgia). Estas principais aplicações do mineral, em consonância com as possibilidades oferecidas pela exploração da camada de pré-sal e a expansão econômica brasileira e mundial, estão gerando demandas crescentes ou constantes por bentonita. As demandas também aumentam gradualmente na indústria de construção civil, cosméticos, filtros e produtos químicos. Novas aplicações farmacêuticas vêm sendo desenvolvidas para bentonitas purificadas, voltadas para absorção de água e gorduras, funcionando como coadjuvantes em processos de emagrecimento. Toda a produção nacional de bentonita bruta, não destinada ao beneficiamento, é integralmente absorvida pelo mercado interno. Em 2005, os preços médios internos para a bentonita ativada e para a argila seca e moída foram respectivamente R\$ 288,42/ton e R\$ 209,58/ton.⁶ Como ilustração, o preço médio da bentonita importada pelos EUA em 2008 foi US\$ 217/ton.¹⁶

O nível de beneficiamento e sofisticação dos processos industriais de modificação de bentonitas no Brasil tem tido altos e baixos. Já houve produção local de esmectita organofílica, que alcançou preços bastante elevados no mercado, através de bentonitas oriundas da Paraíba e de Campina Grande.¹⁷ Atualmente há produtores de bentonitas organofílicas no Brasil que utilizam argilas de São Paulo, da Paraíba e da Argentina. O recente interesse em materiais nanoestruturados levou empresas químicas de grande porte (Oxiteno, Quattor, Braskem, Itatex) e grupos de pesquisa acadêmicos a voltarem a se interessar pelo assunto.

Além das bentonitas, há no Brasil uma importante atividade de exploração de caulins, mica, talco e outros minerais usados industrialmente que podem ser trabalhados e refinados para aplicações em materiais avançados. Ainda que as aplicações destes minerais possam parecer pouco sofisticadas na

¹⁵ Sumário Mineral Brasileiro 2008. Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério da Indústria e Comércio, Brasil.

¹⁶ <http://www.nrcan.gc.ca/smm-mms/busi-indu/cmy-amc/2008revu/htm-com/cla-arg-eng.htm>

¹⁷ COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. S.; SANTOS, H. S. Argilas especiais: Argilas quimicamente modificadas – Uma revisão. Química Nova, Vol. 30, p.p. 1282-1294, 2007.

perspectiva de insumos para materiais avançados, atendem a necessidades regionais, como o uso de argila calcinada para suprir a carência de brita na pavimentação de estradas, especialmente na Amazônia.¹⁸ Porém, a disseminação do uso de argilas em materiais nanoestruturados acabou criando uma demanda paralela por estes materiais, como os caulins purificados e organicamente modificados, que são comercializados para a produção de nanocompósitos por até US\$ 40,00/Kg, sendo classificados como especialidades químicas ou produtos de química fina.

6.8.1. Agenda estratégica e de PD&I

O desenvolvimento de tecnologias de produção de materiais avançados baseadas em argilas e outros minerais devidamente beneficiados e nanoestruturados atenderá simultaneamente a importantes objetivos de políticas públicas:

- 1) Incremento da inovação e da competitividade de diversos setores industriais pela introdução de novos materiais estruturais e funcionais (embalagens alimentícias, equipamentos para transporte e construção civil, bens de uso pessoal e lazer, entre outros);
- 2) Valorização de matérias-primas abundantes e facilmente exploráveis no país e perspectiva de crescimento econômico e sofisticação do portfólio das empresas mineradoras, com a oferta de novos derivados de minerais com alto valor agregado;
- 3) Atendimento de necessidades e carências regionais de materiais avançados para uso como matérias-primas para projetos de infraestrutura básica, a preços compatíveis com as possibilidades do país.

A Tabela 6-4 mostra exemplos de uma ampla gama de produtos nanotecnológicos baseados em argilas introduzidos no mercado mundial nos últimos anos.

No Brasil, uma pesquisa na Plataforma Lattes, usando as palavras-chave *argila*, *talco*, *caulim*, *montmorillonita*, *bentonita*, *compósitos* e *nanocompósitos*, irá demonstrar a existência de um grande número de grupos de pesquisa acadêmicos e em institutos públicos e de economia mista, atuando individualmente – e em vários exemplos em conjunto com a indústria - no desenvolvimento de compósitos, nanocompósitos e outros materiais avançados à base de argilas e outros minerais em todo o país, com resultados bastante expressivos e produção corrente de materiais nanoestruturados baseados em argilas.

¹⁸ Revista Pesquisa FAPESP, Novembro/2007. Em: www.revistapesquisa.fapesp.br/?art=187&bd=4&pg=1&lg=, acesso em 23/1/2007.



A empresa de base tecnológica Orbys desenvolveu e testa no mercado nanocompósitos à base de argila para vários setores industriais (esportes, calçados, peças, entre outros) usando tecnologia desenvolvida na Unicamp.¹⁹ Rolos de borracha modificada com argilas foram também desenvolvidos pela empresa para processamento de produtos e componentes de uma diferente aplicação industrial, aumentando a eficiência do processo e a qualidade dos produtos finais. Esse caso é muito interessante porque ilustra que os ganhos da inovação em materiais nanotecnológicos produzem não só benefícios diretos, mas também em cascata, geralmente não previstos *a priori*.

A Plásticos Mueller produz compostos argila-polímero para cabos, pára-choques e painéis. O Carro-Conceito da Fiat, produzido em seu Centro de Pesquisa Automotiva de Betim, incorpora em seu painel e em sua carroceria diversos compósitos termoformados com argila e plásticos semi-rígidos. O Boticário tem esfoliantes faciais e corporais com argilas quimicamente tratadas.

Há uma lista exaustiva de ações que podem ser realizadas e de possíveis órgãos que podem ser envolvidos no processo de atendimento aos itens sugeridos pela agenda de PD&I, não sendo possível listar todas as alternativas por questões de espaço. Portanto, segue uma breve lista a ser avaliada como base para se atingir os objetivos acima listados ou para futuro aprofundamento dos estudos:

- 1) Abertura de linhas de pesquisa voltadas para o desenvolvimento de processos de extração, purificação e refino e de modificação ou transformação química ou mecânica de argilas em insumos diferenciados para materiais avançados. Mercados potencialmente promissores: cosméticos, farmacêutica e compósitos (estruturais e para embalagens). Fomentos poderiam ser concentrados preferencialmente em grupos de pesquisa em mineralogia, físico-química de superfícies e química inorgânica (CNPQ, ministérios, universidades e institutos de pesquisas);
- 2) Investimentos na base da cadeia produtiva: incentivar o empreendedorismo de pequenos mineradores, que poderão produzir localmente baixos volumes de argilas especiais de alto valor agregado, substituindo importações (ex.: montmorillonita). Poderia ser feito através de linhas de crédito a médio/longo prazo e financiamento para aquisição e modernização de equipamentos e instalações (Finep, BNDES, Fundos setoriais).
- 3) Capacitação tecnológica: os produtores poderiam ser capacitados em técnicas de mineração por intermédio de incubadoras ou do Sebrae. Para apoiá-los, há necessidade de formação de pessoal especializado em empreendedorismo e tecnologia mineral e da extensão da capacitação profissional e técnica de engenheiros de minas e de materiais, geólogos e químicos (universidades, Ministério da Educação, CNPQ – 2010/2015).

¹⁹ VALADARES, L. F. et al. PI-0301193-3, INPI, 2003.

Tabela 6-4: Exemplos de nanocompósitos poliméricos com argilas hoje comercializados no mercado global.²⁰

Produto	Característica frente aos polímeros sem a carga nanométrica	Aplicações	Fabricante
Nanocompósitos com nylon	Melhora no módulo de elasticidade, tensão na ruptura, temperatura de trabalho, propriedade de barreira.	Peças automotivas, (proteção do motor, tanque de combustível) embalagens.	Bayer, Honeywell, Polymer RTP Co., Toyota Motors Ube, Unitika
Nanocompósitos com poliolefinas	Melhora no módulo de elasticidade, tensão na ruptura, menos frágil, mais facilmente reciclado, propaga menos a chama.	Degrau de acesso para o Chevrolet Safári e Astro Van, cobertura de cabos metálicos.	Basell, Blackhawk Automotives Plastic Inc., General Motors, Gitto Global Corp., Southern Clay Products
Nano-MXD6-M9 (PET)	Elevada propriedade de barreira a gases.	Frascos de suco ou cerveja, filmes multicamada, containers	Mitsubishi Gas Chemical Company
Durethan KU2-2601 (Nylon 6)	Mais duro, reduz o fluxo de oxigênio no polímero, propriedades de barreira.	Coating para papel e filmes poliméricos	Bayer
Aegis TM OX (Nylon)	Redução do fluxo de oxigênio no polímero	Garrafas de cerveja, embalagens flexíveis para alimentos	Honeywell Polymer
Forte nanocomposite (Polipropileno)	Melhor resistência a impacto e maior temperatura de trabalho.	Aplicações automotivas	Nobel Polymer
NanoMax (Masterbach para mistura com termoplásticos)	Retardante de chama e melhoria de resistência ao impacto	Diversas	AMCOL International Corporation
Nanolok NP3075 (cloropreno), NT3078 (borracha nitrílica), PT 3575 (resina poliéster)	Propriedade de barreira para substratos elastoméricos	Barreira a gases	InMat

²⁰ Basell: www.basell.com; Bayer: www.bayer.com; Blackhawk Automotive Plastics: www.blackhawkplastics.com; Foster Corporation: www.fostercomp.com; General Motors: www.gm.com; Gitto Global Corporation: www.gitto-global.com; Honeywell Polymer: www.honeywell.com; Mitsubishi Gas Chemical Company: www.mgc.co.jp; Noble Polymer: www.noblepolymers.com; RTP Company: www.rtpcompany.com; Southern Clay Products: www.nanoclay.com; Toyota Motors: www.toyota.com; Ube: www.ube.com; Unitika: www.unitika.co.jp.



6.9. Produção de materiais avançados a partir de fibras naturais

Fibras naturais são alternativas baratas, abundantes e ambientalmente corretas para substituição de fibras sintéticas em diversas aplicações, como a incorporação a termoplásticos como polipropileno, polietileno, poliestireno, PVC e poliamidas para criar compósitos destinados a usos industriais. Legislações de países da União Européia e do Japão estabelecem que, até 2015, 90% das peças de todos os automóveis produzidos em seus territórios deverão ser recicláveis, impulsionando assim pesquisas que busquem substituir fibras sintéticas por fibras naturais na estrutura de veículos. Projeções da ONU (2008) indicam que o consumo de móveis provenientes de fontes sustentáveis (entre elas, fibras naturais como juta, sisal e agave) dobrará nos próximos dez anos em todo o mundo, especialmente na Europa, substituindo móveis produzidos à base de madeira. Países de elevado potencial agrícola e biodiversidade em seu bioma, como o Brasil, através da exploração sustentável destes recursos, têm vantagem competitiva e enorme oportunidade de se projetar como importantes participantes no mercado mundial de produtos têxteis, compósitos e materiais avançados.

Desde 2005, o mercado interno brasileiro de fibras naturais e seus compósitos cresce 5,5% ao ano em volume, substituindo fibras sintéticas em aplicações tradicionais ou ocupando novos espaços e dimensões em setores onde tecnologias e materiais avançados progressivamente se tornam fatores determinantes de sucesso, como a agricultura, o transporte de mercadorias e a proteção ambiental. Patentes estão depositadas em todo o mundo referentes ao uso de fibras naturais para: geotêxteis, controle de erosão de solos, fabricação de rações e brinquedos para animais domésticos, compensados, isolamento térmico e acústico, vasos ornamentais e xaxins, cordas, reforço de solas de calçados, substratos para aquicultura e hidroponia, bases para reflorestamento, móveis, telhas e telas de sombreamento para estufas e culturas *in-door*, chapas laminadas, autopeças, compósitos com resinas termoplásticas e termofixas, capachos, estrados e colchões, embalagens, absorção de derramamentos de líquidos e efluentes, produção de carvão vegetal, biojóias e artesanato.

A elasticidade dos mercados consumidores finais das fibras naturais e seus compósitos, no segmento industrial ou venda direta ao consumidor, é dirigida pela função, beleza, qualidade, apelo de preservação e conservação ambiental, produção sustentável e *design* do produto. Pesquisas de comportamento de mercado mostram que o consumidor de fibras naturais é exigente e não se importa em pagar um pouco mais por um produto, desde que seja exclusivo e atenda suas necessidades. Portanto há outros mercados, além do setor industrial e do agronegócio, que se beneficiariam enormemente do crescimento do negócio de fibras naturais, como equipamentos para o esporte, turismo e lazer. O consumidor moderno preocupa-se com o entretenimento e também com a preservação ambiental, sustentabilidade, diversidade cultural e com o patrimônio histórico, humano e ar-

quitetônico. O desenvolvimento de um programa tecnológico e mercadológico que interaja com as comunidades extratoras e processadoras das fibras é um estímulo ao conhecimento do bioma, biodiversidade, folclore, tradições e características regionais do nosso país, além de proporcionar uma excelente imagem do Brasil e de sua riqueza e belezas naturais aos visitantes estrangeiros, ajudando a divulgar a nossa identidade cultural e os nossos programas de preservação ambiental e inclusão social. Vínculos mais sólidos com as comunidades incentivarão a instalação de serviços de suporte (hotelaria, restaurantes, lojas de artesanato, serviços de transporte), gerando renda e empregos.

- **Cenário.** Comparativamente aos países asiáticos e principalmente à China, líder do estado da arte no processamento de fibras naturais, o Brasil não possui uma cadeia produtiva competitiva. O cultivo ou extração das espécies matrizes e o processamento das mesmas pelas comunidades para produção das fibras, se localizam afastados dos principais mercados consumidores: nos extremos territoriais do País, fronteiras agrícolas ou limites das florestas ou de reservas ambientais, como agriculturas familiares ou de pequena escala. O negócio mais organizado envolve um arranjo produtivo local ligado à produção e comércio de sisal na Bahia.

Aos poucos o Brasil avança em pesquisa, processamento das fibras e desenvolvimento de novas aplicações, mas os grupos realmente ativos no setor ainda se compõem de comunidades produtoras de artesanato e empresas pioneiras na responsabilidade social.

- **Recursos humanos.** Na identificação de espécies nativas e na extração e processamento das fibras, grande parte dos conhecimentos é rudimentar e não documentada, devido ao baixo grau de formação da mão-de-obra envolvida nesta atividade. Já no tratamento das fibras e produção de compósitos e materiais avançados, existem grupos técnicos de alta produtividade tecnológica atuando com excelente interação com a indústria, como o Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais/UFSCar, USP/São Carlos (IQ), Engenharia de Materiais/Unesp, Embrapa (Instrumentação Agropecuária e Cerrados), Inpa, IPT/SP, Unicamp (IQ, FEQ), UFRJ (EQ), Senai Têxteis e várias Escolas de Arquitetura e Design Industrial (PUC/RJ, FAU/SP), entre outros, além dos Centros de Pesquisa das montadoras de automóveis e de diversas empresas privadas atuando em construção civil, móveis, químicos, têxteis e autopeças.
- **Gestão.** A rede governamental de serviços e de apoio tecnológico na forma de “Casas de Agricultura” para os produtores de fibras é bastante restrita, devido à grande maioria dos arranjos produtivos estar localizada nas regiões de floresta. Projetos de gestão bem-sucedidos no desenvolvimento de fibras têm sido realizados na sua maior parte por empresas privadas, que intermedeiam e suprem economicamente as associações e cooperativas de produtores e os grupos acadêmicos de pesquisas, para que sejam produzidas fibras com as características desejadas para aplicações nobres. Mesmo com restrições financeiras,



ONGs têm tido grandes sucessos na transferência de conhecimentos do caboclo para o pesquisador e na aplicação de tecnologias, por conhecer profundamente características culturais e regionais das comunidades.

6.9.1. Agenda estratégica e de PD&I

O sucesso da transformação de uma fibra natural em um insumo avançado dependerá do conhecimento de suas características estruturais e mecânicas e das necessidades finais do compósito, para que seja corretamente escolhida a espécie a ser explorada. Dependerá igualmente da fibra resistir aos agressivos processos de tratamento químico e mecânico sem perder suas características diferenciadas e ainda assim poder ser oferecida a um preço competitivo comparativamente às fibras sintéticas. As futuras pesquisas tecnológicas devem se concentrar em fibras leves e de baixas densidades, além de resistentes, voltadas especialmente para compósitos destinados para construção civil ou para fabricação de peças aeronáuticas e automotivas.

Entre as necessidades tecnológicas para alcance da Agenda de PD&I em fibras naturais, pode-se listar:

- 1) **Aumento da qualidade das fibras brutas:** Identificação das melhores partes da planta para a extração da fibra e para criar processos de extração que tenham baixo impacto mecânico sobre a mesma, de modo a minimizar quebras de comprimento, manter sua orientação preferencial e não modificar demasiadamente sua superfície, além de garantir uma menor quantidade de perdas, bom rendimento no processamento e o envio de menor quantidade de resíduos para descarte.
- 2) **Melhora da adesão fibra/matriz:** A adesão de fibras às suas matrizes em compósitos avançados pode ser melhorada pelo tratamento químico das fibras. Entender o mecanismo e as influências causadas pelas fibras na cristalinidade da matriz durante a formação de um compósito e pesquisar novos agentes de adesão/acoplamento permitirá a criação de compósitos combinados, fundidos ou moldados a outros materiais que não polímeros, como vidros, cerâmicas e metais.
- 3) **Amaciamento:** Processos e produtos que possam amaciar a superfície e remover lignina e gomas sem gasto elevado de água poderão possibilitar o uso de fibras vegetais mais rígidas e naturalmente abrasivas (como o rami, cânhamo e o sisal) em compósitos avançados.

Entre as técnicas sustentáveis e de baixo impacto ambiental, prioriza-se o amaciamento enzimático. Além de diminuir as fraturas da fibra durante o processamento, reduz a quantidade de operações, de energia, de mão-de-obra e de tempo necessário para a processabilidade e aumenta a vida útil dos equipamentos de moagem, corte e extrusão utilizados na transformação.

- 4) **Resistência à chama e ao calor:** Esforços devem ser direcionados para desenvolvimento de aditivos antioxidantes, anti-chama e anti-degradação para possibilitar blendas avançadas fibra/polímero resistentes a altas temperaturas, ampliando o leque de aplicações, especialmente em construção civil.
- 5) **Encapsulamento:** Agentes impermeabilizantes adéquam a capacidade de absorção de água e reduzem a variação dimensional dos compósitos causada por intumescimento excessivo das fibras. Os processos e agentes de barreira disponíveis atualmente não são viáveis, pois as substâncias usadas para tratar a superfície das fibras são de alto custo e algumas não são biodegradáveis. Qualquer avanço tecnológico neste sentido viabilizaria novas aplicações dentro de mercados importantes, como o de embalagens. O encapsulamento oferece também possibilidades de incorporação de substâncias químicas ou farmacêuticas na superfície e no corpo oco das fibras através de nanocápsulas de liberação controlada de conteúdo, oferecendo uma miríade de possibilidades de inovação.
- 6) **Tingimento:** Fibras vegetais são naturalmente opacas e têm dificuldade de tingimento, não sendo passíveis de uso em algumas aplicações avançadas. Mediante o desenvolvimento de processos e produtos específicos, a fibra poderá receber um verniz de brilho e se tornar lustrosa, laminada, ser refratária à luz ou holográfica, além de poder ser tingida em diferentes tons.

Investimentos em empresas de base tecnológica e em projetos envolvendo compósitos e materiais avançados produzidos a partir de fibras naturais são promissores, considerando a grande probabilidade de concretização dos projetos e um baixo tempo de retorno do capital aplicado. A cadeia produtiva agregará valor graças aos novos conhecimentos tecnológicos e a qualificação profissional da mão-de-obra, com redução dos custos de produção das fibras devido ao aumento de escala e de produtividade. Como consequência, os preços dos compósitos e materiais avançados poderão ser significativamente superiores aos preços das fibras ou intermediários.

Há uma lista exaustiva de ações que podem ser realizadas e de possíveis órgãos que podem ser envolvidos no processo de atendimento aos itens sugeridos pela agenda de PD&I, não sendo possível listar todas as alternativas por questões de espaço. Portanto, segue uma breve lista a ser avaliada como base para se atingir os objetivos acima listados ou para futuro aprofundamento dos estudos:

- 1) Abertura de linhas de pesquisa para identificação de espécies alternativas ou melhoramento genético de espécies conhecidas. Possibilidades: Cipós amazônicos, palmeiras, árvores produtoras de painas, gramíneas do Pantanal e dos rios amazônicos, sisal, rami, juta, coco, bambu, agave, abacá, henequém, cânhamo, linho, algodão, curauá, fibra de abacaxi, fibra de bananeira, fibra de carnaúba, fibras de proteínas (oriundas da soja, leite, amendoim, milho e algodão), fibras de amido, seda e fibras de penas de aves (universidades públicas e privadas, INCTs, centros de pesquisa, Embrapa).



- 2) Capacitação técnica dos arranjos produtivos locais. Possibilitaria a redução das perdas no processo de produção de fibras, aumentando a qualidade das mesmas como insumos para materiais avançados. Sugere-se que seja diretamente realizada nas comunidades que cultivam e processam as espécies fibrosas, através de oficinas, cursos, atividades de campo, encontros, suporte de informação. Áreas estratégicas: Norte do PR (rami), Vale do Ribeira/SP (banana), BA e PB (sisal), PA e litoral dos estados do NE (coco), Valença/BA (piaçava), PA e AM (juta, malva e curauá), Mata Atlântica, SC a ES (bambu) (MEC, Sebrae, ONGs, agências de inovação, universidades, empresas privadas, consultores e expertises do setor).
- 3) Painéis tecnológicos sobre fibras naturais. A serem realizados a cada dois anos, com iniciativa governamental, para discussão do estado da arte e de alternativas tecnológicas, envolvendo as comunidades de produtores, acadêmica, tecnológica e empresarial (Mapa, MCT, produtores do setor, iniciativa privada, ICTs, universidades, agências de inovação, empresas privadas).
- 4) Criação de uma linha de pesquisa específica para desenvolvimento de compostos avançados à base de fibras naturais para geotêxteis e construção civil, segmentos de atual grande interesse da indústria (CNPQ, fundações estaduais de pesquisa).
- 5) Linhas de crédito voltadas para aquisição de infraestrutura e equipamentos avançados de laboratório (microscópios óticos e eletrônicos, máquinas de ensaio mecânico universal, injetoras, extrusoras, equipamentos para análise térmica, entre outros) e para capacitação de mão-de-obra técnica (nível médio e superior) para estabelecer normas e métodos para avaliação da composição, da qualidade e do desempenho de fibras naturais em compósitos avançados (Finep, BNDES, bancos, Fundos Setoriais, CNPQ, fundações estaduais de pesquisa).

6.10. Produção de materiais avançados a partir de borracha de látex natural

A borracha natural é obtida pela coagulação do látex que exsuda do tronco de determinadas espécies vegetais, após uma incisão ordenada da casca das mesmas. Embora seja grande o número de espécies que exsudem látex, somente algumas produzem quantidade e qualidade suficientes para exploração em bases econômicas, sendo a principal delas a seringueira, ou *Hevea brasiliensis*. Essa árvore é originalmente nativa da região amazônica e somente pode ser cultivada nas regiões tropicais do planeta, pois depende de um regime muito específico de chuvas e temperatura.

O Brasil foi o principal produtor mundial do látex de borracha natural até 1930. Para que a espécie pudesse ser salva do *mal-das-folhas*, exemplares de seringueira foram introduzidos em São Paulo, onde o fungo ainda não havia chegado. A partir destes exemplares, iniciou-se a primeira cultura de seringais

em escala no país. Por volta de 1960, o *mal-das-folhas* chegou ao Sudeste, e teve início um processo de desenvolvimento tecnológico de modo a tornar a seringueira resistente a esta e outras doenças. No início dos anos 90, a produção dos estados amazônicos representava menos de 50% da produção nacional, perdendo a liderança da produção de borracha natural para São Paulo. O desenvolvimento da tecnologia de clonagem de seringueiras permitiu criar espécies mais resistentes a doenças, com maior produtividade, longevidade e capacidade de adaptação a diferentes climas e solos, expandindo a cultura para outros estados brasileiros, entre eles Espírito Santo, Bahia e Mato Grosso.

Somos um dos maiores importadores mundiais de borracha natural, sendo o produto do agronegócio com o segundo maior peso em nossa balança comercial. O Brasil importou 220 mil toneladas de borracha natural em 2007, que representou um gasto de U\$ 1 bilhão para as contas do país. A demanda de borracha, tanto natural quanto sintética, cresce em paralelo ao PIB; logo, quando cresce a economia, cresce também o consumo de borracha em todos os setores industriais. O plantio de seringueira e produção de látex no Brasil cresce a uma taxa anual de 4,85%, enquanto o consumo interno de borracha cresce a 6% ao ano. O consumo anual brasileiro de borracha natural atualmente está na casa de 340 mil ton (65% importada) e, em 12 anos (2020), deverá atingir 650 mil toneladas, onde 69% (450 mil toneladas) serão importadas, caso não seja previsto nenhum programa de incentivo à produção.

A cadeia produtiva da borracha natural é constituída pelos produtores e extratores (remoção do látex virgem da seringueira e beneficiamento da borracha natural), fornecedores de insumos e serviços (máquinas e equipamentos, produtos químicos para coagulação e conservação do látex, viveiros de mudas, agrônomos), indústrias de transformação leve (artefatos) e pesada (pneus) e distribuidores (atacadistas, varejistas, recauchutagens, borracharias).

A indústria de pneus é responsável por 75% do consumo mundial e também brasileiro de borracha natural. As companhias de pneus deverão investir U\$ 2 bilhões entre 2010 e 2015 na ampliação das suas plantas e instalação de novas fábricas no Brasil. Isso reforça a importância dessa indústria no consumo do elastômero natural. Os 25% restantes são usados pela indústria de artefatos leves, composta por mais de 1.200 empresas no Brasil, que compreende diversos segmentos consumidores de materiais avançados: hospitalar (cateteres, próteses, tubos, preservativos, luvas cirúrgicas e pele artificial), brinquedos (bexigas, bonecos, máscaras), vestuário (tecidos emborrachados, meias, elásticos), calçados (solados, adesivos), construção civil (pisos e revestimentos, placas, vedantes), autopeças navais, automotivas e de aviação (câmaras de ar, batedores, coxins, guarnições, retentores, correias



transportadoras), maquinário agrícola e industrial (revestimentos internos de cilindros, artigos prensados e peças em geral), eletrodomésticos e eletrônicos (bases de circuitos).

As condições de mercado apresentadas acima mostram a necessidade de que se reapresentem novos programas estratégicos de estímulo à heveicultura para que o Brasil possa, ao menos, suprir sua própria demanda de látex natural para pneus e materiais avançados e reconquiste sua posição de produtor estratégico no mercado internacional. Seguem aspectos sobre o mercado de borracha natural no país para tomada de decisões sobre sustentabilidade, tecnologia e materiais avançados:

- **Cenário.** A borracha natural apresenta resiliência, elasticidade, flexibilidade, resistência à abrasão, ao impacto e à corrosão, fácil adesão a tecidos e ao aço, impermeabilidade a líquidos e gases, propriedades elétricas isolantes, alta capacidade de dispersar calor e maleabilidade a baixas temperaturas. Estas propriedades são únicas devido à sua estrutura intrínseca, sua alta massa molar e à presença no látex de componentes minoritários (proteínas, carboidratos, lipídios e minerais). É um material estratégico para materiais avançados, pois, em determinadas aplicações, não pode ser substituída pelas borrachas sintéticas (estireno-butadieno, butílica, cloropreno e poli-isopreno), produzidas a partir de monômeros extraídos do petróleo.
 - A *Hevea brasiliensis* é uma espécie apta à recomposição de mata nativa e para formação de Reservas Legais em São Paulo, de acordo com a Lei no 12.927, de 23/04/2008. No cultivo intensivo ou reflorestamento de áreas degradadas usando seringueira, decorre a proteção do solo e dos mananciais, já que a longevidade de um plantio é de aproximadamente 30 anos;
 - A árvore é excelente fixadora de carbono, sequestrando em média 1.020 toneladas de CO₂ equivalente por hectare, contribuindo para reduzir a geração dos gases de efeito estufa e aquecimento global. O metabolismo da seringueira fixa micronutrientes no solo (ex.: zinco) e melhora sua produtividade. Folhas e galhos decíduos na época da seca (Jun/Ago, SP) se acumulam no solo, gerando matéria orgânica que pode ser transformada em fertilizante orgânico pelo produtor;
 - Além das aplicações descritas para o látex no item 8a, a madeira da seringueira pode ser comercialmente explorada e tem tido destaque na produção de móveis, MDF e para produção de celulose e papel. Suas floradas (Set/Out - SP) são excelentes para apicultura, tendo o mel propriedades terapêuticas e grande quantidade de açúcares e sais minerais. Suas sementes (Mar/Mai - SP) podem ser prensadas, gerando óleos secantes para a indústria de tintas e vernizes e torta para rações e alimentação animal.
 - Outras culturas, como pupunha, abacaxi, mamão, cacau, café, milho, soja e amendoim, podem ser plantadas intercaladas com as carreiras de seringueiras. Estes siste-

mas agroflorestais (consórcios) otimizam o uso da terra e resultam em renda extra ao produtor, além de cobrirem as despesas operacionais de formação do seringal;

- **Recursos humanos.** Grupos acadêmicos e institutos de pesquisa públicos e privados têm atuado no aumento da produtividade, melhoria da qualidade do látex e desenvolvimento de materiais avançados à base de borracha natural no Brasil com alta produtividade científica. Deve-se destacar com louvor o progresso e o sucesso obtido nos desenvolvimentos de clones de alta produtividade e na aclimação dos mesmos a diferentes climas e solos realizado pelos centros de pesquisas de produtoras de elastômeros, como a Michelin e a Pirelli, e o importante apoio das associações de produtores como o ITB, Apabor, Anip, Abiarb e a ABTB para a PD&I dentro do setor.
- **Gestão.** Os seguintes programas voltados para a cadeia produtiva de borracha natural estão atualmente em curso no Brasil: Projeto Borracha Natural Brasileira, Programa Seringueira/IAC, Projeto Lupa, Projeto Tecbor, Programa Nacional da Borracha Natural (Câmara Setorial da Cadeia Produtiva da Borracha Natural/Mapa), Plano Heveicultura/SP (Câmara Setorial de Borracha Natural, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de SP), Programa Probores/ES, Programa Seringueira Cohevea/Embrapa e Projeto Madeira de Seringueira/SP (Instituto Florestal, Secretaria Estadual do Meio Ambiente).

6.10.1. Agenda estratégica e de PD&I

O látex de borracha natural tem um grande potencial de uso como insumo avançado para as seguintes aplicações tecnológicas:

- 1) **Compósitos e nanocompósitos preparados com argilas, sílica e outros minerais, celulose e amido:** busca de novas cargas orgânicas e minerais, agentes anti-chama, modificadores de viscosidade e aditivos que sejam compatíveis com a borracha natural para preparação de compósitos.
- 2) **Copolimerizações de látex de borracha natural com monômeros naturais ou sintéticos:** exploração de novas possibilidades de borrachas e polímeros biodegradáveis.
- 3) **Microbaterias biológicas:** pilares microscópicos contendo vírus auto-organizados sobre placas micrométricas de borracha natural, formando eletrodos que integrarão dispositivos biomecânicos, implantes médicos, sensores para monitoramento da saúde em tempo real e até microlaboratórios, os *labs-on-a-chip*.
- 4) **Sensores vibrotácteis:** géis de silicone inseridos por baixo de uma pele artificial de borracha natural. Quando um objeto escorrega sobre a pele, as vibrações na mesma são transmitidas através do gel para sensores acústicos instalados nos "ossos" artificiais de um membro biônico, feito de acrílico ou outro polímero rígido.



- 5) **Circuitos eletrônicos flexíveis:** circuitos na forma de fitas ultrafinas montados sobre uma pastilha de silício, que é removida e substituída por um microfilme de borracha natural. Ao se puxar e retirar a borracha, os circuitos eletrônicos ficam grudados sob ela. Liberando-se o stress da borracha, a fita de circuitos eletrônicos assume uma forma bem definida de ondas, denominada eletrônica elástica de alto desempenho. Esta tecnologia será usada em roupas e acessórios para transmissão de informações.
- 6) **Géis antienvelhecimento:** proteínas extraídas da seiva bruta da *Hevea brasiliensis* diluem sinais do tempo sobre a pele, sendo capazes de restabelecer o colágeno e elasticidade da mesma.
- 7) **Próteses de órgãos:** próteses de esôfago foram desenvolvidas com látex de seringueira e implantadas em animais, sem rejeição. O látex estimula o crescimento de vasos sanguíneos e de tecidos e ocorre reconstituição total ou parcial do esôfago.
- 8) **Embalagens:** compósitos biodegradáveis de látex natural, amido e fibras celulósicas podem substituir termoplásticos em embalagens, bandejas, vasos e substratos para plantas.
- 9) **Construção civil e transporte:** borracha natural está sendo usada em blendas e misturas com concreto e asfaltos para aumentar a resistência dos mesmos quando submetidos ao stress. Exemplos bem sucedidos de uso são estradas de rodagem e suportes de trilhos ferroviários.
- 10) **Aplicações têxteis:** tecidos emborrachados com borracha natural e outros produtos químicos se tornam totalmente impermeáveis sem perder a leveza e a flexibilidade, destinados a estofados, malas, mochilas, bolsas e autopeças automotivas, navais e de aviação.
- 11) **Adesivos:** suspensões aquosas de micro ou nanopartículas poliméricas de borracha natural proporcionam novos adesivos biodegradáveis e economicamente viáveis, com excelente poder de cobertura e formação de filmes, substituindo adesivos à base de solventes.
- 12) **Encauchados:** consiste na pré-vulcanização artesanal do látex nativo e na adição ao mesmo de fibras vegetais curtas, corantes naturais ou outros substratos biosustentáveis, formando um composto homogêneo que pode ser usado para fabricar bolsas, produtos artesanais e outros objetos. As composições geradas não são coaguladas, prensadas ou calandradas e não secam em estufa, ao contrário do processo industrial. O apelo de biosustentabilidade e de organicidade destes produtos artesanais é enorme e as peças produzidas têm colocação certa em mercados de alto poder aquisitivo no Brasil e no exterior.
- 13) **Recuperação de pneus e artefatos à base de borracha natural para uso em pavimentação e misturas asfálticas:** o uso da borracha em pavimentação asfáltica foi aprovado em 1999, por resolução do Conama e o reaproveitamento de pneus inservíveis (sem condições de rodagem ou de reforma) pode criar uma excelente oportunidade industrial dentro do

conceito de reciclagem e sustentabilidade no pós-consumo.

Para atender esta Agenda de PD&I, projetos de investimento em desenvolvimento tecnológico dentro da cadeia produtiva da borracha natural poderiam ser dirigidos para as seguintes necessidades:

- 1) Melhoria genética e biotecnologia de clonagem: resistência a doenças e intempéries, redução da alergenicidade do látex, adaptação local de clones importados, aclimação dos clones em novas regiões do país, aumento da produtividade e longevidade dos clones e redução da mortalidade e perdas;
- 2) Investigação de novas fontes de látex: testes com maniçoba e outras espécies, escolha de espécies e clones apropriados que incorporem micronutrientes específicos ao látex para um determinado tipo de aplicação;
- 3) Melhoria da qualidade do látex extraído e da borracha produzida: correta frequência de sangria, novos processos de estimulação gasosa com compostos de baixa toxicidade e pouco impacto ambiental, novos tipos de corte da casca da seringueira, processos de coagulação mais eficientes, novas técnicas de secagem e de cura para aumentar a qualidade da borracha seca;
- 4) Boas práticas agrícolas: irrigação adequada do solo, frequências corretas de adubação, pulverização contra insetos, fungos e prevenção de doenças, consórcios com outras culturas;
- 5) Aplicações para os rejeitos da seringueira: Mel, Óleo, Torta, Biomassa, Celulose, Biocombustíveis, Móveis e compensados, Papel e Celulose.

Entre 2010 e 2012 haverá uma flutuação importante na produção interna de borracha natural, pois a grande maioria dos novos seringais plantados entre 2003 e 2005 estará iniciando sua sangria. Hoje os atuais tempos de teste de campo são pelo menos de sete anos, pois para teste é necessário aguardar o início da produção dos seringais. Considerando este prazo, investimentos em novos clones e em novas fontes de látex a serem realizados em 2012, após as sangrias, somente terão produção economicamente viável e retorno financeiro a partir de 2019. Portanto, programas de PD&I a serem desenvolvidos para melhoras no látex para uso em materiais avançados precisariam ser rapidamente implantados para que possamos proteger a cadeia produtiva e o setor industrial e de consumo do *déficit* mundial de borracha previsto para essa data.

A questão do gerenciamento dos seringais e da aquisição das mudas e clones é de extrema importância, devido aos altos preços que determinados clones e seus látexes poderão obter em função, respectivamente, das suas resistências às intempéries e doenças e as suas características físico-químicas para uso em materiais avançados. Sugere-se uma política de descontos na aquisição dos clones



de acordo com as características de cada região e as necessidades de cada produtor. Investimentos para aumento do número de viveiros também são muito bem-vindos para suportar a produção de mudas para a ampliação dos seringais.

É essencial a formação de um banco de dados contendo propriedades químicas dos látexes dos diversos clones existentes no país para que possam ser corretamente selecionados para uso como insumos para materiais e compósitos avançados. Para isso há necessidade de normatização das análises de padronização do látex e das borrachas. O desenvolvimento de novos métodos analíticos e de avaliação de teores de sacarose, tióis, fósforo ou outras substâncias de interesse poderia minimizar o tempo de resposta para aprovação de um novo clone e para seleção de um determinado látex.

6.11. Conclusão

Os recentes avanços na nanotecnologia, biotecnologia e na caracterização de materiais criam um vasto leque de possibilidades de desenvolvimento de materiais avançados e da aplicação de novos processos produtivos, baseados no uso de matérias-primas provenientes do agronegócio e da exploração de minérios abundantes.

Os resultados obtidos até este momento e as muitas outras possibilidades de utilização maciça destas matérias-primas formam uma rota atraente de desenvolvimento tecnológico, que é convergente com outras importantes diretrizes de políticas públicas: a ampliação de cadeias produtivas e as consequentes gerações de renda e de empregos, os crescimentos na oferta de alimentos e de energia necessários para a inclusão social, a mitigação de efeitos antrópicos sobre as mudanças climáticas globais e a adoção de padrões produtivos sustentáveis que contribuam para a melhoria do meio ambiente, como os da “química verde”.

Materiais avançados fabricados com matérias-primas agrícolas e minerais abundantes são, de forma similar, importantes oportunidades econômicas crescentemente exploradas por muitas das maiores organizações econômicas globais, criando novos modelos tecnológicos, de processo e de ciclo de vida dos produtos.

A posição brasileira para a exploração destas oportunidades é muito vantajosa, dada a capacidade brasileira de inovação no agronegócio (plantio e indústrias de transformação), exemplificada pelos es-

forços e programas voltados para produção e exploração do álcool de cana e do papel de eucalipto, que são duas revoluções inovadoras criadas no Brasil, porém que trouxeram impactos mundiais.

Alguns dos resultados obtidos são surpreendentes perante o estado da arte da ciência atual e provocam mudanças de paradigmas científicos, em um movimento de realimentação que privilegia os cientistas brasileiros e lhes dá novas oportunidades de criação, traduzidas em inovações importantes.

Este processo deve ser fomentado por políticas públicas explícitas e bem formuladas. Estas devem adotar estratégias horizontais, com impacto sobre o conjunto das pessoas e das organizações relevantes e também estratégias verticais, focalizadas em produtos ou cadeias produtivas específicos. Este documento apresenta propostas dos dois tipos, escolhidas dentro de um cenário muito amplo e validadas por um processo de consulta do CGEE a um grupo representativo de pesquisadores que atuam na área de materiais.

As oito propostas apresentadas neste estudo não exaurem e não cobrem todas as possibilidades visualizadas, portanto podem ser estendidas para outras cadeias produtivas, especialmente para aquelas com as quais existe uma sinergia natural (energia, meio ambiente, saúde e transportes, entre outras). Entretanto, representam situações de prospectiva ambiciosa, uma vez que se apóiam em um vigoroso lastro de realizações, infraestrutura de PD&I, ativos produtivos e recursos humanos qualificados para um amplo espectro de atividades, desde a pesquisa básica até a comercialização em ampla escala do novo material.

Finalmente, é preciso lembrar que políticas públicas produzem resultados quando são aplicadas em ambientes propícios e terrenos férteis. Documentos governamentais recentes, sendo um deles o Programa Nacional dos Direitos Humanos (PNDH-3), têm evidenciado uma preocupação excessiva e um tanto quanto ilógica quanto aos impactos da nanotecnologia e biotecnologia sobre a sociedade. Essa inquietação, caso venha a ser transformada em ações, poderá ter um efeito destrutivo sobre qualquer política de inovação e de desenvolvimento científico e tecnológico, incluindo as propostas e estratégias sugeridas neste documento.

6.11.1. Bases de dados consultadas

- CGEE. Dados Estratégicos sobre Tecnologias Emergentes de Aproveitamento Sustentável de Biomassa e de Recursos Naturais e a Inovação em Materiais Avançados deles Derivados. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.



- CGEE. Materiais Avançados para Aplicações Ambientais. Estudo prospectivo. Fase I, 2007.
- CGEE. Materiais Avançados para Aplicações Fotônicas. Estudo Prospectivo. Fase I, 2008.
- CGEE. Materiais Avançados para Aplicações Tribológicas. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.
- CGEE. Materiais Avançados para a Defesa e Segurança. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.
- CGEE. Materiais Avançados para a Geração e Armazenamento de Energia. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.
- CGEE. Materiais Avançados para o Setor Espacial. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.
- CGEE. Estudo Prospectivo de Materiais Avançados, Relatório de Perspectivas - Fase II, 2008.
- CGEE. Biopolímeros e Intermediários Químicos. 2009.
- PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
- MMA - Ministério do Meio Ambiente
- MME – Ministério das Minas e Energia
- Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
- PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
- PACTI - Plano de Ação de Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Nacional (2007-2010)
- PADCT III - Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CNPq - Plataformas Lattes / Carlos Chagas
- CNPq – INCT
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
- CNPS – Centro Nacional de Pesquisa de Solos (EMBRAPA Solos)
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (ex-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)
- EMBRAPA - em seus vários centros e grupos de pesquisa: Instrumentação, Cerrados, Fruticultura, etc.
- ABIQUIM

- FAPESP
- BNDES
- FINEP
- SEBRAE
- Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo
- Instituto UNIEMP
- ABMR&A – Associação Brasileira de Marketing Rural e do Agronegócio
- ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
- ABAL – Associação Brasileira do Alumínio
- AGROCONSULT
- ALCOA
- AMA – Associação dos Misturadores de Adubos do Brasil
- ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos
- ANDEF – Associação Nacional de Defesa Vegetal
- APL – Arranjos Produtivos Locais
- DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
- IBRAFOS – Instituto Brasileiro do Fosfato
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
- IFA – International Fertilizer Association
- International Plant Nutrition Institute (ex-POTAFOS, Ass. Brasileira para Pesquisa da Potassa e Fosfatados)
- Instituto Aço Brasil (ex-Instituto Brasileiro de Siderurgia)
- MOSAIC
- SEPED – Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento
- SETEC – Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
- SIACAN – Sindicato da Indústria de Adubos e Corretivos Agrícolas do Nordeste
- SIACESP – Sindicato das Indústrias de Adubos e Corretivos do Estado de São Paulo
- SIARGS – Sindicato da Indústria de Adubos do Rio Grande do Sul
- SINDAC – Sindicato das Indústrias de Adubos e Corretivos Agrícolas do Estado de Minas Gerais
- SINDIADUBOS – Sindicato da Indústria de Adubos e Corretivos Agrícolas do Estado do Paraná
- SINPRIFERT - Sindicato Nacional da Indústria de Matérias-Primas para Fertilizantes



- SRB – Sociedade Rural Brasileira
- VALE S.A.
- YARA INTERNATIONAL
- ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais: www.abiove.com.br
- ABOISSA - www.aboissa.com.br
- ACSOJA - www.acsoja.org.ar
- AGROPALMA- www.agropalma.com.br
- AOAC - Association of Official Analytical Chemists - www.aoac.org
- AOCS - American Oil Chemists Society: www.aocs.org
- American Soybean Association: www.soygrowers.com
- Argentine Oil Industry Chamber (CIARA): www.ciaracec.com.ar
- Associação Nacional dos Exportadores de Cereais (ANEC): www.anec.com.br
- Campestre: www.campestre.com.br
- Canadian Oilseed Processors Association: www.copaonline.net
- Canadian Soybean Exporters Association: www.canadiansoybeans.com
- CATI-Secretaria da Agricultura: www.cati.sp.gov.br/Cati/tecnologias/oleaginosas/ma-mona_al2002.php
- Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA)
- EMPAER/MT – Empresa de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural do Estado de Mato Grosso
- EU Oil and Protein Meal Industry (FEDIOL): www.fediol.be
- The Federation of Oils, Seeds and Fats Associations: www.fosfa.org
- IAC/APTA – Instituto Agronômico de Campinas: www.iac.sp.gov.br
- IB/APTA – Instituto Biológico: www.biológico.sp.gov.br
- IEA – Instituto de Economia Agrícola do Estado de SP: www.iea.sp.gov.br
- INCAPER – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural: www.incaper.es.gov.br
- International Association of Seed Crushers: www.iasc-oils.org
- International Soybean Program: <http://intsoy.nsrl.uiuc.edu>
- Journal of Oil Palm Research (formerly known as ELAEIS): <http://jopr.mpob.gov.my>
- QUALISOY: www.qualisoy.com
- Projeto LUPA – Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agrícola (SP): www.cati.sp.gov.br/projetolupa

- The Solvent Extractors' Association of India: www.seaofindia.com
- The Soy 20/20 Project: www.soy2020.ca
- SENAR/FAESP – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural / Federação da Agricultura (SP): www.faespsenar.com.br
- Soybean Processors Association of India (SOPA): www.sopa.org
- StratSoy Project: www.stratsoy.uiuc.edu
- United Soybean Board: www.soybean.org
- US National Institute of Oilseed Products: www.niop.org
- US National Oilseed Processors Association: www.nopa.org
- US National Sunflower Association: www.sunflowernsa.com
- US Soybean Export Council: www.ussoyexports.org
- ABIARB/SINDIBOR – Associação Brasileira das Indústrias de Artefatos de Borracha / Sindicato das Indústrias de Artefatos de Borracha do Estado de SP – www.borracha.com.br
- ABTB – Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha – www.abtb.com.br
- ANFAB – Associação Nacional dos Fabricantes de Artefatos de Borracha – www.anfab.org.br
- ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – www.anip.com
- APABOR – Associação Paulista dos Produtores e Beneficiadores de Borracha – www.apabor.org.br
- Câmara Setorial da Borracha Natural do Estado de SP - www.codeagro.sp.gov.br/camaras_setoriais/
- Câmara Setorial da Borracha Natural do Ministério da Agricultura – www.agricultura.gov.br
- CEPEC/CEPLAC – Centro de Pesquisas do Cacau/Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - www.ceplac.gov.br
- Comissão de Heveicultura da Federação da Agricultura do ES – www.faes.org.br
- Diário Oficial do Estado de SP, Vol. 118, no 76, 24/04/2008 – www.imprensaoficial.com.br
- Embaixada da Índia no Brasil, Notícias da Índia, 15/08/2008 – www.indianembassy.org.br
- EMPAER/MT – Empresa de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural do Estado de Mato Grosso
- Grupo Braslátex – www.braslatex.com.br
- Grupo Hevea Brasil – www.heveabrasil.com
- Grupo Polifer – www.grupopolifer/agricola
- IAC/APTA – Instituto Agrônomo de Campinas – www.iac.sp.gov.br



- IB/APTA – Instituto Biológico – www.biologico.sp.gov.br
- IDAF – Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Estado do Espírito Santo - www.idaf.es.gov.br
- IEA – Instituto de Economia Agrícola do Estado de SP – www.iea.sp.gov.br
- INCAPER – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - www.incaper.es.gov.br
- IRSG – International Rubber Study Group - www.rubberstudy.com
- ITEB – Instituto Tecnológico da Borracha – www.iteb.org.br
- PROBORES/PEDEAG – Projeto Integrado de Produção de Borracha Natural (ES) / Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura Capixaba: www.es.gov.br/site/files/arquivos/documento/pedeagppt.ppt
- Plantações Michelin da Bahia – www.michelin-hevea.com
- Programa MT Floresta – SEDER/MT – Secretaria de Desenvolvimento Rural do Estado de Mato Grosso
- Projeto Borracha Natural Brasileira – www.borrachanatural.agr.br
- Projeto TECBOR - Tecnologia Alternativa na Prod. de Borracha e Artefatos na Amazônia: www.lateq.unb.br
- SENAR/FAESP – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural / Federação da Agricultura (SP): www.faespsenar.com.br/
- Seringueira – www.seringueira.com

Referências

Fertilizantes e Materiais Agroquímicos Avançados

- ARAKI, K. – Estratégia supramolecular para a nanotecnologia. *Química Nova*, Vol. 30, nº6, 1484-1490, 2007.
- CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. O uso de inibidor de urease para aumentar a eficiência da uréia. Palestra proferida no IPNI (International Plant Nutrition Institute), 2007.
Em: [www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/\\$webindex/article=C721E675032572BB006B9AD737626817](http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/$webindex/article=C721E675032572BB006B9AD737626817)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação dos solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FEDER, G.; JUST, R. E.; ZILBERMAN, D. Adoption of Agricultural Innovations in Developing Countries: A Survey. *Economic Development and Cultural Change*, Vol. 33, No. 2 (Jan. 1985), pp. 255-298, The University of Chicago Press.
- GIRARDI, E. A.; MOURÃO FILHO, F. A. A. Emprego de fertilizantes de liberação lenta na formação de pomares de citros. *Laranja*, v.24, n.2, p.507-518, Cordeirópolis, 2003.
- GOUVÊA, S. P. – A instrumentação agropecuária: soluções tecnológicas para o agronegócio. Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos/SP, Julho 2007.
- KULAIF, Y. A Indústria de Fertilizantes Fosfatados no Brasil: Perfil Empresarial e Distribuição Regional. Em: http://www.ige.unicamp.br/site/publicacoes/161/LIVRO_Perf_Empres_Fertil_YK.pdf
- LABORATÓRIO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM JORNALISMO - UNICAMP. Pesquisador desenvolve material biodegradável usando plastificante e polímeros naturais. 12/Dez/2005. Em: www.labjor.unicamp.br/midiaciencia/article.php3?id_article=105.
- LARA CABEZAS, W. A. R.; SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de uréia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2331-2342, 2008.
- LOPES, A. S.; da SILVA, C. A. P. Reservas de Fosfatos e Produção de Fertilizantes Fosfatados no Brasil e no Mundo. Palestra realizada na ANDA, 2003.
- MUKHOPADHYAY, S. S.; PARSHAD, V. R.; GILL, I. S. Nanoscience and Nano-Technology: Cracking Prodigal Farming. Department of Soils, Punjab Agricultural University, India. April 29th 2009.
- PATENTE PI0803212-2A2. Processo de concentração de minérios de apatita. Publicada em 24/11/2009, pertencente à Fosfértil.



- POLÍMEROS - O futuro dos plásticos: biodegradáveis e fotodegradáveis. Polímeros. Vol.13, nº4, São Carlos, Out/Dez 2003.
- REVISTA INOVAÇÃO UNICAMP. PIPE: Pequenas que inovam - PHB Industrial. 30/Out/2006. Em: www.inovacao.unicamp.br/pipe/report/061030-phb.shtml.
- ROSA, D. S.; FRANCO, B. L. M.; CALIL, M. R. Biodegradabilidade e Propriedades Mecânicas de Novas Misturas Poliméricas. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 11, nº 2, p. 82-88, 2001.
- SCIENCE AND DEVELOPMENT NETWORK. India looks to nanotechnology to boost agriculture. Em: www.scidev.net/en/news/india-looks-to-nanotechnology-to-boost-agriculture.html, May 2008.
- SENGIK, E.; KIEHL J. C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos. R. Bras. Ci. Solo, 19:455-461, 1995.
- da SILVEIRA, M. L.; de SOUZA LIMA, F. M. da R. O uso de pó de rocha fosfática para o desenvolvimento da agricultura familiar no Semi-Árido brasileiro. Embrapa Solos, Julho/2006. Em: www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XV_jic_2007/Maira_Leao_Francisco_Mariano.pdf
- TRENKEL, M. E. Improving fertilizer use efficiency: controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997. 151 p.

Uso de Rejeitos da Atividade Mineral e do Agronegócio

- ABDULLAH, A. L.; TENDERDY, R. P.; MURTHY, V. G. Optimization of solid substrate fermentation of wheat straw. Biotechnol. Bioeng., 27, pp.20-27, 1985.
- ALCOA Sustainability Highlights 2006, disponível em www.alcoa.com
- Alumínio para Futuras Gerações: A Indústria Brasileira do Alumínio e o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em www.abal.org.br
- AQUARONE, E.; BORZANI, W.; LIMA, U. A. Biotecnologia: tópicos de microbiologia industrial. v.2. São Paulo: E. Blucher, 1990.
- AOAC, Association of Official Analytical Chemists, 1984. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 14ªed. Arlington: AOAC, 500p
- AURIA, R.; MORALES, M.; VILLEGAS, E.; REVAH, S. Influence of mold growth on the pressure drop in aerated solid state fermentor. Biotechnol. Bioeng., 41, pp.1007-1013, 1993.
- BARRIOS-GONZÁLEZ, J.; TOMASINI, A.; VINIEGRA-GONZÁLEZ, J.; LÓPEZ, J. Penicillin production by solid state fermentation. Biotechnol. Lett., 10 (11), pp.793-798, 1988.

- BORGES, C. D.; CHIM, J. F.; LEITÃO, A. M.; PEREIRA, E; LUVIELMO, M. M. Produção de Suco de Abacaxi Obtido a Partir dos Resíduos da Indústria Conserveira. Boletim CEPPA, 22 (1), pp.23-34, 2004.
- BOUÇAS, C. Cresce a demanda por sebo bovino para a produção de biocombustível. Eletrosul, Gestor Digital de Informações, disponível em www.eletrosul.gov.br
- BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 358, 29 de abril de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2005.
- BRASIL, ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 306, 07 de dezembro de 2004.
- BRASIL, PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Prestação de contas da Presidência da República, item Agronegócio, 2008. Disponível em www.cgu.gov.br/Publicacoes/PrestacaoContasPresidente/2008/ParteV/5.2.pdf
- BRAVO, C. E. C.; CARVALHO, E. P.; SCHWAN, R. F.; GÓMEZ, R. J. H. C.; PILON, L. Determinação de Condições Ideais para Produção de Poligalacturonase por *Kluyveromyces Marxianus*. Ciênc. Agrotec., 24 (Edição Especial), pp.137-152, 2000.
- BRAVO, O.; FERRER, A.; AIELLO, C.; LEDESMA, A.; DÁVILA, M. Growth of *Chaetomium cellulolyticum* in solid-state fermentation of sugar cane bagasse treated with alkali water at several liquid/solid ratios. Biotechnol. Lett., 16 (8), pp.865-870, 1994.
- CANAKCI, M. The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. Bioresource Technology, 98, pp.183-190, 2007.
- COELHO, M. A. Z. Aproveitamento de Resíduos Agroindustriais: Produção de Enzimas a Partir da Casca de Coco Verde. Boletim CEPPA, 19 (1), pp. 3342, 2001.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. Biomassa para Energia. Editora UNICAMP, 2007. Disponível em www.feagri.unicamp.br/energia/biomassaenergia
- DEMAJORIVIC, J. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos: as novas prioridades. Revista de Adm. de Empresas, 35 (3), pp. 88-93, 1995.
- DESGRANGES, C. Biomass estimation in solid state fermentation. I. Manual biochemical methods. Appl. Microbiol. Biotechnol., 35, pp.200-205, 1991a.
- DESGRANGES, C. Biomass estimation in solid state fermentation. II. On-line measurements. Appl. Microbiol. Biotechnol., 35, pp.206-209, 1991b.
- DUEÑAS, R.; TENDERDY, R.P.; GUTIERREZ-CORREA, M. Cellulase production by mixed fungi in solid-substrate fermentation. World J. Microbiol. Biotechnol., 11, pp.333-337, 1995.



- DURAND, A.; CHEREAU, D. A new pilot reactor for solid-state fermentation: application to the protein enrichment of sugar beet pulp. *Biotechnol. Bioeng.*, 31, pp.476-486, 1988.
- DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, 113-125, 2003.
- EL-GOHARY, F. A.; ABO-ELELA, S. I. Management of wastewater from soap and food industries: a case study. *The Science of Total Environment*, 66, pp.203-212, 1987.
- FERRARI, R. A.; COLUSSI, F.; AYUB, R. A. Caracterização de Subprodutos da Industrialização do Maracujá - Aproveitamento das Sementes. *Rev. Bras. Frutic.*, 26 (1), pp. 101-102, 2004.
- FRENCH, M. L.; LAFORGE, R. L. Closed-loop supply chains in process industries: an empirical study of producer re-use issues. *Journal of Operations Management*, 24, pp. 271-286, 2006.
- GALEMBECK, F. Synergy in Food, Fuel and Materials production from Biomass. *Energy Environ. Sci.*, 2010. First published on the web: 08 February 2010.
- GALEMBECK, F.; BARBOSA, C. A. S.; SOUSA, R. A. Sustainable use of Biomass and Natural Resources for Chemical Innovation. *Química Nova*, v. 32, p. 571-581, 2009.
- GONZALEZ, R.; MURARKA, A.; DHARMADI, Y.; YAZDANIA, S. S. A new model for the anaerobic fermentation of glycerol in enteric bacteria. *Metabolic Engineering*, Volume 10, Issue 5, September 2008, Pages 234-245.
- GUMBIRA-SA'ID, E.; MITCHELL, D. A.; GREENFIELDS, P. F.; DOELLE, H. W. A. A packed bed solid-state cultivation system for the production of animal feed: cultivation, drying and product quality. *Biotechnol. Lett.*, 14 (7), pp.623-628, 1992.
- HOLKER, U.; LENZ, J. Solid-state fermentation - are there any biotechnological advantages? *Current Opinion in Microbiology*, v. 8, 301-306, 2005.
- HUANG, S. Y.; WANG, H.; WEI, C.; MALANEY, G.W.; TANNER, R.D. Kinect response of the Koji solid state fermentation process. Em: Wiseman, A. *Topics in enzyme and fermentation biotechnology*. 10 (4), pp.89-108, 1978.
- IBS Relatório de Sustentabilidade 2007. Disponível em www.ibs.org.br/publicacoes.asp
- JOSHI, V. K.; SANDHU, D. K. Preparation and evaluation of an animal feed byproduct produced by solid-state fermentation of apple pomace. *Bioresour. Technol.*, 56, pp.251-255, 1996.
- KOBORI, C. N.; JORGE, N. Caracterização dos Óleos de Algumas Sementes de Frutas como Aproveitamento de Resíduos Industriais. *Ciênc. Agrotec.*, 29 (5), pp. 1008-1014, 2005.

- KUMAR, S.; KUMAR, R.; Bandopadhyay, A. Innovative methodologies for the utilization of wastes from metallurgical and allied industries. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 48, 301-314, 2006.
- LALLO, F. H.; PRADO, I. N.; Nascimento, W. G.; Zeoula, L. M.; Moreira, F. B.; Wada, F. Y. Níveis de Substituição da Silagem de Milho pela Silagem de Resíduos Industriais de Abacaxi sobre a Degradabilidade Ruminal em Bovinos de Corte. *R. Bras. Zootec.*, 32 (3), pp.719-726, 2003.
- LAUFENBERG, G.; KUNZ B.; NYSTROEM, M. Transformation of vegetable waste into value added products: (A) the upgrading concept; (B) practical implementations. *Bioresource Technology* v. 87, 167-198, 2003.
- MARQUES, J. A.; PRADO, I. N.; ZEOULA, L. M.; ALCADE, C. R. Avaliação da Mandioca e Seus Resíduos Industriais em Substituição ao Milho no Desempenho de Novilhas Confinadas. *Rev. Bras. Zootec.*, 29 (5), pp. 1528-1536, 2000.
- MAXIME, D., MARCOTTE, M., ARCAND, Y. Development of eco-efficiency indicators for the Canadian food and beverage industry. *Journal of Cleaner Production*, 14, pp.636-648, 2006.
- MONTEIRO, J. B. R.; SILVA, D. O.; MORAES, C. A. Produção de biomassa protéica de *Trichoderma reesei* e *Rhizopus oligosporus* em bagaço de cana-de-açúcar. *Rev. Microbiol.*, 22 (2), pp.164-169, 1991.
- MULIGGWE, S. E.; KASEVA, M. E. Assessment of industrial solid state waste management and resource recovery practices in Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling*, 47, pp.260-276, 2006.
- PAL, M.; CALVO, A. M.; TERRÓN, M. C.; GONZÁLEZ, A. E. Solid-state fermentation of sugarcane bagasse with *Flammulina velutipes* and *Trametes versicolor*. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 11, pp.541-545, 1995.
- PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V. T. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I. Sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.*, 74, pp.69-80, 2000.
- PANDEY, A. Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, 81-84, 2003.
- PANDEY, A. et al. Solid state fermentation for the production of industrial enzymes. *Current Science*, 77: 149-162, 1999.
- PELIZER, L.H. Estudo da influência da atividade de água na fermentação em estado sólido de *Bacillus thuringiensis*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências Farmacêuticas – USP. São Paulo, 104p, 1997.
- PELIZER, L. H.; DANESI, E. D. G.; RANGEL, C. O.; CARVALHO, J. C. M.; SATO, S.; MORAES, I. O. Estudio de la influencia de la edad del inóculo en el cultivo de *Spirulina platensis*. Em: *Memorias del Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*, 8, Huatulco, y Congreso Latinoamericano de



- Biotecnología y Bioingeniería, 4, Huatulco. Anais. Huatulco. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A.C., p.276, 1999a
- PELIZER, L. H.; DANESI, E. D. G.; RANGEL, C. O.; SASSANO, C. E. N.; CARVALHO, J. C. M.; SATO, S.; MORAES, I. O. Influência da concentração de inóculo na produção da microalga *Spirulina platensis*. Em: Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos, 3, UNICAMP, p.101, 1999b.
- PELIZER, L. H.; PONTIERI, M. H.; MORAES, I. O. Utilização de resíduos agro-industriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. *Journal of Technology Management & Innovation*, v.2, 118 – 127, 2007.
- PINTO, G. A. S. et al. Fermentação em Estado Sólido: Uma Alternativa para o Aproveitamento e Valorização de Resíduos Agroindustriais Tropicais. *Embrapa - Comunicado Técnico Online 102*, Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, disponível em www.biodiesel.gov.br
- RAMACHANDRANA, S. et al. Oil cakes and their biotechnological applications - A review. *Bioresource Technology*, v. 98, 2000-2009, 2007.
- RANGEL, C. O. Influência da luz e da uréia no crescimento e conteúdo de clorofila da biomassa de *Spirulina platensis*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências Farmacêuticas – USP, São Paulo, 127p, 2000.
- REDA, S. Y.; LEAL, E. S.; BATISTA, E. A. C.; BARANA, A. C.; SCHNITZEL, E.; CARNEIRO, P. I. B. Caracterização dos Óleos das Sementes de Limão Rosa (*Citrus Limonia Osbeck*) e Limão Siciliano (*Citrus limon*), um Resíduo Agroindustrial. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 25 (4), pp.672-676, 2005
- Revista Inovação UNIEMP, Julho - Agosto de 2007
- Revista Pesquisa FAPESP, 58, 2000. Revista Pesquisa FAPESP, 71, 2002.
- SANTOS, G. T.; ÍTAVO, L. C. V.; MODESTO, E. C.; JOBIM, C. C.; DAMASCENO, J. C. Silagens alternativas de resíduos agro-industriais. Simpósio Sobre Produção e Utilização de Forragens Conservadas - Anais do Simpósio (Maringá, 2001). Clóves Cabreira Jobim, Ulysses Cecato, Júlio César Damasceno e Geraldo Tadeu dos Santos. Maringá, UEM/CCA/DZO, p. 262-285, 2001.
- SARGANTANIS, J.; KARIM, M. N.; MURPHY, V. G.; RYOO, D. Effect of operating conditions on solid substrate fermentation. *Biotechnol. Bioeng.*, 42, pp. 149-158, 1993.
- Sebo bovino. Campestre Ind. Com. de Óleos Vegetais Ltda. Em: www.campestre.com.br/sebo_bovino.shtml e Grupo BERTIN, www.bertin.com.br.
- SHOJAOSADATI, S. A.; FARAIDOUNI, R.; MADADI-NOUEI, A.; MOHAMADPOUR, I. Protein

- enrichment of lignocellulosic substrates by solid state fermentation using *Neurospora sitophila*. *Resour., Conserv., Recycl.*, 27 (1/2), pp.73-87, 1999.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Revista Matéria*, v. 12, 322 – 338, 2007.
- SOCCOL, C. R.; VANDENBERGUE, L. P. S. Overview of applied solid-state fermentation in Brazil. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, 205-218, 2003.
- SOLIS-PEREYRA, S.; FAVELA-TORRES, E.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M.; SAUCEDO-CASTAÑEDA, G.; GUNASEPARAN, P.; VINIEGRA-GONZÁLEZ, G. Production of pectinases by *Aspergillus niger* in solid state fermentation at high initial glucose concentrations. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 12, pp.257-260, 1996.
- SURYANARAYAN, S. Current industrial practice in solid state fermentations for secondary metabolite production: the Biocon India experience. *Biochemical Engineering Journal*, v.13 189-195, 2003.
- TIMOFIECSYK, F. R.; PAWLOWSKY, U. Minimização de Resíduos na Indústria de Alimentos: Revisão. *Boletim CEPPA*, 18 (2), pp. 221-236., 2000.
- TREJO-HERNÁNDEZ, M. R.; LONSANE, B. K.; RAIMBAULT, M.; ROUSSOS, S. Spectra of ergot alkaloids produced by *Claviceps purpurea* 1029c in solid-state fermentation system: influence of composition of liquid medium used for impregnating sugar-cane pith bagasse. *Process Biochem.*, 28, pp.23-27., 1993.
- VANDENBERGUE, L. P. S., SOCCOL, C. R., PANDEY, A., LEBEAULT, J. M. Solid-state fermentation for the synthesis of citric acid by *Aspergillus niger*. *Bioresour. Technol.*, 34, pp.175-178, 2000.
- YANG, S. S.; JANG, H. D.; LIEW, C. M.; DU PREEZ, J. C. Protein enrichment of sweet potato residue by solid-state cultivation with mono na co-cultures of amylolytic fungi. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 9, pp. 258-264, 1993.
- ZHANG, R.; EL-MASHAD, H. M.; HARTMAN, K.; FENGYU, W.; LIU, G.; CHOAT, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 2006.
- ZVAUYA, R; MUZONDO, M. I. Some factors affecting protein enrichment of cassava flour by solid state fermentation. *Lebensm.-Wiss. Technol.*, 27 (6), pp.590-591, 1994.

Óleos e Gorduras

- ARRUDA, F. P. de; BELTRÃO, N. E. de M. ; ANDRADE, A. P. de; PEREIRA, W. E. ; SEVERINO, L. S. Cultivo do pinhão manso (*Jatrofa curcas* L.) como alternativa para o semi-árido Nordeste. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibras*, Campina Grande/PB, v. 8, nº1, p. 789-799, Jan/Abril, 2004.



- BALBINOT, N. S.; SCHNEIDER, R. C. de S.; RODRIGUEZ, A. L.; KAPPEL, F. I. Utilização de Resíduos Vegetais da Produção de Óleo de Girassol para Produção de Carvão Vegetal. Em: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.
- BALBINOT, N. M. S. Produção de Carvão Vegetal Ativado e Compósitos Termoplásticos a partir de Coprodutos da Cadeia Produtiva do Biodiesel de Girassol. Dissertação de Mestrado, UNISC, Set. 2007.
- BELTRÃO, N. E. M. et alli. Alerta sobre o Plantio de Pinhão Manso no Brasil. Campina Grande: Embrapa Algodão. Documentos, 155, 2006, 15p. Em: www.cnpa.embrapa.br/publicacoes/2006/DOC155.pdf.
- DRUMMOND, O. A.; PURCINO, A. A. C.; CUNHA, L. H. de S.; VELOSO, J. de M. Cultura do pinhão manso. EPAMIG, Belo Horizonte, 1984.
- GIANNIS, A. Syntheses with a Chiral Building Block from the Citric Acid Cycle: (2R,3S)-Isocitric Acid by Fermentation of Sunflower Oil. *Angewandte Chemie International Edition*, May 2007.
- PAGES, X.; ALFOS, C. Synthesis of new derivatives from vegetable sunflower oil methyl ester via epoxidation and oxirane opening. *Congrès et Conférence Internationale Tournesol N°15, vol.8, n°2, pp.122-132, 2001.*
- PROJETO SÍTIO DO BELLO – Contribuição para Linhas de Pesquisa de Frutas Nativas do Brasil. Em: www.sitiodobello.com.br/pesquisa2.htm
- ROUILLY, A.; ORLIAC, O.; SILVESTRE, F.; RIGAL, L. New Natural Injection-Moldable Composite Material from Sunflower Oil Cake. *Bioresource Technology*, 2006.
- SANTOS, F. R.; FERREIRA, J. C. N.; COSTA, S. R. R. Decomposição catalítica de óleo de soja em presença de diferentes zeólitas. Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, UFRRJ, 1996.
- SEVERINO, L. S.; NÓBREGA, M. B. M.; GONÇALVES, N. P.; EGUIA, M. T. J. Viagem à Índia para prospecção de tecnologias sobre mamona e pinhão manso. Campina Grande: Embrapa Algodão. Documentos, 153, 2006. Em: www.cnpa.embrapa.br/publicacoes/2006/DOC153.pdf
- SUDENE. CULTIVO DE PINHÃO MANSO (*Jatropha curcas* L.). Pacto Nordeste: ações estratégicas para um salto do desenvolvimento regional. Recife, 1996. 77p.
- TEIXEIRA, J. P. F. Teor e composição do óleo de sementes de *Jatropha* spp. www.scielo.br/pdf/brag/v46n1/17.pdf
- Van ERP, G; ROGERS, D. Development of Sunflower Resins for Fibre Composite Applications. 14th Australian Sunflower Association Conference Proceedings, 2003.
- WILBERG, K. O. Oxidação de Compostos Fenólicos em Solução Aquosa com Enzima Peroxidase de Extratos Vegetais. Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da UFRGS, 2003.

Fibras Naturais

2009: International Year of Natural Fibers – FAO/ONU

ABMTENC - Associação Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais.

ALVES FILHO, M. Material extraído de planta amazônica substitui fibra de vidro com vantagens: patenteada, nova técnica possibilitará a produção de plásticos reforçados e já poderá ser transferida para a indústria. Em: www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje. Edição 245, Março, 2004.

Bambu Brasileiro, www.bambubrasileiro.com

Bolsa Amazônia: www.bolsamazonia.com/projetos.asp

BRADY, G. S., CLAUSER, H. R., VACCARI, J. A. Materials Handbook, 15th Ed. McGraw-Hill, 2002.

BRANDÃO, I. D. Pesquisas com curauá dão suporte à indústria. www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje. Nov, 2007.

EMBRAPA Instrumentação Agropecuária – Fontes diversas.

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. Cultivo hidropônico de plantas (Boletim técnico 180). Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 52p, 1999.

Harvest SPF Textile (Beijing) Co. Ltd., www.spftex.com

INBAR – International Network for Bamboo and Rattan. Em: www.inbar.int/

Ingeo® Polylactic Acid, NatureWorks LLC, www.natureworksllc.com

Jornal O Estado de São Paulo - www.estadao.com.br/ciencia/banco/noticias/2001/ago/24/131.htm

Jornal O Estado do Paraná - Fibras naturais ainda são pouco exploradas. Reportagem, 01/07/2006. Em: www.parana-online.com.br

Press release oficial do governo da República Popular da China (em inglês). March 21st, 2009.

PROJETO POEMA - www.ufpa.br/poema/

RAMALHO, E. A folha amazônica que virou arte. www.rfi.fr/actubr/articles/068/article_124.asp, Nov/2005.

Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Em: www.redetec.org.br/inventabrasil/indexn.htm, Abr/09.

Site Inovação Tecnológica, 23/05/2006. Em: www.inovacaotecnologica.com.br/noticias.

Swicofil AG, Switzerland, www.swicofil.com/soybeanproteinfiber.html



Borracha Natural

- BARBOSA, M. B. Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil da UNESP - Campus de Ilha Solteira, Agosto/2006.
- BUZETO, F. A. Modificação de superfície da borracha natural por descarga corona. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, 2007.
- JOB, A. E.; OLIVEIRA, F. A.; ALVES, N.; GIACOMETTI, J. A.; MATTOSO, L. H. C. Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors. ICSM 2002 International Conference on Science and Tech-nology of Synthetic Metals, Shanghai , China, 2003, vol. 135-36 (881 p.)
- JORGE, R. M.; FERREIRA, M. T.; PICCIANI, P. H. S.; GOMES, A. S.; NUNES, R. C. R. Caracterização físico-mecânica de filmes de borracha natural epoxidada curáveis em temperatura ambiente. Polímeros, vol. 19, nº 4, São Carlos, 2009.
- MORENO, R. M. B.; MATTOSO, L. H. C.; JOB, A. E.; GONÇALVES, P. DE S. Monitoramento e avaliação da borracha natural crua utilizando a técnica de análise térmica dinâmico-mecânica. Polímeros, vol. 16, nº 3, São Carlos, 2006.
- NAIME, R.; DA SILVA, R. Utilização de pneus usados na fabricação de telhas. INGEPRO - Inovação, Gestão e Produção, Vol. 2, Nº 1 (2010).
- NEVES-JUNIOR, W. F. P.; FERREIRA, M.; ALVES, M. C. O.; GRAEFF, C. F. O.; MULATO, M.; COUTINHO-NETTO, J.; BERNARDES, M. S. Influence of fabrication process on the final properties of natural-rubber latex tubes for vascular prosthesis. Braz. J. Phys., vol. 36, nº 2b, São Paulo, June/2006.
- OLIVEIRA, P. C. Modificação química da borracha natural pela técnica de polimerização em emulsão por semente : propriedades coloidais, estrutura química e comportamento viscoelástico. Tese de Doutorado, faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 2003.
- PROBOR II : segundo programa de incentivo à produção de borracha natural : fundamentos, objetivos, normas operativas. Ministério da Indústria e do Comércio, Superintendência da Borracha, 1978.
- Revista FAPESP, nº 61, Jan/Fev 2001. <http://revistapesquisa.fapesp.br/index.php?art=545&bd=2&pg=1&lg=>
- RIPPEL, M. M.; GALEMBECK, F. Nanostructures and adhesion in natural rubber: new era for a classic. J. Braz. Chem. Soc., vol. 20, nº 6, São Paulo, 2009.
- RIPPEL, M. M. Caracterização microestrutural de filmes e partículas de látex de borracha natural. Tese de Doutorado, Instituto de Química da UNICAMP, 2005.

RODRIGUES, S. de S. Desenvolvimento de um sistema de controle de fluxo esofágico para o tratamento da obesidade. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2008.

VALADARES, L. F. Nanocompósitos de borracha natural e argila: preparação a partir de látex. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química da UNICAMP, 2005.

ZANIN, A. N. F. Adesivos sensíveis à pressão à base de nanocompositos de borracha e argila. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, 2006.



7. Materiais avançados para saúde médico-odontológica¹

7.1. Apresentação

Desde sempre, o homem busca a imortalidade. Segundo opinião recente do cientista e futurólogo Raymon Kurzweil, o *transhumanismo* (integração homem-máquina) pode ser realidade em 20 a 30 anos; fruto da aplicação conjunta de tecnologia da informação, biotecnologia e nanotecnologia. A esperança de vida do brasileiro vem sendo ampliada de forma consistente, principalmente a partir da década de 40. Em 2008 foi atingida a expectativa de vida ao nascer de 73 anos [1] e estima-se, para 2020, 30 milhões de brasileiros com mais de 60 anos. Com o incremento da longevidade e de traumas decorrentes de acidentes de trânsito e violência, aumenta também a demanda por produtos e tecnologias providos tanto pelo Sistema Único de Saúde (SUS) como pelo Sistema de Saúde Suplementar [2]. Assim, é fundamental consolidar a indústria de produtos para a saúde no Brasil como forma de atender à demanda crescente por procedimentos de alta complexidade. É preciso ainda identificar nichos de oportunidades de negócios que contribuam para o aumento das exportações, em volume e diversificação.

Pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) em saúde é relevante para diminuir a vulnerabilidade do SUS e preparar o país para novos desafios tecnológicos. As tendências mundiais em longo prazo (2020-2050) indicam foco na medicina diagnóstica e regenerativa. Materiais sintéticos, naturais ou híbridos nanoestruturados ou obtidos por rotas biotecnológicas, associados a terapias celulares, sistemas de liberação controlada de fármacos (*drug delivery*) ou genes serão indispensáveis para a garantia da qualidade e da eficiência da assistência à saúde prestada pelo SUS e pelo Sistema de Saúde Suplementar.

O Estudo Prospectivo em Materiais Avançados para Aplicações em Saúde Médico-Odontológica, iniciado em 2007 no CGEE, englobou três fases e resultou na priorização de seis tópicos: materiais

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Glória Dulce de Almeida Soares (coordenadora), Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia (revisora), Alfredo Miranda de Góes, Carla Valéria Martins Rodrigues, Cristina Tristão de Andrade, Luiz Sérgio Marcelino Gomes, Marcelo Ganzarolli de Oliveira, Maria Fidela de Lima Navarro, Radovan Borojevic, Rubens Belfort Junior, Táis Munhoz M. G. de Oliveira (co-relatores).

para implantes ortopédicos; materiais para próteses endovasculares (stents); materiais dentários; materiais nanoestruturados para diagnóstico e tratamento de doenças; materiais carreadores para sistemas de liberação controlada (SLC) e materiais para engenharia tecidual. Há uma clara concordância das prioridades definidas nos relatórios do Estudo com àquelas presentes na lista com os 100 produtos estratégicos no âmbito do SUS, definidos na portaria do Ministério da Saúde (MS) número 978, de 16/05/2008.

Cada um dos seis tópicos tecnológicos deste artigo foi, por sua vez, subdividido em dois itens, o primeiro voltado (sempre que possível) para estratégias de mercado e o segundo para ações de PD&I em suporte à atividade produtiva. As estratégias de mercado podem se beneficiar das linhas de ação listadas no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) de PD&I do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) [3], em especial daquelas que promovem a inovação tecnológica nas empresas (apoio à inovação tecnológica nas empresas; tecnologia para inovação nas empresas e incentivo à criação e à consolidação de empresas intensivas em tecnologia) e seus desdobramentos. As linhas de ação do PAC do MCT para PD&I em áreas estratégicas englobam insumos para a Saúde e as áreas de Biotecnologia e Nanotecnologia, ambas consideradas portadoras de futuro; ou seja, com elevada probabilidade de romper barreiras tecnológicas e mercadológicas.

7.1.1. Considerações

A PDP, Política de Desenvolvimento Produtivo [4], que tem como objetivo central dar sustentabilidade ao atual ciclo de expansão, inclui o Complexo Industrial da Saúde (CIS) no grupo dos seis Programas Mobilizadores em Áreas Estratégicas. Para o CIS foram estabelecidas as seguintes metas: reduzir o déficit comercial do CIS para US\$ 4,4 bilhões até 2013 e desenvolver tecnologia para produção local de 20 produtos estratégicos para o SUS até 2013. Dois outros programas mobilizadores – biotecnologia e nanotecnologia – também se destacam pela grande relevância que apresentam para a inovação na área da saúde.

Neste contexto, competirá ao Grupo Executivo do Complexo Industrial da Saúde (Gecis) criado em 2008 pelo Ministro da Saúde, a promoção de ações concretas visando à criação de um marco regulatório brasileiro na área, além de reduzir gargalos legais, tributários e financeiros, [5]. No entanto, essas ações (basicamente, o financiamento para ampliação da capacidade de produção e a expansão dos recursos para PD&I em áreas estratégicas) ainda não foram totalmente entendidas pelo setor produtivo. No intuito de reverter esse quadro, a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp) lançou, em abril de 2009, o caderno intitulado *Manual dos Instrumentos da*



Política de Desenvolvimento Produtivo que resume os instrumentos, instituições, setores contemplados e outros detalhes, [6].

Além do papel relevante do Ministério da Saúde (MS) e do MCT como financiadores, e da definição das Políticas Públicas em Saúde e C&T, órgãos como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) e Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Inpi) são fundamentais na remoção de entraves que resultem em atraso na execução das ações sugeridas no presente artigo. A abordagem transversal sobre matérias primas e tecnologias também é fundamental, pois favorece o adensamento da cadeia produtiva, contribuindo para a viabilização das metas propostas na PDP.

O documento do CGEE, Fase II, de Perspectivas, [7], capítulo 5, Prioridades de PD&I em Materiais Avançados para a Saúde Médico-odontológica, estabeleceu, sob encomenda do MCT, as prioridades e as dimensões de maior impacto para o desenvolvimento das atividades de PD&I. Por ordem decrescente de relevância Industrial² para o ano prospectivo de 2022, foram listados os seguintes tópicos: medicina regenerativa (4,5); nanotecnologia aplicada ao tratamento de doenças crônico-degenerativas e engenharia de superfícies aplicada aos biomateriais (4,3); próteses endovasculares (stents) (4,0); próteses de quadril; produtos para oftalmologia; placas/parafusos reabsorvíveis e materiais dentários (3,9); têxteis tecnológicos (3,7) e têxteis inteligentes (3,6)³; e cosméticos (3,2). As notas entre parênteses percorrem uma escala de cinco níveis de relevância.

Os resultados da Fase II apontaram, ainda, como dimensões de maior impacto para o desenvolvimento dos tópicos tecnológicos de materiais para a saúde médico-odontológica: recursos humanos (RH), demanda de mercado e financiamento, nessa ordem. *Scale-up*⁴ e experiência em gestão empresarial foram outros aspectos apontados por empresários e pesquisadores como desafios importantes a serem superados. Cada um desses assuntos será sumarizado a seguir.

² Relevância varia de 1 a 5; sendo 5, equivalente a Muito Relevante.

³ Os têxteis tecnológicos reúnem conceitos de engenharia de superfícies, nanotecnologia e liberação controlada e são desenvolvidos para atenderem a determinadas funções, como por exemplo, melhoria no desempenho de uma dada prática esportiva, incluindo também tecidos com ação antimicrobiana e proteção balística. Têxteis inteligentes costumam agregar elementos de tecnologia da informação como sensores e sistemas de transferência de dados.

⁴ Scale-up consiste em uma série de etapas para aumento de escala (por ex. de uma escala de laboratório ou piloto de desenvolvimento, para uma escala ampliada de produção). Ao longo do documento será usada a expressão em inglês.

7.1.2. Desafios em RH em materiais para a saúde

O tema de recursos humanos tem sido bastante discutido nos grupos de trabalho ligados ao Fórum de Competitividade em Biotecnologia, que destacou, entre outros, a necessidade de fortalecimento do ensino técnico e da flexibilização dos cursos de graduação.

A PDP definiu duas ações sistêmicas na dimensão *Capacitação e Treinamento em RH: o Plano Nacional de Educação*, com meta de 260 mil e 500 mil novas matrículas, respectivamente, na educação profissional/tecnológica e no ensino superior, para 2010. A outra ação, de responsabilidade conjunta do sistema Sesi/Senai/CNI e do Ministério do Trabalho, tem como meta 16 milhões de matrículas, sobretudo no ensino profissional. Essas ações estão em consonância com a Linha de Ação número 2 do PAC do MCT, voltada para a formação e capacitação de recursos humanos para Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I). O Plano de Ação tem também como meta elevar o número de bolsas concedidas pelo CNPq, até 2020, dando ênfase às engenharias e áreas estratégicas. No entanto, com o aquecimento do setor industrial o número de engenheiros bolsistas tem sido drasticamente reduzido.

Os cursos de metalurgia e de materiais existentes no país já possuem um alto grau de integração com áreas da saúde e o setor médico-odontológico, propiciando a formação multidisciplinar de mestres e doutores. O número de doutores formados tem aumentado, mas faltam postos de trabalho para esses RH altamente qualificados. Por isso, os editais para concessão de bolsa de pós-doutoramento nas ICT ou nas empresas são importantes, mas os projetos que incluem pós-doutoramentos sofrem grandes discontinuidades. Parte desses pesquisadores não completa sequer o 1º ano de projeto. A criação da carreira de pesquisadores nas universidades, a ampliação de vagas nos Institutos ligados ao MCT e a inserção formal nas empresas são opções importantes e não-excludentes para fixar os RH e acelerar a inovação.

7.1.3. Desafios quanto à demanda de mercado e compras do Estado

Um dos desafios da PDP para o CIS consiste em adensar a cadeia produtiva e fortalecer as empresas nacionais, sendo que o principal instrumento proposto corresponde às compras governamentais, estimadas em R\$ 12 bilhões anuais entre 2008-2011 [4]⁵. O uso do poder de compra do Estado prevê também a revisão da regulamentação de compras governamentais. A lista com os cem produtos estratégicos no âmbito do SUS anteriormente mencionada serve de balizamento para o Banco Na-

⁵ Não foram consideradas possíveis alterações nas metas do PDP em função da crise mundial.



cional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) avaliar e priorizar projetos submetidos ao Programa de Apoio ao Desenvolvimento do Complexo Industrial da Saúde (Profarma).

Em maio de 2008, [5], pesquisadores e gestores identificaram a dificuldade de cooperação das Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT) com empresas da área de equipamentos e materiais de uso em saúde como o grande entrave à inovação e sugeriram critérios para habilitar empresas aos próximos editais de subvenção e/ou financiamentos para pesquisa, desenvolvimento e inovação. Os critérios incluem, entre outros, a necessidade de parceria com as ICT e a participação de pós-graduandos na empresa.

7.1.4. Desafio em financiamento

É preciso garantir continuidade de financiamento para grandes projetos de PD&I, como, por exemplo, os Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT). O financiamento para pesquisa, um dos pré-requisitos para se atingir a inovação, tem aumentado significativamente nos últimos anos, mas ainda é pulverizado em múltiplos editais. Seria importante rediscutir a relação das agências financiadoras com os pesquisadores, os critérios de avaliação dos projetos e a abertura de editais com prazos de execução de projetos em médio e em longo prazo (6-10 anos), com avaliações intermediárias.

O financiamento para ampliação da capacidade de produção do CIS inclui o novo Profarma/BNDES com recursos da ordem de R\$ 3 bilhões entre 2008 e 2012, além de recursos orçamentários do Ministério da Saúde de cerca de R\$ 900 milhões no mesmo período. Recursos para PD&I em áreas estratégicas e para infraestrutura científico-tecnológica também estão disponíveis, bem como o apoio financeiro e a capitalização propostos na PDP para nanotecnologia e biotecnologia, [4].

Dentro das prioridades estratégicas do PAC do MCT, a linha de ação número 6 que prevê Incentivo à Criação e à Consolidação de Empresas Intensivas em Tecnologia é fundamental para diminuir a vulnerabilidade do CIS. Materiais nanoestruturados, arcabouços⁶ para engenharia tecidual e sistemas de liberação controlada são exemplos de produtos e tecnologias intensivas em inovação que dependem fortemente dos recursos previstos no Plano de Ação do MCT.

Ações da Finep (fundo setorial e subvenção econômica compreendendo fundos não-reembolsáveis e instrumentos de capital de risco, como: capital semente, *venture capital*, *private equity* e abertura de capital); ações do BNDES (Criatec, entre outros) e a ação conjunta dos ministérios MS/MCT

⁶ Também chamados de templates ou scaffolds podem ser definidos como suportes porosos tridimensionais para cultura de células.

(lei de inovação e encomendas tecnológicas) são instrumentos fundamentais para acelerar a inovação na saúde. Cabe ainda destacar o papel dos Editais Finep-Sebrae que financiam a busca de soluções concretas para problemas de pequenas e médias empresas pelas ICT, como forma de superar gargalos tecnológicos na cadeia de inovação e o papel das Fundações Estaduais de Apoio (FAPs).

7.1.5. Desafio para *scale-up*

Vários pesquisadores apontam o *scale-up* (i.e., a conversão de um processo industrial a partir de configurações laboratoriais no sentido do uso amplo de mercado) como o principal gargalo da cadeia de inovação por falta (ou desconhecimento) de mecanismos de financiamento, baixa interação com empresas e, principalmente, falta de recursos humanos especializados em *scale-up*. Essas transferências de escala (1:10 ou 1:100) necessitam, antes de mais nada, de parceiros interessados, projetos de equipamento, validação da metodologia e suprimento de matéria prima em quantidade e custo compatível com o produto. Iniciativas, a exemplo da criação do Centro de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde, [8], são importantes para preencher essas lacunas, mas ainda são em número insuficiente e com resultados esperados para médio em longo prazo.

7.1.6. Desafio em gestão empresarial

Grandes projetos de PD&I têm sido coordenados, em sua ampla maioria, por professores e/ou pesquisadores de universidades públicas sem formação em gestão empresarial. Nesse contexto, para impulsionar o desenvolvimento pretendido será preciso profissionalizar as seguintes frentes de gestão:

- Gestão da proteção do conhecimento, incluindo acompanhamento em todas as etapas e a obtenção de patentes no exterior;
- Gestão laboratorial com a implantação de normas ISO e compatibilização com o uso dos laboratórios em atividades de ensino; e
- Gestão dos projetos, propriamente ditos.

Nesse contexto, agências de fomento, como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) ou o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), poderiam incentivar e financiar a participação de pesquisadores em pós-graduação *lato sensu* na área de gestão, selecionar propostas a serem patenteadas etc.



7.2. Materiais para implantes ortopédicos

O gasto dos Estados Unidos em produtos médicos foi de cerca de U\$ 80 bilhões em 2007 e constitui um dos componentes com crescimento mais rápido nos gastos hospitalares. Os implantes ortopédicos representam uma substancial proporção desses gastos⁷, sendo previsto um aumento de 9,8% ao ano, totalizando U\$ 23 bilhões em 2012 [9].

Em 2007, os gastos do SUS com procedimentos cirúrgicos ortopédicos superaram cerca de R\$ 575 milhões, correspondendo a R\$ 146 milhões voltados para órteses e próteses ortopédicas [10]. No mesmo ano, os procedimentos de artroplastia de quadril e joelho foram responsáveis por cerca de 17 mil internações, gerando um gasto total com esses procedimentos cirúrgicos de cerca de R\$ 65 milhões, tendo sido aproximadamente R\$ 38 milhões relativos à compra de próteses. A demanda por implantes de quadril e joelho, o maior setor de produtos ortopédicos, tem expectativa de rápido crescimento, devido ao envelhecimento da população mundial associado ao do estilo de vida ativo e aumento dos acidentes traumáticos. Estudos indicam uma demanda crescente e ainda reprimida destes procedimentos cirúrgicos no Brasil, uma vez que em países desenvolvidos, a exemplo da Suécia, cerca de 140 artroplastias totais de quadril primárias foram realizadas por 100.000 habitantes em 2007 [11].

Embora largamente empregadas há algumas décadas, as próteses totais de quadril e de joelho são sistemas complexos, compostos por partes femorais (haste e cabeça femorais) que se articulam com partes acetabulares, na prótese de quadril; ou tibiais e patelares, na prótese de joelho. Esses componentes tendem a apresentar durabilidade relativamente baixa, da ordem de 10 a 15 anos. Mundialmente, o desgaste do par *cabeça femoral – componente acetabular* que gera a soltura asséptica da prótese é apontado como causa principal da falha da prótese total de quadril. Outra causa de falha frequentemente reportada no Brasil é a metalose, que, segundo a Anvisa, se refere ao processo de desgaste da prótese dentro do organismo humano e à necrose dos tecidos do local onde a prótese foi implantada.

Segundo o Registro Nacional de Artroplastia da Noruega [12], que acumula dados de mais de 120 mil e quase 30 mil pacientes submetidos, respectivamente, à artroplastia de quadril de 1987 a 2006, e de joelho de 1994 a 2006, as combinações de superfícies articulares mais usadas nas próteses totais de quadril naquele país, em 2006, foram polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM equivalente a UHMWPE de *ultra-high molecular-weight polyethylene*) com aço inoxidável, seguidas de PEUAPM-ligas CoCrMo; PEUAPM-alumina e alumina-alumina. Além disso, foi observado um aumento

⁷ Somente próteses de quadril e de joelho respondem por 29% do mercado de biomateriais para ortopedia.

importante nos últimos anos do uso de próteses não-cimentadas fabricadas em ligas de titânio recobertas por hidroxiapatita⁸, especialmente em pacientes ativos e adultos jovens.

De acordo com o mesmo registro, as superfícies articulares com maior desgaste acumulado em sete anos pós-cirurgia são as metal-metal (4.4%) seguidas pelas: cerâmica-polietileno (3.5%), metal-polietileno (3.5%) e cerâmica-cerâmica (3.1%), mas o desgaste é fortemente afetado pelos processos de fabricação e acabamento do par em contato. A Suécia, que mantém um registro nacional de artroplastias de quadril desde 1989, segue padrão similar de uso preferencial de materiais e combinações de superfícies articulares, observando-se um aumento crescente do uso do par metal - polietileno de ultra-alta peso molecular, apesar da grande preocupação com o desgaste dos componentes articulares poliméricos.

Na Noruega, Suécia, Austrália, Canadá e Estados Unidos da América (EUA) há, desde 2002, uma tendência crescente do uso de próteses de ligas de cobalto-cromo-molibdênio (CoCrMo) em cirurgias de *resurfacing*⁹ do quadril. Essa cirurgia é usada preferencialmente em homens adultos jovens com fraturas ou artrose de quadril debilitante e com longa expectativa de vida e alto nível de atividade física.

7.2.1. Ampliação da produção de implantes ortopédicos

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Artigos e Equipamentos Médicos (Abimo), aproximadamente 75% dos implantes ortopédicos utilizados no país são de fabricação nacional. Além disso, entre os implantes ortopédicos utilizados pelo SUS, em 2004, aproximadamente 88% eram de procedência nacional, enquanto que apenas 12% correspondiam a produtos importados. A Associação relata ainda que 88% do volume de vendas dos implantes ortopédicos nacionais se destinam ao mercado interno e 12% para exportações, nesse último caso limitado a 1/3 das empresas do setor [13].

O modelo de prótese de quadril cimentado mais usado no país, segundo cirurgiões brasileiros de quadril entrevistados em 2005 [13], consiste no modelo Alpha cimentado fabricado em aço inoxidável conformado mecanicamente. Nesse contexto, os investimentos governamentais que visem a atender a alta demanda reprimida por cirurgias de artroplastia de quadril, especialmente em idosos,

⁸ Hidroxiapatita é uma cerâmica de fosfato de cálcio classificada como bioativa e osteocondutora. Normalmente esse termo é utilizado de forma genérica englobando outras cerâmicas de fosfato de cálcio, sendo que nas Tabelas do SUS e da ANS é utilizada a denominação de cerâmicas fosfo-cálcicas.

⁹ Resurfacing do quadril consiste num procedimento cirúrgico no qual apenas a superfície da cartilagem junto ao fêmur é retirada e a cabeça do fêmur reformatada para receber uma prótese. Nessa cirurgia, o acetábulo também é totalmente substituído por uma prótese.



devem ser concentrados nesses modelos, uma vez que a matéria-prima pode ser suprida pela indústria nacional.

As demais matérias-primas metálicas empregadas na fabricação de próteses de quadril e joelho, ou seja, as ligas de titânio e as de CoCrMo são importadas¹⁰. Diante da tendência mundial e no país do aumento do uso de próteses não-cimentadas de quadril em ligas de titânio, bem como o uso de ligas CoCrMo em cirurgias de *resurfacing* do quadril e de artroplastias de joelho, seria importante que a indústria nacional recuperasse sua capacidade de produzir ligas especiais em média/larga escala. No caso do Ti e suas ligas, tanto a indústria médico-hospitalar, como a indústria espacial [14] e de defesa [15], absorveriam rapidamente o aumento da escala de produção desses materiais.

Quanto ao material polimérico empregado no componente acetabular de próteses do tipo polímero-metal, é importante a opção pelo polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWP), como forma de se evitar complicações relevantes, a exemplo da soltura da prótese, gerando a necessidade de nova cirurgia, troca dos componentes da prótese e custos excessivos para o sistema de saúde. É possível realizar tratamento superficial no polímero com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste. O PEUAPM já foi desenvolvido no país sendo importante, no entanto, investir na etapa de purificação para seu uso seguro como biomaterial¹¹.

Recomendações

- 1) Ampliar a produção de implantes ortopédicos no país com vistas a suprir o mercado interno e a expansão das exportações;
- 2) Produzir ligas CoCrMo e ligas de titânio no país (em conjunto com outros setores), visando a fabricação de próteses ortopédicas nacionais em média/larga escala;
- 3) Nacionalizar etapas do processo de fabricação e acabamento, a exemplo do recobrimento poroso metálico ou de hidroxiapatita por aspersão térmica (plasma spray) das próteses de quadril não-cimentadas¹². Para tal é preciso reunir competências e consolidar a infraestrut-

10 O País já possuiu know-how para a produção de ligas especiais, desenvolvido principalmente pelo CTA, mas a reestruturação do setor metalúrgico-mecânico na década de 90 resultou na desativação de várias linhas de produção.

11 Reis, M.C. Modificação do Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular (PEUAPM cabeça do femur reformatada para receber uma prótese. Nessa cirurgia, o acetábulo também é totalmente substituído por uma prótese.

O País já possuiu know-how para a produção de ligas especiais, desenvolvido principalmente pelo CTA, mas a reestruturação do setor metalúrgico-mecânico na década de 90 resultou na desativação de várias linhas de produção.) Visando A Melhoria da Resistência Ao Desgaste Por Fricção. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas

12 Em consulta eletrônica à comunidade de especialistas, o tópico "Engenharia de superfícies e biomateriais" resultou com nível

- tura necessária para realização de tratamentos de superfície no país; e
- 4) Consolidar e expandir a infraestrutura física das instituições, públicas e privadas, que tenham como missão a avaliação de conformidade de implantes ortopédicos, a exemplo da Rede Multicêntrica de Avaliação de Implantes Ortopédicos (REMATO), por meio de ações transversais.

7.2.2. Agenda de PD&I em biotribologia para implantes ortopédicos

A tribologia é uma área de pesquisa que estuda o desgaste, fricção e lubrificação de superfícies articuladas em movimento relativo [16], e no caso da biotribologia, um dos objetivos é aumentar a vida útil de implantes e produtos similares [17]. Os ensaios tribológicos são essenciais para a avaliação da durabilidade dos modelos de próteses de quadril e joelho em processo de desenvolvimento ou incorporação tecnológica no país.

Simulações tribológicas também podem ser geradas de acordo com perfis estratificados da população, incluindo idade, sexo e nível de atividade física, uma vez que determinadas combinações de materiais podem ser mais indicadas para populações com determinadas características. Por exemplo, próteses de quadril tipo cerâmica-cerâmica de alto custo, com baixo coeficiente de atrito e baixa taxa de desgaste seriam mais indicadas para homens adultos jovens, com intensa atividade física, em comparação às próteses do tipo polímero-metal que tendem a apresentar maior desgaste do material polimérico. Dados concretos, nesse sentido, proveriam relevante subsídio para a elaboração de protocolos clínicos pelo Ministério da Saúde, Secretarias de Saúde estaduais e municipais, sociedades médicas e a Agência Nacional de Saúde Suplementar (ANS), voltados para o uso seguro de próteses de quadril e joelho no país.

Recomendações

- 1) Investir na aquisição e desenvolvimento de equipamentos por instituições científicas e tecnológicas para avaliação tribológica de implantes ortopédicos em desenvolvimento ou comercializados no país;
- 2) Investir no desenvolvimento de novos métodos e/ou softwares simuladores tribológicos. Ampliar infraestrutura multiusuário, certificar e acreditar laboratórios nacionais voltados para a realização de ensaios biotribológicos;

de relevância industrial superior a 4.



7.3. Materiais para próteses endovasculares (*stents*)

As doenças cardiovasculares constituem a principal causa de mortalidade e morbidade no Brasil e no mundo. Segundo dados da Organização Mundial de Saúde (OMS), em 2002, no mundo, do total de 16,7 milhões de óbitos, 7,2 milhões ocorreram por doença arterial coronariana (DAC). Estima-se, para 2020, que esse número possa se elevar a valores entre 35 e 40 milhões. No Brasil, em 2005, houve 196.474 internações e 84.945 óbitos registrados no Sistema de Informação de Mortalidade (SIM) por DAC [18].

O uso de *stents* (prótese endovascular) associados à angioplastia coronariana reduz a ocorrência de eventos adversos, reestenose¹³ angiográfica e reoclusão, em comparação à angioplastia convencional [19] e vêm substituindo gradualmente as cirurgias de revascularização. A angioplastia é um procedimento não-cirúrgico, não-restrito à área coronária, que desobstrui artérias ou vasos por meio de um cateter e introduz uma prótese para manter o diâmetro original do vaso/artéria. No Brasil são realizadas anualmente 90.000 angioplastias contra 30.000 cirurgias de revascularização, sendo que a maioria dos procedimentos de angioplastia inclui a colocação de um ou mais *stents*. A Sociedade Brasileira de Hemodinâmica e Cardiologia Intervencionista (SBHCI) estima que sejam implantados no Brasil 60 mil *stents* por ano [20]. Cabe ainda destacar, que o mercado de *stents* é dominado por um número reduzido de grandes empresas.

Existem dois grupos de *stents*: convencionais (sem medicamento) e recobertos (SR) também denominados “*drug-eluting stents*” ou *stents* farmacológicos. No caso dos *stents* farmacológicos são utilizadas prioritariamente duas drogas com ação anti-proliferativa: rapamicina e paclitaxel, ambas já aprovadas para uso no Brasil pela Anvisa. O SUS reembolsa a utilização do *stent* convencional ao preço de R\$ 2.034,50 a unidade. *Stents* recobertos por medicamentos (com preço variando de R\$ 6.500,00 a R\$ 15.000,00) [20] podem ser providos pelos planos de saúde do Sistema de Saúde Suplementar, desde que devidamente justificado o uso e avaliados os riscos e benefícios correspondentes por equipe técnica competente.

Estudos de custo-efetividade de *stents* recobertos com fármacos indicam que o SR foi mais favorável em pacientes de alto risco de reestenose, com elevado custo do manejo de reestenose e sob a perspectiva não-pública [21]. Além do elevado custo, a controvérsia em torno da segurança dos SR

13 Obstrução decorrente da formação de novos trombos nas paredes dos vasos ou artérias.

levou o *US Food and Drug Administration (FDA)* a se pronunciar, em setembro de 2006, sobre as indicações para uso dos stents e a convocar um painel com especialistas para discutir possíveis riscos associados aos fármacos utilizados nos stents [22].

Revisão sistemática conduzida pelo Centro Cochrane do Brasil em 2008, sob encomenda do Ministério da Saúde, concluiu que os stents recobertos com rapamicina e paclitaxel quando comparados com os stents convencionais não alteram de modo estatisticamente significante as taxas de mortalidade, trombose, infarto do miocárdio e de revascularização cirúrgica, mas diminuem significativamente a taxa de reestenose [23].

7.3.1. Ampliação da produção de *stents*

Conforme relatado no Estudo Prospectivo de Materiais Fase I (2008), diversos materiais têm sido utilizados para a fabricação de stents, destacando-se o aço inoxidável 316L, liga Co-Cr (L605) e o nitinol (liga NiTi com superelasticidade e memória de forma). Alguns fabricantes contra-indicam os *stents* fabricados em ligas Co-Cr a pacientes alérgicos ou hipersensíveis aos componentes da liga [24]. Stents em poli (ácido láctico) associados a fármacos e polímeros com memória de forma estão sendo desenvolvidos como substitutos aos metais.

A liga nitinol não é produzida no país, mas é tema de PD&I em universidades e também em institutos militares, uma vez que essas ligas apresentam grande campo de aplicação na área Espacial [14] e de Defesa [15].

Recomendações

- 1) Ampliar a produção no país de *stents* endovasculares metálicos convencionais para atendimento à demanda do SUS e para exportação;
- 2) Fortalecer as empresas nacionais produtoras de *stents*, de forma a ampliar a sua competitividade no mercado de produtos para a saúde;
- 3) Desenvolver tecnologia para fabricação no país da liga NiTi (nitinol) em parceria com outros setores que demandem essa matéria-prima; e
- 4) Ampliar a infraestrutura laboratorial para a caracterização dos materiais e avaliação da segurança e efetividade dessa tecnologia em médio e longo prazo.



7.3.2. Agenda de PD&I em stents convencionais e os recobertos com fármacos

Investimentos governamentais em PD&I em stents recobertos com fármacos têm sido realizados; contudo, são essenciais também investimentos para o desenvolvimento ou aprimoramento de etapas básicas da cadeia de produção dos stents relacionadas com engenharia de superfície e nanotecnologia.

São exemplos de tópicos tecnológicos para investimentos:

- Texturização com laser das superfícies dos stents;
- Caracterização de superfícies;
- Eletropolimento e tratamento químico, entre outros [25].

Recomendações

- 1) Identificar gargalos em relação à disponibilidade de matéria-prima, tecnologias, equipamentos e recursos humanos para a ampliação da produção de stents no país;
- 2) Investir em PD&I voltada para solucionar as dificuldades identificadas no item anterior;
- 3) Selecionar fármacos prioritários para o desenvolvimento de stents nacionais recobertos por fármacos, incluindo testes toxicológicos; e
- 4) Atrair centros de PD&I de empresas estrangeiras.

7.4. Materiais dentários

A população brasileira passa por um momento de transição da qualidade da saúde bucal, fruto da implantação tardia de políticas públicas na área de saúde bucal [26]. A população idosa ainda apresenta altos índices de perdas dentais, enquanto a população infantil já se aproxima das metas da Organização Mundial da Saúde (OMS), que prevê 50% das crianças entre os cinco e seis anos livres de cáries.

O mercado global de sistemas de implante, restauração e regeneração para substituição de dentes perdidos total ou parcialmente é estimado em U\$ 3 bilhões em 2008, divididos em 44, 31, 18 e 7% para, respectivamente, Europa, Estados Unidos, Ásia/Pacífico e Países BRIC¹⁴ [27]. No Brasil, esse

¹⁴ BRIC: sigla que engloba Brasil, Rússia, Índia e China.

mercado é crescente e promissor. Além do acesso a planos privados de tratamento odontológico, a população conta hoje com o Programa de Saúde Bucal do Governo Federal que se propõe a estender o serviço de implantes a um maior número de Centros de Especialidade Odontológica (CEO). Há empresas nacionais produzindo implantes dentários, geralmente em titânio ou ligas Ti-Al-V. Essas empresas poderiam também ser beneficiadas pelos resultados de propostas que visam transferência de tecnologia de outros setores como recobrimentos, produção de ligas de titânio nacionais e estudos em biotribologia. Materiais para enxertos (de origem bovina ou sintética) têm sido produzidos e empregados em cirurgias buco-maxilo-faciais e como arcabouços para a engenharia tecidual óssea, que será apontada adiante.

Publicação de 2005 do IBGE sobre “Pesquisa Industrial por Produto” disponibiliza informações sobre os produtos fabricados pela indústria brasileira, utilizando a nomenclatura articulada entre a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) e o Mercosul. Na categoria de “produto nacional” são incluídos produtos importados, reprocessados e/ou embalados no Brasil, sendo praticamente impossível destacar a produção efetivamente nacional [2]. A competência do Brasil em odontologia é reconhecida mundialmente. Recentemente, a Capes indicou a área que reúne odontologia, cirurgia oral e medicina como uma das líderes em publicações indexadas, com produção da ordem de 4 vezes a produção média brasileira. Entretanto, esse conhecimento tem chegado à indústria de forma lenta.

Dois materiais odontológicos merecem destaque no universo dos próximos 15 anos, [2]:

- Cimentos de ionômero de vidro (CIV); e
- Cerâmicas odontológicas.

Cada um deles destina-se de modo particular a melhorar a qualidade de vida da população.

7.4.1. Agenda de PD&I em cimento iônomo de vidro (CIV)

Entre as opções de materiais dentários disponíveis no mercado, o cimento ionômero vidro (CIV) também chamado de *glass ionomer* se destaca pela facilidade de aplicação, adequação estética e possível liberação de flúor. Por estes e outros motivos, os CIV estão presentes na maioria dos consultórios odontológicos do mundo, sendo, portanto, um material relevante economicamente. Seu potencial de aplicação foi classificado como 5, em uma escala de 0 a 5 [2].



As aplicações dos CIV são várias, incluindo uso para cimentar próteses e brackets ortodônticos, em restaurações temporárias e como base de restaurações muito profundas, em selantes e ainda na medicina, como cimentos ósseos. Destaque-se também a indicação do CIV para restauração não-traumáticas (ART - *atraumatic restorative technique*), desenvolvimento ocorrido na década de 90 visando ao mercado de países em desenvolvimento e subdesenvolvidos. Em áreas remotas e na ausência de pessoal qualificado, é possível estancar o processo de formação da cárie com a aplicação do CIV.

Os cimentos ionômeros de vidro (CIV) foram desenvolvidos nos anos 70 e, hoje, englobam quatro grandes grupos: convencional, modificado com metais (cermets), modificados com resinas e compômeros, totalizando mais de 50 produtos comerciais [28]. As principais empresas fabricantes de CIVs se encontram na Europa, Japão, EUA e Austrália. No Brasil, os ionômeros são, em sua ampla maioria, importados e embalados em território nacional, similarmente ao que ocorre em outros países em desenvolvimento.

Recomendações

- 1) Selecionar duas ou três composições de cimentos ionômeros de vidro (CIV) em função do *know how* existente nas ICT, das demandas do SUS e de disponibilidade de matéria-prima no país;
- 2) Desenvolver as composições de cimentos ionômeros de vidro selecionadas no item anterior, incluindo a etapa de testes toxicológicos; e
- 3) Investir em PD&I em *gaps* existentes no processo de inovação e *Scale-up*.

7.4.2. Agenda de PD&I em cerâmicas dentais

As cerâmicas dentais vêm ampliando seu mercado em odontologia na medida em que muitos avanços em termos de propriedades mecânicas e estéticas foram alcançados. As porcelanas dentárias são utilizadas no recobrimento de subestruturas metálicas (*copings*) para reabilitação de pacientes com perdas volumosas da estrutura dental. Já o sistema de próteses cerâmicas livre de metal (*metal-free*) foi desenvolvido para satisfazer a crescente tendência da odontologia estética, eliminando o metal das próteses e restaurações. Neste caso, substitui-se a subestrutura metálica por um corpo cerâmico (de alumina, zircônia ou espinélio) sobre o qual será infiltrada a porcelana. A principal causa de falha destes sistemas está associada à baixa tenacidade dos materiais cerâmicos [29]. Também

o desgaste de dentes antagonistas e/ou da porcelana é um tema de grande interesse, que depende de estudos aprofundados em biotribologia.

A porcelana odontológica geralmente compreende uma fase vítrea e uma fase cristalina e tem como componentes principais feldspato, quartzo, alumina, zircônia e caulim. Um desafio importante a vencer é a fabricação das subestruturas cerâmicas (*copings*) assistida por CAD/CAM¹⁵. A tecnologia CAD/CAM é amplamente utilizada em diversos setores, mas na área de cerâmicas dentais a usinagem dos *copings* tem sido feita em laboratórios no exterior, encarecendo o procedimento e aumentando o tempo de tratamento.

Recomendações

- 1) Reunir competências em CAD/CAM existente em outros setores, para transferir tecnologia para o setor de materiais cerâmicos;
- 2) Fazer o *scale-up* do processo de produção de porcelanas dentais;
- 3) Desenvolver cerâmicas compatibilizando propriedades ópticas de translucidez com as propriedades mecânicas necessárias.

7.5. Materiais nanoestruturados para diagnóstico e tratamento de doenças

As doenças crônicas figuram como principal causa de mortalidade e incapacidade no mundo, responsável por 59% dos 56,5 milhões de óbitos anuais. São os chamados agravos não-transmissíveis, que incluem doenças cardiovasculares, diabetes, obesidade, câncer e doenças respiratórias, [30]. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), existem mais de 1 bilhão de pessoas infectadas com uma, ou mais, doenças negligenciadas, [31]. O sucesso do tratamento e a erradicação de doenças negligenciadas (DN) dependem de inúmeros e complexos fatores, mas a inovação tecnológica em saúde é um item fundamental.

A nanociência e a nanotecnologia abrem novos caminhos para o diagnóstico e tratamento de doenças crônico-degenerativas e negligenciadas, possibilitando que se evolua da medicina curativa para a medicina diagnóstica e uso de terapias menos invasivas. A complexidade dessas tecnologias é gran

¹⁵ Manufatura assistida por computador; de computer-aided design / computer-aided manufacturing



de, pois os materiais nanoestruturados são normalmente associados a sistemas de liberação controlada ou à engenharia tecidual, o que vai exigir elevados recursos e RH altamente qualificados.

Produtos fotônicos representam cerca de 20% (em valor) do setor de equipamentos eletrônicos, [32]. Cromóforos (compostos fotoativáveis) e pontos quânticos são substâncias ou nanopartículas que exibem fluorescência quando irradiados com luz de comprimento de onda adequado. Podem ser associados a polímeros ou moléculas funcionais (como peptídeos), tendo aplicação como marcadores em kits para diagnóstico, no imageamento biológico e na medicina. Alguns marcadores reagem com a luz e o oxigênio formando oxigênio singleto que leva à morte celular. A terapia fotodinâmica (TFD ou PDT de *photodynamic therapy*) para tratamento de alguns tipos de câncer utiliza esse princípio, tendo como insumo moléculas fotoativáveis e fontes de luz (laser ou LEDs). Os cromóforos baseados em porfirinas têm sido substituídos por uma segunda geração de agentes fototerapêuticos como as ftalocianinas que apresentam ação mais efetiva, podendo ser administradas em menores dosagens no tratamento de neoplasias.

Pontos quânticos (*quantum dots*) são partículas nanométricas quase esféricas com dimensões da ordem de 10 nm ao longo de pelo menos dois eixos do cristal, o que resulta em partículas com 200 a 10.000 átomos. Pontos quânticos de óxido de ítrio ou seleneto de cádmio são propostos como componentes de kits diagnósticos para a detecção precoce de tumores. O mercado global de pontos quânticos em 2013 é estimado em U\$ 700 milhões, [33]. A rota de fabricação desses nanomateriais geralmente envolve processo sol-gel e, no Brasil, diversos grupos de pesquisa têm se dedicado ao desenvolvimento desses materiais.

Ferrofluidos ou fluidos magnéticos biocompatíveis são essencialmente suspensões coloidais estáveis contendo nanopartículas de óxido de ferro. Esses ímãs nanoscópicos podem atuar como marcadores ou serem usados no procedimento denominado magnetohipertermia. De forma resumida, a magnetohipertermia consiste na injeção vetorizada de nanopartículas com tamanho da ordem de 5 nm acopladas a substâncias bioativas. A aplicação de um campo magnético alternado provoca aumento de temperatura local que pode levar a célula à morte, [34]. Também é proposta na literatura o uso de ouro coloidal (nanopartículas de ouro em suspensão), sendo que pesquisadores do Instituto de Pesquisas em Patologias Tropicais (IPEPATRO) desenvolveram um sistema de detecção com ouro coloidal para diagnóstico de malária *falciparum*, [35].

O Relatório de Perspectivas em Materiais Avançados (Fase II) indicou o tema nanotecnologia aplicada ao tratamento de doenças crônico-degenerativas como um dos itens em que o Brasil se encontra mais afastado do estágio de P&D existente nos países de primeiro mundo. O atraso existente, so-

mado às características de intensividade tecnológica, coloca o Brasil frente ao desafio de identificar nichos para investir maciçamente como forma de construir competitividade nesta área estratégica.

Em 2004, o MCT, através de editais dos Fundos Setoriais CT-Energia e CT-Biotecnologia, financiou projetos visando fabricação, caracterização e utilização de pontos quânticos como marcadores biológicos e em genômica/proteômica. Também, os INCTs aprovados em 2008/2009 terão um papel relevante na ampliação da inovação no país e na consolidação de determinadas tecnologias, sendo que, pelo menos, dois desses projetos tem como propostas o uso de materiais nanoestruturados para diagnóstico e/ou tratamento de câncer.

A UNB é uma das instituições líderes na aplicação da terapia fotodinâmica para tratamento de câncer de boca e pele, [36]. A pesquisa em câncer de pele já concluiu a primeira fase clínica no Hospital Regional da Asa Norte - HRAN em Brasília, DF. A inovação, nesse caso, é na veiculação (carreação) dos fotosensibilizadores em estruturas nanométricas, nanopartículas magnéticas, lipossomas e nanocápsulas. A pesquisa em câncer de boca já concluiu a fase de testes pré-clínicos, utilizando fotosensibilizadores disponíveis no mercado, enquanto que, o uso de fluidos magnéticos se encontra em fase pré-clínica e um dos principais gargalos apontados pelos pesquisadores é o *scale-up* da produção destes fluidos.

Muitos desses materiais ou tecnologias utilizam materiais nanoestruturados associados a sistemas de liberação controlada (*drug delivery*). Dada à relevância do tema, cinco convênios de cooperação Capes-Cofecub estão em andamento e são coordenados por pesquisadores da UFPE, UFRGS, UFSC, Unesp-IS e UnB. Em função da área de atividade da equipe do projeto de pesquisa, o mesmo tem como objetivo principal a síntese de nanopartículas, a cinética de liberação de substâncias ativas, o tratamento de doenças propriamente dito ou a interação nanopartícula-carreador-fármaco.

O principal entrave à popularização dessas tecnologias é a transferência da produção de materiais e processos da escala laboratorial para a escala piloto e dessa, para a escala industrial (i.e., *scale up*).

Recomendações

- 1) Fazer o *Scale-up* do processo de veiculação do agente fotosensibilizador, com a criação de, pelo menos, uma empresa incubada.
- 2) Incubar, ao menos, uma empresa para a produção de fluidos magnéticos.
- 3) Ampliar infraestrutura de caracterização de materiais nanoestruturados e de testes pré-clínicos.



7.5.1. Agenda de PD&I em materiais nanoestruturados para diagnóstico e tratamento de doenças

Segundo especialistas, uma agenda deve se concentrar em materiais (monômeros, partículas de óxidos com dimensões nanométricas, [37] e argilas nanoestruturadas), processos de encapsulamento, bem como solucionar os problemas identificados nas etapas de *scale-up*.

Recomendações

Financiar projetos para superação dos gargalos no *scale-up* de materiais nanoestruturados, identificando, nos diversos grupos de PD&I, competências para a solução dos entraves tecnológicos;

- 1) Financiar projetos de PD&I em pontos quânticos, de forma a garantir quantidades reprodutibilidade adequadas; e
- 2) Ampliar infraestrutura multiusuário para caracterização de materiais nanoestruturados e testes pré-clínicos.

7.6. Materiais carreadores para sistemas de liberação controlada (slc)

Sistemas de liberação controlada (SLC ou *drug delivery systems - DDS*) liberam fármacos ou outras substâncias ativas em locais precisos e ao longo de um dado tempo, objetivando a eficácia terapêutica. O princípio ativo de interesse é incluído em um material (carreador), ou a ele ligado, e o conjunto princípio-ativo/carreador é adicionado a um veículo como, por exemplo, um gel polimérico. As formas convencionais de administração de SLC (oral, inalável, injetável e tópica) têm sido amplamente exploradas pela indústria farmacêutica e de cosméticos.

A associação dos SLC (ou DDS) com nanociência e nanotecnologia conjuga conhecimentos de física, química, engenharia, farmácia etc, na chamada ciência convergente. No mundo inteiro, vultosos recursos têm sido destinados a pesquisas nesta área para o tratamento de câncer, HIV¹⁶ e diabetes,

entre outros. O impacto da nanotecnologia, principalmente nos sistemas implantáveis, é enorme e estima-se que o mercado global de *drug delivery* baseado em nanotecnologia atinja US\$ 700-800 bilhões em 2015, [38]. Sistemas de liberação controlada (micro ou nanoestruturados) podem ainda ser utiliza-

¹⁶ De Human immunodeficiency virus

dos em conjunto com a engenharia tecidual, sendo relativamente comum a inclusão de substâncias antimicrobianas ou antibióticos a arcabouços 2- ou 3-D, para posterior liberação no sítio de interesse.

Os carreadores do tipo sistema-reservatório são largamente empregados pela indústria moderna de cosméticos e de alimentos para proteger a substância ativa dos efeitos da radiação ultravioleta, umidade ou do contato com oxigênio, [2]. Na medicina, fármacos são encapsulados ou associados também a filmes ou membranas poliméricas. Além de polímeros, fosfatos de cálcio, argilas e nanocompósitos (geralmente de matriz polimérica) têm sido utilizados como carreadores em sistemas de *drug delivery*. Dada à amplitude do tema, essa seção se concentra nos polímeros biodegradáveis empregados no encapsulamento (micro ou nano) de substâncias ativas e na produção de curativos têxteis. Entretanto, as recomendações propostas podem ser estendidas a outras aplicações.

Curativos especiais são empregados em queimados e ulcerações crônicas de origem diabética ou venosa, [39]. Estima-se que em 2011 o mercado americano para tecnologias avançadas no tratamento de lesões da pele atinja US\$ 4,6 bilhões, [40], sendo que nesse valor estão incluídas também as terapias celulares¹⁷. De acordo com dados do Ministério da Saúde de 2000, o SUS gasta cerca de R\$ 55 milhões/ano com o tratamento de queimados. As ulcerações crônicas são um problema crescente em idosos e na população diabética, que foi estimada em aproximadamente 10 milhões em 2004, [41]. Similarmente às projeções mundiais, prevê-se crescimento do número de diabéticos no Brasil e, consequentemente, aumento dos gastos públicos com o tratamento de complicações decorrentes da doença.

São bastante comuns os curativos que utilizam carreadores compósitos multi-camadas. A associação de camadas com diferentes graus de hidrofobicidade, malhas com aberturas diversas (em tamanho e formato) e o emprego de fios ou fibras nanométricas permitem a fabricação de um leque enorme de produtos. Agentes antimicrobianos¹⁸ e antibióticos podem ser incorporados a essas camadas. No Brasil, poliisopreno de origem vegetal, produtos oriundos de cana-de-açúcar e acetato de celulose têm sido empregados no desenvolvimento de curativos e substitutos da pele.

Na literatura científica, abundam propostas de uso de quitosana, alginato e colágeno como base de curativos para regenerar a pele. Quitosana é um material semicristalino derivado da quitina, o segundo polissacarídeo mais abundante na natureza, encontrada em animais marinhos, fungos e insetos. São várias as iniciativas para a produção de quitosana no país, [42] [43], incluindo testes em escala-piloto para a produção da quitina e da quitosana a partir de resíduos da indústria pesqueira, [44].

¹⁷ Terapias celulares ou a interação do tecido biológico (ou sintético) com células é uma das áreas da medicina regenerativa que será abordada na Seção 6.

¹⁸ Os agentes antimicrobianos, bactericidas e antifúngicos, como a prata, se adaptam a usos diversos, incluindo fraldas descartáveis e têxteis esportivos e recebem o nome genérico de “silver-coated dressing ou SCD”.



Já existem produtos no mercado à base de quitosana que usam os princípios de liberação localizada e sustentada, [45]. Também, colágeno ou colágeno associado à quitosana, além de alginatos, lipossomas, poli(ácido lático)-PLA e poli(ácido lático-co-ácido glicólico) -PLGA, entre outros, têm sido extensivamente explorados para armazenar e liberar de forma controlada, diversos princípios ativos, como por exemplo, a insulina, [46].

A área de P&D em doenças da pele e do tecido subcutâneo está incluída em Edital¹⁹, que tem como objetivo o fortalecimento da Rede Brasileira de Avaliação de Tecnologias em Saúde – REBRATS. Nesse contexto, investimentos foram direcionados especificamente para o levantamento, mediante revisão sistemática da evidência disponível sobre a utilização de curativos contendo carboximetilcelulose, comparado a outras alternativas para tratamento de feridas e queimaduras. Também está previsto o levantamento, mediante estudo epidemiológico, das práticas adotadas nos serviços do Sistema Único de Saúde. Os resultados do projeto, em desenvolvimento por pesquisadores da UFF e UFRJ, nortearão a elaboração de recomendações para o Ministério da Saúde no que tange ao uso seguro e eficaz de curativos no tratamento de feridas e queimaduras.

7.6.1. Produção de polímeros biorreabsorvíveis para sistemas de liberação controlada

Polímeros biorreabsorvíveis são, em sua ampla maioria, produzidos a partir de uma fonte de carbono renovável. Entre os biomateriais poliméricos se destacam como os de maior importância econômica: poli(ácido lático) - PLA, polihidroxialcanoato - PHA, polímeros de amido e xantana – Xan, [47]. No Brasil, devido ao preço elevado do poli(ácido lático) - PLA e poli(ácido glicólico) PGA, têm sido utilizados os polihidroxialcanoatos (PHA) como o polihidroxibutirato (PHB), o polihidroxivalerato (PHV) e seus copolímeros para a produção de placas e parafusos biodegradáveis e para aplicações em engenharia tecidual.

Recomendações

- 1) Ampliar a produção de PHB no país.
- 2) Reunir competências no país em PD&I para verificar a viabilidade de *scale-up* para a produção de PLA no país, em conjunto com outros setores econômicos.
- 3) Otimizar a etapa de purificação dos polímeros biodegradáveis, visando às aplicações na área de saúde.

¹⁹ Edital MCT/CNPq/CT-Saúde/MS/SCTIE/DECIT N° 067/2009

7.6.2. Agenda de PD&I em materiais carreadores para sistemas de liberação controlada

Um desafio importante em polímeros biorreabsorvíveis é adequar o tempo de degradação do polímero à regeneração do tecido ou à liberação controlada desejada, uma vez que o metabolismo humano é muito variável e a correlação das propriedades físico-químicas com a taxa de degradação ainda pouco conhecida. Por isso, muitos grupos de diversas ICTs tem se dedicado ao desenvolvimento de copolímeros, ajustando a composição e o processamento aos requisitos prioritários para uma dada aplicação. Como em outras áreas, os resultados obtidos em PD&I tem sido publicados em revistas relevantes, mas a interação com o setor produtivo ainda é aquém da ideal.

Além dos polímeros citados anteriormente, argilas especiais têm sido sugeridas como carreadores para sistemas de liberação controlada. A agregação de valor a argilas montmorilonitas e argilas fibrosas como a atapulgita pode ser uma opção de material carreador de baixo custo para uso na indústria farmacêutica e de cosméticos, [48].

Recomendações

- 1) Mapear as necessidades de polímeros biorreabsorvíveis na área de saúde, em termos de volume de produção, composição e processamento;
- 2) Fazer *scale-up* de copolímeros com biodegradabilidade controlada;
- 3) Ampliar a produção de quitosana para uso em aplicações médicas;
- 4) Agregar valor a argilas brasileiras com potencial uso como carreador;
- 5) Desenvolver metodologia para determinação de efeitos colaterais ou tóxicos decorrentes da degradação *in vivo* dos carreadores utilizados em sistemas de liberação controlada. *Scale-up* para a produção de copolímeros com biodegradabilidade controlada.

7.7. Materiais para engenharia tecidual

O tópico em medicina regenerativa, terapias celulares e engenharia tecidual foi considerado o mais prioritário, no documento que definiu as prioridades de PD&I de materiais avançados para a saúde médico-odontológica, [7]. O alto nível de prioridade atribuído à medicina regenerativa (MR) não surpreende, pela tendência de evolução da medicina na direção da regeneração de órgãos e tecidos, de uma forma personalizada.



A medicina regenerativa é uma área portadora de futuro, que tem como objetivo controlar e ampliar a capacidade natural de regeneração tecidual, adotando uma diferente abordagem no tratamento de lesões e doenças. Medicina regenerativa engloba vários temas relevantes como:

- Dispositivos médicos e órgãos artificiais;
- Engenharia tecidual e biomateriais;
- Terapia celular e testes clínicos [49].

Nos EUA, que gastam mais de U\$ 1,5 trilhões/ano em saúde, a medicina regenerativa é vista como solução para combater o aumento contínuo dos gastos decorrentes do envelhecimento populacional, [50]. O documento 2020: A New Vision - A Future for Regenerative Medicine, [50], do U.S. Department of Health and Human Services (HHS) estabelece as metas previstas para o desenvolvimento da medicina regenerativa nos próximos anos. Os autores consideram que em 10 anos as terapias de MR devem estar disponíveis para o tratamento de pacientes e bases de PD&I instaladas em empresas. Em vinte anos, deve se atingir o pleno potencial dessas terapias, mas esse prazo pode se estender por mais 20 a 30 anos caso não haja apoio suficiente (políticas públicas e recursos financeiros) do governo americano.

A engenharia de alguns tecidos, como cartilagem e osso, depende de um biomaterial que sirva como arcabouço para a cultura de células e o desenvolvimento do novo tecido²⁰. O projeto de um arcabouço objetiva mimetizar o funcionamento da matriz extracelular (MEC) em uma estrutura coordenada no tempo e organizada no espaço, sendo necessário codificar os sinais biológicos dentro do arcabouço para controlar a adesão, migração, proliferação e diferenciação celular. Para isso, é preciso estabelecer um compromisso entre as propriedades físico-químicas e biológicas do arcabouço, [52].

Diversos materiais têm sido propostos como arcabouços na engenharia tecidual, a exemplo de polímeros biorreabsorvíveis, fosfatos de cálcio, compósitos de polímeros (naturais ou sintéticos) com fosfatos de cálcio, componentes da MEC purificada (colágeno, ácido hialurônico e fibrina), alginato e quitosana. Uma etapa importante no desenvolvimento de arcabouços consiste em entender o papel das propriedades físico-químicas e de superfície na adesão de proteínas ao material, uma vez que a interação material-proteínas definirá o tipo de interação material-células (ou tecido) possível, [53].

20 Idealmente, células do paciente são cultivadas in vitro no arcabouço e, após algum tempo, o conjunto (arcabouço mais células) é inserido no paciente, substituindo em parte, ou todo, o tecido lesado.

7.7.1. Inovação tecnológica para produção de arcabouços 2 e 3D

Diversos grupos têm se dedicado à pesquisa e desenvolvimento de biocerâmicas e biomateriais à base de fosfato de cálcio. Em maio de 2009, havia 19 e 11 grupos de pesquisa catalogados no diretório de grupos de pesquisa do CNPq com a palavra-chave *biocerâmica(s)* ou *fosfato(s) de cálcio*, respectivamente. No que se refere especificamente à produção de arcabouços para engenharia tecidual no país, existem algumas poucas iniciativas de empresas incubadas em pólos de alta tecnologia.

Polímeros biorreabsorvíveis também apresentam grande potencial de inovação, produção e absorção pelo setor de produtos para a engenharia tecidual e medicina regenerativa, particularmente em substituição a tecidos moles, como pele e cartilagem. Pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica nesses materiais são realizados em 67 grupos de pesquisadores no CNPq. Há 3.982 patentes registradas no INPI e 20 produtos médicos registrados na Anvisa. Dos 20 produtos médicos, apenas um tinha como objetivo aplicação em engenharia tecidual óssea, porém apresenta registro vencido desde 2001. A grande maioria das patentes se refere a polímeros utilizados em aplicações médicas; outras, que não a engenharia tecidual. Desta forma, observa-se que, apesar da intensa atividade de pesquisa, há um grande gargalo na inovação e transferência de tecnologia.

Entre as ações e políticas específicas voltadas para o desenvolvimento e produção em média escala de arcabouços para terapia celular cita-se a Política de Desenvolvimento da Biotecnologia, por meio do Decreto Lei nº 6.041, de 8 de fevereiro de 2007, em sintonia com o PAC do MCT. Na citada política, a área de biomateriais foi considerada uma das prioritárias dentro do contexto de saúde humana; enquanto que a nanobiotecnologia e a terapia celular com o uso de células-tronco, foram consideradas áreas de fronteira da biotecnologia.

Em 2008, foi criada a Rede Ibero-Americana de Biofabricação em Materiais, Processos e Simulação (Biofab) e, mais recentemente, o INCT Biofabris para, entre outros, elaborar projetos de biofabricação e desenvolver software para arcabouços para engenharia tecidual.

Recomendações

- 1) Mapear as necessidades de arcabouços para a engenharia tecidual em termos de materiais, fabricação, competências e *scale-up*;
- 2) Otimizar a resistência mecânica, porosidade e a degradação do arcabouço em função da aplicação desejada;



- 3) Fomentar projetos por meio de edital de parceria universidade e empresa para a difusão e transferência de tecnologia na área de biomateriais para arcabouços em engenharia tecidual;
- 4) Identificar gargalos existentes nos processos de inovação e *scale-up*;
- 5) Criar base normativa para certificação de biomateriais para engenharia tecidual.

7.7.2. Agenda de PD&I em arcabouços e terapia celular

Pesquisadores brasileiros tem se dedicado basicamente a três grandes temas:

- Aprimoramento dos biomateriais para arcabouços;
- Associação de biomateriais a células pluri ou totipotentes (*stem cells*) e/ou a fatores de crescimento para a produção de tecidos e órgãos; e
- Terapia celular para a regeneração tecidual.

Em geral, o que está sendo pesquisado nas ICTs no Brasil é bastante similar ao desenvolvido em outros países, não havendo, em nível de pesquisa, um *gap* tecnológico marcante.

Matrizes descellularizadas (ECM) xenogênicas (de origem animal) ou alogênicas (normalmente de banco de tecidos), tais como valvas cardíacas, bexiga urinária e submucosa intestinal, associadas ou não a tipos celulares específicos vêm sendo desenvolvidas no país. Contudo, alguns autores alertam para o seu potencial imunogênico, contaminação, difícil especificação, caracterização e reprodutibilidade, [55].

Biocerâmicas, materiais ósteo-miméticos, polímeros naturais e sintéticos, proteínas estruturais, biomateriais condro-miméticos, combinados ou não, vêm sendo estudados com vistas à produção de arcabouços com características específicas. Entretanto, esses arcabouços são produzidos em pequenas quantidades e de modo artesanal, dependendo, muitas das vezes, de insumos importados (caros e com baixa disponibilidade como o PLA e o PGA). Além disso, a compatibilização das propriedades mecânicas com as biológicas de um *scaffold* não foi alcançada plenamente.

Diversas ações governamentais foram desenvolvidas nos últimos oito anos com vistas ao financiamento de pesquisas na área de biotecnologia e nanotecnologia para o desenvolvimento de novos biomateriais e pesquisas em terapia celular, muitas delas sob a forma de ações transversais. O MS, em parceria com o MCT, lançou uma primeira chamada pública, em 2008, para o financiamento de pesquisas específicas em terapia celular sob a forma de uma Rede

Nacional de Terapia Celular (RNTC) com o objetivo de estruturar o esforço nacional de pesquisa em terapia celular; ampliar a geração de conhecimento, por meio de uma maior interação entre a comunidade científica e qualificar novos profissionais; e reduzir os gastos do SUS com procedimentos cardíacos, transplantes a reinternações, [63].

Dando continuidade, a criação de um Plano Nacional Integrado de PD&I em Medicina Regenerativa composta por uma Rede Nacional de Engenharia tecidual (RNET) integrada à existente RNTC promoveria uma importante re-estruturação da pesquisa básica e aplicada nessa área. É viável, ainda, em futuro próximo, a independência tecnológica do país na produção de determinados produtos de engenharia brasileira pela associação dos arcabouços em PD&I com as linhagens celulares nacionais, de forma a propiciar a regeneração tecidual e órgãos tridimensionais, a exemplo do osso, cartilagem, fígado, pâncreas etc.

Recomendações

- 1) Mapear as demandas futuras do SUS em termos de PD&I em engenharia tecidual;
- 2) Identificar gargalos para a inovação tecnológica em arcabouços;
- 3) Fomentar a criação de uma Rede Nacional de Engenharia Tecidual;
- 4) Criar um Plano Nacional Integrado de PD&I em Medicina Regenerativa, por meio da integração das Redes Nacional de Terapia Celular (já existente) e de Engenharia Tecidual (a ser criada);
- 5) Criar infraestrutura de caracterização e a base normativa para certificação de biomateriais e de linhagens celulares para engenharia tecidual.

7.8. Conclusão

O Estudo Prospectivo em Materiais Avançados para Aplicações em Saúde Médico-Odontológica, conduzido pelo CGEE, foi organizado em seis capítulos que detalham os tópicos definidos como prioritários para o desenvolvimento industrial do setor no horizonte de 2022:

- 1) Desenvolvimento de materiais para implantes ortopédicos,
- 2) Desenvolvimento de materiais para próteses endovasculares (stents),
- 3) Desenvolvimento de materiais dentários,
- 4) Desenvolvimento de materiais nanoestruturados para diagnóstico e tratamento de doenças,



- 5) Desenvolvimento de materiais carreadores para sistemas de liberação controlada (SLC); e
- 6) Desenvolvimento de materiais para engenharia tecidual.

7.8.1. Recomendações gerais

Em recursos humanos. Cruciais para o desenvolvimento de qualquer setor, as ações a serem efetivadas na área de RH devem incluir também especializações e cursos técnicos em *scale-up* e em gestão tecnológica. É necessário ampliar as políticas de fixação de RH em empresas e ICTs, contemplando, inclusive, pessoal de nível técnico.

Em demanda de mercado. Usar o poder de compra do Estado para estimular a produção nacional de biomateriais para a saúde, projetando o rol de compras dos próximos anos.

Em financiamento.

- 1) Financiamento da ampliação da capacidade de produção nacional de produtos para saúde estratégicos ou de uso em larga escala no âmbito do SUS (Novo Profarma e Recursos do MS);
- 2) Expansão dos recursos para P&D em tópicos estratégicos (MS, projetos em áreas prioritárias; BNDES, Profarma e Funtec; Finep, CT-Saúde; MCT, infraestrutura). Uso dos recursos destinados às áreas estratégicas de biotecnologia e nanotecnologia, sempre que pertinente;
- 3) Financiamento de projetos de *scale-up*, obtenção de patentes no exterior e implantação de normas ISO em laboratórios públicos; e
- 4) Estímulo do desenvolvimento de pesquisa científica e tecnológica em estreita articulação com empresas inovadoras, nas áreas do Sistema Brasileiro de Tecnologia (Sibratec).

Especial destaque é dado aos materiais e tecnologias associadas que se revelam fundamentais para a inovação e a sustentabilidade do desenvolvimento tecnológico do setor dependente de materiais avançados para aplicações em saúde médico-odontológico:

Em ligas metálicas. Ligas de CoCrMo e ligas de titânio são relevantes, principalmente, na ortopedia para a fabricação de próteses não-cimentadas. O desenvolvimento e o processamento de ligas com memória de forma como ligas NiTi (nitinol) são de interesse da odontologia e tem aplicação na fabricação de stents e potencial como atuadores elétricos.

Em polímeros inertes e polímeros biodegradáveis. Próteses metal-polímero podem ser aprimoradas com o uso de polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM) com tratamento superficial para aumento da resistência ao desgaste. Polímeros biorreabsorvíveis são fundamentais para a expansão de sistemas de liberação controlada (*drug delivery*) e engenharia tecidual.

Em cerâmicas avançadas. A produção e usinagem de cerâmicas avançadas por CAD/CAM é um nicho de mercado na odontologia, hoje restrita a processamento no exterior. O desenvolvimento de cimentos ionômeros de vidro é também relevante para aplicações, principalmente, no âmbito do SUS.

Em compósitos poliméricos. Compósitos lamelares ou associações de polímeros com biocerâmicas são importantes como arcabouços 2 ou 3D para a engenharia tecidual e em sistemas de liberação controlada. O desafio nesta área consiste em ajustar a biodegradabilidade desses materiais às necessidades de regeneração dos tecidos.

Em engenharia de superfícies e biotribologia. O conhecimento existente em outras áreas pode ser transferido para melhorar o desempenho de produtos como próteses (ortopédicas ou endovasculares) e materiais dentários. Processamento a laser ou plasma; tratamentos de superfície, em escala micro ou nanométrica e recobrimentos bioativos são exemplos de processos relevantes para a área de saúde.

Em nanotecnologia. A nanotecnologia é fundamental, principalmente, em sistemas de liberação controlada, na medicina diagnóstica e na engenharia tecidual. Destaque pode ser feito para os cromóforos funcionais, pontos quânticos, nanopartículas (poliméricas, óxidos metálicos ou magnéticas), filmes para controle de hidrofobicidade, entre outros materiais nanoestruturados.

Em sistemas de liberação controlada. É fundamental ampliar o entendimento da interação entre os materiais carreadores e as substâncias ativas, o ajuste de degradabilidade *in vivo* e o desenvolvimento de processos de fabricação reprodutíveis.

Em engenharia tecidual. Grande parte das aplicações da engenharia tecidual depende de arcabouços 2 ou 3D. Neste caso, é preciso aprofundar o estudo da interação dos materiais que compõem o arcabouço com proteínas, células ou genes; além do ajuste da biodegradabilidade ou bioreabsorção e da garantia de processos de fabricação reprodutíveis.



Colaboradores

- Alfredo Miranda de Góes, UFMG
- Aloisio Nelmo Klein, UFSC
- Celso Pinto de Melo, UFPE
- Cristina Tristão de Andrade, UFRJ
- Edison Bittencourt, ABIT
- Gilberto Goissis, BRAILE Biomédica
- Luiz Sérgio Marcelino Gomes, CE-SECROT
- Marcelo Ganzarolli de Oliveira, UNICAMP
- Marcio Bosio, ABIMO
- Maria Fidela de Lima Navarro, USP
- Paulo César de Moraes, INB
- Radovan Borojevic, UFRJ e INMETRO
- Rossana Mara da Silva Moreira Thire, UFRJ
- Rubens Belfort Junior, UNIFESP
- Silvana Vargas da Silva Goissis, Biotech Biomédica
- Sylvio Napoli, ABIT
- Tais Munhoz Machado Garcia de Oliveira, DFL Indústria e Comércio S/A

Referências

- IBGE, 9 outubro 2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1476&id_pagina=1>. Acesso em: 16 fevereiro 2010.
- CGEE. Materiais Avançados para Saúde Médico-Odontológica. Estudo Prospectivo. Fase I. Rio de Janeiro, p. 35. 2007.
- MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Nacional. Plano de Ação 2007-2010. Brasília, DF, p. 19-20. 2007.
- GOVERNO FEDERAL. Política de Desenvolvimento Produtivo - PDP. Brasília, DF, p. 235. 2008.
- DECIT/MS. Oficina de Prioridades de Pesquisa em Saúde. [S.l.]. 2008.
- FIESP. Manual dos instrumentos da Política de Desenvolvimento Produtivo. [S.l.]. 2009.
- CGEE. Estudo Prospectivo de Materiais Avançados, Relatório de Perspectivas - Fase II. Brasília, DF, p. 79-91. 2008.
- FAPERJ. FAPERJ, 29 janeiro 2009. Disponível em: <http://www.faperj.br/boletim_interna.phtml?obj_id=5190>. Acesso em: 29 maio 2009.
- BURNS, L. R. et al. Implant vendors and hospitals: Competing influences over product choice by orthopedic surgeons. *Health Care Management Review*, 34, 2009. 2-18.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. DATASUS. Disponível em: <<http://www.datasus.gov.br>>. Acesso em: 06 junho 2009.
- THE SWEDISH HIP ARTHROPLASTY REGISTRY. Annual Report. [S.l.]. 2007.
- THE NORWEGIAN ARTHROPLASTY REGISTRY. Annual Report. [S.l.]. 2007.
- RODRIGUES, C. V. M. Próteses Totais de Quadril: Diagnóstico do Panorama Nacional e Elaboração de Políticas Públicas. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006.
- CGEE. Materiais Avançados para o Setor Espacial. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.
- CGEE. Materiais para a Defesa e Segurança. Estudo Prospectivo. Fase I. [S.l.]. 2007.
- CGEE. Materiais Avançados para Aplicações Tribológicas. Estudo Prospectivo. Fase I, 2007.
- CALONIUS, O. Tribology of prosthetic joints – Validation of wear simulation methods. Tese de Doutorado. *Acta Polytechnica Scandinavica*, 2002. 62.



- ANVISA. Boletim Brasileiro de Avaliação de Tecnologias em Saúde. Brasília, DF. 2008.
- AGOSTONI, P. et al. Clinical effectiveness of bare-metal stenting compared with balloon angioplasty in total coronary occlusions: insights from a systematic overview of randomized trials in light of the drug-eluting stent era. *American Heart Journal*, 2006. 682-689.
- FOLHA DE SÃO PAULO, 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult306u548459.shtml>>. Acesso em: 28 fevereiro 2010.
- POLANCZYK, C. A.; WAINSTEIN, M. V.; RIBEIRO, J. P. Custo-efetividade dos Stents Recobertos por Rapamicina em Procedimentos Percutâneos Coronarianos no Brasil. *Arq Bras Cardiol*, 2007. 464-474.
- US FDA. Disponível em: <<http://www.fda.gov/cdrh/news/091406.html>>. Acesso em: 15 outubro 2007.
- CENTRO COCHRANE DO BRASIL. Revisão sistemática de ensaios clínicos randomizados sobre stents recobertos com rapamicina ou paclitaxel versus stents convencionais. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2008.
- BOSTON SCIENTIFIC. Disponível em: <http://www.bostonscientific.com/templatedata/imports/collateral/eDFU/promus_dfu_02_us.pdf>. Acesso em: 9 março 2010.
- BNDES. II Seminário sobre o Complexo Industrial da Saúde. [S.l.]. www.bndes.gov.br/conhecimento/seminario/saude2_7.pdf.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portal Saúde. Disponível em: <http://portal.saude.gov.br/portal/saude/visualizar_texto.cfm?idtxt=21125>. Acesso em: 01 maio 2009.
- STRAUMANN. Disponível em: <http://www.straumann.com/com_index/ci_company/ci_dental_implant_market.htm>. Acesso em: 30 maio 2009.
- NAGARAJA UPADHYA, P.; G, K. Glass Ionomer Cement – The Different Generations. *Trends Biomater. Artif. Organs*, 18, 2005.
- SADOWSKY, S. J. An overview of treatment considerations for esthetic restorations: A review of the literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 96, 2006. 433-442.
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE. Disponível em: <http://www.opas.org.br/sistema/arquivos/d_cronic.pdf>. Acesso em: 14 junho 2009.
- DECIT / MINISTÉRIO DA SAÚDE. Doenças negligenciadas: o desafio. *Boletim Informativo*, p. 3, abril 2009.
- CGEE. Materiais Avançados para Aplicações Fotônicas. Estudo Prospectivo. Fase I. Brasília, DF. 2008.

- NANOTECHWIRE. Disponível em: <<http://www.nanotechwire.com/news.asp?nid=6897&ntid=188&pg=1>>. Acesso em: 16 maio 2009.
- UNB. Disponível em: <<http://www.unb.br/ib/cnano/projetos.htm>>. Acesso em: 1 novembro 2007.
- DECIT / MINISTÉRIO DA SAÚDE. Projeto desenvolve kit rápido de diagnóstico de malária para o SUS. Boletim Informativo, p. 2, fevereiro 2009.
- UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. UNB. Disponível em: <<http://vsites.unb.br/ib/cnano/projetos.htm>>. Acesso em: 21 fevereiro 2010.
- NANOX. Disponível em: <<http://www.nanox.com.br/nanoxhidrocell.asp>>. Acesso em: 6 junho 2009.
- THE MEDICAL NEWS, 2008. Disponível em: <<http://www.news-medical.net/?id=41554>>. Acesso em: 22 abril 2009.
- GOISSIS, G. Oficina de Validação dos Relatórios da Fase I. Brasília: CGEE. 2007.
- BCC RESEARCH, 2007. Disponível em: <<http://www.bccresearch.com/report/PHM011E.html>>. Acesso em: 19 maio 2009.
- REVISTA ISTO É GENTE, 2009. Disponível em: <<http://www.terra.com.br/istoegente/256/saude/index.htm>>. Acesso em: 19 maio.
- INSTITUTO VIRTUAL DE FÁRMACOS DO ESTADO DO RJ, 2006. Disponível em: <http://acd.ufrj.br/~ivfrj/ivfonline/edicao_0012/vitamina_A.html>. Acesso em: 15 junho 2009.
- UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAI. Disponível em: <http://siaiacado4.univali.br/download/pdf/spp_iwarp/rodrigues_clovis.pdf>. Acesso em: 15 junho 2009.
- MOURA, J. M. et al. Obtenção de quitina a partir de carapaças de siri (Maia squinado): uso de um planejamento experimental na etapa de de. VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias, Vol. 15, No 1 (2005), v. 15, p. 7-17, 2005. Disponível em: <<http://www.seer.furg.br/ojs/index.php/dqm/article/viewFile/294/85>>. Acesso em: 15 junho 2009.
- QUITOSANA: biopolímero funcional com potencial industrial biomédico. Quím. Nova, São Paulo, 32.
- NANOCORE. Composições farmacêuticas contendo microesferas biodegradáveis encapsulando insulina. Disponível em: <<http://www.nanocore.com.br>>. Acesso em: 2 junho 2009.
- CGEE. Biopolímeros e Intermediários Químicos. [S.l.], p. 119. 2006.
- COELHO, A. C. V. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. Química Nova, 30, 2007. 146-152.



- REGENERATIVE MEDICINE. Disponível em: <<http://www.regenerativemedicine.net/>>. Acesso em: 27 maio 2009.
- US DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES (HHS). Disponível em: <<http://www.hhs.gov/reference/newfuture.shtml>>. Acesso em: 22 abril 2009.
- EUROPEAN COMMISSION - ENTERPRISE AND INDUSTRY. Disponível em: <http://ec.europa.eu/enterprise/library/enterprise-europe/issue21/articles/pt/topic7_pt.htm>. Acesso em: 8 outubro 2007.
- CAUSA, F.; NETTI, P. A.; AMBROSIO, L. A multi-functional scaffold for tissue regeneration: the need to engineer a tissue analogue. *Biomaterials*, 28, 2007. 5093-5099.
- SANTOS, E. A. et al. Surface energy of hydroxyapatite and b-tricalcium phosphate ceramics driving serum protein adsorption and osteoblast adhesion. 19:2307–2316. *J Mater Sci: Mater Med*, 19, 2008. 2307–2316.
- ABDI. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br>>. Acesso em: 27 maio 2009.
- FURTH, M.; ATALA, A.; DYKE, M. E. V. Smart biomaterials design for tissue engineering and regenerative medicine. *Biomaterials*, 28, 2007. 5068–5073.
- NORDMANN, A. J. et al. Primary stenting versus primary balloon angioplasty for treating acute myocardial infarction. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2009.
- CHITOSAN and Alginate Wound Dressings: A Short Review. *Trends Biomater. Artif. Organs*, 18, 2004. 18-23.
- BIOTECH BIOMÉDICA. Disponível em: <<http://www.biotechbiomedica.com.br/>>. Acesso em: 10 outubro 2007.
- POLYMAR. Disponível em: <http://www.polymar.com.br/pagina.php?diretorio=materiaprima/&arquivo=hospitalar.php&menu=0&cod_secao=8>. Acesso em: 7 junho 2009.
- BIOCYCLE. Disponível em: <<http://www.biocycle.com.br>>. Acesso em: 31 maio 2009.
- MA, P. X. Biomimetic materials for tissue engineering. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 60, 2008. 184-198.
- LIAO, S.; AL., E. Stem cells and biomimetic materials strategies for tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 28, 2008. 1189-1202.

- SILVESTRE LABS. Disponível em: <http://www.silvestrelabs.com.br/imprensa/noticia_detalhe.asp?id=7>. Acesso em: 27 maio 2009.
- AGÊNCIA BRASIL, 2008. Disponível em: <<http://www.agenciabrasil.gov.br/noticias/2008/10/04/materia>>. Acesso em: 2 junho 2009.
- MOREL, C. M. Caderno de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 22, 2006. 1522-1523.
- ABIFINA, 14 nov. 2008. Disponível em: <<http://www.protec.org.br/noticias.asp?cod=2475>>. Acesso em: 27 maio 2009.
- BIOPLASTIC NEWS, 2009. Disponível em: <<http://bioplasticnews.blogspot.com/2009/07/phb-industrial-crise-adia-meta-de.html>>. Acesso em: 28 fevereiro 2010.
- FAPESP, 2007. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/7952/noticias/finep-premia-inovacoes-do-sudeste.htm>>. Acesso em: 19 maio 2009.
- LM FARMA. Disponível em: <<http://www.curativoage.com.br/age3orayon.aspx>>. Acesso em: 9 junho 2009.
- DECIT / MINISTÉRIO DA SAÚDE. Doenças negligenciadas e fomento à pesquisa no Ministério da Saúde. Boletim Informativo, p. 3, abril 2009.
- UNIVERSITY OF MICHIGAN.
Disponível em: <<http://www.news-medical.net/?id=41554>>. Acesso em: 22 abril 2009.
- Disponível em: <<http://www.bccresearch.com/report/PHM011E.html>>. Acesso em: 19 maio 2009.
- FAPESP. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/7952/noticias/finep-premia-inovacoes-do-sudeste.htm>>. Acesso em: 19 maio 2009.
- Disponível em: <<http://www.curativoage.com.br/age3orayon.aspx>>. Acesso em: 9 junho 2009.
- UFRJ. Disponível em: <http://acd.ufrj.br/~ivfrj/ivfonline/edicao_0012/vitamina_A.html>. Acesso em: 15 junho 2009.
- Disponível em: <<http://www.seer.furg.br/ojs/index.php/dqm/article/viewFile/294/85>>. Acesso em: 15 junho 2009.
- COMUNIDADE EUROPEIA. Disponível em: <http://ec.europa.eu/enterprise/library/enterprise-europe/issue21/articles/pt/topic7_pt.htm>. Acesso em: 8 outubro 2007.
- REVISTA ISTO É, 2009. Disponível em: <<http://www.terra.com.br/istoegente/256/saude/index.htm>>. Acesso em: 19 maio.



DECIT / MINISTÉRIO DA SAÚDE. Ciência, Tecnologia e Inovação em Saúde, fevereiro 2009.

DECIT / MINISTÉRIO DA SAÚDE. Ciência, Tecnologia e Inovação em Saúde, dezembro 2009.

DECIT / MINISTÉRIO DA SAÚDE. Ciência, Tecnologia e Inovação em Saúde, abril 2009.

SANTOS, E. A. et al. Surface energy of hydroxyapatite and b-tricalcium phosphate ceramics driving serum protein adsorption and osteoblast adhesion. 19:2307–2316. J Mater Sci: Mater Med, 19, 2008. 2307–2316.

Siglas e abreviaturas

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial	ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ABIMED	Associação Brasileira dos Importadores de Equipamentos, Produtos e Suprimentos Médico-Hospitalares	MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
ABIMO	Associação Brasileira da Indústria de Artigos e Equipamentos Médicos	MEC	matriz extra-celular
ANS	Agência Nacional de Saúde Suplementar	MR	medicina regenerativa
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária	MS	Ministério da Saúde
ART	<i>atraumatic restorative technique</i>	MSF	Médicos Sem Fronteiras
ATPC	angioplastia transluminal percutânea coronariana	OMS	Organização Mundial da Saúde
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	OPAS	Organização Pan-Americana de Saúde
BRIC	Brasil, Rússia, Índia e China	P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
CT&I	Ciência, tecnologia e inovação	PD&I	Pesquisa, desenvolvimento e inovação
CAD/ CAM	<i>computer-aided design / computer-aided manufacturing</i>	PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	PBAC	Programa Brasileiro de Avaliação de Conformidade
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas	PDP	Política de Desenvolvimento Produtivo
CDTS	Centro de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde	PDT	<i>photodynamic therapy</i>
CEO	Centros de Especialização Odontológica	PEUAPM	polietileno de ultra-alto peso molecular
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral	PHA	polihidroxialcanoato
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos	PHB	polihidroxibutirato
CIS	Complexo Industrial da Saúde	PHB-HV	poli(hidroxibutirato-hidroxivalerato)
CIV	cimento de ionômero de vidro	PHV	polihidroxivalerato
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	PLA	poli(ácido láctico)
COFECUB	<i>Comité Français d'Evaluation de la Coopération Universitaire avec le Brésil</i>	PLGA	poli(ácido láctico-co-ácido glicólico)
CTA	Centro Técnico Aeroespacial	PROFARMA	Programa de Apoio ao Desenvolvimento do Complexo Industrial da saúde
DAC	doença arterial coronariana	PUC-SP	Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
DDS	<i>drug delivery systems</i>	REBRATS	Rede Brasileira de Avaliação de Tecnologias em Saúde



DECIT	Departamento de Ciência e Tecnologia do Ministério da Saúde
DN	doenças negligenciadas
ECM	matrizes descelularizadas
EUA	Estados Unidos da América
FAPERJ	Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do RJ
FAPs	Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa
FDA	<i>US Food and Drug Administration</i>
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
GECIS	Grupo Executivo do Complexo Industrial da Saúde
HHS	<i>US Department of Health and Human Services</i>
HIV	<i>Human immunodeficiency virus</i>
HRAN	Hospital Regional da Asa Norte
IAM	infarto agudo do miocárdio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICT	Instituições de Ciência e Tecnologia (Universidades e Institutos de Pesquisa)
IDPC	Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia
INC	Instituto Nacional de Cardiologia
InCor	Instituto do Coração
INCT	Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
INT	Instituto Nacional de Tecnologia

REMATO	Rede Multicêntrica de Avaliação de Implantes Ortopédicos
RNET	Rede Nacional de Engenharia Tecidual
RNTC	Rede Nacional de Terapia Celular
SAS/MS	Secretaria de Atenção à Saúde do Ministério da Saúde
SBHCI	Sociedade Brasileira de Hemodinâmica e Cardiologia Intervencionista
SCD	<i>silver-coated dressing</i>
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SIM	Sistema de Informação de Mortalidade
SLC	Sistemas de liberação controlada
SR	Stents recobertos com fármacos
SUS	Sistema Único de Saúde
TFD	Terapia Fotodinâmica
TIB	Programa de Tecnologia Industrial Básica e Serviços Tecnológicos para a Inovação e Competitividade
UFF	Universidade Federal Fluminense
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

IOT	Instituto de Ortopedia e Traumatologia da USP	UHMWPE	<i>ultra-high molecular-weight polyethylene</i>
IPEPATRO	Instituto de Pesquisas em Patologias Tropicais	UNB	Universidade de Brasília
UNESP-IS	Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira	UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo		



8. Oportunidades Econômicas para Materiais Avançados na Tribologia¹

8.1. Introdução:

A Tribologia, definida na década de 60 como a “Ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados” (JOST 1966), em função de sua complexidade, em particular sua natureza multidisciplinar, tem sido universalmente desconsiderada ao longo da história.

Nos últimos 20-30 anos a importância da Tribologia vem sendo reconhecida, principalmente pelos países industrializados (JOST 1990), onde o assunto é considerado de relevância nacional e incluído entre as tecnologias de importância estratégica.

Notória pelo seu caráter nocivo, associado tanto à degradação de sistemas mecânicos pela ação do desgaste em suas diversas formas quanto à dissipação de energia pelo atrito, a tribologia apresenta, no entanto, tanto aspectos positivos associados à lubrificação quanto a utilização de fenômenos tribológicos, como nos processos de manufatura.

As perdas econômicas e o impacto ambiental gerados pelo efeito negativo dos fenômenos tribológicos têm sido constantemente analisados na literatura. Estatísticas realizadas em países desenvolvidos mostram que cerca de 1 a 6 % do PIB são gastos com desgaste (CZICHOS e HABIG 1992). Em paralelo estima-se que 20% destas perdas podem ser evitadas com aplicação do conhecimento já existente sobre desgaste, atrito e lubrificação.

Ali Erdermir (ERDEMIR 2009) em palestra convidada apresentada no 64 Congresso anual da ABM afirmou que os custos de desgaste e atrito e desgaste nos Estados Unidos da América perfazem a impressionante cifra de meio trilhão de dólares / ano. Com dados de 2008 isto significa um terço do PIB brasileiro. Ainda para 2008, apenas para o Brasil, teríamos desperdícios de 29 a 174 bilhões de Reais/ano e economias possíveis entre 5,8 e 34,8 bilhões de Reais.

¹ Este capítulo foi elaborado pela equipe composta por: Aloísio Nelmo Klein (coordenador), José Daniel Biasoli de Mello (relator), Amilton Sinatora (revisor), Henara Lillian Costa, Roberto Binder (co-relatores).

A literatura mostra ainda que o retorno dos investimentos em pesquisas associadas à Tribologia é altamente compensador: para cada unidade monetária investida estima-se um retorno de 40 a 76 unidades nas indústrias siderúrgicas e de carvão, por exemplo.

Estes fatos deveriam, por si só, ser suficiente para motivar todo um programa nacional na área de tribologia.

Adicionalmente, há de se ressaltar a forte transversalidade da tribologia que a coloca como ferramenta estratégica e privilegiada e agente de inovação no desenvolvimento de materiais avançados.

A redução da dissipação de energia pelo atrito pode e deveria ser considerada não apenas como um fator de aumento de eficiência de sistemas mecânicos, mas também com um agente potencial na otimização da matriz energética nacional. Por exemplo, apenas 12% da energia disponível no combustível é disponibilizada para movimentar as rodas em um carro médio de passeio. Da energia total cerca de 15% é perdida mecanicamente, principalmente por atrito (BOVINGTON et al. 1999b). Some-se a isto a resistência ao rolamento dos pneus e se terá aproximadamente uma perda de 20% da potência utilizável. Apenas no motor do veículo, 48% da energia consumida para movimentá-lo é dissipada na forma de perdas por atrito.

Os impactos ambientais associados à tribologia são compreensivelmente enormes, dada a magnitude das movimentações de matéria na indústria, em especial em setores econômicos como a mineração e a siderurgia. Dentre as diversas formas de impacto ambiental, algumas podem ser associadas diretamente ao desgaste (atrito e lubrificação). Outras, são o descarte de lubrificantes, o consumo de recursos não renováveis, como elementos de liga, que se oxidam ou degradam de outra forma e a emissão de poluentes.

Muito embora empregada de longa data, apenas recentemente a potencialidade da utilização de fenômenos tribológicos como processos de manufatura tem sido enfatizada e reconhecida na literatura (HUTCHINGS 2001; HUTCHINGS 2003). Infelizmente não foram encontrados dados econômicos relativos aos aspectos positivos da tribologia, mas estes são, certamente, consideráveis e aumentam a importância econômica do assunto.

Na tribologia como em qualquer campo do conhecimento a criação e a transmissão do conhecimento são aspectos importantes. Os países centrais instituíram, desde a década de 1960, programas que envolvem: ensino de graduação, ensino em nível de pós graduação, elaboração de livros e programas de pesquisa governamentais em tribologia. Estes pontos são comuns a países como Ingla-



terra, Alemanha, Japão e mesmo a antiga União Soviética. Na Comunidade Européia este procedimento foi generalizado a todos os países integrantes. Pode-se ver em qualquer país culto do mundo a realização de encontros científicos sobre tribologia. Também pode-se observar que nos países industrializados se perenizaram centros de pesquisa nestas áreas de mecânica, mineração, agricultura e siderurgia provavelmente para minimizar o efeito das modas de pesquisa, bem como para assegurar apoio científico a estes setores vitais. Por outro lado países “em desenvolvimento” vivem de ciclos esporádicos de incentivo a produção científica nestes campos.

No Brasil, levantamento recente (DE MELLO 2009) mostrou que a tribologia está presente em onze instituições de ensino e pesquisa sendo que boa parte delas, além das atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, oferecem ensino de pós-graduação e graduação de forma regular envolvendo cerca de 170 pessoas apenas nas atividades afeitas a pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Ressalta-se, também, o início da perenização das atividades tribológicas no país através da criação, em 2009, da Divisão Técnica de Tribologia, Associação Brasileira de Metais, Materiais e Mineração e a realização da First International Brazilian Conference on Tribology - TriBoBr-2010 a ser realizada no Rio de Janeiro em novembro de 2010.

Ter um programa de longo prazo voltado para a pesquisa fundamental em tribologia, reunindo físicos, químicos, médicos, biólogos e engenheiros é a melhor garantia de sucesso na abordagem de problemas e no enfrentamento dos inúmeros cenários esboçados neste estudo. Parece extremamente importante ressaltar o aspecto social aqui tratado do ponto de vista da educação e da pesquisa. Sempre (e não apenas nestes anos iniciais do século XXI) vivemos em intensa mudança. O que distingue os que vivem as mudanças com sucesso é o aproveitamento que eles fazem destas mudanças. Para aproveitá-las é necessário estar preparado. É estar sempre exercitando a capacidade de ver e apreender a realidade, tanto através de estudo quanto de pesquisa. Então, se um país deseja aproveitar as oportunidades tribológicas em todos os campos tratados neste estudo, há que ter um duradouro programa de pesquisa e, conseqüentemente, de ensino em tribologia.

Analisa-se, na seqüência, cinco temas selecionados do relatório de situação intitulado “Oportunidades em Tribologia como Agente de Inovação no Desenvolvimento de Materiais”. Este relatório foi validado a partir de uma oficina e uma consulta eletrônica estruturada que caracterizou sete tópicos em materiais avançados para Tribologia.

Face às peculiaridades da área optou-se por fazer a apresentação de cada tema individualmente e, na seqüência, apresentar as diversas agendas (ações estratégicas; pesquisa, desenvolvimento e inovação) bem como os fomentos estruturantes de maneira conjunta.

8.2. Temas relevantes:

8.2.1. Oportunidades estratégicas em tribologia:

Apresentação:

Aplicações tribológicas de materiais devem ser analisadas num espectro mais amplo devido ao fato de que atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas são características dos sistemas tribológicos considerados sendo claro que características tribométricas, atrito e desgaste, dependem não apenas dos materiais em si mas também do ambiente e dos parâmetros operacionais e de interação justificando, desta forma, a inclusão deste tema como um dos mais relevantes para o desenvolvimento de materiais avançados em tribologia

Adicionalmente, fenômenos tribológicos são fenômenos superficiais. Portanto, em tribologia, o foco deve ser principalmente na superfície dos componentes. O substrato também exerce papel importante, pois é ele que fornece a sustentação à camada superficial do material. Porém, é na superfície que os fenômenos de interesse em tribologia têm sua gênese.

O forte caráter sistêmico do atrito e do desgaste, associado à complexidade, natureza evolutiva e superficial e irreversibilidade dos fenômenos tribológicos fazem com que a abordagem de problemas tribológicos, inclusive e em particular o desenvolvimento e otimização de tribomateriais de alto desempenho, necessitem de uma abordagem multi-escalar/disciplinar para serem bem sucedidos.

Como conseqüência, o desenvolvimento de materiais tribológicos volumétricos, de revestimentos/modificações superficiais, de lubrificantes e de aditivos, bem como o controle da topografia de superfície também devem, necessariamente, envolver a interação entre pessoas/grupos com diferentes formações: tribologistas, cientistas e engenheiros de materiais, engenheiros mecânicos, físicos, químicos, médicos, biólogos, dentistas, etc.



Do ponto de vista da engenharia, o sistema tribológico tem de ser considerado como um todo. Por exemplo, o coeficiente de atrito medido em um dado sistema incluindo suas restrições somente poderá ser efetivamente modelado se os níveis de interação forem considerados adequadamente. Blau (BLAU 1991) distingue três níveis de interação. No nível I, assume-se que o cisalhamento induzido pelo atrito é acomodado na interface entre corpo e contra-corpo, como é o caso de sistemas eficientemente lubrificados. O comportamento de camadas moleculares e filmes interfaciais ditará a escala adequada (sub nanométrico até dezenas de nanômetros). No nível II de interação, se o cisalhamento for transmitido entre as superfícies interagindo em movimento relativo, ou seja, corpo e contra-corpo, as propriedades destes, em particular as propriedades superficiais e sub-superficiais, deverão ser incluídas em um modelo realista da interação. As propriedades do meio ambiente e suas interações com os outros componentes do tribosistema também deverão ser consideradas. As dimensões das asperidades em contato acrescidas das dimensões das camadas modificadas sub-superficialmente balizarão as dimensões a serem modelizadas (micrometros). Finalmente, no nível III, caso corpo e contra-corpo não consigam, via fluxo plástico, acomodar completamente o cisalhamento induzido pelo atrito, forças serão transmitidas para o dispositivo, que necessariamente deverá ser incluído, juntamente com o sistema mecânico, no modelo. Neste caso, as dimensões necessárias para modelizar satisfatoriamente o sistema poderão ser ordens de grandeza maiores do que as necessárias no nível II (micrometros até centímetros).

As relações entre propriedades tribológicas, micro estrutura e dureza dos materiais são muito estudadas. Entretanto, a quantificação da importância dos diversos fatores não mereceu a mesma intensidade de esforços. Os estudos cobrem, na sua quase totalidade, apenas parte das variáveis envolvidas nos fenômenos tribológicos. O meio ambiente e o papel dos produtos de desgaste são poucas vezes considerados assim como as interações químicas na interface de desgaste. Por fim, são escassas as racionalizações dos resultados por meio de modelos que considerem adequadamente os mecanismos de desgaste e propriedades fundamentais do sistema tribológico. Em decorrência, muitas das correlações da literatura podem ser fortuitas e não generalizáveis, além de não permitirem conciliar a modelagem da física e da química com as da engenharia.

Um dos fatores que mais dificultam a compreensão dos fenômenos tribológicos é o fato da interface de deslizamento (onde tudo acontece!) ser “enterrada” e extremamente difícil de ser acessada experimentalmente. Para estudar esta interface, os tribologistas tradicionalmente têm que separar corpo e contra-corpo antes de analisá-los. Esta abordagem *ex situ* pode se beneficiar das mais diversas técnicas analíticas. Esta técnica, a mais tradicional e largamente utilizada, mesmo internacionalmente, tem permitido o estudo dos mecanismos de desgaste, formação, estrutura e composição química da interface, etc. Para minimizar a contaminação e/ou conhecer o efeito do meio ambiente

no comportamento tribológico, os ensaios podem ser conduzidos em câmaras que possibilitem o controle do meio ambiente. Na seqüência, a análise é executada como na abordagem *ex situ*. Esta abordagem é bastante preconizada quando a composição química da interface tem papel importante no comportamento tribológico.

Bem mais poderosa, a abordagem *in situ*, ainda que limitada a algumas técnicas, tem sido utilizada com bastante sucesso na caracterização tribológica. Dentre outras, têm sido monitorados *in situ* a resistência elétrica do contato, emissões de infravermelho (saídas do sistema), espectroscopia Raman e de infravermelho, microscopia ótica e eletrônica de varredura etc (técnicas analíticas). Pela combinação de alguma técnica espectroscópica com microscopia ótica chega-se à abordagem tribométrica *in situ* poderosa ferramenta moderna que permite a determinação da composição química da tribocamada na interface e correlacioná-la com outros fenômenos tribológicos. Ainda mais poderosa seria a combinação da tribometria *in situ* realizada com temperatura e ambiente controlado. Novos modelos e metodologias de caracterização tribológica em tempo real são fundamentais para a melhora da eficiência de materiais de alto desempenho

Tendência recente no cenário mundial é a busca de uma abordagem multi-escalar, passando, necessariamente, pelo acoplamento de análises na escala atômica com modelos do contínuo através de abordagens híbridas hierarquizadas, em que tanto experimental (AFM, nano indentação, FIB-HR-TEM) quanto teoricamente (Dinâmica molecular) procura-se explicar aspectos macro tribológicos com base na compreensão dos fenômenos dissipativos de energia na interface entre sólidos bem como os mecanismos de desgaste.

Evidentemente, é primordial a existência de fortes vínculos entre os desafios experimentais e teóricos descritos. Mais claramente, avanços efetivos só serão alcançados se resultados experimentais confiáveis e precisos forem disponibilizados para validar os modelos teóricos. Da mesma forma, a complexidade dos processos tribológicos exige o desenvolvimento de modelos simples e bem caracterizados nos quais se definam todos os parâmetros do sistema tribológico. A existência destes modelos é crucial para o desenvolvimento de teorias generalizadas que, por sua vez, deverão ser totalmente validadas pelos experimentos. Para uma avaliação dos modelos em tribologia ver Meng e Ludema 1995 (MENG E LUDEMA 1995)

Finalmente, ressalta-se que o desenvolvimento nestas áreas ainda é incipiente, inclusive internacionalmente, permitindo oportunidades de vantagem competitiva para o País.



Ainda que a Ciência e a Engenharia de Materiais tenham contribuído de forma expressiva para o avanço do conhecimento em Tribologia, como reportado por Peter Jost [4], que considera que 40% deste conhecimento é oriundo da área de materiais, a maior parte deste esforço tem sido concentrado na compreensão das propriedades volumétricas quando, na realidade, o fenômeno é superficial. Adicionalmente, pequena tem sido a contribuição de tribologistas na compreensão de fenômenos eminentemente tribológicos utilizados como processo de manufatura. Assim, um esforço ainda maior deverá ser desenvolvido para a geração de conhecimento nesta área, uma vez que, mesmo para os metais, a real influência de suas características nas propriedades de atrito e desgaste ainda é pouco entendida.

Evidentemente, esta defasagem é ainda maior no campo dos processos e materiais inovadores de alto desempenho, onde a severidade das solicitações e a velocidade de introdução de novos produtos é bem superior à taxa de geração de conhecimentos e à compreensão precisa, tanto de suas propriedades tribológicas, quanto da influência destas nos fenômenos envolvidos.

Resta perguntar: porque “superfícies interagindo em movimento relativo” têm tanta importância econômica e afetam tanto nosso dia?

Uma resposta plausível seria: Interações superficiais controlam e governam o funcionamento de praticamente todo dispositivo desenvolvido pelo homem.

Recomendações:

Desta forma, preconiza-se que, pelo viés da inovação decorrente das oportunidades e desafios identificados em tribologia, associada à transversalidade estabeleça-se uma estratégia que aumente competitividade do país de forma diferenciada sem, no entanto, abandonar o estudo do comportamento tribológico de materiais clássicos nos mais diversos sistemas. Estes estudos podem auxiliar na seleção de materiais utilizados na confecção de componentes e também na definição de condições ideais de trabalho, que possibilitarão a redução de custos de manutenção e de reposição de peças, além de economia devido ao aumento da vida dos componentes e do próprio equipamento. Em particular:

- a) Implementar ações que levem ao desenvolvimento de tribômetros permitindo tanto em nível de uma única aspereza quanto micro e macroscopicamente a análise in situ do efeito do ambiente, dos produtos de desgaste e das interações químicas na interface de desgaste.

- b) Apoiar ações para estimular a análise tribológica em diferentes escalas de dimensões em particular pelo acoplamento de análises na escala atomística com modelos do contínuo através de abordagens híbridas hierarquizadas bem como pela extensão da capacidade de caracterização de tribômetros por toda a faixa de escalas.
- c) Aprimorar a interação de diferentes grupos de forma que a multi disciplinaridade seja favorecida em particular pela existência de fortes vínculos entre os desafios experimentais e teóricos.

Agenda de PD&I/fomentos:

Realizar uma oficina para identificar potenciais participantes, suas competências e potencialidades e, em consequência, uma avaliação mais realista dos recursos necessários para a indução de uma rede nacional de tribologia (multidisciplinar privilegiando a interação entre a tribologia e a engenharia e ciência dos materiais) envolvendo a academia, centros de pesquisa e o setor produtivo

Os membros da rede deverão eleger um comitê consultivo que estabelecerá critérios para a seleção de temas pré-competitivos que serão financiados pela rede.

Projetos específicos poderão (deverão) ser desenvolvidos porém com busca de financiamento pelos parceiros.

Do ponto de vista da infra-estrutura sugere-se que pelo menos dois grupos nacionais sejam fortalecidos na sua capacidade de análise tribológica inclusive dispondo de equipamentos multi usuários disponibilizados para toda a rede.

Recomenda-se, ainda, através do financiamento de infra-estrutura básica, a consolidação/indução de pelo ao menos mais três grupos acadêmicos afeitos diretamente a tribologia. A infra-estrutura básica deverá contar com, pelo menos, equipamentos dedicados a exploração da competência do grupo. Sugere-se que estes grupos sejam selecionados/induzidos com vistas a complementaridade das competências não se replicando as competências/infra-estrutura já existentes nos grupos líderes.

Sem dúvida, como instrumento de indução da multi/inter disciplinaridade apoiar, através do financiamento de infra-estrutura, pelo menos seis grupos afeitos a engenharia/ciências dos materiais que deverão desenvolver as atividades de forma associada, sinérgica e complementar aos grupos de tribologia da rede. Devido a diversidade de ações possíveis fica difícil (impossível) adiantar qualquer especulação sobre a infra-estrutura necessária para cada grupo.



Adicionalmente, implementar um programa estável de formação de recursos humanos em tribologia com o estabelecimento de metas a serem cumpridas pelos grupos acadêmicos da rede que deverão, de forma diferenciada, receber apoio financeiro das agências governamentais.

Estas atividades devem ser entendidas como de relevância nacional e incluídas entre as tecnologias de importância estratégica e consideradas um investimento altamente compensador capaz de trazer vantagens competitivas para o país além de importantes benefícios sociais, ecológicos e econômicos.

8.3. Tribomateriais para sistemas mecânicos energeticamente mais eficientes:

8.3.1. Apresentação:

A eficiência de sistemas mecânicos pode ser drasticamente aumentada pela aplicação de revestimentos tribológicos bem como pela lubrificação sólida; chaves para sistemas energeticamente mais eficientes. Por exemplo, a redução de 1% nas forças de atrito implica imediatamente no ganho de até 1% a mais de energia com o mesmo custo em qualquer sistema de geração desde hidroelétricas até motores de automóveis.

A sempre crescente necessidade de sistemas energeticamente mais eficientes tem aumentado, consideravelmente, a severidade dos contatos tribológicos. A lubrificação é umas formas mais eficientes de reduzir atrito e desgaste. Em contatos extremamente severos ou em aplicações que não permitam a utilização de lubrificantes líquidos convencionais, uma das alternativas mais promissoras tem sido a lubrificação sólida, conseguida através de materiais autolubrificantes que podem ser tanto aplicados na superfície do componente quanto incorporados na sua própria composição.

De uma maneira geral, os revestimentos tribológicos podem ser classificados quanto ao uso em revestimentos para ferramentas de corte, revestimentos para moldes e matrizes e revestimentos para componentes mecânicos (HOGMARK 2004).

Nas duas primeiras classes, o revestimento, em geral duro, será aplicado contra um substrato também duro, facilitando enormemente o processo, como atesta o forte domínio tecnológico e sucesso prático das ferramentas de corte para usinagem, revestidas com TiN desde 1969. Atualmente cerca de 75% das ferramentas comercializadas são revestidas.

Moldes e matrizes são originalmente tratados por nitretação e oxidação. A partir de 1990 tem crescido a utilização de ferramentas revestidas por TiN, CrN e outros revestimentos por PVD. de usinagem, etc..

No caso dos componentes mecânicos, é imperioso o uso de substratos moles para facilitar a sua fabricação. Nestes sistemas, a prevenção de danos superficiais, associada à alta capacidade de carga, baixo atrito e alta resistência ao desgaste representa um grande desafio técnico-científico sendo escassos os exemplos práticos de componentes revestidos, constituindo-se em um grande potencial de desenvolvimento e uma enorme oportunidade.

Para a obtenção destas características ímpares, tem-se preconizado o uso de processo multifuncionais de engenharia de superfície combinando camadas com objetivos específicos (Aumento da capacidade de carga, aumento da resistência ao desgaste, diminuição do coeficiente de atrito).

Na categoria dos lubrificantes sólidos enquadram-se vários materiais como os dicalcogênios, o grafite, os metais moles, os polímeros e, mais recentemente os DLCs (diamond like carbon), os fulerenos etc. Esses materiais podem ser dispersos nas superfícies funcionais por uma grande variedade de métodos. Mais modernamente têm se usado, preferencialmente, filmes, compósitos e nano partículas de lubrificantes sólidos (aditivos).

Ainda que intensamente estudados, cerca de 2500 artigos publicados nos últimos 25 anos, não existe um único lubrificante sólido capaz de promover propriedades tribológicas satisfatórias numa ampla gama de temperatura e ambiente. Como toda propriedade tribológica, tanto a durabilidade quanto o coeficiente de atrito são fortemente dependentes do sistema tribológico, em particular do ambiente.

Adicionalmente, novos desafios aparecem quanto à qualidade superficial (Filmes), à distribuição de fases (compósitos) e à otimização micro estrutural / topográfica com vistas ao estabelecimento de “reservatórios” para as nano partículas (aditivos)

Muito embora o desenvolvimento de filmes à base de nano compósitos, super-redes e gradientes tenham predominado na última década, novas estruturas mono componentes continuam a ser desenvolvidas e aplicadas. A versatilidade das técnicas de deposição a vácuo tem permitido a obten-



ção de composições químicas bastante complexas, em geral multifásicas, ou mesmo novas composições, como é o caso dos revestimentos à base de carbonitreto não convencionais.

No entanto, não obstante os progressos e refinamentos nos processos de deposição, a vida de muitos lubrificantes sólidos ainda é bastante limitada, devido à espessura finita do filme. Para aumentar a durabilidade, processos de reabastecimento ou fornecimento de lubrificante como ocorre nos sistemas vivos são necessários, mas ainda bastante difíceis de serem obtidos.

Quanto ao processamento, a introdução de processos híbridos, também chamados de duplex ou triplex, têm permitido a obtenção de um conjunto único de propriedades impossível de ser obtido por um único processo, como extensivamente ilustrado por MATTHEWS (MATTHEWS 2002).

Os processos de deposição de filmes necessitam de temperaturas variando desde a temperatura ambiente até 1000 °C. Desta forma, a resistência à temperatura do substrato pode limitar consideravelmente a variedade de processos aplicáveis a um determinado substrato, uma vez que pode-se induzir transformações de fase, amolecimento ou mesmo distorções dimensionais e geométricas. Assim, o desenvolvimento de processos utilizando baixas temperaturas tem muita importância nesta área.

Ainda que a literatura seja abundante em novos e sensacionais revestimentos, a grande maioria deles foi aplicada em amostras pequenas de geometria simples em escala laboratorial. A transferência destas técnicas para componentes apresentando dimensões maiores e geometria mais complexa produzidos em larga escala com tolerâncias estreitas e reprodutibilidade ainda é o maior desafio tanto tecnológico quanto econômico.

Devido à sua grande versatilidade, um grande volume de trabalho tem sido dedicado aos materiais carbonosos, em particular aos DLCs. Estas estruturas amorfas contêm hibridações sp^2 e sp^3 e teores de Hidrogênio variáveis de 1 a 50 at%. Dentre os lubrificantes sólidos, os DLCs exibem a maior versatilidade e faixa de comportamento tribológicos. Filmes de diamante, geralmente produzidos por CVD, são extremamente duros, apresentando excelentes propriedades mecânicas, inércia química e boas propriedades tribológicas. Filmes com grandes proporções de ligações de tipo sp^2 comportam-se mais como grafite durante fenômenos tribológicos ao passo que aqueles contendo maiores proporções de ligações sp^3 têm tendência a se comportar como diamante.

A vida de muitos filmes lubrificantes sólidos ainda é bastante limitada devido à espessura finita e pequena, limitada pelas tensões residuais e pela qualidade das técnicas de deposição do filme. Para aumentar a durabilidade, processos de reabastecimento ou fornecimento são necessários. Neste

sentido, técnicas clássicas, como metalurgia do pó ou fundição, para a produção de compósitos contendo lubrificantes sólidos em sua estrutura aparecem como uma alternativa simples e econômica para o avanço do conhecimento. Conceitos tribológicos aplicados em conjunto com conhecimentos de engenharia micro estrutural e processamento de materiais podem constituir ferramenta poderosa no desenvolvimento e otimização de materiais auto lubrificante simples, economicamente viáveis e que apresentem, devido ao constante reabastecimento do lubrificante sólido, uma vida útil bastante grande.

Recentemente, Rapoport et al (LESHCHINSKY et al. 2004; RAPOPORT et al. 2003a; RAPOPORT et al. 2003b; RAPOPORT et al. 2005) evidenciaram uma substancial redução do atrito e desgaste de vários materiais metálicos em diferentes condições tribológicas pela adição de partículas semelhantes a fulerenos obtidas de dicalcogenídeos metálicos MX_2 ($M=Mo, W$ e $X=S, Se$). Aplicadas a materiais produzidos por metalurgia do pó (RAPOPORT et al. 2003a), estas nano esferas foram incorporadas na rede de poros, garantindo um contínuo e gradual suprimento de lubrificante na interface, mostrando o grande potencial da otimização da microestrutura de materiais sinterizados como agente de otimização tribológica.

Recomendações:

- a) Apoiar iniciativas que, pela interação sinérgica entre a Tribologia e a Engenharia e Ciências de Materiais, levem ao desenvolvimento de revestimentos multifuncionais aplicados a revestimentos moles.
- b) Induzir iniciativas que promovam a transferência dos conhecimentos obtidos na escala laboratorial para componentes apresentando dimensões maiores e geometria mais complexa produzidos em larga escala com tolerâncias estreitas e reprodutibilidade.
- c) Induzir atividades que, aplicando conceitos tribológicos em conjunto com conhecimentos de engenharia micro estrutural e processamento de materiais, desenvolvam e otimizem materiais auto lubrificantes simples, economicamente viáveis e que apresentem, devido ao constante reabastecimento do lubrificante sólido, uma vida útil bastante grande.



Agenda de PD&I/Fomentos:

Após realização da oficina preconizada no item anterior e conseqüente identificação de potenciais participantes, suas competências e potencialidades induzir editais levando ao desenvolvimento de materiais para sistemas energeticamente mais eficientes.

8.4. Biotribomateriais:

8.4.1. Apresentação:

Biotribomateriais podem ser agentes de saúde integral. O corpo humano contém um grande número de superfícies interagindo em movimento relativo e que estão sujeitas a desgaste e lubrificação. Neste caso, o ambiente aquoso presente impõe um sem número de variáveis cujos efeitos ainda não são bem conhecidos e entendidos pela tribologia “clássica”, o que torna o desenvolvimento dos biotribomateriais uma área de grande importância e potencialidade. Um entendimento completo do desempenho de componentes biomecânicos que possam substituir órgãos naturais somente pode ser conseguido ao se conhecer o atrito, o regime de lubrificação operante e os mecanismos de desgaste, tanto nos órgãos naturais em funcionamento dentro do corpo humano quanto nos dispositivos biomecânicos artificiais bem como sua biocompatibilidade.

Uma abordagem multidisciplinar envolvendo conceitos médico biológicos associados à ciência e engenharia de matérias complementados pela utilização de características biomiméticas e tribologia certamente levarão ao desenvolvimento de biotribomateriais de maior desempenho e menor custo.

O implante de próteses ósseas, em especial de próteses de quadril e de joelho, é considerado como o grande feito da cirurgia ortopédica no século XX. Por aproximadamente 40 anos, este campo foi praticamente dominado pelo uso de implantes consistindo de cabeças femorais metálicas e acetábulos poliméricos, conhecidos implantes Charnley LFA (Low Friction Arthroplasty). Porém, materiais alternativos têm sido propostos e testados nos últimos anos como substitutos superiores aos implantes clássicos sob o ponto de vista de longevidade da prótese (SMITH et al. 2001).

Para reduzir as taxas de desgaste e conseqüentemente a formação dos resíduos que causam a osteólise, tem havido nos últimos anos, por exemplo, uma ressurgência de interesse em relação às

juntas metal/metal em contraste com as juntas tradicionais polímero/metal (SMITH et al. 2001). As melhoras implementadas geralmente objetivam aumento de dureza, aumento de resistência ao risco e controle da topografia das superfícies. O controle da topografia das superfícies das próteses também pode ser um outro fator de controle da osteólise. Caso a topografia seja formada por vales que consigam acomodar as partículas de desgaste antes que elas sejam liberadas no corpo humano, é possível retardar o seu efeito de produzir fagocitose. Além disso, a presença dos bolsos que constituem a textura permite controlar o tamanho e a forma das partículas de desgaste antes que elas entrem em circulação no corpo, o que pode reduzir bastante a reação de fagocitose (COSTA 2005; FANG et al. 2006).

Devido à sua maior dureza, as cabeças femorais cerâmicas tendem a sofrer menor desgaste que as metálicas, como comprovado por experiências clínicas (SMITH et al. 2001). A zircônia, por ter uma tenacidade à fratura superior à da alumina, tem sido também outro forte candidato como material das cabeças femorais.

Por outro lado, ao invés da utilização de uma cabeça femoral dura sobre um acetábulo mole, tem-se também investigado pares com pouca diferença de dureza, de forma a reduzir o desgaste do acetábulo e assim reduzir a osteólise. Isto tem levado ao um interesse ressurgente nas próteses metal/metal, sendo que especial interesse é dado à utilização de novas formas das ligas CoCr/Mo. Até 1996, várias dezenas de milhares de próteses metal/metal foram implantadas, especialmente na Europa (SEMLISTCH and WILLERT 1997). Elas têm apresentado baixas taxas de desgaste, que normalmente caem com o tempo, o que tem sido atribuído a um período de amaciamento, semelhante ao que ocorre em automóveis. Entretanto, recentemente, divulgaram-se evidências que anualmente de 1 a 3% (800 a 2400 casos) deste tipo de próteses tem trazido problemas a pacientes norte americanos. (NEW YORK TIMES 2010)

Como a junta sinovial na verdade é um mancal auto-contido de incrível desempenho, avanços no desenvolvimento de novos materiais para próteses ósseas articuladas somente serão substanciais se a abordagem de avaliação da sua desempenho for multidisciplinar incluindo a tribologia.

A fórmula tribológica encontrada pela natureza para produzir uma junta sinovial é baseada no uso de um material de mancal relativamente mole e poroso, a cartilagem da articulação, com lubrificação de filme contínuo e lubrificação limite extremamente eficientes para minimizar o desgaste. Isso tem inspirado o desenvolvimento de mancais compliantes, chamados de mancais tipo almofada (UNSWORTH et al. 1987). A alta conformidade do contato propicia as condições necessárias para desenvolver-se um filme de lubrificação hidrodinâmico contínuo. Os dois materiais que têm atraído



mais atenção neste sentido são os poliuretanos não porosos e os hidrogéis porosos. Um dos grandes desafios destes mancais consiste em encontrar um material que possa se beneficiar das características de lubrificação limite que o fluido sinovial pode conferir.

SOARES (SOARES 2010) apresenta, no âmbito da Agenda Estratégica em Materiais Avançados, CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), um trabalho bastante completo indicando caminhos para os biotribomateriais no Brasil. No entanto, o entendimento completo do desempenho de próteses somente pode ser conseguido ao se conhecer o atrito, o regime de lubrificação operante e os mecanismos de desgaste, tanto nas juntas sinoviais naturais quanto nas próteses o que implica na imperiosa necessidade de uma abordagem multidisciplinar envolvendo conceitos médico-biológicos associados à ciência e engenharia de materiais, instrumentação, biomecânica e manufatura complementados pela utilização de características biomiméticas e tribológicas levando ao desenvolvimento de biotribomateriais de maior desempenho e menor custo. Exemplo recente foi o desenvolvimento de uma prótese apresentando cabeça femoral em cerâmica e corpo em liga de Titânio. O corpo da prótese é oco e contém um complexo sistema de instrumentação permitindo a monitoração via rádio, através de oito sensores, de forças e velocidades atuando *in situ* e *in vivo*.

A tribologia oral inclui estudos relacionados aos dentes, à junta Temporomandibular (TMJ), à saliva e aos tecidos moles da cavidade bucal. Nesta área, é fundamental o conhecimento dos mecanismos básicos associados à tribologia oral para que seja possível a seleção de materiais adequados para a restauração oral.

No caso do desgaste dentário, é necessário investigar-se o comportamento em desgaste dos tecidos dentários e dos materiais de restauração. Desgaste excessivo pode impedir um contato oclusal perfeito, especialmente nas superfícies de mordedura e mastigação, perda de eficiência de mastigação, obliteração da superfície de mastigação, dentre outros efeitos. Os principais tipos de desgaste ocorrentes em dentística são abrasão e erosão (ZHOU and ZHENG 2006). O estudo da topografia das superfícies dentárias torna-se então extremamente importante para o entendimento do seu comportamento tribológico. Especial ênfase deve ser dada a técnicas que permitam uma caracterização 3D e para as quais não haja contato com o apalpador, de forma a minimizar o seu efeito durante a medição, como é o caso da interferometria a laser (DE MELLO et al. 2005; STOUT and BLUNT 1995; STRAIOTO et al. 2006). Estas técnicas podem ainda auxiliar na medição do desgaste sofrido.

Os biotribomateriais mais utilizados em restaurações dentárias são os metais, os cerâmicos e os compósitos. O seu desenvolvimento e seleção requererem um conhecimento aprofundado dos possíveis mecanismos de desgaste dentro da cavidade bucal. Uma grande tendência à utilização de

materiais cerâmicos tem sido observada nos últimos anos devido à sua aparência semelhante à superfície natural do dente e à sua durabilidade química. Porém, os cerâmicos são abrasivos e potencialmente destrutivos em relação aos dentes naturais ou outras restaurações contra os quais eles se oprimam (MAGNE et al. 1999).

Um outro aspecto tribológico importante na dentística é a capacidade lubrificante da saliva. Estudos recentes utilizando microscopia de força atômica têm mostrado que a presença de películas salivares entre superfícies duras reduz o coeficiente de atrito por um fator de 20. Um conhecimento fundamental dos mecanismos de lubrificação atuantes na cavidade bucal e das características lubrificantes da saliva deve ter implicações decisivas no desenvolvimento de substitutos artificiais para a saliva, uma vez que um número crescente de pessoas sofre de disfunções salivares.

A tribologia também pode ser aplicada à ciência dos alimentos. O atrito inter-oral também tem aparentemente um grande efeito na percepção da textura dos alimentos pelo homem, em especial no caso de adstringência (BERG et al. 2003). A adstringência é um atributo percebido como uma sensação seca que ocorre para uma larga faixa de produtos, como é o caso do vinho tinto e de outros produtos ricos em tanino. Estes produtos aparentemente provocam uma redução na lubrificação e um aumento no atrito causados pela presença de partículas, resultantes tanto da precipitação de proteínas salivares quanto da floculação de células mortas.

A consideração de aspectos tribológicos no desenvolvimento de materiais a serem utilizados em instrumentação clínica e cirúrgica também é extremamente necessária para a otimização de seu desempenho. O controle da topografia da superfície tem ajudado no desenvolvimento de superfícies a serem colocadas em contato com o sangue com reduzida propensão a complicações tromboembólicas (FUJISAWA et al. 2001) e também de ferramentas para limpeza dentária com atrito aumentado que requerem menor esforço do profissional de higienização bucal (LAROCHE et al. 2007).

Os desafios cirúrgicos, clínicos e de engenharia no campo do desenvolvimento de bio-tribomateriais garantem um amplo escopo para colaboração entre tribologistas, bio-engenheiros e cirurgiões, em especial na investigação de novas configurações de mancais, como metal/metal, cerâmico/metal e mancais tipo almofada. Abordagens como o controle da topografia de superfícies das, a medição e o controle do tamanho e forma das partículas abrasivas/resíduos de desgaste e o desenvolvimento de materiais que consigam reagir quimicamente com o fluido sinovial para formar uma camada de lubrificação limite são campos de investigação para bio-tribo-materiais a serem usados em nas próximas décadas.



Recomendações:

- a) Novas configurações de mancais, como metal/metal, cerâmico/metal e mancais tipo almofada. Abordagens como o controle da topografia de superfícies das próteses, a medição e o controle do tamanho e forma das partículas abrasivas/resíduos de desgaste e o desenvolvimento de materiais que consigam reagir quimicamente com o fluido sinovial para formar uma camada de lubrificação limite são campos de investigação para biotribomateriais a serem usados nas próximas décadas.
- b) Fomentar ações visando o estabelecimento de projetos envolvendo equipes multidisciplinares com vistas ao desenvolvimento de biotribomateriais de alto desempenho e baixo custo.
- c) Induzir iniciativas que promovam a transferência da escala laboratorial para componentes apresentando dimensões maiores e geometria mais complexa produzidos em larga escala com tolerâncias estreitas e reprodutibilidade.
- d) Outras recomendações constantes em SOARES (SOARES 2010).

8.4.2. Agenda de PD&I/Fomentos:

Após realização da oficina preconizada no item anterior e conseqüente identificação de potenciais participantes, suas competências e potencialidades induzir editais levando ao desenvolvimento de biotribomateriais em particular aqueles já citados por SOARES (SOARES 2010).

8.5. Tribomateriais estratégicos para setores primários da economia:

8.5.1. Apresentação:

A aplicação de conceitos de tribologia pode desenvolver materiais mais econômicos e eficazes para setores primários da economia, como a indústria mecânica pesada, a mineração, a siderurgia e os setores agrícola e sucro-alcooleiro.

Setores fundamentais da economia nacional, estes gigantes podem funcionar adequadamente somente com o uso de materiais tribologicamente avançados e, desta forma, manter, ampliar e tornar mais produtiva, competitiva e rentável a produção dos setores primários no Brasil. Mesmo quando

utilizam na sua operação materiais “clássicos”, estes setores produzem grandes benefícios sócio-econômicos. Porém estes setores primários estão “fora de moda” cientificamente, com conseqüentes hiatos científicos, tecnológicos e mesmo de formação de mão de obra especializada em relação a países e setores da economia mais desenvolvidos tecnologicamente. Existe grande possibilidade de aplicação de novas metodologias que envolvam conceitos de tribologia que permitiriam um desenvolvimento significativo das indústrias deste setor.

As relações entre propriedades tribológicas, micro estrutura e dureza dos materiais são muito estudadas. Entretanto, a quantificação da importância dos diversos fatores não mereceu a mesma intensidade de esforços. Os estudos cobrem, na sua quase totalidade, apenas parte das variáveis envolvidas nos fenômenos tribológicos. O meio ambiente e o papel dos produtos de desgaste são poucas vezes considerados assim como as interações químicas na interface de desgaste. Em decorrência, muitas das correlações da literatura podem ser fortuitas e não generalizáveis, além de não permitirem conciliar a modelagem da física e da química com as da engenharia, especialmente no que se refere ao atrito. Estas constatações podem ser apreciadas em detalhe na revisão feita por MENG e LUDEMA (MENG, LUDEMA 1995).

Optou-se por tratar dos materiais resistentes ao desgaste em setores como a indústria mecânica, a mineração, a agricultura e a siderurgia, considerando primeiramente seus processos de fabricação. Tomou-se este caminho pois, uma vez que estas aplicações envolvem vastas quantidades de materiais, é necessário que a produção considere processos de fabricação de baixo custo. Como exemplos, citam-se materiais para produção de corpos moedores (bolas), esteiras para tratores, engrenagens para caminhão, cilindros para laminação de aço e ferramentas de corte e de conformação plástica.

Materiais fundidos

São produzidos grandes volumes de ferros fundidos para blocos de motores, freios, embreagens, dentre outros componentes automotivos, moldes para estampagem de peças para a indústria automotiva, para injeção de plásticos, etc. Estes ferros fundidos têm em sua microestrutura a grafita ou grafite, que se forma no processo de fabricação dos mesmos. A engenharia destes materiais está bastante avançada e o país detém competência científica e tecnológica nos mesmos. Há, entretanto um hiato na formação de quadros científicos decorrentes, de um lado, de a estagnação dos anos 1980 ter atingido fortemente estes setores, e de outro, do fato de estes materiais não serem considerados modernos nem atrativos do ponto de vista de carreira acadêmica. Em decorrência, a forma-



ção dos engenheiros para atuar neste setor também está defasada como fruto da não atualização dos docentes e pesquisadores universitários.

Outros ferros fundidos que contêm fases duras, os carbonetos, são fabricados em volumes relativamente menores. Porém, apesar do menor volume de produção, eles possuem maior valor agregado. O Brasil produz ferros fundidos deste tipo para as indústrias de mineração, cimento e siderúrgica com relativo sucesso. Contribui para isto a opção feita nos anos 1970 e 1980 pelos países mais industrializados de investirem em setores industriais mais nobres, transferindo para o Brasil suas unidades produtivas e, mais recentemente parte de seus esforços de pesquisa e desenvolvimento. No âmbito destes materiais, há limitações claras na literatura no que se refere a sua otimização tribológica, adicionalmente à escassez de quadros científicos. As causas das limitações são as mesmas acima citadas, acrescidas à menor importância econômica destes produtos. Destacam-se limitações no conhecimento da termodinâmica de sistemas com mais de três componentes (elementos químicos na composição do material), bem como no estudo da competição entre formas distintas pelas quais pode ocorrer a solidificação de muitos destes materiais (meta estabilidade). A estes ferros fundidos juntam-se outros materiais, às vezes chamados de aços, também obtidos por fundição e que podem ser analisados da mesma forma. Para todos eles, há muito que avançar nas técnicas de controle da microestrutura.

Alguns aços empregados por estes setores econômicos também são fundidos. O conhecimento destes materiais e do processo de fundição foi bastante estudado no século passado. As principais limitações são decorrentes do fato de esta área do conhecimento ser considerada pouco atrativa ou pouco “científica” e, por isto, são poucos os formandos com conhecimentos gerais sadios no tema. Há que se acrescentar a consideração de que estudar solidificação requer mais e melhores equipamentos de laboratório do que para estudar transformações no estado sólido. Por isto talvez é que não se apontam neste estudo limitações sérias no que se refere aos tratamentos térmicos nem às transformações no estado sólido dos materiais acima.

Materiais conformados plasticamente

São especialmente aços empregados como material de sacrifício na proteção, por exemplo, de caçambas de caminhões fora de estrada que transportam minério e na proteção de silos, calhas, dutos e tubos que necessitam resistir ao desgaste. Os aços também são empregados em aplicações sem revestimentos como grelhas, exaustores, pontas de escavadeira, rodas de trem, pontes rolantes ou vagonetes para extração de minérios e trilhos. Outras vezes, para as mesmas aplicações, os aços recebem tratamentos de superfície bastante variados, desde volumosos recobrimentos por solda até

finíssimos e sofisticados tratamentos por plasma. Os principais processos de conformação plástica para a produção destes produtos são a laminação, o forjamento e a estampagem. A tribologia, em particular o estudo do coeficiente de atrito medido diretamente a partir da força de resistência ao movimento, destes processos de fabricação teve poucos avanços experimentais em relação ao que foi feito no início do século XX. Os avanços experimentais realizados na década de 1930 e sumarizados por Underwood (1952) são referências utilizadas até hoje.

Os tratamentos térmicos e termoquímicos têm importância significativa para os materiais conformados plasticamente, uma vez que há uma necessária oposição entre a plasticidade requerida na conformação e a resistência ao desgaste requerida no uso. São comuns os tratamentos de têmpera e revenimento, bem como os mais diversos tratamentos de superfície que são abordados em outro ponto deste trabalho. Cabe lembrar a importância que têm os tratamentos de cementação e nitreção em aplicações tão simples como a fabricação de engrenagens.

As cerâmicas têm enorme importância na siderurgia sob a forma de refratários. O país vem estabelecendo competência neste setor, ingressando numa fase de parceria e patrocínio da pesquisa por parte da indústria. Na corrida por um espaço a curto prazo no mercado de aço, a autonomia no desenvolvimento de refratários deve ter um peso expressivo devido às grandes quantidades e valores associados a estes insumos, bem como ao impacto que paradas para troca dos mesmos tem na produtividade das siderúrgicas.

Nos setores como a indústria mecânica, a mineração, a agricultura e a siderurgia, são empregados muitos outros materiais em quantidades relativamente pequenas em relação aos analisados acima. Estes materiais são de natureza muito variada. Os processos de fabricação e os tratamentos térmicos ou de superfície são muitas vezes decisivos para materiais como, por exemplo, os aços para rolamentos, transmissões, mesas e guias. Em particular, os tratamentos de superfície estão sendo muito estudados no Brasil e no mundo, embora o volume de investigação não tenha resultado em alternativas economicamente viáveis aos processos usados pelos setores primários da economia nacional.

O Brasil é o país mais avançado, do ponto de vista tecnológico, na produção e no uso do etanol como combustível, seguido pelos EUA e, em menor escala, pela Argentina, Quênia, Malawi e outros. A produção mundial de álcool aproxima-se dos 40 bilhões de litros, dos quais presume-se que até 25 bilhões de litros sejam utilizados para fins energéticos. O Brasil responde por 15 bilhões de litros deste total. O álcool é utilizado em mistura com gasolina no Brasil, EUA, UE, México, Índia, Argentina, Colômbia e, mais recentemente, no Japão. O uso exclusivo de álcool como combustível está



concentrado no Brasil. O aumento de escala, a prática empresarial e as inovações tecnológicas tornaram o álcool competitivo com a gasolina.

O álcool pode ser obtido de diversas formas de biomassa, sendo a cana-de-açúcar a realidade econômica atual. A cana-de-açúcar é a segunda maior fonte de energia renovável do Brasil, com 12,6% de participação na matriz energética atual. Dos seis milhões de hectares, cerca de 85% da cana-de-açúcar produzida no Brasil está na Região Centro-Sul, concentrada em São Paulo, com 60% da produção, e os 15% restantes na região Norte-Nordeste.

No início das usinas, as safras duravam em torno de três meses, quando as usinas realmente funcionavam. O restante do tempo era destinado ao planejamento e manutenções. Com a profissionalização do setor e investimentos em variedades de cana de açúcar mais produtivas e resistentes, hoje há uma inversão, e as safras duram até nove meses. O tempo para reparos ficou, então, muito reduzido. Durante as paradas das usinas, estas são praticamente desmontadas para manutenção. As principais causas da manutenção são: a corrosão, as diversas formas de desgaste individualmente ou associadas à corrosão e o desgaste abrasivo. Este último é muito influenciado pelo aumento da eficiência dos equipamentos na extração do caldo, além dos abrasivos como terras, cinzas e palhas que acompanham a cana. Estes fatores necessitam de estudo para quantificar a parcela atribuída a cada agente.

Toda o preparo da cana, desde o seu recolhimento no campo e transporte para as moendas, envolve desgaste abrasivo ou a combinação desse com a corrosão. Em componentes como os rolos das moendas, os materiais são especificados principalmente para resistirem apenas à abrasão severa. No caso da produção de açúcar, partículas desprendidas por abrasão ou corrosão podem comprometer a qualidade do produto, originando o problema conhecido como “pontos pretos”.

Neste contexto, como todas as usinas de uma região param em uma mesma época para manutenção devido à entressafra, e com tempo reduzido, falta mão-de-obra especializada no mercado. Uma forma de reduzir os custos de parada e os com materiais, além de aumentar a eficiência das plantas, passa, necessariamente, por utilizar materiais com maior vida útil.

Portanto, ações similares aquelas indicadas anteriormente são preconizadas para as indústrias mecânica, mineração, agricultura e siderurgia, em particular as que levem ao desenvolvimento/otimização de materiais resistentes ao desgaste abrasivo associado a corrosão.

Recomendações:

- a) Estimular e implantar um programa que, enfatizando a formação de recursos humanos, avance a aplicação de novos conceitos tribológicos multidisciplinares, no desenvolvimento de materiais de alto desempenho para os setores primários da economia nacional.

Agenda de PD&I/Fomentos:

Após realização da oficina preconizada no item anterior e conseqüente identificação de potenciais participantes, suas competências e potencialidades induzir editais levando ao desenvolvimento de materiais para os setores primários da economia nacional.

8.6. Conclusão e recomendações:

Realizar uma oficina para identificar potenciais participantes, suas competências e potencialidades e, em conseqüência, uma avaliação mais realista dos recursos necessários para a indução de uma rede nacional de tribologia (multidisciplinar privilegiando a interação entre a tribologia e a engenharia e ciência dos materiais) envolvendo a academia, centros de pesquisa e o setor produtivo. Obs. É desejável que químicos e físicos participem uma vez que em tribologia há carência de aplicação de fundamentos de ciência provenientes destas áreas.

Implementar um programa estável de formação de recursos humanos em tribologia com o estabelecimento de metas a serem cumpridas pelos grupos acadêmicos da rede que deverão, de forma diferenciada, receber apoio financeiro das agências governamentais.

Esta rede/programa deve ser entendido como de relevância nacional e incluído entre as tecnologias de importância estratégica e considerado um investimento altamente compensador capaz de trazer vantagens competitivas para o país além de benefícios sociais, ecológicos e econômicos.

Em particular:

- 1) Aprimorar a interação de diferentes grupos de forma que a multi disciplinaridade seja favorecida em particular pela existência de fortes vínculos entre os desafios experimentais e teóricos.
- 2) Apoiar ações para estabelecer análise de diferentes escalas de dimensões em particular



pelo acoplamento de análises na escala atômica com modelos do contínuo através de abordagens híbridas hierarquizadas bem como pela extensão da capacidade de caracterização em tribômetros por toda a faixa de escalas.

- 3) Implementar ações que levem ao desenvolvimento de tribômetros especiais permitindo tanto em nível de uma única aspereza quanto micro e macroscopicamente a análise in situ do efeito do ambiente, dos produtos de desgaste e das interações químicas na interface de desgaste.
- 4) Apoiar iniciativas que, pela interação sinérgica entre a Tribologia e a Engenharia e Ciências de Materiais, levem ao desenvolvimento de revestimentos multifuncionais aplicados a revestimentos moles.
- 5) Induzir atividades que, aplicando conceitos tribológicos em conjunto com conhecimentos de engenharia micro estrutural e processamento de materiais desenvolvam e otimizem materiais auto lubrificantes.
- 6) Induzir iniciativas que promovam a transferência da escala laboratorial para componentes apresentando dimensões maiores e geometria mais complexa produzidos em larga escala com tolerâncias estreitas e reprodutibilidade.
- 7) Fomentar ações visando o estabelecimento de projetos envolvendo equipes multidisciplinares com vistas ao desenvolvimento de biotribomateriais de alto desempenho, baixo custo envolvendo conceitos médico biológicos associados à ciência e engenharia de matérias complementados pela utilização do mimetismo e tribologia.
- 8) Estimular e implantar um programa que, enfatizando a formação de recursos humanos, avance na aplicação de novos conceitos multidisciplinares, inclusive tribológicos, no desenvolvimento de materiais de alto desempenho para os setores primários da economia nacional.

Referências:

- BERG, I. C. H., RUTLAND, M. W. and ARNEBRANT, T. (2003). "Lubricating Properties of the Initial Salivary Pellicle - an AFM Study." *Biofouling* 19(6): 365-369.
- BINNIG, G., QUATE, C. F. and C. GARBER(1986). "Atomic Force Microscope." *Phys. Rev. Lett.* 56: 930-933.
- BLAU, P. J. (1991). "Scale Effects in Steady-State Friction." *Tribology. Transactions* 34(3): 335.
- BOVINGTON, C., KORCEK, S. and SORAB, J. Eds. (1999b). *The Importance of the Stribeck Curve in the Minimization of Engine Friction. Lubrication at the Frontier.* DOWSON, D. E. A., Elsevier: 205-214.
- COSTA, H. L. (2005). *Modification of Surface Topography: Manufacturing Methods and Applications.* Ph. D Thesis, Engineering Department, University of Cambridge: 240p.
- CZICHOS, H. and HABIG, K. H. (1992). *Tribologie Handbuch - Reibung Und Verschleiß.* Braunschweig, Vieweg Verlag.
- DE MELLO, J. D. B. (2006). "Lubrificação Sólida Aplicada a Substratos de Baixa Resistência ao Fluxo Plástico: Desafios E Perspectivas". Palestra convidada, Workshop: Lubrificantes sólidos e suas aplicações tribológicas, INPE.
- DE MELLO, J. D. B., (2009). "Tribologia & inovação: perspectivas para a divisão técnica de tribologia da ABM, palestra convidada, Associação Brasileira de Metais, Materiais e Mineração, 18 Novembro 2009.
- DONNET, C. and ERDEMIR, A. (2004). "Historical Developments and New Trends in Tribological and Solid Lubricant Coatings." *Surface and Coatings Technology* 180 -181: 76-84.
- ERDEMIR, A. (2009) "Innovative Design Concepts for the Development of Superhard and Low-friction Nano-composite Coatings" Plenary lecture, 64 Congresso Annual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- FANG, H. W., SU, Y. C., HUANG, C. H. and YANG, C. B. (2006). "Influence of Biological Lubricant on the Morphology of UHMWPE Wear Particles Generated with Microfabricated Surface Textures." *Mater Chem Phys* 95(2-3): 280-288.
- FIRKINS, P. J., TIPPER, J. L., INGHAM, E., STONE, M. H., FARRAR, R. and FISHER, J. (2000). *A Novel Low Wearing Differential Hardness, Ceramic on Metal Prosthesis.* BORS Spring Meeting
- FUJISAWA, N., BERTRAM, C. D., WOODARD, J. C., POOLE-WARREN, L. A. and SCHINDHELM, K. (2001). "Fluid Dynamics of a Textured Blood-Contacting Surface." *J Biomech Eng-T ASME* 123(1): 97-105.
- GRESHAM, J. (2007). "Muri: Multifunctional Nanocomposites for Air and Space Tribology." from <http://grove.ufl.edu/~wgsawyer/MURI/MURI.html>.



- HAMILTON, D. B., WALOWIT, J. A. and ALLEN, C. M. (1966). "A Theory of Lubrication by Micro-Irregularities." Transactions of ASME, Journal of Basic Engineering: 177-185.
- HOGMARK, S. (2004). Surface Engineering - What Are the Gains? Key note speaker, Workshop of the European Virtual Tribology Institute: Challenges in surface engineering,. Gant, Belgium.
- HUTCHINGS, I. M. (2001). Abrasion in Wear and Manufacturing Processes. Conferência Plenária COBEM 2001 - Incorporando o V Seminário Brasileiro Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia / MG.
- HUTCHINGS, I. M. (2003). Wear as a Manufacturing Process. Conferência Plenária, 14th International Conference on Wear of Materials - WOM 2003, Washington DC.
- JOST, H. P. (1966). Lubrication (Tribology) - a Report on the Present Position and Industry's Needs. London, Department of education and science: 1-79.
- JOST, H. P. (1990). "Tribology - Origin and Future." Wear 136(1): 1-17.
- KLEIN, A N. Material didático da disciplina de metalurgia do pó e materiais sinterizados, 2005.
- LAROCHE, C., BARR, A., DONG, H. and REMPEL, D. (2007). "Effect of Dental Tool Surface Texture and Material on Static Friction With a Wet Gloved Fingertip." J Biomech 40(3): 697-701.
- LARSEN-BASSE, J. (2005). Boundary Lubricated Friction Experiments with Coarse Surface Texture. World Tribology Congress III, Washington, D.C.
- LESHCHINSKY, V., POPOVITZ-BIRO, R., GARTSMAN, K., ROSENSTVEIG, R., ROSENBERG, Y., TENNE, R. and RAPOPORT, L. (2004). "Behavior of Solid Lubricant Nanoparticles under Compression." Journal of Materials Science 39(13): 4119-4129.
- MAGNE, P., OH, W.-S., PINTADO, M. R. and DELONG, R. (1999). "Wear of Enamel and Veneering Ceramics after Laboratory and Chairside Finishing Procedures." J. Prosthet. Dent. 82(6): 669-679.
- MATE, C., M., MCCLELLAND, G. M., ERLANDSSON, R. and CHIANG, S. (1987). "Atomic-Scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface." Phys. Rev. Lett 59: 1942-1945.
- MATTHEWS, A. (2002). "Developments in PVD Tribological Coatings (IUVSTA Highlights Seminar- Vacuum Metallurgy Division)." Vacuum 65(2): 237-238.
- MENG, H.C., LUDEMA K.C. "Wear models and predictive equations: their form and content. Wear, 181-183 (1995) 443-457;
- New York Times, 04 de março de 2010. (<http://www.nytimes.com/2010/03/04/health/04metalhip.html?emc=eta1>) consultado em 11-04-2010 17:01h.

- RAPOPORT, L., LESHCHINSKY, V., LVOVSKY, M., LAPSKER, I., Y. VOLOVIK, FELDMAN, Y., POPOVITZ-BIRO, R. and TENNE, R. (2003a). "Superior Tribological Properties of Powder Materials Withsolid Lubricant Nanoparticles." *Wear* 255: 794-800.
- RAPOPORT, L., LESHCHINSKY, V., VOLOVIK, Y., LVOVSKY, M., NEPOMNYASHCHY, O., FELDMAN, Y., POPOVITZ-BIRO, R. and TENNE, R. (2003b). "Modification of Contact Surfaces by Fullerene-Like Solid Lubricant Nanoparticles." *Surface & Coatings Technology* 163: 405-412.
- RAPOPORT, L., O. NEPOMNYASHCHY, I., LAPSKER, A., VERDYAN, A., MOSHKOVICH, FELDMAN, Y. and TENNE, R. (2005). "Behavior of Fullerene-Like WS₂ Nanoparticles under Severe contact Conditions." *Wear* 259: 703-707.
- SMITH, S. L., DOWSON, D. and GOLDSMITH, A. A. J. (2001). "The Lubrication of Metal-on-Metal Total Hip Joints: A Slide Down the Stribeck Curve." *Proc. Inst. Mech. Engrs* 215(J): 483-493.
- SOARES, G. D. A. (2010). "Subsídios CGEE em Materiais Avançados para Saúde Médico-Odontológica no Brasil 2010-2022", CGEE, Brasília DF, 32p.
- STRAIOTO, F. G., LELIS, B. C., SOARES, C. J., DE MELLO, J. D. B., DECHICHI, P. and FERNANDES NETO, A. J. (2006). "Estudo Comparativo da Topografia De Superfície do Esmalte Humano e Bovino." *Revista de Pós-Graduação (USP)* 13: 223-228.
- UNDERWOOD, L. R., *The Rolling of Metals*, London, 1952.
- ZHOU, Z. R. and ZHENG, J. (2006). "Oral Tribology." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology* 220(J8): 739-754.

