



Materiais Avançados 2010-2022

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação



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.

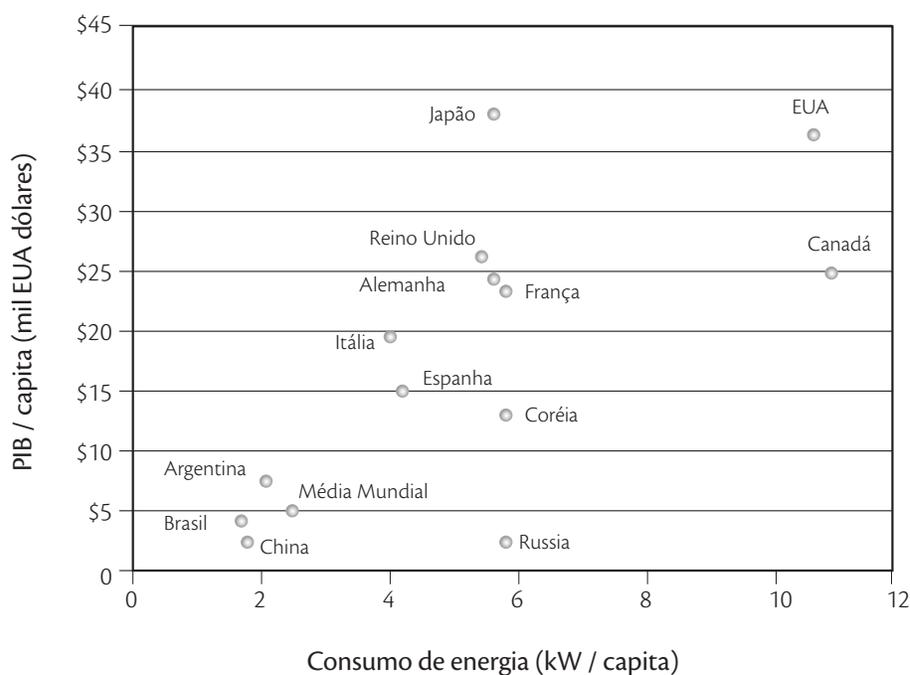


Figura 4-1: Dependência do produto interno bruto com o consumo de energia per capita. Fonte: dados adaptados do relatório da Agência Internacional de Energia (2006).

Por outro lado, as maiores emissões de CO₂, 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.

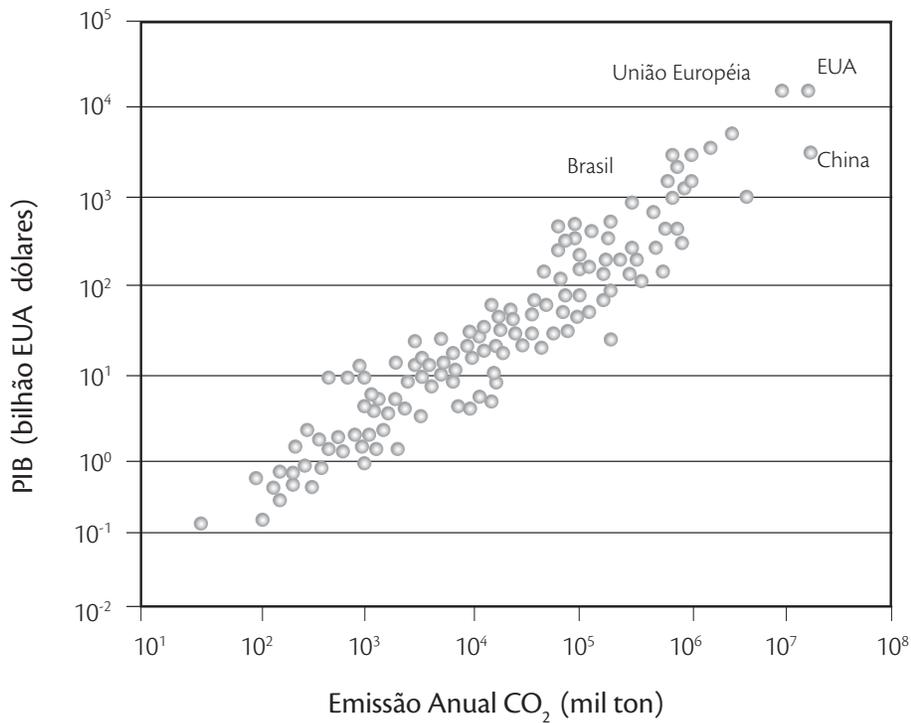


Figura 4-2: Relação entre o produto interno bruto e as emissões anuais de CO₂. Fonte: PIB – Fundo Monetário Internacional (2006) e Emissões de CO₂ - Carbon Dioxide Information Analysis Center (DOE, EUA, 2006).

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

crescente 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, alanos, 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.

