expediente

Revista ADvir / ISSN 1518-3769

REVISTA ADVIR
Publicação da Associação
de Docentes da Universidade do
Estado do Rio de Janeiro - Asduerj.
Registro ISSN 1518-3769
Rua São Francisco Xavier, 524,
1º andar, Bloco D, Sala 1026, Maracanã
Rio de Janeiro/RJ - CEP 20550-013.
(21) 2264-9314 / 2334-0060 / 2334-0511
www.asduerj.org.br • advir@asduerj.org.br

DIRETORIA BIÊNIO 2011/2013
Presidente: Bruno Deusdará
I Vice-Presidente: Fábio Iorio
II Vice-Presidente: Paulo Alentejano
I Tesoureiro: Juliana Fiúza
II Tesoureiro: Hindenburgo Pires
I Secretário: Lia Rocha
II Secretário: Wilson Macedo

FICHA TÉCNICA
Jornalista: Sérgio Franklin
Estagiário de jornalismo: Carlos Henrique Silva
Revisão de textos: Décio Rocha e Leila Braile
Produção Editorial e Edição Visual: Leila Braile
Assessoria de Produção:
José Luís de Souza e Mira Caetano
Tiragem: 2000 exemplares

SECRETARIA DA ASDUERJ
Secretária
Arlete Cândido
Agente Administrativo
Erick Cândido
Apoio Administrativo
Zita Alves

DISTRIBUIÇÃO (GRATUITA)
Aos filiados da Asduerj;
Seções Sindicais do Andes-SN;
Instituições de Pesquisa e Ensino Superior;
Bibliotecas Públicas.

CONSELHO EDITORIAL
Décio Rocha
Deise Mancebo
João Araújo Ribeiro
João Pedro Vieira
Luiz Claudio de Santa Maria
Hindenburgo Pires

CONSELHO CONSULTIVO
Adriana Facina (História/UFF)
Antonio Celso Pereira (Direito/UERJ)
Bruno Corrêa Meurer (Biologia/USU)
Carlos Alberto Mandarim (Biologia/UERJ)
Cláudia Mônica dos Santos (Serviço Social/UFJF)
Edison da Silva Faria (Arte e Crítica da Arte/UFPA)
Eurico Zimbres (Geologia/UERJ)
Franceline Reynaud (Farmácia/UFRJ)
Francisco Portugal (Psicologia Social/UFRJ)
Gustavo Krause (Literatura/UERJ)
Heliana Conde (História da Psicologia/UERJ)
Jader Benuzzi Martins (Física/UERJ)
José Augusto Quadra (Nefrologia/UERJ)
José Carlos Pinto (Engenharia Química/UFRJ)
Josefina Lanzi de Zeitune (Linguística/UNT/Argentina)
Jussara Cruz de Brito (Saúde do Trabalhador/ENSP)
Lená Medeiros (História/UERJ)
Lilian Nabuco (Comunicação/UERJ)
Luciana Maria Almeida de Freitas (Educação/UFF)
Luiz Sebastião Costa (Engenharia/UERJ)
Luiz Satoru Ochi (Computação/UFF)
Maria Beatriz David (Economia/UERJ)
Miguel Angel de Barrenechea (Educação/UNIRIO)
Rose Mary Serra (Serviço Social/UERJ)
Rubens Luiz Rodrigues (Educação/UFJF)
Solange Cadore (Química/UNICAMP)
Wang Shu Hui (Materiais/USP)
Yves Schwartz (Ergologia/UP/França)

EDITORES RESPONSÁVEIS
Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho (Engenharia/Uerj)
Luiz Sebastião Costa (Engenharia/Uerj)

POLÍTICA editorial e NORMAS para submissão de artigos

POLÍTICA EDITORIAL

A Revista ADVIR é uma publicação semestral editada pela Associação de Docentes da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (ASDUERJ), cujo objetivo é divulgar produções científicas nacionais e estrangeiras.

Os textos enviados para ADVIR devem ser inéditos. A critério do Conselho Editorial, excepcionalmente poderão ser aceitos textos para republicação.

Todo material recebido será submetido a, pelo menos, dois pareceristas do Conselho Consultivo, que decidirão, em caráter definitivo e com base em critérios científicos, sobre sua publicação ou não, ficando a critério do Conselho Editorial definir em que edição e seção da revista isto ocorrerá, tendo em vista apenas critérios de adequação editorial.

O Conselho Consultivo poderá sugerir ao autor modificações de estrutura ou de conteúdo, bem como rejeitar os trabalhos. É do(s) autor(es) a inteira responsabilidade pelo conteúdo do material enviado, inclusive a revisão gramatical e adequação às normas de publicação. Os autores serão contatados, individualmente, para envio do resultado do parecer.

NORMAS PARA SUBMISSÃO DE ARTIGOS
(Reprodução parcial, com acréscimos, da ABNT NBR 14724:2011)

Resumo/Abstract/palavras-chave: O(s) autor(es) deve orientar-se pelo descrito na ABNT NBR 6028**).** Resumos de artigos acadêmicos em periódicos devem ter entre 150 e 200 palavras. As palavras-chave (no caso da Advir, até cinco) devem ser representativas do conteúdo do documento, escolhidas, preferentemente, em vocabulário controlado.

Idioma: Os trabalhos deverão ser redigidos em português ou espanhol. Textos escritos em outros idiomas deverão ser traduzidos ao português.

Envio: Os trabalhos deverão ser enviados unicamente por *e-mail* para o endereço: <advir@asduerj.org.br> da seguinte forma: os arquivos deverão ser enviados, separadamente, no mesmo *e-mail*: 1) nomeado como DADOS AUTOR, o arquivo deve conter os dados de identificação do autor (nome, titulação, função e/ou cargo, unidade e departamento, endereço eletrônico, residencial e comercial, telefones para contato; 2) nomeado como TRABALHO 01, o trabalho sem identificação do autor, inclusive nas autorreferências ao longo do texto, que deverão ser substituídas por "XXX"; 3) nomeado como TRABALHO 02, o trabalho com identificação do autor.

Prazo: A submissão de textos deverá ser realizada, impreterivelmente, até o prazo estipulado nos editais de chamada de artigos da Revista Advir disponíveis em www.asduerj.org.br.

Número de páginas: O texto deve ter entre 8 e 15 páginas.

Dimensões e cores: Os textos devem ser digitados em folha A4, cor preta, devendo ser utilizado o padrão preto (e seus matizes) e branco para as ilustrações.

Margens: As margens devem ser: para o anverso, esquerda e superior de 3 cm e direita e inferior de 2 cm; para o verso, direita e superior de 3 cm e esquerda e inferior de 2 cm.

Fonte: Deve-se utilizar a fonte *Times New Roma*n, tamanho 12, para todo o trabalho, inclusive capa, excetuando-se citações com mais de três linhas, notas de rodapé, paginação, dados internacionais de catalogação na publicação, legendas e fontes das ilustrações e das tabelas, que devem ser em tamanho menor e uniforme.

Espaçamento: Todo texto deve ser digitado com espaçamento 1,5 entre as linhas, excetuando-se as citações de mais de três linhas, notas de rodapé, referências, legendas das ilustrações e das tabelas, que devem ser digitados em espaço simples. As referências, ao final do trabalho, devem ser separadas entre si por um espaço simples em branco.

Notas de rodapé: As notas devem ser digitadas dentro das margens, ficando separadas do texto por um espaço simples de entre as linhas e por filete de 5 cm, a partir da margem esquerda. Devem ser alinhadas, a partir da segunda linha da mesma nota, abaixo da primeira letra da primeira palavra, de forma a destacar o expoente, sem espaço entre elas e com fonte menor.

Citações: Apresentadas conforme a ABNT NBR:10520 (ou última edição revisada disponível).

Siglas: A sigla, quando mencionada pela primeira vez no texto, deve ser indicada entre parênteses, precedida do nome completo.

Equações e fórmulas: Para facilitar a leitura, devem ser destacadas no texto e, se necessário, numeradas com algarismos arábicos entre parênteses, alinhados à direita. Na sequência normal do texto, é permitido o uso de uma entrelinha maior que comporte seus elementos (expoentes, índices, entre outros).

Ilustrações: Devem seguir o padrão preto (e seus matizes) e branco. Qualquer que seja o tipo de ilustração, sua identificação aparece na parte superior, precedida da palavra designativa (desenho, esquema, fluxograma, fotografia, gráfico, mapa, organograma, planta, quadro, retrato, figura, imagem, entre outros), seguida de seu número de ordem de ocorrência no texto, em algarismos arábicos, travessão e do respectivo título. Após a ilustração, na parte inferior, indicar a fonte consultada (elemento obrigatório, mesmo que seja produção do próprio autor), legenda, notas e outras informações necessárias à sua compreensão (se houver). A ilustração deve ser citada no texto e inserida o mais próximo possível do trecho a que se refere.

Tabelas: Devem ser citadas no texto, inseridas o mais próximo possível do trecho a que se referem e padronizadas conforme o Instituto Brasileiro de Geografi a e Estatística (IBGE).

Referências bibliográficas: Apresentadas conforme a ABNT NBR 6023:2002 (ou última edição revisada disponível).

PRÓXIMA EDIÇÃO (ADvir 32)

Seção Ponto de Vista

Jornadas de junho: reflexões.

Demais seções:

Tema livre.

Prazo para submissão de artigos:

Até 14 de abril de 2014.
Envio somente pelo *e-mail*:
advir@asduerj.org.br

Informações
Assessoria de Comunicação da Associação de Docentes da Uerj.
Telefones: 2264-9314 / 2334-0060
E-mail: advir@asduerj.org.br
www.asduerj.org.br/publicacoes

Equipe
Jornalista:
Sérgio Franklin
Estagiário de Jornalismo:
Carlos Henrique Souza
Produção editorial:
Leila Braile
Assistentes de produção:
José Luís de Souza
Mira Caetano

Índice

Ponto de Vista

Energia solar fotovoltaica: panorama e perspectivas para o Brasil <6 a 20>
Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho e Luis Chiganer

A Extração do petróleo da camada pré-Sal brasileira: desafios e oportunidades
Antonio Cláudio de França Corrêa **<21 a 27>**

Hidroeletricidade: migração para uma matriz elétrica predominantemente renovável
José Biruel Junior **<28 a 38>**

Energia eólica no Brasil. Hora de mudar a política?
Geraldo Martins Tavares **<39 a 46>**

Energia nuclear: desmistificação e desenvolvimento
Leonam dos Santos Guimarães **<47 a 64>**

A polêmica sustentabilidade dos biocombustíveis
Selena Herrera **<65 a 76>**

Sistemas eletrônicos de energia renovável:desafios e soluções para uma vida sustentável
Maria Dias Bellar, Luís Fernando Corrêa Monteiro,
José Paulo Vilela Soares da Cunha e Tiago Roux de Oliveira **<77 a 89>**

Geração hidrelétrica: fatos e mitos
Antonio Guilherme Garcia Lima **<90 a 109>**

Opinião

O Movimento de junho e as práticas políticas institucionais
Valter Duarte **<110 a 124>**

editorial

O assunto energia foi escolhido pelo Conselho Editorial para esta edição da revista Advir considerando a importância do uso da energia, que está intimamente associado ao grau de desenvolvimento tecnológico e social das nações, ao conforto e ao bem estar dos cidadãos e correlacionado com a sustentabilidade ambiental. Assim definimos como tema central **Geração e Disponibilidade Energética Sustentável para o Futuro.**

O uso da energia se destaca em todas as atividades de nosso dia a dia, com importância para o transporte de bens e de pessoas, para a agricultura e a indústria e todos os demais setores da economia.

O episódio energético de 2001, conhecido popularmente como "apagão", que, com os seus inconvenientes, promoveu intensos debates sobre o tema, culminou com grande programa de racionamento e consequente conscientização da população para o uso eficiente da energia. Antes deste fato, a energia era socialmente percebida como inesgotável.

Quanto à geração e disponibilidade energética**,** o Brasil é referência mundial no uso de fontes renováveis, com 42,4% do total, sendo 13,2% a média mundial. Com destaque para a geração hidrelétrica, que participa com 76,9% da produção de energia elétrica nacional, que, por outro lado, traz grandes discussões sobre as barragens e alagamentos das futuras usinas na região amazônica, em contraponto ao fato de ser renovável e de pequenas emissões.

Com relação às fontes energéticas fósseis, o Brasil ganhou destaque no cenário internacional pela descoberta das grandes reservas de petróleo e gás do Pré-Sal e pelo desenvolvimento de tecnologia para a sua exploração, podendo transformar-se no futuro em um dos principais exportadores.

O assunto energia, sem dúvida, é um problema de discussão mundial, dado que há predominância do uso das fontes fósseis, não renováveis, que tende a se esgotar, o mesmo ocorrendo com o potencial hidrelétrico. Ao mesmo tempo, as energias solar e eólica, conhecidas como as fontes energéticas do futuro, ainda não são competitivas economicamente com as fontes tradicionais, faltando tecnologias para ampliar a sua participação na matriz energética.

Desta forma, a discussão sobre as diversas fontes energéticas nos levaram a criar os subtemas:

Hidreletricidade, Energia Eólica, Solar e Nuclear, Petróleo e Biomassa, que são temas de discussão e destaque nos cenários nacional e internacional.

Como a questão energética está diretamente relacionada à questão ambiental, com destaque para o aquecimento global e consequentes mudanças climáticas, que são temas em discussão atualmente por toda a sociedade, isso nos conduziu pela oportunidade da escolha do tema central desta edição.

Ressaltamos, também, que o planejamento energético deve envolver discussões com toda a sociedade brasileira, com vistas a definir os tipos de fontes mais apropriados e seus respectivos níveis de participação na matriz energética, onde podemos salientar a oportunidade da discussão do uso da energia nuclear, haja vista o domínio tecnológico que o Brasil já possui. Neste planejamento também deve ser dado destaque ao uso eficiente das fontes energéticas.

Outro tema em amplo debate são os biocombustíveis, principalmente na competição com as áreas destinadas à produção de alimentos e no risco de uma expansão fora de controle da fronteira agrícola.

Esperamos que os assuntos e artigos publicados venham a suscitar esclarecimentos e debates, com vistas a procurar alternativas viáveis, do ponto de vista econômico e tecnológico, que nos levem a uma Geração de Energia Sustentável para o Futuro.

Editores Responsáveis por ADvir, número 31

Prof. Manoel Antonio da Fonseca Costa (Engenharia Mecânica/Uerj)

Prof. Luiz Sebastião Costa (Engenharia Elétrica/Uerj)

Ponto de Vista

Energia solar fotovoltaica: panorama e perspectivas para o Brasil

Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Luis Chiganer
Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo

A matriz energética nacional é constituída de 42,4% de fontes renováveis, enquanto a média mundial é 13,2%, o que faz do Brasil um *benchmark* no uso das fontes renováveis de energia. Estudos indicam que a energia solar fotovoltaica será a forma predominante na matriz energética mundial de 2030 em diante. A energia solar tem participação insignificante na matriz energética brasileira. As energias solar fotovoltaica e eólica são as fontes alternativas com maior potencial para utilização na geração distribuída de eletricidade, caracterizada pelo uso de geradores descentralizados, instalados próximo aos consumidores, o que se opõe ao modo tradicional de geração de energia elétrica baseado em grandes usinas construídas em locais distantes dos consumidores. A Agência Nacional de Energia Elétrica publicou a resolução normativa 482/2012, obrigando as concessionárias de energia elétrica a adaptar-se à entrada de sistemas de geração distribuída com fontes alternativas em suas redes de distribuição de baixa tensão. Devido ao alto custo de implantação, acredita-se que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede crescerão primeiro como projetos de P&D financiados pelos mecanismos oficiais, e em residências de classe alta com consciência ambiental, ou em centros comerciais ou empresas com apelo ambiental.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Energias renováveis. Energia solar.

Photovoltaic solar energy: overview and outlook for Brazil

Abstract

The Brazilian energy matrix is composed of 42.4 % from renewable sources, while the world averaged is 13.2 %, which makes Brazil a benchmark in the use of renewable energy. Studies indicate that solar photovoltaic will be the prevailing mode in the world energy matrix from 2030 onwards. Solar energy has insignificant share in the Brazilian energy matrix. The solar photovoltaic and wind power are the alternative sources with the greatest potential for use in distributed generation of electricity, characterized by the use of decentralized generators, installed close to the consumers, which is opposed to the traditional way of generating electricity based on large power plants built at sites far from consumers. The National Electric Energy Agency published the Normative Resolution 482/2012, forcing electric utilities to adapt to the input of distributed generation systems with alternative sources in their low voltage distribution grids. Due to the high cost of implementation, it is believed that the photovoltaic systems connected to the grid will grow first as R & D projects funded by official mechanisms, and in the environmentally conscious, high class residences, or shopping centers and companies as environmental appeal.

Keywords: solar PV. Photovoltaic systems connected to the grid. Renewable energy. Solar energy.

1 - INTRODUÇÃO

A evolução da espécie humana vem sendo acompanhada de uma crescente demanda por energia. Muito embora haja movimentos na questão ambiental e de desenvolvimento sustentável, sob o ponto de vista econômico, a sociedade tem sido movida por constantes passos no caminho do consumismo imediato. Assim, há todo um crescimento, das nações menos desenvolvidas às mais desenvolvidas, baseado simplesmente no aumento do consumo de energia. Como as fontes de energia convencionais não são inesgotáveis, um caminho a ser desenvolvido será o de novas fontes alternativas de energia, onde se destaca a energia solar.

Com o desenvolvimento industrial, particularmente a partir do século XVIII, tivemos incrementos expressivos no consumo de energia, e de origem fóssil em quase a sua totalidade. Por exemplo, o desenvolvimento do motor a combustão interna fez a humanidade disseminar o uso dos combustíveis no uso da energia.

Atualmente, a matriz energética mundial utiliza os combustíveis fósseis como a sua grande fonte de energia primária. No entanto, o carvão, o petróleo e o gás natural, importantes para esse mercado, têm suas reservas limitadas e potencialidades indiscriminadas na poluição ambiental. Cerca de 80% da energia elétrica consumida no mundo é produzida a partir da queima do carvão, do petróleo e do gás natural e a partir de usinas nucleares.

A participação das energias não renováveis será cada vez menor devido principalmente ao esgotamento das reservas de combustíveis fósseis. As energias solar e eólica, que hoje são apenas consideradas alternativas e têm pouca participação na matriz energética mundial, deverão ser as principais fontes de energia no futuro.

O conceito de energia limpa é frequentemente associado às fontes renováveis. O uso de fontes renováveis de energia para a produção de eletricidade em substituição aos combustíveis fósseis colabora com a redução da emissão de poluentes na atmosfera e reduz o chamado efeito estufa.

O conceito de energia alternativa não é exclusivo das fontes renováveis, entretanto a maior parte dos sistemas alternativos de geração de eletricidade emprega fontes renováveis. Os custos das fontes alternativas de energia estão reduzindo-se, com aumento de escala de produção. Em muitos países, estes custos já se igualam ao da energia produzida pelas fontes tradicionais.

Há países com um vasto potencial energético de origem hidráulica. O Brasil, em particular, que tem um vasto potencial energético de origem hidráulica ainda não explorado em sua plenitude, é beneficiado por não necessitar utilizar grandes quantidades de combustível para a geração de energia elétrica. Entretanto, a frota nacional utiliza predominantemente derivados do petróleo, com apenas 12,5% de participação do etanol (EPE, 2013). A matriz energética nacional é constituída de 42,4% de fontes renováveis (EPE, 2013), sendo 13,2% a média mundial calculada pela Agência Internacional de Energia, o que faz do Brasil um *benchmark* no uso das fontes renováveis de energia.

2 – A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra corresponde, aproximadamente, a dez mil vezes a demanda atual global de energia. Logo teríamos de utilizar apenas 0,01% desta energia para satisfazer a demanda total terrestre. Claro que estamos sendo otimistas e considerando a captação total da energia enviada à Terra pelo Sol, todavia sabemos que isso não é possível, mas esta informação serve para termos a ideia de quão grande é essa fonte alternativa e limpa.

O sol fornece energia na forma de radiação térmica. A energia solar pode ser usada para aquecimento, utilizando-se coletores solares, e, quando captada desta forma, ela é denominada de Energia Solar Térmica. A conversão da energia solar em eletricidade pode ser direta, por meio de um Sistema Fotovoltaico ou indireta, por meio de um Sistema Termossolar.

Em um Sistema Termossolar, a radiação térmica é captada por coletores com dispositivos concentradores de forma a elevar a temperatura para promover a vaporização de um fluido, que é utilizado em uma turbina a vapor, seguindo um ciclo termodinâmico de Rankine convencional, o mesmo usado em algumas usinas termelétricas e termonucleares, diferindo destas apenas na fonte de aquecimento do fluido.

Os Sistemas Fotovoltaicos têm a capacidade de converter diretamente a luz solar em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. A corrente elétrica produzida é coletada e processada por dispositivos controladores e inversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica. Este artigo refere-se exclusivamente à energia solar fotovoltaica.

O efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez em 1893 pelo físico francês Edmond Becquerel (GOETZBERGER et al, 2003), consiste essencialmente na conversão da energia luminosa incidente sobre materiais semicondutores em eletricidade. É com base nesses que se produzem as células fotovoltaicas. Devido às suas pequenas dimensões, as células fotovoltaicas apresentam produção de energia pouco significante, uma vez que esta é proporcional à área da superfície que recebe radiação solar. As células devem, portanto, ser associadas em grupos, de forma a resultar num somatório de potencial energético, constituindo assim os painéis solares.

No início, os painéis solares eram utilizados somente na geração de energia para satélites. Mas as tecnologias de produção evoluíram a tal ponto que tornaram viável seu uso em aplicações terrestres para fornecimento de energia elétrica em residências isoladas da rede convencional de distribuição.

Devido à insolação ocorrer apenas no período diurno, os sistemas fotovoltaicos necessitam de um sistema de armazenamento. Os sistemas isolados utilizam um banco de baterias e, nos sistemas conectados à rede elétrica, a rede exerce a função de armazenamento.

Existem basicamente 3 tipos de células fotovoltaicas disponíveis em escala comercial: silício monocristalino, policristalino e amorfo. Estas aproveitam apenas um determinado

comprimento de onda, e o rendimento máximo está em 15%. O restante da energia solar absorvida é convertido em calor, que aquece o painel e prejudica o seu rendimento, principalmente em clima tropical (KAGAN *et al*., 2013).

Painéis com mais de um material, ainda em fase de desenvolvimento, absorvem mais de um comprimento de onda, podendo alcançar 25% de rendimento em laboratório. Células de arsenieto de gálio alcançam, em laboratório, rendimento de 28% (KAGAN *et al*., 2013).

As células de película fina ou filmes finos são uma tecnologia mais recente, que surgiu após as tecnologias cristalinas já estarem bem desenvolvidas. Diferentemente das células cristalinas, que são produzidas a partir de fatias de lingote de silício, os dispositivos de filmes finos são fabricados por meio da deposição de finas camadas de materiais sobre uma base que pode ser rígida ou flexível. Os materiais comercialmente usados são o silício amorfo, o disseleneto de cobre-índio e o telureto de cádmio.

As células de película fina utilizam muito menos matéria-prima e energia para sua fabricação, não têm restrições de tamanho e forma e podem, até mesmo, ser flexíveis e transparentes.

As células de película fina foram a promessa para baratear o custo dos módulos fotovoltaicos, desde os anos 90, mas, em função de vários fatores, não conseguiram tirar a liderança do silício cristalizado. Um dos principais motivos, que é comum a todas as tecnologias de filmes finos, é a maior disponibilidade de silício grau-solar, que barateou o silício cristalizado. São adequados para telhados e mesmo paredes, principalmente em localidades de altas latitudes. São muito usados na Alemanha, pois a inclinação ótima do painel corresponde à latitude local e, portanto, a posição vertical possibilita um rendimento aceitável nos países de clima temperado do Hemisfério Norte. A grande vantagem dos filmes finos é a incorporação da captação fotovoltaica da energia solar sem a descaracterização da arquitetura das construções.

Os painéis solares podem ser usados nos telhados e fachadas das construções para suprir as necessidades locais de eletricidade, ou podem ser empregados em usinas geradoras de eletricidade. Nas figuras 1 e 2 são mostradas aplicações de sistemas fotovoltaicos.

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia cujo uso mais cresce em todo o mundo. Estudos mostram como tem crescido o consumo de energia elétrica no mundo desde 1980, no qual o consumo era cerca de 7 mil TWh, e que a previsão é de quase 30 mil TWh em 2030, segundo a Agência Internacional de Energia.

Na figura 3 vemos que, no ano de 2000, o mundo tinha menos de 5 GW de capacidade de geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos. Esta capacidade aumentou para cerca de 40 GW em 2010 e não para de crescer. A figura 3 mostra, também, que a energia solar fotovoltaica será a forma predominante na matriz energética mundial, a partir de 2030.

Atualmente, a Alemanha é o país que possui a maior capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, com cerca de 20 GW, superior a todos os outros países juntos. Isso

representa aproximadamente 4% de toda a eletricidade produzida naquele país. Os programas de incentivo à energia solar praticados pelo Governo da Alemanha favoreceram o desenvolvimento dos equipamentos e a redução de custos, porque geraram mercado. E estes benefícios estão sendo usufruídos por todos os países.

A melhor taxa de irradiação solar da Alemanha é cerca de 3500 W.h/m^2 por dia, disponível apenas em uma pequena parte ao sul do seu território. O Brasil apresenta taxas de irradiação solar entre 4500 e 6000. Dadas as dimensões territoriais e as elevadas taxas de irradiação solar brasileiras, é razoável esperar para o Brasil um potencial de geração fotovoltaica, pelo menos, dez vezes superior à capacidade instalada na Alemanha.

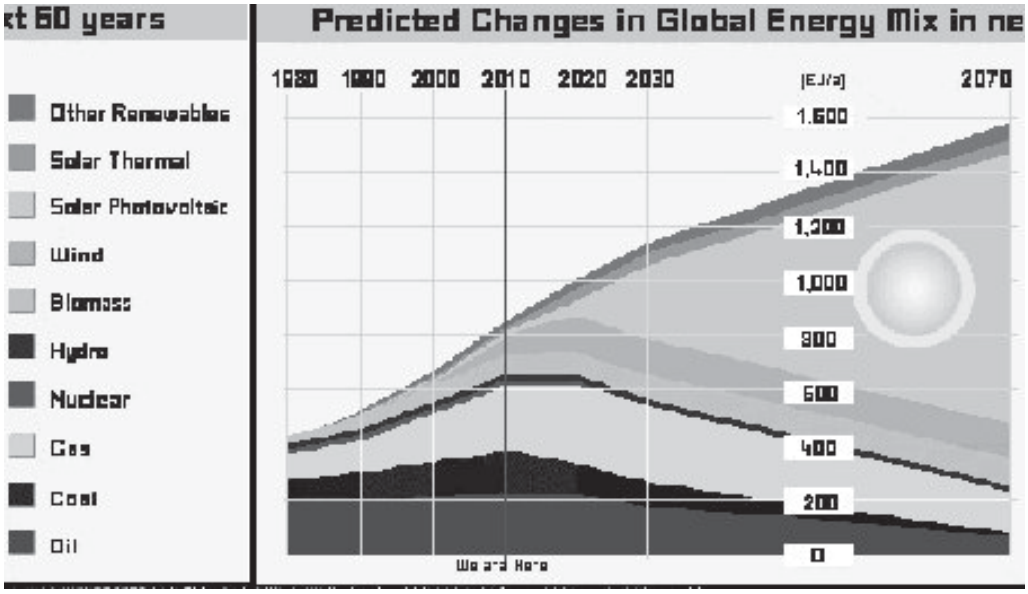
Figura 1 - Usina solar do estádio do Maracanã, Rio de Janeiro.

Fonte: foto própria, em 16/08/2013.

Figura 2 – Sistema fotovoltaico do Centro de Estudos e Pesquisa em Energias Renováveis da UERJ, bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro.

Fonte: http://www.ceper.eng.uerj.br/solar/. Acesso em 16/10/2013.

Figura 3 - Previsão para a participação das fontes de energia no mundo até o ano de 2070.



Fonte: http://www.airenergysolar.com/key.htm. EJ/a: 10 Joule/ano.

Segue, abaixo, uma análise de vantagens e desvantagens dos sistemas fotovoltaicos:

- não possuem partes móveis, sendo, por consequência, silenciosos;

- praticamente não necessitam de manutenção, o que os torna adequados para o uso em residências;

- os painéis, que são a parte mais cara do conjunto, têm garantia de 20 anos ou mais. As baterias, que possuem durabilidade média de apenas 5 anos, são eliminadas quando o sistema fotovoltaico trabalha conectado à rede elétrica. Os componentes eletrônicos sofrem com as condições de elevadas temperatura e umidade do ar, e necessitam ser "tropicalizados";

- apresentam composição modular, facilitando a sua expansão de acordo com o aumento do consumo;

- não geram resíduos na sua utilização, apesar da mineração do silício gerar significativo impacto ambiental e o processo de purificação do silício ser de uso intenso de energia. Há carência de estudos publicados sobre a análise de ciclo de vida de um painel fotovoltaico, dado que a divulgação dos mesmos contraria os interesses dos fabricantes, que são os mais aptos a levantarem os custos de produção, os gastos de energia e as emissões de poluentes ao longo de toda a cadeia produtiva, de modo a determinar com precisão qual é o *payback* ambiental, isto é, quanto tempo o painel deverá funcionar para compensar a energia consumida em toda a sua cadeia produtiva, incluindo também o seu transporte e a sua instalação;

- se houver um adequado planejamento, em sistemas isolados, parte da rede elétrica poderá trabalhar com corrente contínua ou inversores de menor qualidade, como os de onda quadrada, quando o sistema alimentar cargas resistivas, como iluminação, ou aparelhos com conversores para corrente contínua (retificadores), como computadores e demais produtos eletrônicos;

- com a evolução da iluminação para a tecnologia de led, o baixo consumo destas lâmpadas tornará a aplicação de sistemas fotovoltaicos para iluminação bastante atrativa;

- tem havido redução dos custos no Brasil. Galdino (2012) aponta o custo total de implantação de sistemas fotovoltaicos, incluindo custos de equipamentos, materiais e serviços de instalação de sistemas isolados no Brasil, em cerca de 38 R$/Wp, e o custo total dos equipamentos em 21 R$/Wp, ambos os custos com tendência de redução.

No caso dos sistemas distribuídos, algumas vantagens deste tipo de instalação podem ser destacadas, a saber: não requerem área extra e podem, portanto, ser utilizados no meio urbano, próximos ao ponto de consumo, o que leva a eliminar perdas de transmissão e distribuição da energia elétrica. Os módulos fotovoltaicos de filmes finos podem ser também considerados como um material de revestimento arquitetônico no caso de instalações em prédios e casas, reduzindo os custos e dando à edificação uma aparência estética inovadora e *high tech* (FRAINDENRAICH & LYRA, 1995).

3 - A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

As energias solar fotovoltaica e eólica são as fontes alternativas com maior potencial para utilização na geração distribuída de eletricidade, caracterizada pelo uso de geradores descentralizados, instalados nas proximidades dos locais de consumo, o que se opõe ao modo tradicional de geração de energia elétrica, baseado em grandes usinas construídas em locais distantes dos consumidores.

Geração distribuída é a geração que não é planejada de modo centralizado, nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizada (MALFA, 2002). Para o IEEE, geração descentralizada é uma central de geração pequena o suficiente para estar conectada à rede de distribuição e próxima do consumidor (MALFA, 2002). Segundo Turkson & Wohlgemuth, (2001), geração distribuída é definida como o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e/ou consumidores específicos. A geração distribuída transforma as redes elétricas convencionais radiais e passivas em redes em malha e ativas (KAGAN et al., 2013).

As vantagens da geração distribuída são:

- posterga investimentos em transmissão;
- elimina as perdas em transmissão;
- reduz as perdas em distribuição;
- melhora a qualidade do serviço de energia;
- Para o consumo próprio, o autoprodutor fica isento de impostos; no caso do ICMS, o imposto está na faixa de 20%, o que favorece o uso de tecnologias com maior custo da energia, como a solar fotovoltaica. Em muitos países, a energia solar fotovoltaica já alcançou a paridade com a rede, isto é, o custo da energia gerada pelo sistema fotovoltaico já é igual ao valor de compra de energia da concessionária, que inclui os impostos incidentes.

De acordo com a Plataforma Tecnológica Fotovoltaica Europeia (EUROPEAN UNION, 2007 apud INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE, 2009), a energia gerada por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede deverá se tornar competitiva na Europa com a tarifa praticada para o consumidor (paridade com a rede) entre 2010 e 2020, e com os custos médios de geração depois de 2030.

Por outro lado, no caso da geração termelétrica, equipamentos de maior porte alcançam maiores rendimentos, as turbinas a gás e, em especial, as usinas com ciclo combinado alcançam rendimentos muito superiores aos dos motores de ciclo Otto e Diesel e as microturbinas usados na geração distribuída; e também a emissão de poluentes fica distante dos centros urbanos, onde há maior concentração da população. Estas situações favorecem a geração centralizada.

Com o crescimento da população e do acesso à rede elétrica, a demanda crescente e a falta de investimentos por décadas no aumento da capacidade de geração, o interesse pela geração distribuída cresceu no Brasil. A tarifação diferenciada no horário de ponta do consumo de energia elétrica fez disseminar o uso de geradores a diesel e a gás natural, inclusive nos centros urbanos, contribuindo para o aumento da poluição. Em muitos casos, a necessidade de um sistema de geração de emergência eliminou os custos de implantação e estes geradores de *back up* passaram a operar diariamente, nas três horas de pico.

A geração distribuída teve grande alavancamento no Brasil com a utilização do bagaço de cana de açúcar como combustível para produzir aquecimento e energia elétrica nas usinas sucroalcooleiras, cujos excedentes de eletricidade passaram a ser exportados para a rede elétrica, por meio de conexões na média tensão (13,8 kV). Com o estabelecimento do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), esta modalidade passou a receber incentivos e foram estabelecidas as primeiras regulações da geração distribuída no Brasil. Esta forma de geração é bastante difundida no Estado de São Paulo e representa aproximadamente 6% da matriz elétrica nacional, segundo a EPE (2013).

Entretanto, sistemas de geração conectados à rede na baixa tensão não podiam ser instalados, porque isto carecia de regulação, e as concessionárias de eletricidade não os permitiam.

Mediante grande pressão por parte dos interessados, finalmente, em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa 482, aprovada em 17/04/2012, que passou a vigorar em dezembro de 2012. A publicação desta resolução constitui um marco regulatório em nosso país, beneficiando a população e obrigando as concessionárias de energia elétrica a adaptar-se à entrada de sistemas de geração distribuída com fontes alternativas, dentre elas a fotovoltaica, em suas redes de distribuição de baixa tensão. A resolução estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

Esses geradores podem ser instalados em residências e telhados de empresas, escolas e centros comerciais, constituindo microusinas e miniusinas de geração de eletricidade conectadas ao sistema elétrico nacional ou fornecendo eletricidade para comunidades isoladas, distantes da rede elétrica, situações cuja análise econômica atual favorece o uso da energia solar fotovoltaica.

No Brasil, as microusinas (potência instalada até 100KW) e miniusinais (potência instalada entre 100KW e 1MW) de eletricidade serão empregadas para abastecer o consumo próprio, podendo gerar créditos de energia nos períodos em que a geração é maior do que o consumo, de acordo com a resolução normativa 482.

Entre os incentivos à geração distribuída com injeção de até 30 MVA na rede de distribuição por meio de fonte primária de aproveitamento hidráulico, solar, biomassa ou cogeração qualificada, pode-se citar o desconto de 50% na tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD), comercialização da produção em leilões específicos, a venda direta a consumidores livres e à distribuidora por meio de chamada pública, além da desobrigação de contribuir para os Programas de P&D (KAGAN *et al*., 2013).

Por outro lado, a presença da geração distribuída nas redes de distribuição torna as redes ativas com toda a complexidade inerente à sua operação, controle, proteção, segurança na manutenção, injeção de harmônicos, aumento do nível de curto circuito, produção intermitente etc. (KAGAN *et al*., 2013).

Enquanto o investimento centralizado é realizado por grupos econômicos, incluindo o estado e, portanto, com recursos públicos, o investimento em microgeração, e mesmo em geração distribuída de biomassa, é realizado com recursos privados. Isto oferece uma interessante oportunidade à participação pulverizada no investimento do setor elétrico. (KAGAN *et al*., 2013).

4 – A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Apesar do vasto recurso solar, amplamente disponível em todo o território brasileiro e em todas as estações do ano, a energia solar tem participação insignificante na matriz energética brasileira, sequer aparecendo no Balanço Energético Nacional da EPE (2013), edição de 2012.

O Banco de Informações de Geração (BIG, acesso em 13/10/2013) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013) menciona 33 empreendimentos de usinas fotovoltaicas em operação com potência fiscalizada de 2.770 kW, cujo valor representa 0,00% de participação na capacidade total de geração de eletricidade do Brasil, onde 64,57% e 28,26% correspondem à geração hidrelétrica e termelétrica, respectivamente. No BIG, não há nenhum novo empreendimento em construção de usina geradora fotovoltaica

Uma das razões do interesse tardio do Brasil pela energia solar fotovoltaica é a geração hidrelétrica, responsável por 76,9 % da produção de eletricidade no Brasil (incluindo as importações), segundo a EPE (2013), cujos investimentos já foram saldados e foram construídas, em grande parte, em época na qual as preocupações ambientais não eram fortes e os impactos ambientais eram, em parte, desconhecidos, em parte, desconsiderados, sob a alegação de se tratar de uma fonte de geração limpa. Disto resultou custos de geração extremamente baixos e a falta de interesse do governo brasileiro em investir em uma tecnologia ainda com elevados custos. Mais recentemente, verificaram-se os impactos ambientais associados ao alagamento de grandes áreas de vegetação nativa, risco de perda de biodiversidade em áreas de fauna e flora ainda desconhecidas ou pouco conhecidas, grandes perdas em transmissão, porque a maior parte do potencial ainda não explorado encontra-se na Região Amazônica, portanto distante das regiões onde se concentra a população brasileira, e ainda, em muitos casos, com relevo desfavorável, o que aumenta a área de inundação.

A grande vantagem da geração hidráulica, que já é renovável, sobre a energia solar fotovoltaica, além do baixo custo da eletricidade, é possibilitar o armazenamento natural no seu reservatório de água, podendo adequar a produção ao consumo, o mesmo que

acontece com as termelétricas, com o armazenamento de combustíveis. Portanto, as energias solar e eólica não se prestam a servir como energia de base, devido à sua intermitência, imprevisibilidade e impossibilidade de armazenamento em grande quantidade por longo período. Há um limite de participação de fontes alternativas na matriz elétrica nacional, porém como a participação das fontes alternativas ainda é muito pouca, apenas 0,9% para a geração eólica, segundo a EPE (2013), o Brasil ainda está muito longe deste limite. Um grande problema da energia solar no Brasil é que o pico de geração está defasado do pico de consumo e a armazenagem é impraticável. Entretanto, está havendo uma migração do horário de pico para as 14h, nos dias mais quentes de verão, em função da disseminação do uso de aparelhos de ar condicionado, o que representa uma grande oportunidade para a utilização dos sistemas fotovoltaicos. A dificuldade de armazenamento é um grande problema das fontes alternativas, pois estas não se ajustam ao consumo. Na Dinamarca, por exemplo, 35% da energia eólica produzida é dissipada em bancos de resistores, porque não há consumo coincidente com os picos de geração.

Os custos são comumente apontados como uma das principais barreiras. O custo dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), no Brasil, varia de 800 a 900 R$/MWh (ZILLES, 2008a *apud* INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE, 2009). Já o custo marginal de expansão do setor elétrico nacional é de US$ 57/MWh (R$ 125,40/MWh), de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030. A tarifa média para os consumidores é de R$259,24/MWh. Portanto, o custo dos SFCR's no Brasil é de seis a sete vezes maior do que o custo marginal de expansão e de três a quatro vezes maior do que as tarifas médias de eletricidade praticadas no país. Alguns estudos apontam que a paridade de rede no país poderá acontecer entre 2015 e 2020 (INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE, 2009).

Apesar dos custos elevados, a experiência internacional tem mostrado que políticas públicas são responsáveis pela introdução dessa tecnologia no mercado, trazendo benefícios importantes, como redução dos custos, geração de emprego, desenvolvimento da indústria local de equipamentos e serviços, redução das emissões de gases de efeito estufa e da dependência de combustíveis fósseis (INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE, 2009).

As telecomunicações, em particular as estações repetidoras de microondas, constituem a aplicação mais antiga da tecnologia fotovoltaica no país (FRAIDENRAICH, 2002).

O uso da energia solar fotovoltaica no Brasil contou com algumas iniciativas voltadas para a eletrificação rural, através de concessionárias e instituições, conforme WINROCK INTERNATIONAL – BRAZIL (2002) *apud* VARELLA *et al*. (2012): Programa Luz Solar, implantado no estado de Minas Gerais; Programa Luz do Sol, implantado na Região Nordeste e Programa Nacional de Eletrificação Rural, Luz no Campo.

A primeira iniciativa governamental para o uso da energia solar fotovoltaica foi o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), instituído em 1994 pelo governo federal, envolvendo três tipos de aplicação: sistemas isolados de geração de energia elétrica, sistemas isolados de bombeamento d'água e sistemas fotovoltaicos de iluminação pública. Os sistemas isolados foram destinados a comunidades

pequenas e distantes da rede elétrica, cuja análise econômica tornava inviável a extensão da rede elétrica até estes locais, e, nestes casos, o custo do sistema fotovoltaico era menor do que a extensão da rede, dentro de um programa de universalização do acesso à energia elétrica. Os sistemas de bombeamento foram destinados a localidades do semiárido para captação de água do subsolo. O terceiro caso visava a reduzir despesas fixas e servir como *marketing* do governo.

Pelo PRODEEM, foram instalados 5 MWp de sistemas fotovoltaicos em aproximadamente 7.000 comunidades em todo Brasil (BRASIL, 2009). à medida que a rede elétrica alcançava alguns destes locais, os sistemas fotovoltaicos eram desativados e transferidos para outras localidades. A grande vantagem dos sistemas fotovoltaicos para comunidades isoladas é a sua pouca exigência de manutenção, em comparação aos geradores convencionais acionados por motores a combustão interna, além da logística complicada do transporte do combustível para estas localidades.

O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica (Programa Luz para Todos), que substituiu o Programa Luz no Campo, foi instituído pelo governo federal em 2003 e está previsto para funcionar até 2014, incorporou o PRODEEM.

Em 2004 foi criado o Centro Brasileiro para o Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica (CB-SOLAR), o qual desenvolve um projeto para a produção industrial de módulos fotovoltaicos de alta eficiência e baixo custo.

Em 2011, entrou em operação, no estado do Ceará, Região Nordeste, a Usina Solar Fotovoltaica de Tauá, com capacidade de 1 MW. Foi a primeira usina solar fotovoltaica comercial da América Latina e era a única conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

A ANEEL publicou, em agosto de 2011, a Chamada de Projeto Estratégico de Pesquisa & Desenvolvimento Nº 013/2011, intitulada "Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira". Foram qualificados 18 projetos, distribuídos em 96 empresas, 62 instituições de ensino e pesquisa e 584 pesquisadores. Os projetos totalizam uma geração de 24,5 MWp no prazo de três anos (HAAS *et al*., 2006).

Outras ações da ANEEL que estimulam o uso da energia solar fotovoltaica são:

- Resolução Nº 481/2012, que altera o desconto, de 50% para 80%, sobre as tarifas de uso dos sistemas de distribuição e transmissão (TUSD e TUST) para usinas com fonte solar nos empreendimentos que entrarem em operação comercial até dezembro de 2017;
- Resolução Nº 493/2012, que estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI.

No começo de 2013, foi criado o Fundo Solar**,** que tem o objetivo de incentivar o desenvolvimento do mercado fotovoltaico no Brasil, apoiando os primeiros projetos

conectados à rede, através de aporte financeiro constituído por recurso não reembolsável. Poderá solicitar o apoio ao Fundo Solar qualquer pessoa física ou jurídica interessada em instalar um microgerador fotovoltaico com potência de até 5 KWp conectado à rede, integrado à uma edificação e participe do sistema de compensação de energia (conforme previsto na Resolução 482/2012 da ANEEL). As entidades promotoras do Fundo Solar são o Instituto IDEAL (Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina) e o Grüner Strom Label (GSL - Selo de Eletricidade Verde). No Fundo Solar, o IDEAL é responsável pela gestão dos recursos no Brasil e o GSL será responsável pela captação dos recursos junto a instituições alemãs.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia solar fotovoltaica tornou-se uma realidade em alguns países, em função dos incentivos ao seu desenvolvimento. No entanto, o aprendizado da indústria internacional está ainda em evolução e os seus custos têm apresentado reduções significativas. De uma forma geral, considera-se que essa tendência será mantida nos próximos anos, o que pode significar que a fonte se torne mais competitiva, no futuro. É justamente nessa competitividade que é necessário um conjunto de medidas e estudos sobre formas de inserção desta fonte de geração, de modo a organizar nossa indústria nessa direção e não necessitarmos importar tecnologia no futuro.

No Brasil, tanto a geração fotovoltaica isolada como a integrada à rede deverão crescer nos próximos anos.

No caso da geração distribuída, em função do alto valor das tarifas de distribuição de energia ao consumidor final, uma comparação de valores já permite dizer que está próxima à condição de viabilidade econômica para a forma de utilização isolada. O mesmo não ocorre com a geração centralizada, cujos custos ainda não são competitivos com os de outras fontes renováveis.

Espera-se uma redução mais significativa dos custos de produção das células fotovoltaicas no país, quer por ganhos de escala, quer pelo grau de utilização e incentivos na indústria. Isto permitirá ao país participar de um maior grau de independência tecnológica no âmbito mundial.

Devido ao alto custo de implantação, acredita-se que os sistemas fotovoltaicos interligados à rede crescerão primeiro como projetos de P&D financiados pelos mecanismos oficiais, em residências de classe alta com consciência ambiental ou em centros comerciais ou empresas como apelo ambiental.

Há necessidade da execução de trabalhos de monitoramento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica para avaliar impactos no transformador, na rede elétrica, sua contribuição na suavização do pico nos dias mais quentes de verão na parte de tarde, bem como a avaliação da qualidade da energia da rede. Além disto, a medição da quantidade de energia produzida e os créditos gerados possibilitarão a realização de avaliações precisas do desempenho econômico dos sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Estudo e propostas de utilização de geração fotovoltaica conectada à rede, em particular em edificações urbanas**. Brasília: MME, 2009.

EPE, Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012, Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: 2013. (https://ben.epe.gov.br/)

FRAIDENRAICH, Naum & LYRA, Francisco, 1995. Energia Solar - Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotérmoelétrica e Fotovoltaica. P. 423-436

FRAINDENRAICH, N. **Tecnologia Solar no Brasil. Os próximos 20 anos.** In: Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos vinte anos. Campinas, SP: UNICAMP, 2002.

Galdino, Marco Antonio ANÁLISE DE CUSTOS HISTÓRICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASILIV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012

Goetzberger, A.; Hebling, C.; Schock, H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. Materials Science and Engineering R, v.4, 2003.

Haas, R.; Demet, S.; Lopez-Polo, A., 2006. An International Comparison of Market Drivers for Grid Connected PV Systems. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 september 2006. Dresden, Germany.

International Energy Agency, PVPS Annual Report 2007.

International Energy Initiative para a América Latina (IEI–LA) & Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**, 2009, Campinas, Procobre.

KAGAN, N. et al. Redes elétricas inteligentes no Brasil; análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação. **Rio de Janeiro, Synergia, 2013.**

MALFA, E., "ABB on Sustainable Energy Markets", Università di Brescia, 2002.

TURKSON, J. & WOHLGEMUTH, N. "Power Sector Reform and Distributed Generation in sub

Saharan Africa" Energy Policy **29: 2001.**

VARELLA, F., CAVALIERO, C., SILVA, E.. REGULATORY INCENTIVES TO PROMOTE THE USE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN BRAZIL. HOLOS - ISSN 1807-1600**, Natal, 3, jun. 2012. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/883>. Acesso em: 16 out. 2013.**

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.

A Extração do petróleo da camada pré-Sal brasileira: desafios e oportunidades

Antonio Cláudio de França Corrêa
Doutor em Engenharia do Petróleo pela Stanford University
Diretor da Universidade Corporativa da Petrobras

Resumo

Uma grande reserva petrolífera foi descoberta na plataforma continental brasileira. Tal reserva se encontra em rochas carbonáticas situadas a grande profundidade e em lâminas d'água superiores a 2 km de espessura. Este artigo descreve o processo de deposição das rochas do pré-sal, seu preenchimento com petróleo e gás natural, e desafios e oportunidades para a extração do petróleo de tais rochas. Devido à natural heterogeneidade dos carbonatos, é necessário grande investimento na caracterização das jazidas descobertas para a maximização da produção futura, e no desenvolvimento de novas tecnologias para redução de custo de perfuração de poços, pesquisa de novos materiais resistentes à corrosão por fluidos agressivos, e na logística de transporte de passageiros e materiais.

Palavras-chave: Pré-sal. Óleo. Gás. Petróleo. Rochas carbonáticas. Plataforma Continental Brasileira.

Petroleum Extraction from the Brazilian Pre-salt Layer: Challenges and Opportunities

Abstract

A huge oil reserve has been found in the Brazilian continental platform. Such petroleum is located in deeply buried carbonate rocks in water depths beyond 2 km. This paper describes the pre-salt rocks deposition process, the reservoirs filling with oil and gas,and discusses the challenges and opportunities for oil extraction from these rocks. Due to the natural heterogeneity of carbonate rocks large investments are required in reservoir characterization for maximizing future production, in new technologies for drilling costs reduction, in the development of new materials resistant to corrosion by aggressive fluids, and in the logistic of personnel and materials transports.

Keywords: Pre-salt. Gas. Oil. Petroleum. Carbonate rocks. Brazilian Continental platform.

No ano de 2006, um poço exploratório perfurado a pouco mais de 200 km do litoral do Estado do Rio de Janeiro, em lâmina d'água de cerca de 2.000 metros, atravessou uma espessa sequência de evaporitos, isto é, rochas formadas por deposição de sal, e atingiu uma camada de rochas carbonáticas impregnada com óleo. A partir daí, novas acumulações nestes carbonatos de idade geológica aptiana, depositadas há cerca de 120 milhões de anos, foram encontradas, incluindo o Brasil no rol dos países detentores de grandes reservas petrolíferas e com potencial para transformar-se, também, em um dos maiores produtores do mundo. A história geológica das acumulações do pré-sal e suas características, e os desafios encontrados na extração do petróleo são o tema deste artigo.

Inicialmente, sob uma visão holística dos processos físicos e químicos existentes no interior do nosso planeta, vamos procurar entender o processo de formação das acumulações petrolíferas do pré-sal brasileiro.

O interior da Terra é formado por um núcleo interno sólido, composto por 90% de ferro, níquel e traços de outros elementos, com raio de 1.215 km e temperaturas estimadas acima de 5.000^{o} C. Envolvendo este núcleo rígido há um núcleo externo líquido, com composição similar, raio externo de 3.480 km e temperaturas acima de 3.200^{o} C, e cuja rotação do metal líquido produz o campo magnético da Terra. A temperatura diminui à medida que se afasta do interior do planeta, indicando que a Terra está constantemente perdendo calor. Este resfriamento é a causa dos movimentos que ocorrem na parte externa da Terra e que são tão importantes para a exploração petrolífera.

Envolvendo o núcleo líquido, há o manto e a crosta, com raio de cerca 6.370 km. A crosta é sólida, com espessura variando entre 7 km (crosta oceânica) e 35 km (crosta continental). A crosta continental é menos densa (2,7 g/cm^3) do que a crosta oceânica (3,0 g/cm^3), sendo que a elevação média dos continentes é de 800 metros acima do nível do mar. A litosfera, parte superior do manto com cerca de 100 km de espessura, é sólida e quebradiça. Portanto, a parte sólida exterior da Terra constitui-se apenas de uma delgada casca quando comparada com as dimensões do planeta.

Imediatamente abaixo da litosfera, até uma profundidade de 660 km, há uma camada do manto superior, a astenosfera, formada por rochas parcialmente fundidas e sobre a qual boiam a litosfera e a crosta. Finalmente, entre o manto superior e o núcleo externo, há o manto inferior, formado por rochas muito quentes e submetidas a elevadas pressões, porém capazes de se movimentar ao longo do tempo geológico. Tal movimento é responsável pelo resfriamento gradual do planeta, uma vez que o material mais quente sobe, enquanto o mais frio desce, produzindo as correntes de convecção que deslocam a litosfera e a crosta. A elevação das rochas mais quentes provoca a quebra e a separação da crosta nas chamadas placas tectônicas. Há cerca de 140 milhões de anos, tal fenômeno deu origem à separação entre a América do Sul e a África, iniciando-se pelo extremo sul e rasgando o continente original em direção à linha do Equador. A abertura deu origem ao Oceano Atlântico e durou cerca de 40 milhões de anos até atingir o que hoje é o Estado do Rio Grande do Norte. A elevação do material líquido do manto para a superfície e seu

resfriamento provocam a constante formação de crosta oceânica e causa a separação dos continentes, os quais hoje se distanciam a uma velocidade de 2 cm por ano. No caso da separação entre a África e a América do Sul, as placas são divergentes e formam o que se denomina de margem passiva. Já em uma margem ativa, onde a crosta oceânica é consumida, como na costa oeste da América do Sul, há um constante atrito entre a placa oceânica descendente e a crosta subjacente, causando grande compressão, formação de cadeias de montanhas e inúmeros grandes terremotos. Portanto, nosso planeta é dinâmico e os movimentos que ocorreram no passado continuam na atualidade.

O entendimento dos fenômenos causadores do início da separação continental ainda é controverso, porém se aceita que o movimento dos fluidos quentes advindos do manto é responsável pelo estiramento e adelgaçamento da litosfera e da crosta. O posterior resfriamento do material do manto amalgamando-se com a litosfera aumenta sua densidade e causa a subsidência térmica, provocando afundamentos, falhas e depressões na crosta, dando origem à formação de lagos e mares rasos. Essas depressões foram supridas com sedimentos e matéria orgânica advindos das vizinhanças mais elevadas, que, num estágio posterior, foram responsáveis pela geração do petróleo hoje encontrado. Há cerca de 120 milhões de anos, na idade geológica denominada aptiana, ocorreu nas margens do lago formado no leste do Brasil, em águas calmas, a deposição de uma extensa plataforma de carbonatos, de origem microbial, a qual se estende de Santa Catarina ao Espírito Santo. Evidências da formação desses carbonatos podem ser vistas atualmente na Lagoa Salgada, situada no Norte do Estado do Rio de Janeiro. Estes carbonatos constituem os reservatórios da denominada camada pré-sal.

À medida que a crosta oceânica foi sendo construída, esta foi esfriando, tornando-se mais densa e afundando, dando origem ao período denominado subsidência térmica. Neste período, elevações e recuos do nível do oceano, adjacente aos lagos, permitiu a formação de ciclos de alimentação e evaporação de água salgada, formando as rochas salinas ou evaporitos logo acima dos carbonatos microbiais. Daí a denominação camada pré-sal para os tais carbonatos, uma vez que estes foram formados anteriormente aos evaporitos. As rochas evaporíticas são excelentes selos, impedindo que o petróleo acumulado no carbonato abaixo deles ascenda à superfície, formando as grandes acumulações ora encontradas.

Os carbonatos são rochas quebradiças ou rúpteis e que, sujeitas às tensões decorrentes de sua subsidência e dos movimentos da placa tectônica, formam fraturas e/ou fissuras. Como será visto, esta característica possui grandes implicações na maneira como o petróleo residente nessas rochas deve ser extraído.

Acima da camada salina, a qual, na Bacia de Santos, possui cerca de 2 km de espessura, houve a deposição de rochas mais recentes, arenitos e folhelhos, que são constituídas respectivamente por areia e argila e formam o que se denomina camada pós-sal. Atualmente, na Bacia de Santos, a base do sal (topo do reservatório) encontra-se entre 5 e 6 mil metros de profundidade, em águas profundas, com lâminas d'água de 2 a 3 mil metros. Um fato interessante é que, em águas profundas, a temperatura no fundo do oceano é de

4 graus centígrados. Como a camada de sal é excelente condutora térmica, dificultando a acumulação de calor abaixo dela, então a temperatura no reservatório é baixa para a sua profundidade, de cerca de 60 graus centígrados. Isto faz com que o petróleo esteja, em sua maioria, na forma líquida na Bacia de Santos.

A elevação do magma durante a abertura dos continentes produziu uma série de efeitos tectônicos, com a ascensão de fluidos hidrotermais, tais como o dióxido de carbono, o qual é extremamente corrosivo e dissolve os carbonatos. Como o sal é impermeável também ao CO2, este se acumulou em alguns dos reservatórios do pré-sal, dissolvendo parcialmente a rocha e melhorando as condições permoporosas dos carbonatos. Assim, carbonatos onde tenha havido a circulação pregressa de fluidos hidrotermais, através do sistema de fraturas, possuem grande produtividade. Interessante notar que, nas condições atuais de baixa temperatura e a alta pressão encontrada no pré-sal, o CO2 encontra-se em fase líquida, denominada supercrítica. Nesta condição, ele se mistura completamente com o óleo no reservatório.

Inicialmente, as rochas em subssuperfície encontram-se com seus interstícios saturados com água. Este é o caso, inclusive, das rochas geradoras, formadas por argilas e por matéria orgânica intersticial. à medida que estas rochas foram soterradas e submetidas ao contínuo acúmulo de sedimentos aportados ao lago, a pressão e a temperatura a que estiveram submetidas eram sempre crescentes, compactando-as, expulsando a água intersticial e reduzindo sua porosidade. A partir de certa pressão e temperatura, a matéria orgânica se decompõe, gerando óleo ou gás, num processo denominado catagênese. Estes fluidos, então, escaparam da rocha geradora e, por diferença de densidades em relação à água residente, se elevaram através do sistema poroso, tentando alcançar a superfície. Porém, a barreira impermeável de sal impediu sua ascensão e favoreceu a acumulação nos reservatórios da camada pré-sal. Tal acumulação se dá pela expulsão da água originalmente existente no reservatório, formando uma capa de hidrocarbonetos sobrejacente ao aquífero preexistente. Dependendo do tipo de fluido e das condições de pressão e temperatura, a região de hidrocarbonetos sofre uma posterior segregação gravitacional, com a formação de uma capa de gás no topo, uma zona de óleo intermediária e um aquífero subjacente.

Na Bacia de Campos, como a cobertura da camada de sal é pouco espessa, o petróleo ascendente escapou através de janelas ou aberturas no sal e se acumulou em rochas superiores, de idade geológica mais recente, dando origem a diversos campos petrolíferos, incluindo alguns gigantes.

Ao atingir a superfície, devido ao processo de extração, o petróleo se separa em duas fases: uma, líquida, contendo preferencialmente uma mistura de hidrocarbonetos pesados e com maiores cadeias carbônicas, e outra, gasosa, contendo uma mistura de hidrocarbonetos mais leves e voláteis. Na superfície, em condições de pressão atmosférica e temperatura ambiente, o petróleo do pré-sal divide-se em pouco mais de 200 volumes de gás para cada volume de líquido, valor este que, no jargão da indústria, denomina-se razão gás-óleo. Em termos energéticos, um volume de líquido contém a mesma energia

calorífica da encontrada em 1.000 volumes de gás hidrocarboneto. Assim, podemos concluir que o cerca de 20% da energia dos reservatórios do pré-sal é encontrada na forma de gás natural, indicando a importância econômica que esta matéria prima terá no futuro.

Durante o processo de migração e acumulação do petróleo, este se misturou completamente com o CO2 existente em subssuperfície. Em alguns reservatórios da camada pré-sal, o teor de CO2 no fluido do reservatório pode ser bastante elevado. Quando extraído juntamente com o petróleo, ao atingir a superfície, o CO2 gaseifica-se totalmente e se mistura com os hidrocarbonetos mais voláteis, constituindo o gás natural, o qual deve ser tratado para retirada do CO2. Isto é absolutamente necessário, visto que o transporte do gás por meio de gasodutos deve ser virtualmente isento de CO2, devido à sua alta corrosividade, exigindo a utilização de custosos materiais na construção das tubulações submarinas. Como o CO2 não deve ser ventilado na atmosfera, uma opção para seu uso é a reinjeção no reservatório. Em geral, tal injeção é feita conjuntamente com a água, num processo denominado WAG ("water alternating gas"), e que objetiva aumentar a recuperação do petróleo devido à miscibilidade existente entre o CO2 e o óleo no reservatório. Entretanto, este é um grande desafio, pois, com o tempo, o CO2 voltará aos poços produtores em concentrações mais elevadas, reduzindo a capacidade de processamento das plataformas e, consequentemente, a produção de óleo.

Os carbonatos microbiais (microbiolitos) do pré-sal são rochas formadas primordialmente por carbonato de cálcio e são de origem orgânica, com boa porosidade nas regiões das colônias de bactérias e com material retrabalhado e bastante compactado, formado originalmente por uma espécie de lama carbonática, nas regiões entre as colônias. Isto dá uma ideia de quão heterogênea é a qualidade do material original (matriz) dos reservatórios. Como já foi dito, devido à sua elevada rigidez, os carbonatos são facilmente quebrados e a ocorrência de fraturas e fissuras permite a circulação de água meteórica ou de fluidos hidrotermais, criando uma porosidade secundária e aumentando a capacidade de transporte de fluidos (permeabilidade) dessas rochas. Em geral, cerca de 1 a 2% do óleo do reservatório reside nesta rede de fraturas e dissoluções. Isto faz com que a produção inicial dos poços perfurados nesses reservatórios seja extremamente elevada. Porém, a quantidade de óleo existente nas fraturas descomprime-se rapidamente, fazendo com que gradativamente a matriz passe a alimentar a rede de fraturas, responsável pelo transporte de petróleo para os poços. Daí que a permeabilidade da matriz controla a produtividade tardia, a qual é consideravelmente menor do que a original.

À medida que os carbonatos fraturados são depletados, ou seja, têm sua pressão ou energia reduzidas devido à produção, há uma tendência natural da água do aquífero a ascender através da rede de fraturas e atingir os poços produtores. Quando isto acontece, a produção de óleo e gás é reduzida, podendo-se chegar a uma situação que a produção se torna tecnicamente inviável ou antieconômica. No Brasil, os poços em carbonatos começam a produzir água quando o volume de óleo produzido atinge cerca de 1 a 2% do volume original "in place". Isto tem resultado em reduzidos fatores finais de recuperação do petróleo em carbonatos, ou seja, abaixo de 10%.

O desafio para se aumentar o fator de recuperação é fazer com que a água, seja ela proveniente do aquífero ou de injeção, penetre na matriz, expulsando o óleo ali residente, e deixe de circular na rede de fraturas. Isto é particularmente difícil, uma vez que os carbonatos são molhados preferencialmente pelo óleo, ou seja, o óleo adere às paredes dos poros e cria uma barreira capilar para a entrada da água na rocha matriz. Isto exige que a água no sistema de fraturas esteja a uma pressão maior do que o óleo residente na matriz, o que não é trivial, uma vez que, com a pressão elevada, a água circula pelas fraturas em direção aos poços produtores.

Em carbonatos com grande espessura, como é o caso do nosso pré-sal, é possível tirar proveito da força gravitacional para aumentar o fator de recuperação por deslocamento por água. Esta tecnologia foi desenvolvida pela empresa Saudi-Aramco e tem sido empregada nos campos da Arábia Saudita, particularmente no campo de Ghawar, que, com 65 anos de existência, produz diariamente e de maneira controlada a impressionante quantia de 5 milhões de barris de óleo. O método consiste na perfuração de poços especiais, denominados de máximo contato com o reservatório (MRC, "maximum reservoir contact"). Tais poços são construídos perfurando-se um poço central horizontal, e, a partir deste, várias ramificações laterais também horizontais, na forma de uma espinha de peixe. Os poços produtores são perfurados no topo do reservatório, pouco abaixo da base do sal. Os injetores de água, quando necessários para manutenção da pressão do reservatório, são perfurados na parte inferior do reservatório, logo acima do contato óleo-água. Os árabes apregoam que, com este método, conseguem chegar a 70% de recuperação do petróleo original "in place".

A agregação de novas tecnologias é de extrema importância para a maximização da extração do petróleo do pré-sal. Só para se ter uma ideia, no poço descobridor, em 2006, foi utilizada pela primeira vez uma ferramenta de investigação de reservatório baseada no princípio da ressonância magnética, a qual permitiu identificar a presença de óleo móvel no interior do carbonato de baixa permeabilidade. Até então, haviam sido perfurados no carbonato do pré-sal vários poços com características semelhantes ao descobridor e que haviam sido abandonados devido à baixa porosidade e à falta de indícios de hidrocarbonetos. De posse da informação sobre o óleo móvel, voltou-se a um poço no litoral do Espírito Santo, o qual foi então testado e colocado em produção, tendo produzido um volume acumulado de cerca de 10 milhões de barris de óleo até sua desativação em 2011.

Dentre as tecnologias que se fazem necessárias para a produção de petróleo em jazidas carbonáticas, estão a de instrumentos de caracterização de reservatório, necessária para se mapear a qualidade do reservatório e a rede de fraturas naturais e dissoluções, visando a melhor locação para cada novo poço. Dado que os poços são muito caros, é fundamental que eles tenham a maior produtividade possível, e a identificação de onde perfurá-los é crucial para seu sucesso.

O avanço na tecnologia de materiais também permitirá o desenvolvimento de equipamentos e tubulações mais resistentes à corrosão por um preço mais acessível, uma vez que a construção dos poços requer cerca da metade do capital empregado para o desenvolvimento de um campo de petróleo marítimo.

Outro grande desafio é o da logística de movimentação de pessoal e cargas, uma vez que os principais campos petrolíferos do pré-sal estão localizados a distâncias de cerca de 300 km do litoral, fazendo com que os custos envolvidos neste item sejam bastante elevados. Investimentos em portos e terminais aeroviários para transporte de carga e passageiros serão de grande importância e necessidade para a exploração do pré-sal.

Finalmente, dada a grande extensão das jazidas, a velocidade de extração deve ser calibrada em função de objetivos estratégicos do país, uma vez que os volumes previstos para serem produzidos serão representativos quando comparados com a produção mundial, podendo inclusive afetar o preço global do petróleo futuro, considerando-se ainda o rápido desenvolvimento econômico de fontes alternativas de energia.

Referências

FERRO, Fernando e TEIXEIRA, Paulo (Relatores): Os Desafios do Pré-Sal, Câmara dos Deputados, Conselho de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica, Brasília, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Exame e Avaliação de Dez Descobertas e Prospectos Selecionadas no Play do Pré-sal em Águas Profundas na Bacia de Santos, Brasil, Gaffney, Cline & Associates, Rio de Jeneiro, 2010.

PETROBRAS MAGAZINE. "Um desafio atrás do outro", Edição 56, Rio de Janeiro, 2009.

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.

Hidroeletricidade: migração para uma matriz elétrica predominantemente renovável

José Biruel Junior
Mestre em Planejamento Energético. Mestre em Geração Térmica.
Pesquisador do Centro de Pesquisas da Petrobras, CENPES.

Resumo:
O potencial técnico mundial para instalação de novas centrais hidrelétricas é de aproximadamente 3000 GW, quadruplicando a capacidade instalada atual de 1007 GW. No Brasil, a hidroeletricidade é responsável por 80% da energia elétrica ofertada. A expansão mundial dessa geração se dará prioritariamente em países em desenvolvimento, enquanto, no Brasil, será por meio do aproveitamento do potencial hidráulico da região Norte. A escassez dos grandes desníveis naturais e cânions, utilizados no passado para construção das centrais hidroelétricas, levou ao desenvolvimento das centrais de baixa queda, que utilizam turbinas tipo Kaplan. Embora apresente uma cadeia tecnológica madura, a indústria busca melhorias incrementais no rendimento dos equipamentos por meio da aplicação de técnicas de dinâmica dos fluidos computacional. A dimensão ambiental também constitui um grande desafio para a perenidade desta indústria.
Palavras-chave: Hidrelétricas. Energia Renovável. Pequenas Centrais Hidrelétricas. Meio Ambiente.

Hydropower: migration to a predominantly renewable electricity matrix.

Abstract:
The world technical installed hydrocapacity for new units is approximately 3000 GW, which would quadruplicated the 1007 GW of today's installed hydro capacity. In Brazil, 80% of electric energy supply comes from hydroelectric power plants. The development countries will be responsible to explore the new frontier of this technology, expanding the hydropower generation, which for Brazil will take place mostly in the north region. The scarcity of high natural slopes or canyons has led to the development of low head hydropower plants, equipped with Kaplan turbines. Although the hydroelectric technological chain is well establish, the industry pursuit high performance in equipment through the application of computational fluid dynamic techniques. Furthermore, the environmental issues consist in an important challenge for this industry.
Keywords: Hydroelectric. Renewable Energy. Small Hydropower, Environment.

Introdução

A revolução na qualidade de vida da humanidade ocorrida durante o século XX está intimamente relacionada ao aumento no acesso e uso de energia, principalmente aos hidrocarbonetos e eletricidade. Constantes inovações nos processos de extração, transporte e transformação da energia garantiram a oferta desses energéticos nos níveis, sempre crescentes, demandados pela sociedade. Por outro lado, o consumo de energia passou por uma revolução neste período, com o aumento da capacidade, flexibilidade e eficiência das tecnologias de conversão final.

Considerando a intensidade energética como a razão entre consumo total de energia de um país por seu produto interno bruto, pode-se afirmar que, nos estágios iniciais de industrialização de uma nação, há um aumento nesta grandeza, que, após atingir um valor máximo, declina à medida que ocorrem aumentos de eficiência energética, inovações e alterações estruturais da economia (Schaeffer *et al*, 2012).

Historicamente a composição do portfólio da oferta de energia acompanhou as mudanças tecnológicas. No século XIX, com o advento da máquina a vapor, um aumento sem precedentes na produção de bens de consumo foi responsável pela substituição da lenha pelo carvão mineral. Coincidentemente, no século XX, o desenvolvimento dos motores de combustão interna foi contemporâneo ao advento da indústria do petróleo, resultando na substituição do carvão pelo óleo bruto como principal item da matriz energética. Na era da informação que vivemos hoje, seria conveniente imaginar que as mudanças nos hábitos de consumo, a necessidade latente de intensificação do uso de transporte de massa, a mobilidade virtual, o aumento da eficiência energética de tecnologias de uso final e pressões ambientais conduziriam a uma matriz energética majoritariamente renovável. Contudo, o cenário atual impõem fortes barreiras à migração para uma matriz mais limpa, como, por exemplo, o menor custo, a alta confiabilidade e a economia de escala da cadeia do petróleo, cuja indústria é dominada por empresas de grande envergadura, que operam de forma integrada e internacionalmente.

Atualmente, os combustíveis fósseis são responsáveis por 71% da oferta mundial de energia, representando 68% da fonte primária para geração de energia elétrica. A matriz elétrica ainda é dominada pela geração a carvão, que representa 40% do total, enquanto a geração por fontes renováveis representa 19% desta matriz (IEA, 2010). A geração hidrelétrica é responsável por 16% da oferta mundial de energia elétrica, com capacidade instalada de 1007 GW (IPCC, 2011).

As centrais hidrelétricas podem atender a um amplo intervalo de potência, variando de microcentrais até grande-centrais, destacando-se Itaipu, no Brasil, com 14 GW e Três Gargantas, na China, com 22 GW, as quais produzem juntas, anualmente, cerca de 100 TWh. O potencial técnico para instalação de novas centrais permitiria quadruplicar o portfólio atual, contudo questões ambientais e econômicas limitam tal expansão. Os investimentos previstos até o ano de 2030 contribuirão para o aumento de aproximadamente 50% da capacidade instalada. A intensa exploração dos recursos hídricos durante o último século, aliada a fortes pressões ambientais e escassez de área, tornou o custo marginal de

expansão inviável em países desenvolvidos, cabendo aos países em desenvolvimento a implementação de novos empreendimentos. Para a próxima década, a previsão de aumento da potência instalada mundial é de 180 GW, dos quais 60 GW serão implementados pela China.

No Brasil, a geração hidrelétrica representa hoje 75% da energia elétrica produzida, e quando somada à importação desta, resulta em 80% da energia elétrica ofertada. A expansão hidrelétrica nacional conta com empreendimentos em fase de construção, como, por exemplo, os aproveitamentos hidrelétricos de Belo Monte (Rio Xingu), Santo Antônio e Jirau (Rio Madeira), que, juntos, são responsáveis por cerca de 10% da capacidade instalada do Sistema Integrado Nacional (SIN), no final do horizonte decenal. Ao se incluir nesse conjunto os empreendimentos dos Rios Teles Pires, Tapajós e Jamanxim, a participação de todas essas usinas representará 14% do total, no final do horizonte de planejamento. Ainda existem projetos já concedidos a serem viabilizados, de 2018 a 2020, apresentando capacidade instalada de 786 MW, e novos projetos a serem viabilizados de 2016 a 2020, apresentando capacidade instalada de 18 GW. Esta expansão se dará, em grande parte, pela utilização de potenciais hidráulicos situados na região Norte do país, distante dos grandes centros de consumo, acarretando em aumento no custo de transmissão (MME/EPE, 2010).

Dada a importância da geração hidrelétrica na matriz renovável mundial e, principalmente, a sua predominância na matriz elétrica brasileira, esse artigo busca explorar os desafios para sua expansão nas dimensões ambiental, tecnológica e regulatória, dando ênfase às Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

Condicionamento e Disponibilização de Recursos Hídricos

A sazonalidade da disponibilidade de recursos hídricos, acentuada em países de clima temperado, conduz a uma utilização não regular do parque gerador hidrelétrico, resultando em um fator de capacidade mundial médio da ordem de 44%. No Brasil, entretanto, o estabelecimento de imensos reservatórios através da construção de barragens, aliado ao favorável regime fluvial, permitiu que o fator de capacidade médio fosse superior à média mundial.

As características geográficas dos rios e suas condições de entorno são fatores determinantes na forma de implantação de centrais hidrelétricas, as oportunidades de desenvolvimento de potencias hidráulicos são diretamente afetadas por questões ambientais e sociais. Alterações em regimes de fluxo de rios e qualidade da água, barreiras para migração de peixes, redução da biodiversidade e deslocamento populacional são alguns dos principais impactos relacionados à implantação dos empreendimentos. A avaliação do ciclo de vida das centrais hidrelétricas indica pequena quantidade de emissão de carbono durante a fase de construção civil dos empreendimentos e fabricação de equipamentos, contudo não existe consenso sobre a questão das emissões oriundas do alagamento de áreas necessário à construção dos reservatórios.

Embora este tipo de empreendimento seja bastante impactante na fauna e flora locais, a construção de reservatórios propicia outros benefícios, além da geração elétrica, como, por exemplo, regularização no fornecimento de água, desenvolvimento do turismo e a implantação de piscicultura, além de constituir a maior fonte de acumulação de energia do setor elétrico. As centrais hidrelétricas, estabelecidas pela construção de barragens regularizadoras de regime de vazões, acumulam em suas bacias hidrográficas os volumes de água que vão suprir as deficiências das vazões de estiagem dos rios. As centrais de bombeamento utilizam energia da rede para encher seu reservatório em horário fora de pico, e contribuem para oferta de energia nos horários de pico. Existem ainda as centrais de fio d'água, as quais são estabelecidas através da construção de barragens regularizadoras de nível, destinadas apenas a elevar os níveis d'água de estiagem e afogar convenientemente as estruturas de captação das vazões de consumo. A evolução das técnicas de construção civil contribui notavelmente para redução do custo do investimento, como, por exemplo, a aplicação de novas técnicas de construção de túneis, utilizadas para construção de caminhos hidráulicos e casa de máquinas, tendo apresentado redução de custo de 25% nos últimos 30 anos.

Os impactos das mudanças climáticas no potencial global de geração hidrelétrica são pequenos, contudo podem ocasionar grandes alterações regionais, afetando a geração local. As mudanças climáticas podem afetar o atual potencial de recursos para geração hidrelétrica através de mudanças em regimes de rios causadas por aumento da temperatura global. Projeções de longo prazo da variação do fluxo dos rios, baseadas nos modelos climáticos, indicam aumento do fluxo em regiões de alta latitude e nos trópicos úmidos, e redução da vazão em médias latitudes e algumas partes dos trópicos secos. Outro risco associado a essa questão é o aumento da probabilidade de ocorrência de eventos extremos, como secas e inundações, os quais se refletem em aumento do risco e custo dos projetos. Tais eventos também contribuem para o aumento na quantidade de sedimentos dos rios, o que exige a utilização de materiais mais nobres, resistentes à erosão, na construção de equipamentos mecânicos, e o desenvolvimento de equipamentos para limpeza do acúmulo de sedimentos em reservatório, evitando seu assoreamento. Alterações climáticas também podem afetar a demanda pelo uso da água para fins não energéticos, como, por exemplo, irrigação e suprimento de água, o que contribui indiretamente para a redução do potencial hídrico para geração elétrica.

Conversão Energética do Potencial Hídrico

Embora a cadeia tecnológica para geração hidrelétrica encontre-se em um estágio de desenvolvimento maduro, questões ambientais, geográficas e econômicas demandam a continuidade das pesquisas nesta indústria. Buscando a redução do impacto ambiental, esforços são despendidos no estudo do gerenciamento integrado de bacias hidrográficas e no desenvolvimento de aproveitamentos de baixa queda.

A construção de reservatórios hídricos de alta queda implicaria em uma imensa área inundada, dada a escassez dos grandes desníveis naturais e cânions utilizados no passado para construção de centrais hidrelétricas. Tal fato induziu o desenvolvimento de centrais de baixa queda, as quais utilizam turbinas axiais tipo Hélice ou Kaplan, ao invés de turbinas diagonais tipo Francis. As turbinas Kaplan, por apresentarem passo de pá variável, são as mais adequadas para grandes aproveitamentos, sendo utilizadas, por exemplo, nas centrais hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau. Ainda que desenvolvidas em meados do século passado, essas turbinas passam por um processo de aumento de eficiência através do emprego de técnicas de dinâmica dos fluidos computacional. Além das melhorias aerodinâmicas, o elevado nível de sedimentos dos recentes aproveitamentos induziu ao desenvolvimento de equipamentos mecânicos resistentes à erosão.

Um aumento considerável na energia ofertada pode ser obtido através da renovação, modernização e melhoria de centrais hidrelétricas existentes. Esta técnica, conhecida no mercado como repotenciação, constitui-se como uma importante fonte de aumento da eficiência e capacidade instalada de geração de energia em empreendimentos construídos na primeira metade do século XX.

Tecnologias Portadoras de Mudanças

Nos antigos projetos de Turbinas Hidráulicas (máquinas de fluxo com cerca de duzentos anos de história), a experiência do próprio engenheiro/projetista, juntamente com numerosos e dispendiosos testes com modelos tipo tentativa-e-erro, constituíam as principais ferramentas de projeto disponíveis. Uma parte das informações empíricas acumuladas com o tempo foi condensada em diversos diagramas e guias de projeto que fornecem linhas gerais para o dimensionamento básico das turbinas (Cordier, 1955; Quantz, 1976; Schweiger e Gregori, 1988 e 1989). Outra parte desse conhecimento de projeto ficou retida pelos próprios projetistas, sendo transmitida de "mão-em-mão", como uma herança aos próximos times de engenheiros das empresas.

O desenvolvimento de computadores digitais na segunda metade do século XX e sua aplicação à análise do escoamento em turbomáquinas, impulsionada primordialmente pelos avanços no campo das turbinas a gás aeronáuticas (Denton, 1993), tornou possível o uso de métodos complexos de simulação numérica de escoamentos para análise e projeto também de turbinas hidráulicas. "O projeto hidrodinâmico e a construção de turbinas hidráulicas têm sido mais uma arte do que uma ciência. Os elementos científicos tornaram-se mais numerosos com os recentes avanços na tecnologia de análise de escoamento" (Ueda, 1982). Atualmente, programas dos tipos Euler 3D e Navier-Stokes 3D são ferramentas padrão no desenvolvimento de novas unidades de turbinas hidráulicas, podendo, em certos casos, ser até usados com rotinas de otimização (Lipej, 2004; Penget *al*., 2002a e 2002b, Kueny *et al.*, 2004). Detalhes da separação do escoamento, fontes de perdas e suas distribuições em componentes, análise acoplada de componentes no

ponto de projeto e fora dele, e baixos níveis de pressão com risco de cavitação agora são problemas mais amenos de se analisar com a assim denominada Dinâmica dos Fluidos Computacional – Computational Fluid Dynamics, CFD.

A aplicação dessas técnicas modernas de CFD para a predição do campo de escoamento através de uma turbina inteira tem levado a uma melhor compreensão física dos fenômenos que ocorrem nesses escoamentos, com consequências diretas sobre o projeto hidrodinâmico dos componentes da turbina. Além disso, o progresso nas técnicas experimentais de medição e testes com modelos é outro fator importante que tem contribuído para essa compreensão mais detalhada dos fenômenos fluidodinâmicos em turbinas hidráulicas. No tocante à parte experimental, inclusive, os avanços na análise numérica computacional e a tecnologia de predição das características de funcionamento não eliminam os ensaios com modelos como meio para se melhorar o rendimento, especialmente fora do ponto de projeto. Tais ensaios, no entanto, agora podem ser muito mais objetivos, sendo realizados em menor número e já na fase final de projeto/prototipagem, reduzindo-se significativamente, assim, o tempo de desenvolvimento e os custos com experimentos (Ueda, 1982; Casey, 2003). De fato, uma análise de precisão razoável, mais simples e rápida, ainda é essencial para as fases iniciais de projeto, quando a geometria não está complemente determinada (Oh e Kim, 2001; Yoon, *et al*., 1998). Em turbinas a gás, por exemplo, são bastante comuns as publicações sobre métodos computacionais de baixo custo para análise e projeto preliminares. Nesse âmbito, é típica a aplicação de Métodos de Curvatura de Linha de Corrente com uma modelagem simplificada para as perdas e desvios do escoamento (Yoonet al., 1998; Lee e Chung, 1991; Park e Chung, 1992; Sullerey e Kumar, 1984) ou mesmo análises apenas na linha média – 1D – (Kacker e Okapuu, 1982; Souza Júnior *et al.*, 2005), talvez ainda indispensáveis para a otimização inicial de um novo projeto e para a predição dos rendimentos atingíveis.

Merece destaque o fato de que as configurações dos tipos bulbo e tubular vêm sendo usadas cada vez mais em diversos países, entre os quais o Brasil, em lugar das turbinas Kaplan convencionais de eixo vertical. Há, de fato, uma nítida tendência mundial em direção aos aproveitamentos de baixas e baixíssimas quedas (inferiores a 15 m), até então inexplorados por questões econômicas, mas que, agora, em virtude do esgotamento dos aproveitamentos tradicionais, com quedas moderadas e altas, e por restrições ambientais cada vez mais fortes, despontam como excelente alternativa para a expansão da matriz hidroelétrica mundial. Outro ponto são os cada vez mais numerosos projetos de repotenciação, atestados pelos principais fabricantes mundiais de turbinas hidráulicas (Dansie, 1996; Hindley, 1996). A repotenciação de usinas hidrelétricas reduz a necessidade de construção de novas plantas, evitando-se o impacto ambiental que estas ocasionariam. Além disso, permite um uso mais efetivo do potencial explorado.

Por fim, não se espera o aparecimento de uma tecnologia disruptiva no setor de hidroeletricidade. As pesquisas buscam melhorias incrementais de eficiência, ou redução de impactos ambientais, como, por exemplo, as turbinas hidrocinéticas e turbinas amigáveis aos peixes. No primeiro caso, o da turbina hidrocinética, a conversão de energia é realizada

sem a necessidade de barragens, utilizando-se a energia natural do fluxo dos rios, enquanto as turbinas amigáveis aos peixes são projetadas considerando a preservação da ictiofauna. Ambas iniciativas somente são aplicáveis em pequena escala, não sendo capazes de promover mudanças na estrutura da oferta de energia.

Pequenas Centrais Hidrelétricas

No Brasil, as pequenas centrais hidrelétricas – PCHs foram definidas pela Lei 9.648/98, como aproveitamentos hidrelétricos cuja potência seja superior a 1 MW e inferior a 30 MW, e a área alagada do reservatório não ultrapasse 2 km^2. Com a Resolução n° 652, de 09 de dezembro de 2003, a área inundada passou a ter autorização de chegar até 13 km^2, desde que a inequação Ad" (14,3xP)/Hb seja atendida, onde P é a potência do empreendimento, dada em MW, Hb é a queda bruta disponível do empreendimento, dada em metros e A é a área inundada, dada em km^2; ou quando o reservatório tenha sido dimensionado com base em outros usos que não o de geração de energia elétrica.

As PCHs tiveram um papel fundamental nos primórdios da eletrificação do país, sendo utilizadas para geração elétrica de sistemas isolados desde o final do século XIX. No entanto, a criação de grandes empresas geradoras no país, na década de 1960, deixou as PCHs num processo de ostracismo, uma vez que concentrou a geração em grandes blocos de energia e interligou os diversos sistemas de transmissão (Thiago Filho *et al,* 2011).

Embora algumas tentativas de reativação da indústria das pequenas centrais tenham ocorrido nos anos 1980, apenas no final dos anos 1990 foram criadas as condições para seu desenvolvimento, com a edição da lei 9648/98, que ampliou a potência das PCHs de 10 para 30 MW, e da Lei 9.074/95, que reestruturou o setor elétrico, criando as figuras do Produtor Independente de Energia Elétrica, do Comercializador de Energia Elétrica e do Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAEE, posteriormente substituído pela Câmara Comercializadora de Energia Elétrica – CCEE.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA foi criado pela Lei 10.438/2002 com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional. A primeira etapa do programa previa a construção de 3.300 MW de capacidade, com compra de energia assegurada por 20 anos. A aquisição da energia seria feita pelo valor econômico correspondente à tecnologia específica de cada fonte, mas tendo como pisos 50%, 70% e 90% da tarifa média nacional de fornecimento ao consumidor final para a produção concebida a partir de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e energia eólica, respectivamente. Foi admitida a participação direta de fabricantes de equipamentos na constituição do Produtor Independente Autônomo, desde que o índice de nacionalização dos equipamentos e serviços fosse de no mínimo 60% em valor na primeira etapa e de, no mínimo, 90% em valor, na segunda etapa do programa.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA implantou, até 31 de dezembro de 2011, um total de 119 empreendimentos, constituídos por 41 eólicas, 59 PCHs e 19 térmicas a biomassa. Juntos, os 119 empreendimentos têm capacidade instalada de 2.649,87 MW, compreendendo 963,99 MW em usinas eólicas, 1.152,54 MW em PCHs e 533,34 MW em plantas de biomassa. A energia elétrica gerada anualmente por essas usinas é suficiente para abastecer o equivalente a cerca de 4,5 milhões de brasileiros (Eletrobras, 2013).

Atualmente, as PCHs mostram-se menos competitivas em relação às eólicas e biomassa, devido a não isonomia de incentivos entre as fontes renováveis de energia, e têm tido dificuldades em disputar espaço no mercado regulado, caracterizado pelo mecanismo de compra de energia, que são os Leilões de Energia Elétrica, promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel e Ministério de Minas e Energia. A situação é tal que, nos leilões A-3 e A-5, realizados em agosto e dezembro de 2011, respectivamente, nenhuma energia de PCH foi contratada. (Thiago Filho *et al,* 2011).

Conclusão

A geração hidrelétrica possui participação expressiva na oferta de energia elétrica mundial e majoritária no âmbito brasileiro. O crescimento do parque gerador até 2030 elevará em 50% a capacidade atual instalada, sendo os países em desenvolvimento os principais responsáveis por esta expansão.

As mudanças climáticas representam grande risco para a geração hidrelétrica, visto que podem alterar os regimes dos rios e a qualidade da água dos rios, levando à redução do fator de capacidade das instalações e ao desgaste prematuro de equipamentos.

Melhorias incrementais são esperadas por meio da aplicação de técnicas modernas de construção de barragens e mecânica dos fluidos computacional para otimização de turbinas axiais, aplicadas aos aproveitamentos de baixa queda. Também se busca o desenvolvimento de mecanismos de aproveitamento de energia de corrente dos rios, que não implicam em impacto ambiental, contudo de abrangência reduzida.

Referências Bibliográficas

CASEY, M. (2003), “Best practice advise for CFD in turbomachinery design”, QNETCFD Network Newsletter, Vol. 2, No. 3, December, pp. 35-37.

CORDIER, O. (1955), “ÄhnlichkeitsbetrachtungbeiStrömungsmaschinen”, VDIZeitschrift, Vol. 97, No. 34, pp. 1233-1234.

DANSIE, J. (1996), “Turbines in the 90’s”, International Water Power & Dam Construction, August, pp. 26-28.

DENTON, J. D. (1993), “Loss mechanisms in turbomachines”, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 621-656.

Eletrobras (2011). Informe à imprensa – Resultados do PROINFA.

HINDLEY, M. (1996), “Buoyant year for turbines”, International Water Power &DamConstruction, February, pp. 29.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2011).”Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdon.

International Energy Agency (2010).”World Energy Outlook 2011". Paris, France. <Disponívelem: www.iea.com>

KACKER, S. C. e OKAPUU, U. (1982), “A mean line prediction method for axial flow turbine efficiency”, ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 104, pp. 111-119.

KUENY, J-L, LESTRIEZ, R., HELALI, A., DEMEULENAERE, A. e HIRSCH, C. (2004), “Optimal design of a small hydraulic turbine”, 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, paper A02-2.

LEE, C. e CHUNG, M. K. (1991), “Secondary flow loss and deviation models for through-flow analysis of axial-flow turbomachinery”, Mechanics Research Communications, Vol. 18(6), pp. 403-408.

LIPEJ, A. (2004), “Optimization method for the design of axial hydraulic turbines”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 218, Part A, pp. 43-50.

Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (2010). “Plano Decenal de Expansão de Energia 2019”.

OH, H. W. e KIM, K.-Y. (2001), “Conceptual design optimization of mixed-flow pump impellers using mean streamline analysis”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 215, Part A, pp. 133-138.

PARK, H. D. e CHUNG, M. K. (1992), “Refinement of spanwise distribution models of deviation angle and secondary loss for axial flow turbine”, Mechanics Research Communications, Vol. 19(5), pp. 449-455.

PENG, G., CAO, S., ISHIZUKA, M. e HAYAMA, S. (2002a), “Design optimization of axial flow hydraulic turbine runner: Part I – an improved Q3D inverse method”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 39, pp. 517-531.

PENG, G., CAO, S., ISHIZUKA, M. e HAYAMA, S. (2002b), “Design optimization of axial flow hydraulic turbine runner: Part II – multi-objective constrained optimization method”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 39, pp. 533-548.

QUANTZ, L. (1976), “Motoreshidráulicos”, Editorial Gustavo Gili, S.A. SCHWEIGER, F. e GREGORI, J. (1988), “Developments in the design of bulb turbines”, Water Power & Dam Construction, September, pp. 12-15.

SHAEFFER, R. SZKLO, A. LUCENNA, A. (2012). “Visão Retrospectiva e Atual, Desafios Futuros e Oportunidades”.

SCHWEIGER, F. e GREGORI, J. (1989), “Design of large hydraulic turbines”, IAHR,International Symposium on Large Hydraulic Machinery & Associated Equipments,Beijing, pp. 155-164.

SOUZA JÚNIOR, F., SILVA, R. J., MANZANARES FILHO, N., BARBOSA, J. R. e TOMITA, J. T. (2005), “Design point efficiency optimization of a multi-stage axialflow compressor for aero application applying a specially developed computer code”, COBEM, 18th International Congress of Mechanical Engineering, ABCM, OuroPreto – MG, paper No. 1802.

SULLEREY, R. K. e KUMAR, S. (1984), "A study of axial turbine loss models in a streamline curvature computing scheme", ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 106, pp. 591-597.

THIAGO FILHO, G. L., BARROS, R. M., SILVA, F. G. B. (2011) "Trends in the growth of installed capacity of Small Hydro Power in Brazil, based on Gross Domestic Product". Renewable Energy, n.37, p. 403-4011;

UEDA, T. (1982), "Improvement of hydraulic turbine efficiency", Fuji Electric Review, Vol. 28, No. 2, pp. 34-40.

YOON, E. S., KIM, B. N. e CHUNG, M. K. (1998), "Modeling of three dimensional unsteady flow effects in axial flow turbine rotors", Mechanics Research Communications, Vol. 25, No. 1, pp. 15-24.

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.

Energia eólica no Brasil. Hora de mudar a política?

Geraldo Martins Tavares
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica
da Escola Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense

Resumo

A introdução e/ou utilização de qualquer tipo de energia por um país depende, além de sua disponibilidade, do marco regulatório do país para energia. No caso das energias renováveis, existem três tipos principais de política: *Feed-in*, onde o governo fixa a tarifa e o empreendedor oferece a quantidade que entender; Política de Quota, na qual o governo determina que uma certa parcela da capacidade de geração ou da energia injetada na rede seja de origem renovável; e Leilão, onde o governo estabelece uma certa capacidade ou um percentual do total de energia do sistema que deve ser suprida com renováveis e o preço máximo que pagará pela energia. A política adotada atualmente no Brasil é a de Leilão, tendo um sucesso médio, se compararmos seus resultados com aqueles obtidos por outros países, como a Índia. Os custos atuais da geração termelétrica, os preços da energia eolioelétrica e a expansão do parque gerador brasileiro através de usinas hidrelétricas a fio d'água localizadas na Amazônia sugerem a elaboração de estudo sobre as vantagens e a factibilidade da transformação desse parque gerador hidrotérmico em hidroeólico. O principal motor dessa transformação será a mudança da atual política de Leilão para *Feed-in*.

Palavras-chave:
Energias renováveis. Energia eolioelétrica. Marco regulatório energético.

Wind energy in Brazil. Is it time for a plolitical chance?

Abstract

The introduction and/or use of any type of energy by a country depends of, besides it availability, the regulatory framework for the country's energy. In the case of renewable energy, there are three main types of policy: feed -in, where the government sets the rate and the entrepreneur offers the amount that he want; quota policy, where the government determines that a certain portion of the generating capacity or energy injected into the network be from renewable sources and, auction, where the government sets that a certain capacity or a percentage of the total energy of the system must be supplied with renewable and the maximum price it will pay for the energy. The policy adopted in Brazil currently, with an average success, is the Auction type. The current cost of thermal generation, the wind energy prices and the expansion of the Brazilian generation through hydroelectric power plants located in the Amazon Region suggest that the preparation of a study on the desirability and feasibility of the transformation of the Brazilian hydro thermal generating into a hydro wind generation system. The main transformation's driver will be the policy's change from Auction to a feed-in policy.

Keywords: Renewable energy. Wind energy. Renewable energy supporting policies.

Introdução

Atualmente existe no Brasil um sentimento de que a política de leilões resultou em um sucesso para a implantação em larga escala da energia eolioelétrica e fez com que os seus preços baixassem a níveis menores do que na maioria dos países. No programa de TV Globonews Painel, de 26 de outubro de 2013, o presidente da Empresa de Pesquisas Energética, Dr. Maurício Tolmasquim, declarou que a energia eolioelétrica no Brasil é um grande sucesso (Globonews, 2013).

O objetivo deste artigo é analisar o grau de sucesso da implantação da energia eolioelétrica, comparativamente aos obtidos em outros países, e se a atual política brasileira para a energia eolioelétrica de grande porte é a mais adequada para a inserção da energia eolioelétrica na atual matriz energética brasileira.

Importância da política energética

É a política, dentre outras ações, através do estabelecimento do marco regulatório para energia, da isenção ou criação de impostos e taxas e de outros incentivos, que decide quais tipos de energia, dentre aqueles disponíveis para o país, vão ser utilizados para suprir suas necessidades energéticas.

No caso do Brasil, impostos e taxas representam cerca de cinquenta por cento do custo da energia para o consumidor final. Assim sendo, a maioria das tecnologias para geração de energia elétrica atualmente disponíveis pode se tornar competitiva economicamente, dependendo da regulamentação, do corte de impostos e taxas e dos incentivos que a legislação determinar para cada uma delas.

Existem diferentes modelos de política de incentivo à introdução da energia eolioelétrica de grande porte interligada à rede elétrica na matriz energética de um país. Os três principais modelos de política para suporte à energia eolioelétrica gerada por aerogeradores de grande porte são (Bayer, P.; Urpelainen, J., 2013):

> **Tarifa fixa (*Feed-in*):** o governo estabelece o preço que pagará pelo MWh eolioelétrico injetado na rede elétrica, baseado em fatores, tais como, custos de implantação, operação e manutenção de parques eólicos, nas velocidades médias do vento nas regiões onde deseja implantar parques eólicos e na quantidade de MW que ele deseja inserir na sua matriz energética. Os interessados fornecem a quantidade que julgarem conveniente. Assim sendo, a decisão sobre o preço a ser pago pela energia é política e a decisão sobre a quantidade de energia a ser fornecida é uma decisão de mercado;
>
> **Quota:** o governo determina que, no mínimo, uma certa parcela da capacidade de geração ou da energia injetada na rede seja de origem renovável. O responsável

pelo cumprimento dessa determinação podem ser os geradores, os distribuidores ou os consumidores; e

Leilão (*Tendering*): esse modelo é administrado pelo governo, que estabelece uma certa capacidade ou um percentual do total de energia do sistema que deve ser suprida com renováveis e o preço máximo que pagará pela energia. Os provedores de energia renovável concorrem através de leilão para obter "Power Purchase Agreement – PPA". Vencem as ofertas com preços mais baixos para o MWh. Assim sendo, a decisão sobre a quantidade de energia a ser adquirida é política e o preço dessa energia é uma decisão de mercado.

Em todas as políticas o governo estabelece o tempo dos contratos a serem assinados, em geral, de 10 anos a 20 anos.

Existe uma série de estudos que demonstram ser a política de *feed-in* a mais usada no mundo para suportar as energias renováveis, entre elas a eólica (Mendonça, 2009; Mendonça, 2007; Worldwatch Institute, 2013; Farrel *et al*, 2013; Friends of the earth, 2013; Jacobs, 2012; Bayer e Urpelainen, 2013; Ragwitz *et al*., 2011; REN 21, 2013).

Para não ficarmos apenas em estudos, teóricos ou não, podemos fazer uma verificação simples, que é identificar qual é o principal modelo de política adotado pelos cinco países que tiveram mais sucesso na implantação da energia eolioelétrica na sua matriz energética.

Em dezembro de 2012, os cinco países com maior potência instalada de aerogeradores eram a China (75 MW), USA (960 MW), Alemanha (31 MW), Espanha (23 MW) e Índia (18 MW) (05). Todos esses países têm o *feed-in* como principal modelo de política para a energia eolioelétrica.

Sucesso da política eolioelétrica do Brasil

PROINFA

A primeira das duas políticas para a energia eolioelétrica do Brasil foi estabelecida através da lei 10.438 de 26 de abril de 2002 (Brasil, 2002) que, entre outros assuntos, tratou da criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) e a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE).

No PROINFA estava prevista uma primeira etapa do programa em que seriam contratados 3.300 MW, em um esquema de tarifas *feed-in*, distribuídos igualmente entre eólica, biomassa e pequenas centrais hidroelétricas (Irena, 2012), ou seja, seriam contratados parques eólicos com um total de 1.100 MW de potência nominal de aerogeradores. Posteriormente esse valor foi revisto para 1.429 MW. Em uma segunda fase, o programa estabeleceu um objetivo para as renováveis de suprir 10% do consumo anual do Brasil, a ser alcançado em 20 anos, devendo essa fase começar após o término da primeira fase.

A primeira fase do PROINFA resultou na implantação de 964 MW de usinas eólicas, 1.153 MW de PCH's e 533 MW de termelétrica a biomassa (Eletrobrás, 2013). Não se pode dizer que a primeira fase PROINFA foi um fracasso total, pois ele contribuiu significativamente para o início da implantação de parques comerciais e da indústria eolioelétrica no Brasil, mas também não se pode dizer que foi um sucesso total, tendo em vista que a sua execução sofreu sucessivos atrasos, num total de 6 anos, conforme mostramos a seguir:

- A lei nº 10.438 (Brasil, 2002) estabelecia que a contratação desses parques deveria ser feita pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás em até 24 messes após a publicação da lei, devendo a produção dos mesmos se iniciar até 30 de dezembro de 2006, assegurando a compra da energia a ser produzida no prazo de quinze anos.
- Já em 2003, a lei nº 10.762, de 11/11/2003 (Brasil, 2002) dá nova redação a esse item, mudando o prazo de compra da energia produzida para vinte anos e estabelecendo o prazo de 29 de abril de 2004 para celebração dos contratos com a Eletrobrás.
- Em 2004 a Lei nº 10.880 de 2004, modifica novamente esse item, estendendo o prazo de assinatura dos contratos para 30 de junho de 2004.
- Ainda em 2004, a Lei nº 11.075 prorroga o prazo para entrada em operação dos parques eólicos para 30 de dezembro de 2008.
- Em 2009 tal data de entrada em operação foi novamente prorrogada para 30 de dezembro de 2010 pela Lei nº 11.943 de 28 de maio de 2010.
- Em 2011, a Lei nº 12.431 de 24 de junho de 2011, posterga novamente o prazo de entrada em operação para 30 de dezembro de 2011.

A implementação da primeira etapa resultou numa tarifa elevada:

- Todas as prorrogações citadas foram feitas mantendo-se a tarifa estabelecida em 2004, que, na época, era razoável, mas que, com a correção pelo IGP-M, em dezembro de 2010, ela estava na faixa de 268 R$/MWh a 304 R$/MWh (Salino, 2011). Em 2009, o valor médio da energia eolioelétrica vendida no primeiro leilão específico para eólica, realizado em 2009, o preço da energia eolioelétrica negociada foi da ordem de 150 R$/MWh.
- Esses valores altos são um dos argumentos mais citados pelos inimigos da energia eolielétrica.

Modelo de Leilão

A segunda fase do PROINFA, conforme estabelecido na lei nº 10.438 (Brasil, 2002), nunca foi iniciada, pois o governo resolveu aplicar o modelo de leilão para a política de fontes renováveis do Brasil. Em 2009, foi realizado o primeiro leilão exclusivo para eólica.

Esse modelo de leilão vem sendo um sucesso? Consideramos que a maneira de responder a essa questão é comparar a evolução da implantação da energia eolioelétrica de grande porte em um país de características similares ao Brasil. A Índia, pelo seu nível de desenvolvimento econômico e tecnológico e pelo tamanho de seu território, é um bom referencial.

A Índia começou a desenvolver a energia eolioelétrica em sua matriz energética na mesma época que o Brasil, 2001/2002 (GWEC, 2012). Em dezembro de 2012, ela tinha uma potência instalada de aerogeradores da ordem de 18.000 MW (GWEC, 2012), enquanto a do Brasil era de 2.100 MW (ANEEL, 2013). O plano decenal de expansão de energia 2022 da EPE, ora em consulta pública, prevê que o Brasil terá 17.000 MW de capacidade instalada de eólica somente em 2022 (EPE, 2013).

A Índia tornou-se um dos mais importantes polos mundiais de exportação de aerogeradores. O Grupo Suzlon da Índia detém 7,4 % do mercado mundial de aerogeradores. O Brasil praticamente não exporta aerogeradores.

Assim sendo, consideramos que a atual política brasileira para a energia eolioelétrica tem sucesso relativo.

Razões para acelerar a energia eolioelétrica no Brasil

Com os preços atuais da energia eolioelétrica na faixa de 110 R$/MWh, o custo fixo das termelétricas na faixa de 160 R$/MWh e o custo variável da geração termelétrica média da ordem de 273 R$/MWh, faz todo sentido instalar rapidamente usinas eolielétricas para substituir a geração termelétrica destinada a manter os reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN) em um nível adequado. As termelétricas já instaladas servirão como *backup* das eolielétricas.

Com a tendência de implantar grandes hidrelétricas a fio d'água na Amazônia, com baixo fator de capacidade, a necessidade de operar as termelétricas interligadas ao sistema torna-se cada vez maior.

Tendo em vista que a geração máxima das termelétricas no Sistema Nordeste em 2013 foi de 3.384 MWmédio (Ricosti, 2011) e considerando um fator de carga médio para as eólicas no Nordeste de 0,3, seria necessário instalar cerca de 11.300 MW nominais para fazer essa substituição. No caso do sistema Sul, a geração máxima das termelétricas foi de cerca de 1.800 MWmédio e considerando um fator de carga médio para as eólicas de cerca de 0,3, seriam necessários cerca de 6.000 MW nominais.

A grosso modo, uma penetração da energia eolioelétrica no sistema elétrico de até 30% da capacidade do parque gerador convencional que supre o sistema não causará grandes problemas à operação do sistema. O valor total de 17.300 MW nominais é muito menor do que 30% da potência de geração conectada ao SIN, da ordem de 120.000 MW nominais em novembro de 2013 (ANEEL, 2013) e menor ainda do que o potencial eolioelétrico brasileiro, da ordem de 400.000 MW.

O total de 17.300 MW poderia ser instalado em um prazo de 5 anos, tendo em vista que foram inscritos no Leilão de Energia Nova (A-3) projetos eólicos totalizando cerca de 15.000 MW.

A questão básica é como conseguir implantar tal montante de eólica nesse prazo. A resposta para essa pergunta é a mudança da política brasileira para a energia eolioelétrica de leilão para *feed-in*.

A adoção da política de *feed-in* reduziria os riscos dos empreendedores, devido aos seguintes aspectos:

- Uma encomenda de 300 MW em aerogeradores é considerada no setor eolielétrico como de grande porte, o suficiente para que um fabricante instale uma fábrica no Brasil para atendê-la, aumentando, desse modo, a concorrência entre fabricantes;
- O custo do aerogerador pode ser reduzido, visto que empreendedor e fabricante poderão fazer acordo para reduzir os custos, tendo em vista o ganho de escala e a certeza de que o empreendedor poderá instalar quantos MW's desejar e tiver capacidade para tanto. O custo dos aerogeradores representa cerca de 70% do custo total da usina eolielétrica;
- Os encargos burocráticos dos empreendedores e dos órgãos governamentais envolvidos com a implantação de energia eolioelétrica seriam bastante reduzidos.

A estratégia seria instalar inicialmente eólicas para substituir a geração termelétrica convencional no Nordeste e no Sul, tendo em vista que nessas regiões encontram-se os melhores locais para instalação de eólicas no Brasil. A seguir, seria dado início à instalação de eólicas para substituir a geração termelétrica convencional do Sudeste. Tais estratégias podem ser feitas através do valor da tarifa de *feed-in*, incialmente mais baixa, tendo em vista a maior velocidade média anual dos ventos no Nordeste e no Sul, na ordem de 8 m/s a 8,5 m/s médios anuais, e posteriormente mais alta, tendo em vista os ventos médios anuais no Sudeste, da ordem de 7 m/s.

Conclusões

A atual forma de expansão do sistema gerador hidrelétrico brasileiro, baseado, principalmente, na construção de hidrelétricas operando a fio d'água, localizadas na Amazônia, os elevados custos fixo e variável da geração termelétrica, o grande potencial eolielétrico brasileiro e o custo decrescente da energia eolioelétrica sugerem que se leve em conta a possibilidade de atender à expansão do sistema gerador brasileiro, através de usinas hidrelétricas e termelétricas.

A possibilidade de substituir a atual geração termelétrica por geração a partir de usinas eolielétricas também deveria ser analisada.

Caso os estudos indiquem a viabilidade de adoção da geração de energia eolioelétrica, tanto para a expansão do sistema quanto para substituição da atual geração termelétrica, para se induzir um rápido incremento na implantação de energia eolioelétrica, seria necessário mudar a atual legislação – Leilão – para uma política do tipo *feed-in,* a fim de oferecer incentivo à energia eolioelétrica atual.

Referências

[01] BRASIL. Lei 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, no 9.648, de 27 de maio de 1998, no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 5.655, de 20 de maio de 1971, no 5.899, de 5 de julho de 1973, no 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.HTM. Acessado em 02/11/2013

[02] Irena – International Renewable Energy Agency; GWEC – Global Wind Energy Council. 30 years of policies for Wind Energy – lessons from 12 wind energy markets. 2012.

[03] ELETROBRÁS. PROINFA. Disponível em http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm. Acessado em 04/11/2013.

[04] Salino, P. J. Energia eólica no Brasil: uma comparação do PROINFA e dos novos leilões. Tese de Mestrado, UFRJ –Escola de Engenharia, fevereiro de 2011.

[05] GWEC – Global Wind energy council. Global wind report – annual market updated 2012. Disponível em http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf. Acessado em 12/10/2013.

[06] Globonews Painel. Convidados debatem os resultados do leilão do pré-sal. Programa levado ao ar em 26/10/2013. Disponível em http://globotv.globo.com/globo-news/globo-news-painel/t/todos-os-videos/v/convidados-debatem-resultados-do-leilao-do-pre-sal/2916098/. Acessado em 27/10/2013.

[07] Mendonça, M. Accelerating the Deployement of renewable energy. Earthscan, London, UK, 2009.

[08] Mendonça, M. Feed-in Tariffs – Acelerating the Deployment of Renewable Energy.Earthscan, UK and USA, 2007.

[09] Worldwatch Institute, Musolino E. Policy support for renewable energy continues to grow and evolve. August 22, 2013. Disponível em http://vitalsigns.worldwatch.org/sites/default/files/vital_signs_trend_policy_support_for_renewable_energy_final_pdf.pdf. Acessado em 01/11/2013.

[10] Farrel, N. *et al*. Especifying and efficient renewable energy feed-in tariff. Disponível em http://mpra.ub.uni-muenchen.de/49777/1/MPRA_paper_49777.pdf. Acessado em 02/11/2013

[11] Friends of the earth. Powering Africa through feed-in tariffs – advancing renewable energy to meet the continent energy needs. February 2013. Disponível em http://www.boell.org/downloads/2013-03-Powering-Africa_through-Feed-in-Tariffs.pdf. Acessado em 02/11/2013

[12] Jacobs, D. Renewable energy policy convergence in Europe – The evolution of feed-in tariffs in Germany, Spain and France. Ashgate Publishing Company, Emgland, August 1, 2012. 294 pg.

[13] Bayer, P. and Urpelainen, J. It's all about political incentives – Explaing the adoption of feed-tariffs. April 22, 2013. Disponível em http://www.vatt.fi/file/torstaiseminaari%20paperit/2013/FITmanu.pdf. Acessado em 03/11/2013

[14] Ragwitz, M. et al. Review report on support schemes for renewable electyricity and heating in Europe – D8 Report. Januray 2011. Disponível em www.reshaping-res-policy.eu. Acessado em 22/09/2013.

[15] REN 21 – Renewable Energy Network for the 21st Century. Renewables 2013 – Global status report. Disponível em http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf. Acessado em 03/11/2013,

[16] ANEEL. Banco de Informações de Geração. Disponível em http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm. Acessado em 04/11/2013.

[17] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano decenal de expansão de Energia 2022. Disponível na página da EPE.

[18] Juliana Ferrari Chade Ricosti. Inserção da energia eólica no sistema hidrotérmico brasileiro. Tese de mestrado, 2011. Unidade: Interunidades em Energia EP/IEE/FEA/IF

[19] ONS. Geração de Energia – Térmica Convencional no Nordeste no ano de 2013. Disponível em http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia_out.aspx?area=. Acessado em 04/11/2013.

[20] ONS. Geração de Energia – Térmica Convencional no Nordeste no ano de 2013. Disponível em http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia_out.aspx?area=. Acessado em 04/11/2013.

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.

Energia nuclear: desmistificação e desenvolvimento

Leonam dos Santos Guimarães

Doutor em Engenharia Naval e Oceânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Diretor Técnico-Comercial da Amazônia Azul Tecnologias de Defesa SA - AMAZUL

Resumo

A energia nuclear continua a ser uma questão controversa para as políticas públicas sobre a energia e o ambiente devido a fatores ligados ao gerenciamento de rejeitos, às consequências de acidentes severos, à proliferação nuclear horizontal e à competitividade econômica. As questões referentes às mudanças climáticas e à segurança de abastecimento de energia elétrica têm trazido uma nova lógica para o seu ressurgimento na agenda política internacional. A geração elétrica nuclear, em termos dos objetivos de sustentabilidade, tem sido até agora, em grande medida, evitada, basicamente devido ao fato de muitos cientistas e políticos excluírem esta opção a priori por considerarem a questão nuclear fora de seu domínio de competência ou por se submeterem à influência da opinião pública. O presente trabalho pretende, portanto, contribuir para o preenchimento desse hiato, reestruturando a questão da sustentabilidade da energia nuclear de forma dinâmica. Claramente a energia nuclear possui características de risco que são muito distintas dos combustíveis fósseis e muito maior potencial de sensibilização da opinião pública do que os que são associados à maioria das energias renováveis. Deve-se, entretanto, lembrar que uma das razões para esta última constatação decorre do fato das energias renováveis ainda não terem sido aplicadas em grande escala global.

Palavras-chave: Energia Nuclear. Brasil. Mundo. Fukushima.

Nuclear energy: demystifying and developement

Abstract

Nuclear energy remains a controversial issue for public policies on energy and the environment due to factors related to waste management, the consequences of severe accidents, nuclear proliferation and horizontal economic competitiveness. Issues relating to climate change and security of supply of electricity have brought a new logic to its resurgence in the international political agenda. The nuclear electricity generation, in terms of sustainability goals, has so far been largely avoided, primarily due to the fact that many scientists and politicians exclude this option in advance for considering the nuclear issue outside their area of competence or submit to influence public opinion. This paper therefore aims to contribute to filling this gap by restructuring the issue of sustainability of nuclear energy dynamically. Clearly, nuclear power has risk characteristics that are very different from fossil fuels and much larger potential public awareness than those associated with most renewables. One should, however remember that one of the reasons for this latter finding stems from the fact that renewables have not yet been applied on a large global scale.

Keywords: Nuclear Power. Brazil. World. Fukushima.

1.Introdução

A avaliação da magnitude das reservas energéticas renováveis e não renováveis nacionais trazem grande otimismo face aos desafios do crescimento econômico e do desenvolvimento social sustentável do Brasil (EPE, 2012). Com o devido aporte de planejamento, tecnologia e adequada gestão, nosso País pode ser autossuficiente em energia no mínimo por mais de meio século, o que se constitui grande fator de alavancagem e diferencial competitivo no conserto das nações.

Uma política energética inteligente terá que conciliar múltiplos interesses políticos, econômicos, sociais, ambientais e dificilmente pode basear-se em ideias simplista como as daqueles que pregam uma solução única e supostamente "milagrosa" para o problema, seja biomassa, eólica, hídrica, nuclear, solar, gás natural ou qualquer outra que entre "na moda".

O problema é demasiado complexo para que qualquer uma das potenciais soluções possa ser colocada como "bala de prata". Essa é a maior dificuldade no debate sobre a energia o da simplificação extrema das decisões e a noção perversa de que existe uma resposta simples e imediata para o problema. Só quando percebermos coletivamente que não existe uma "solução milagrosa" e que os problemas da segurança energética, dos custos e das emissões de gases de efeito estufa não são compatíveis com esse tratamento simplista, é que será possível realmente avançar no debate.

A complementaridade entre energéticos é a única estratégia de que dispomos para a otimização do conjugado modicidade tarifária/confiabilidade, já que o gerenciamento da expansão do sistema elétrico nacional é similar ao gerenciamento de uma carteira de investimentos: os princípios da gestão de riscos (confiabilidade) indicam uma estratégia de diversificação no sentido de garantir o retorno (modicidade tarifária).

Os indicadores brasileiros de consumo e capacidade instalada de geração elétrica per capita são ainda medíocres (EPE, 2012), inferiores à médias mundiais e correspondentes à metade dos de Portugal este é o fato crucial a ser considerado. Isto obriga o país aproveitar ao máximo e o mais rápido possível todos os recursos disponíveis para aumentar a capacidade geração de eletricidade, permitindo que sejam alcançados níveis de consumo compatíveis com as necessidades da vida moderna.

2. Contribuição da Energia Nuclear no uso Sustentável dos Recursos Naturais

Os combustíveis fósseis possuem muitos outros usos mais nobres, além de gerar eletricidade em larga escala. Esses combustíveis são necessários em quantidades muito maiores do que o urânio para produzir a quantidade equivalente de eletricidade. A energia nuclear já vem reduzindo substancialmente o uso de combustíveis fósseis no mundo há décadas. Existem questões especificas associadas ao custo de oportunidade no uso de gás para gerar eletricidade na base de carga, quando se considera seu emprego no aquecimento direto e como combustível para motores de veículos.

Outro aspecto do uso de recursos naturais em alguns lugares do planeta é em relação à água potável. Usinas a carvão são frequentemente construídas próximo às minas por razões de logística, e depois resfriadas com água doce utilizando torres de resfriamento evaporativo, que por sua vez utilizam uma grande quantidade de água. Com as usinas nucleares, não há nenhuma consideração de localização semelhante e podem ser mais facilmente colocadas no litoral, utilizando água do mar para resfriamento sem evaporação.

A liderança do IPCC (IPCC, 2013) tem demonstrado conclusivamente a abrangência e a urgência da crise e está ousando apontar a energia nuclear como elemento essencial da solução. Em fazendo isso, está sobre bases sólidas, pois, sob uma análise justa e desapaixonada, a energia nuclear é de fato a fonte de energia essencial para o desenvolvimento sustentável:

- seu combustível estará prontamente disponível por muitos séculos;
- sua presença oferece segurança energética;
- seu histórico de segurança é superior às maiores fontes de energia;
- seu consumo não causa quase nenhuma poluição ou gases de efeito estufa;
- seu uso preserva os recursos fósseis para futuras gerações;
- suas capacidades são escalonáveis, de pequenos a grandes reatores;
- seus custos são competitivos e tendem a reduzir;
- seus resíduos podem ser gerenciados de forma segura em longo prazo;
- suas operações são gerenciáveis tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento.

Certamente as energias renováveis, como a solar, a eólica, a das marés e a geotérmica, têm um relevante papel a desempenhar no futuro energético da humanidade, de forma similar ao que a energia hídrica já vem desempenhando há muitos séculos. Também deve haver conservação de energia e maior eficiência energética. Mas nenhuma dessas ferramentas pode alterar o fato de que a energia nuclear oferece a única tecnologia disponível confiável para energizar uma economia próspera, sem impacto ambiental significativo. O reconhecimento dessa verdade, e a ação baseada nisso, se reflete agora em um renascimento nuclear mundial que reúne velocidade e dinamismo, mesmo após o acidente de Fukushima, em março de 2011.

No cerne da equação da sustentabilidade planetária está o parâmetro da densidade de energia (WNA, 2013). A densidade de energia é, essencialmente, a quantidade de energia acumulada dentro de um determinado combustível (não necessariamente tem que se tratar de um combustível, mas, no caso da produção de energia, o combustível é o método de

armazenamento de energia empregado). A densidade de energia de um combustível indica também a quantidade de resíduos produzidos por unidade de energia gerada. Na medida em que esses conceitos são complementares, torna-se útil comparar diversas fontes comuns de produção de energia com base na densidade de energia e no consequente volume de resíduos produzidos.

A primeira coisa que se precisa saber sobre essas formas de produção de energia é que as fontes de combustível são convertidas em energia térmica, que é transformada em energia cinética para girar uma turbina que produz eletricidade. Há um processo idêntico no caso do nuclear, carvão, gás natural e petróleo. Essas fontes de produção de energia diferem no modo de criação da porção de energia térmica produzida no processo.

Tanto o carvão quanto o gás natural e o petróleo utilizam reações químicas para produzir calor. As reações químicas conectam a força dos elétrons que orbitam em torno do núcleo de um átomo. Os elétrons representam menos de 1% da massa de um átomo, representando, portanto, menos do que 1% do potencial de energia nele armazenada. É baseado nesse tipo de reação química que o carvão, o petróleo e o gás natural são convertidos de matéria em energia térmica, isto é, utilizando menos de 1% do potencial energético disponível.

A energia nuclear é gerada por uma reação de fissão que capta a energia potencial armazenada dentro do núcleo do átomo, o que representa mais de 99% dessa energia. A diferença entre isso e uma reação química é absolutamente clara: a reação química usa menos de 1% e a fissão utiliza mais de 99% da massa do átomo para gerar energia térmica. Dado que Einstein nos ensinou que a matéria e a energia são intercambiáveis, é fácil deduzir que a reação que utiliza mais da massa de um átomo gerará mais energia no processo de transformação.

Os gráficos 1 e 2 contêm uma lista de diversas fontes e suas respectivas densidades energéticas. Note-se a diferença de escala entre os dois gráficos. A densidade energética pode ser calculada com base na massa ou no volume, dependendo da medida que faz

Gráfico 1 - Densidade Energética por Fonte Convencional (WNA, 2013)

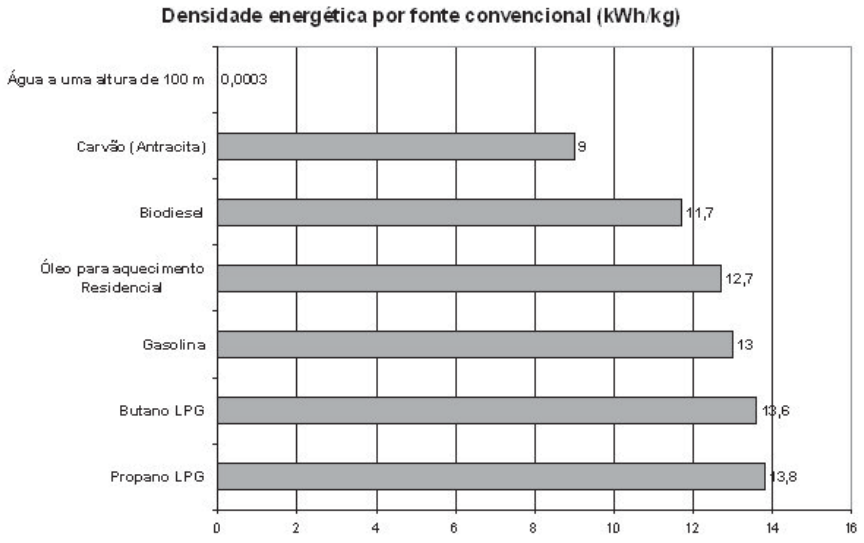
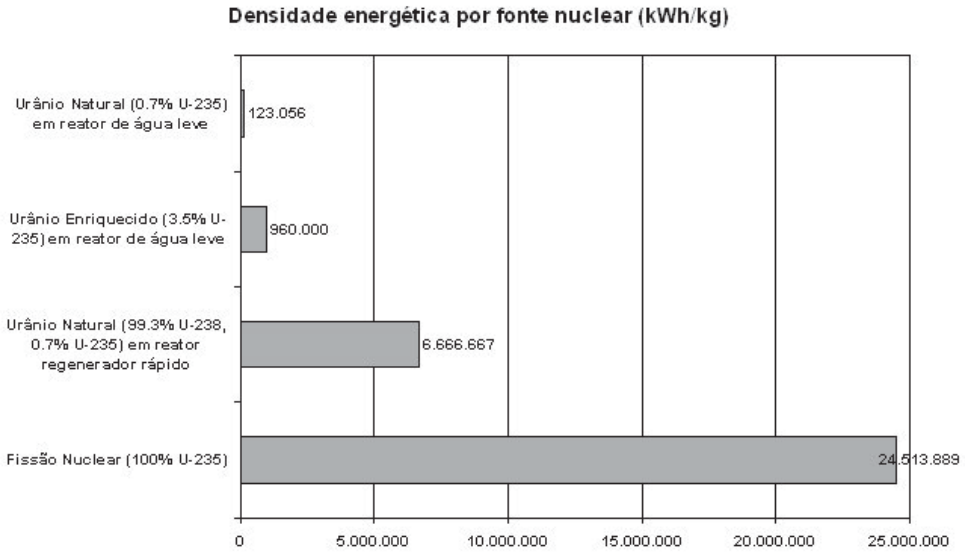


Gráfico 2 - Densidade Energética por Fonte Nuclear (WNA, 2013)



mais sentido para cada situação. No caso da produção de energia, a densidade calculada através da massa é a medida apropriada, visto que a massa do combustível, e não o seu volume, constitui a medida de base para as necessidades de combustível de uma usina nuclear.

As diversas reações químicas em combustíveis são todas similares em termos de densidade de energia, desde o carvão, com 9 kWh por kg, até o propano, com 13,8 kWh por kg. Isso quer dizer que podemos manter aceso o bulbo de uma lâmpada de 100-watts por aproximadamente 90 horas (quase 4 dias) com um quilograma de carvão, ou mais de 140 horas (quase 6 dias) com um quilograma de gás natural.

No outro lado do espectro temos os combustíveis originados na reação por fissão que começam com a menor densidade de energia (Urânio natural [99,3% U-238, 0,7% U-235] em um reator de água pesada) a 123.056 kWh por kg até uma reação com 100% de U-235, que renderia 24.513.889 kWh por kg. Isso quer dizer que a reação nuclear por fissão típica pode manter aceso o bulbo de uma lâmpada por 1.230.560 horas (durante 140 anos) utilizando um quilograma de urânio natural.

A menor estrutura de densidade de energia de reação por fissão é 13.631 vezes mais densa do que o carvão. Isso contrasta com o fato de que a estrutura mais densa de combustível que utiliza uma reação química (propano) é somente 1,5 vezes mais densa do que o carvão.

A densidade energética também nos mostra a quantidade de combustível que uma usina necessita para produzir uma determinada quantidade de eletricidade. Dado que a densidade energética está diretamente ligada à quantidade de combustível necessária, ela

também está ligada à quantidade de resíduos produzidos. Quanto maior a densidade energética de um combustível, menor será a quantidade de combustível usada por uma usina. Sendo utilizada uma quantidade menor de combustível, haverá necessariamente menos resíduos.

As reações químicas e nucleares utilizadas para gerar eletricidade produzem dois tipos diferentes de resíduos. Todas as fontes baseadas em reações químicas produzem essencialmente o mesmo tipo de resíduo, variando somente a quantidade. Carvão, gás natural e petróleo produzem emissões tais como dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, partículas, e alguns outros tipos de emissão em quantidades relativamente pequenas como mercúrio e mesmo urânio (derivado da queima de carvão). Além dessas emissões, a queima de carvão também produz um grande volume de resíduos (cinzas).

3. Atendimento às Legítimas Preocupações do Público

Quanto às preocupações do público tão frequentemente citadas nos jornais, uma avaliação justa mostra que nenhuma representa um verdadeiro obstáculo para a expansão mundial de energia nuclear.

São apresentadas a seguir as assertivas antinucleares comumente veiculadas, que causam legítimas preocupações no público, e os correspondentes principais pontos de resposta.

- *Minas de urânio inevitavelmente poluem o ambiente, barragens de rejeitos causam poluição através de vazamentos.*

Hoje as minas de urânio têm como objetivo atingir emissão zero de poluentes. Qualquer água liberada é de escoamento superficial e se aproxima do padrão potável. A retenção de rejeitos normalmente não causa poluição fora do sítio. Grandes minas de urânio na Austrália e no Canadá possuem a certificação Iso14001.

- *Rejeitos de urânio retêm quase toda a sua radioatividade, que continua por centenas de milhares de anos*

Verdade, mas o nível de radioatividade é muito baixo e, com técnicas consagradas de engenharia comum, eles não representam ameaça a ninguém. Toda a radioatividade provém da jazida original (nenhuma radioatividade adicional é "criada"). O processo de restauração da mina de urânio garante que esses rejeitos são seguros, estáveis e não causam nenhum dano.

- *O urânio é potencialmente perigoso para a saúde dos mineiros.*

A mineração de urânio é altamente regulamentada na maior parte dos países, e as normas garantem que não há risco de efeitos adversos à saúde.

- *Não existe um nível seguro de exposição à radiação.*

Mesmo sendo aceita como uma base conservadora para as normas de proteção radiológica, essa afirmação não constitui de fato um postulado científico. Níveis baixos de radiação comparáveis aos recebidos naturalmente em certos locais (até 50 mSv/ano) não são perigosos, o que é demonstrado pelos estudos epidemiológicos das populações que vivem nesses locais, como o litoral sul do Espírito Santo, no Brasil.

- *Resíduos nucleares (no combustível usado ou após seu reprocessamento) constituem um problema não resolvido.*

Em todos os países em que se utiliza a energia nuclear, existem procedimentos bem instituídos de armazenamento, gerenciamento e transporte para tais resíduos, financiados pelos utilizadores de energia. Resíduos são controlados e gerenciados, e não descartados. O armazenamento é protegido e seguro, e existem planos para eventual disposição final.

- *A indústria nuclear é responsável por terríveis resíduos que, como um pesadelo, vão perdurar para as gerações futuras.*

A energia nuclear é a única indústria produtora de energia que assume responsabilidade total pelo gerenciamento de todos os seus resíduos, e assume os custos disso.

- *Reatores nucleares não são seguros. Chernobyl foi característico e resultou em um enorme número de mortes.*

A indústria nuclear possui um excelente histórico de segurança, com mais de 12 mil reatores-ano de experiência operacional acumulada por cinco décadas. Mesmo um grande acidente, com derretimento do núcleo de combustível em um reator típico, não colocaria em risco o público e o meio ambiente. Alguns reatores projetados e construídos pela extinta União Soviética têm sido motivo de preocupação por muitos anos, mas estão muito melhores hoje do que em 1986. O desastre de Chernobyl seria basicamente impossível de se reproduzir em qualquer usina ocidental, ou mesmo em qualquer usina que seja construída nos dias de hoje. De acordo com números oficiais da ONU, a contagem de mortos de Chernobyl é de 56 (31 trabalhadores naquele momento, mais 16 trabalhadores após o acidente e mais 9 pessoas do público, de câncer de tireoide).

- *Reatores nucleares são vulneráveis a ataques terroristas, como o ocorrido no World Trade Center em 2001; o armazenamento de resíduos e de combustível usado, muito mais ainda.*

Qualquer reator autorizado no ocidente é dotado de uma estrutura de contenção substancial, e muitos também têm vasos de pressão e estruturas internas muito robustas. Avaliações feitas desde 2001 sugerem que os reatores nucleares estariam bem equipados para sobreviver a um impacto daquele tipo sem nenhum perigo de radiação local. O armazenamento de resíduos civis e de combustíveis usados também é robusto e muitas vezes se encontra no subsolo.

- *Companhias de seguro não dão cobertura a reatores nucleares, portanto, o risco recai sobre o governo.*

Todos os reatores nucleares, pelo menos no ocidente, estão garantidos por seguros. Não somente isso: são riscos bem aceitos pelas seguradoras, devido a seus altos padrões operacionais e de engenharia. Além da cobertura para usinas individuais, existem acordos nacionais e internacionais para coberturas ainda mais abrangentes.

- *A energia nuclear é muito cara. Eficiência energética é tudo o que é preciso, com maior uso de renováveis.*

A energia nuclear é mais competitiva que o carvão mineral, sendo mais barata em certos locais e, em outros, mais cara. Se os custos ambientais são considerados, a energia nuclear se torna ainda mais competitiva. A eficiência energética é vital, mas não pode substituir maior capacidade de geração. A energia eólica é normalmente mais onerosa muitas vezes o dobro por kWh.

- *A energia nuclear goza de subsídios maciços do governo.*

Em nenhum lugar do mundo a energia nuclear é subsidiada ao contrário, na Suécia e Alemanha existem sobretaxas especiais. Nos Estados Unidos, subsídios limitados têm sido oferecidos para novas usinas de 3a geração, em nível de 1.8c/kWh, muito inferiores aos subsídios ilimitados disponíveis para a energia eólica.

- *No ciclo completo do combustível, a energia nuclear utiliza quase tanta energia quanto consome.*

Esse folclore popular é facilmente refutável por informações extraídas de estudos sérios. Na realidade, considerando todo o consumo, incluindo o gerenciamento de resíduos, menos de 6% da energia produzida é gasta na situação mais desfavorável. Em média são gastos somente 2-3%.

- *Descomissionar usinas nucleares será muito caro.*

Normalmente, o descomissionamento é financiado enquanto a usina está em operação. Experiências até agora nos dão uma boa ideia de custos, e as estimativas iniciais estão sendo revisadas para menos.

- *Fontes de energia renovável deveriam ser utilizadas em substituição à energia nuclear.*

Fontes renováveis podem ser utilizadas tanto quanto possível, porém há limitações intrínsecas (fontes difusas, de baixa densidade energética e intermitentes). Isso significa que vento e sol não podem nunca substituir economicamente fontes como o carvão mineral, o gás e a energia nuclear como fornecimento em grande escala, contínuo e confiável.

- *O transporte de urânio e de outros materiais radioativos é perigoso.*

Qualquer tipo de material é transportado em contêineres concebidos para dar segurança em qualquer circunstância. Em uma estrada pública, carros-tanque são mais perigosos que qualquer material radioativo em trânsito em qualquer lugar.

- *Reprocessar combustível gasto dá lugar ao plutônio, que pode ser utilizado em bombas.*

O plutônio obtido a partir de reprocessamento não é adequado para bombas, mas é um combustível valioso, que pode ser utilizado juntamente com urânio empobrecido como combustível óxido misto (MOX).

- *Exploração de urânio contribui para a proliferação de armas nucleares.*

Todo o urânio comercializado é vendido unicamente para produção de eletricidade, e dois níveis de acordos de salvaguardas abrangentes internacionais confirmam isso. Fornecedores ocidentais não admitem clientes que não obedecem às exigências de contabilidade, controle e auditoria de materiais nucleares.

- *Não podemos garantir que urânio não resulte em armas.*

Medidas de salvaguarda detectariam qualquer desvio. Hoje, materiais militares estão sendo liberados para diluição e uso civil, então não há razão para desvio em países clientes.

- *Al Gore, antigo vice-presidente dos Estados Unidos, disse em18-9-2006: Durante meus oito anos na Casa Branca, todos os problemas de armas nucleares que tratamos estavam ligados a problemas em programas de usinas nucleares. Hoje, os programas de armas no Irã e na Coreia do Norte estão ligados aos seus programas civis de usinas nucleares.*

Ele não está certo. O Irã não conseguiu convencer ninguém de que seu programa de enriquecimento clandestino nada tenha a ver com sua usina nuclear em construção (que será abastecida pela Rússia), e a Coreia do Norte não têm qualquer programa civil e usinas nucleares. Em relação à Índia e Paquistão, em que Al Gore poderia ter pensado, existe certamente uma ligação entre a área militar e a civil, mas isso é parte da razão pela qual estão fora do Tratado de Não Proliferação Nuclear.

- *A energia nuclear contribui de forma insignificante para o atendimento das necessidades energéticas do mundo.*

A geração de eletricidade usa 40% da energia primária do mundo. A energia nuclear fornece 16% da eletricidade mundial, mais do que o total da eletricidade produzida mundialmente em 1960.

- *O número de reatores nucleares está constantemente caindo, à medida que deixam de ser vantajosos.*

Desde 1996, o número de reatores funcionando está estável, mas a produção de energia nuclear cresceu significativamente. Aqueles que estão sendo desativados são em sua maioria

pequenos, enquanto os novos são principalmente grandes. Mais reatores estão sendo construídos, e mais de 200 estão planejados ou firmemente propostos.

- *A energia nuclear contribui muito pouco para a redução de emissões de dióxido de carbono.*

Atualmente a energia nuclear evita a emissão de 2,5 bilhões de toneladas de CO2 em relação ao carvão mineral. Para cada 22 toneladas de urânio utilizadas, evita-se um milhão de toneladas de CO2 em emissões. Os fornecimentos de energia no ciclo de combustível nuclear produzem somente uma pequena porcentagem (1%-3%) das emissões de CO2 economizadas. Duplicar a produção nuclear mundial reduziria as emissões de CO2 da geração de energia em mais ou menos um quarto.

- *As usinas de enriquecimento de urânio são as maiores emissoras de produtos químicos que prejudicam a camada de ozônio, especificamente CFC-114 (Freon) utilizado como refrigerante.*

Duas usinas da década de 1950 nos Estados Unidos eram grandes emissoras (360 t/ano), uma atualmente está fechada; a outra, atualmente em fase de fechamento, produz emissões muito reduzidas, muito abaixo de 1% do total de emissões de CFC dos Estados Unidos. Outras usinas de enriquecimento de urânio não utilizam esses produtos químicos.

- *Usinas de energia nuclear utilizam muito mais água do que as alternativas.*

Qualquer usina de energia térmica (biomassa, gás, carvão mineral ou nuclear), utilizando o sistema convencional de ciclos de calor, necessita descarregar mais ou menos dois terços do calor utilizado para fazer eletricidade; a medida depende do tamanho e da eficiência térmica da usina. Nessa questão, não existe diferença fundamental entre biomassa, combustível fóssil e nuclear. O calor é descarregado ou em um grande volume de água (do oceano ou de um grande rio, aquecendo-a em alguns graus) ou em um volume relativamente menor de água em torres de resfriamento, utilizando resfriamento evaporativo (calor latente da vaporização). No último caso, de 2 a 2,5 litros/kWh é evaporado, dependendo das condições.

4. Contexto Pós-Fukushima

O acidente de Fukushima (JAPÃO, 2012) nos obriga a analisar três questões: o que aprendemos com ele; como os responsáveis pela geração elétrica nuclear, tanto no governo como na indústria, deveriam reagir; Fukushima mudará de forma significativa a perspectiva de uma expansão mundial da geração elétrica nuclear. Esse acidente tem sido um importante aprendizado, principalmente por reforçar verdades que já conhecíamos, tanto sobre a tecnologia de geração elétrica nuclear como sobre as percepções da população sobre esta tecnologia.

Inevitabilidade dos acidentes nucleares: Primeiramente e de forma mais elementar, acidentes nucleares acontecem. Não se trata de uma simples observação. Mesmo que nos empenhemos no sentido de ter uma gestão de instalações nucleares impecável, nunca podemos ter certeza de que vamos ser totalmente bem-sucedidos. Tampouco podemos esperar que a população acredite nisso. Devemos reconhecer que os seres humanos erram individual e coletivamente. Isto em si não nos enfraquece. O nosso problema reside na forma como essa realidade é construída. Neste momento, a maioria das pessoas continua a acreditar que a geração elétrica nuclear tem grande probabilidade de produzir um evento altamente letal. Embora Fukushima dê fortes provas do contrário, poucos da população em geral percebem a situação assim. O futuro da geração elétrica nuclear continuará a ter bases frágeis se continuar presente a percepção de graves riscos ao bem-estar humano. O nosso objetivo deve ser explicar ao público que, mesmo no pior dos casos, a probabilidade de ocorrência de incidentes nucleares não somente é extremamente baixa, mas também cada vez menor, visto que a tecnologia nuclear continua a progredir. Simultaneamente, mesmo no caso de um acidente vir a acontecer, suas conseqüências não têm o alto grau de letalidade que as pessoas crêem. Estas são verdades objetivas e devemos apresentá-las de forma convincente ao público.

Necessidade universal de fontes de resfriamento confiáveis: Em segundo lugar, todo reator nuclear requer um mecanismo confiável de manutenção do resfriamento após desligamento, sob quaisquer circunstâncias. Algumas concepções avançadas de reatores em breve conseguirão realizar isso, utilizando o princípio físico da convecção natural. Porém, para os reatores existentes na frota mundial, a eliminação do calor após um desligamento depende de uma fonte de energia externa. Os sistemas de backup de resfriamento em emergência constituem um aspecto não nuclear decisivo da tecnologia nuclear, e Fukushima imprimiu indelevelmente na indústria o quanto essa função é essencial para a segurança e o futuro da geração elétrica nuclear. Nosso comprometimento para garantir a sua confiabilidade em todas as usinas, em todos os lugares e em quaisquer situações, deve ser absoluto.

Segurança é essencial para a energia nuclear: Em terceiro lugar, a despeito das impressões difundidas em sentido contrário, Fukushima enfatizou a segurança essencial da energia nuclear. De fato, este foi o pior dos casos em termos de acidente nuclear. Além disso, mesmo tendo ocorrido liberações significativas de radioatividade, o caráter de precaução extremamente conservadora das políticas japonesas relativas aos padrões de segurança e de evacuação, não houve nem haverá um único caso de contaminação radioativa fatal resultante do acidente de Fukushima, e isso no contexto de um desastre natural que produziu 25.000 mortes (OMS, 2013). Esta não é uma afirmação feita com complacência, feita com o objetivo de minimizar o ocorrido: trata-se somente de um fato concreto e objetivo. Tampouco isso deve ser visto como uma surpresa. Se Fukushima produzisse um acidente fatal por radiação, este seria o primeiro a ocorrer na história da energia nuclear do Japão, dos EUA ou da França países que contabilizam metade dos reatores nucleares

do mundo. Excluído Chernobyl, não se tem notícia de nenhum incidente radioativo fatal ocorrido em toda a história da geração elétrica nuclear, levando em conta perto de 14.500 anos reator de geração elétrica nuclear em mais de 30 países ao redor do mundo. Essa verdade impressionante é totalmente desconhecida pela população e pela mídia. Também sabemos que, só nos três meses após de Fukushima, milhares de pessoas morreram ao redor do mundo, seja na extração de combustíveis fósseis, ou seja, devido às consequências para a saúde da queima desses combustíveis. Observado nesse contexto de letalidade contínua, em larga escala e factual, aquilo que agora é comumente chamado de "desastre nuclear" de Fukushima pede uma descrição menos hiperbólica.

Catastrofismo é hoje o comportamento padrão da mídia: Uma quarta verdade sobre Fukushima é que a cobertura da mídia nos dias de hoje tende mais ao catastrofismo do que ao equilíbrio em relação a qualquer evento envolvendo a energia nuclear. Num mundo de notícias televisionadas de forma competitiva, urgente, existe uma clara compulsão para a cobertura de qualquer história nuclear como o equivalente industrial de um escândalo sexual. No contexto atual, os termos "derretimento" e "vazamento radioativo" são muito excitantes e tentadores, e devemos manter a expectativa de que essa tendência continuará enquanto não conseguirmos desmistificar a energia nuclear. Realizar essa desmistificação significa criar uma maior compreensão pública acerca da radiação como fenômeno natural onipresente e das limitadas consequências resultantes de vazamentos radioativos, mesmo na pior das situações.

Pouco apoio onde a energia nuclear é uma questão ideológica: Uma quinta realidade enfatizada por Fukushima é a estranha fragilidade do apoio à geração elétrica nuclear em alguns países europeus avançados em termos tecnológicos. O caso da Alemanha, enquanto principal potência econômica europeia, é particularmente significativo. Agindo em nome do meio ambiente, os alemães começaram agora a queimar mais carvão, petróleo e gás, ao mesmo tempo em que continuam, sempre quando necessário, a importar eletricidade nuclear dos seus vizinhos. Enquanto o governo alemão se move em direção a uma confusa nuvem de fantasia em relação ao potencial futuro de energias renováveis, pode-se perguntar de modo muito racional como a Alemanha fará, realisticamente falando, para cumprir suas obrigações ambientais em relação aos seus parceiros europeus e ao mundo.

Solidez de apoio em muitos países fundamentais: Uma sexta verdade é a solidez do apoio político para a geração elétrica nuclear na maioria dos países que agora a utilizam. Isso se verifica especialmente naqueles países que planejam a implantação de programas importantes de novas construções nucleares, liderados pela China, Índia, Rússia, Inglaterra, África do Sul e Coréia do Sul. Em outros países importantes também, incluindo a França, a Polônia, a Ucrânia, o Canadá e os EUA, observam-se algumas reações contrárias, porém limitadas, com pequena perda de impulso, porém com os planos de expansão permanecendo inalterados.

Falta de compreensão da população: Uma sétima realidade que vem se somar às anteriores é que a compreensão pública sobre a geração elétrica nuclear em muitos países continua limitada e facilmente suscetível de uma percepção equivocada. Nos países onde observamos constância na política de apoio à energia nuclear, há principalmente o consenso de que os responsáveis políticos não tornarão a energia nuclear uma questão ideológica controversa na política local, tal como aconteceu na Alemanha. Entretanto, Fukushima teve claramente um efeito negativo de longo alcance. Em vários países de todo o mundo, a impressão geral de que a "desastre nuclear" do Japão se deveu a falhas humanas e não a uma catástrofe natural, como foi o caso, enfraqueceu a confiança pública na energia nuclear. Uma vez mais soubemos que "radiação" é uma das palavras mais poderosas e evocativas em qualquer língua.

Continuidade da força do mito de Chernobyl: Uma verdade intimamente ligada, e intensamente enfatizada pela cobertura da mídia sobre Fukushima, é que o mito de Chernobyl tem um peso enorme na consciência pública e continua sendo um ponto de referência jornalístico fundamental em relação a possíveis perigos da energia nuclear. Refiro-me ao "mito" de Chernobyl porque pouquíssimas pessoas compreendem que o reator de Chernobyl que explodiu e pegou fogo em 1986 tem pouca pertinência em relação a qualquer reator em funcionamento agora, e também porque as consequências reais, cientificamente analisadas, causadas por Chernobyl, diferem muito daquelas percebidas pelo senso comum. Na verdade, existe um forte consenso científico de que as mortes pela radiação em Chernobyl são muito limitadas, restringindo-se a algumas dezenas de "exterminadores" seriamente atingidos enquanto combatiam o incêndio no reator e um pequeno número de pessoas nas vizinhanças de Chernobyl, consideradas estatisticamente como algo perto de 16 em número, as quais pode-se supor que tenham morrido de câncer de tireoide causado por iodo radioativo emitido pelo reator em chamas. Como muitas autoridades sobre Chernobyl poderão atestar, a alegação da existência de quaisquer outras mortes decorrentes da radiação depende exclusivamente da chamada hipótese da "dose coletiva", que é cientificamente infundada e ao mesmo tempo contraria todo bom senso. Entre aqueles que têm competência e preparo para afirmar isso inclui-se o presidente do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2013). Mas o público em geral não conhece essa realidade científica. Nesse sentido, também são mal compreendidas as classificações da Escala Internacional de Eventos Nucleares (AIEA, 2013). Quando Fukushima atingiu o grau 7, ou seja, um "Acidente Sério" na Escala da INES, um grau até então somente atingido por Chernobyl, esses mal-entendidos se combinaram, e milhões de pessoas no mundo inteiro concluíram que estavam testemunhando uma catástrofe humana de imensas proporções.

A economia da geração elétrica nuclear continua sendo de suma importância Uma última realidade, que chama a atenção quando consideramos a reação estratégica latente pelo mundo afora em relação a Fukushima, é que o lado econômico da geração elétrica nuclear continua sendo crucial para o seu futuro. É bem conhecido o fato de que,

comparada a outras tecnologias importantes de geração de eletricidade, a energia nuclear é de construção cara e de funcionamento barato. Na última década, ainda que haja aumentado a confiança no futuro da geração elétrica nuclear no mundo todo, observamos o esforço industrial para limitar os custos de capital enquanto se empreende a construção da próxima geração de reatores. Neste contexto, é extremamente importante notar que as ações regulatórias tomadas como reação a Fukushima deverão trazer benefícios claros em termos de segurança, e não considerarem novos requisitos que somente aumentem custos sem trazer razoáveis reduções de riscos.

Como o governo e a indústria deveriam reagir? Num clima predominante imbuído do impulso pela necessidade de "fazer algo", podemos identificar alguns princípios a partir dos quais é possível avaliar qualquer reação proposta.

Estrutura institucional sólida para reação. Em primeiro lugar, temos que reconhecer que nos encontramos bem equipados institucionalmente para examinar o evento de Fukushima e aprender com ele. No plano nacional, as autoridades de segurança nuclear e agências de fiscalização e controle já estão trabalhando e, internacionalmente, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), a Associação Mundial de Operadores Nucleares (WANO), que representa as concessionárias de geração elétrica nuclear do mundo, e a Associação Nuclear Mundial (WNA), cujos membros incluem não só as concessionárias, mas também as empresas que planejam, equipam e constroem as usinas nucleares, representam exatamente os mecanismos de que necessitamos. Essas instituições estão apoiando a reação a Fukushima tanto em nível nacional como internacional e coordenando a participação de especialistas a elas associados.

Ressaltar exclusivamente as medidas importantes. Em segundo lugar, a reação a Fukushima deve se concentrar exclusivamente em mediadas substanciais capazes de produzir reais ganhos para a segurança nuclear. Muitos pontos essenciais podem ser analisados agora. O primeiro deles é reforçar as ações de defesa em profundidade, mantendo em todas as usinas um conjunto adicional de sistemas de backup que garanta o resfriamento pós-desligamento em quaisquer circunstâncias. Isso inclui medidas para recuperar energia em corrente alternada na situação de blackout, ter geradores diesel à prova de inundação, assegurar tempos adequados de funcionamento com baterias, e um plano alternativo seguro para o suprimento de água e respectivos sistemas de bombeamento. Fukushima também requer uma nova consideração acerca de como aperfeiçoar ainda mais a segurança e a eficácia na gestão do combustível usado. Numa reação de emergência, uma interessante proposta partiu do Instituto de Operações de Energia Nuclear (INPO) norte-americano, que prevê a criação e manutenção de uma unidade de reação de emergência internacional, buscando uma ação rápida e liderada por especialistas e utilizando equipamentos interoperáveis pré-testados. Este conceito pode ser visto com ceticismo, porém o próprio ato de abordar a questão da ajuda internacional pode servir como um estímulo valioso às análises de necessidades e preparativos de emergência no plano nacional. Em relação a implicações para a tecnologia das usinas, Fukushima provavelmente oferece

novas perspectivas. Embora a concepção das usinas nucleares tenha evoluído consideravelmente desde que a central de Fukushima Daiichi foi construída, é bem possível que a análise técnica aprofundada da dinâmica do que aconteceu na explosão de hidrogênio, na dispersão do material radioativo e na perda parcial da contenção permita que os responsáveis pelo projeto e construção de usinas façam aperfeiçoamentos para o futuro, tanto nas usinas em operação como nas em construção e em projeto.

Evitar gestos puramente simbólicos. Terceiro, a reação de Fukushima deveria evitar ações de natureza simbólica que oferecem pouco ganho real em termos de segurança nuclear. Um caso a ser visto é a iniciativa do Secretário Geral das Nações Unidas que convocou várias agências das Nações Unidas para tratar de como evitar outra Fukushima. Tendo em vista a proeminência da IAEA enquanto meio reconhecido pelas Nações Unidas como provedor de conhecimento especializado para que esses objetivos sejam alcançados, é difícil ver como essa conferência vagamente concebida pode ser mais do que um convite para ostentar uma imagem diante do público e causar problemas políticos. Ao contrário, os testes de estresse feitos tanto na Europa quanto em outros lugares podem conciliar simbolismo e conteúdos consistentes. A iniciativa já serviu para ampliar a consciência em relação à segurança no sentido de dar nova ênfase em relação a desastres naturais, e isso também representa um passo potencialmente construtivo em direção de uma harmonização de normas internacionais relativas à concepção de usinas nucleares. Devemos ter como objetivo assegurar que, na prática, os resultados desses testes de estresse representarão verdadeiras melhorias na segurança.

Rever e recomeçar a trabalhar a percepção da população. Finalmente, devemos repensar a questão da percepção da população acerca da energia nuclear. No quarto de século depois de Chernobyl, a indústria e o governo trabalharam no paradigma de que normas cada vez mais rígidas relativas à segurança nuclear e um registro de desempenho nuclear seguro cada vez mais longo traria confiança para a população em relação à geração elétrica nuclear. Isso não foi mal conduzido e foi, até certo ponto, um êxito. Porém foi incompleto. Fukushima revelou de uma forma cruel que tanto a mídia quanto a população só receberam parte da mensagem. A indústria nuclear ainda é, essencialmente, vista como "Máquinas do Juízo Final", ainda que operadas e geridas com segurança. Nesse conceito, a palavra "dia do Juízo Final" sempre vai se superpor à palavra "segurança". De fato, reguladores e indústria contribuíram, sem dúvida, para uma imagem da geração elétrica nuclear como perigosa ao aplicar normas de proteção radiológica que tendem a ser muito mais restritivas do que as que são aplicadas na medicina, na indústria não nuclear, e até mesmo as normas que determinam locais de risco onde as pessoas não podem viver. Embora alguns se orgulhem dessa prática, ela implica que a radiação proveniente da energia nuclear, por mais limitada que seja, é de alguma forma percebida como diferente e mais fatal do que os demais agentes danosos à saúde pública. Devemos agir para mudar esse conceito disseminado. Sendo a eletricidade um serviço público vital e não simplesmente uma commodity de mercado, a questão sobre como geramos eletricidade hoje e como a

geraremos nos próximos anos é agora urgente no ponto de vista do futuro do meio ambiente terrestre, visto que os nossos cientistas e responsáveis pela concepção de políticas estão convencidos de que a geração elétrica nuclear deve desempenhar um papel primordial, se quisermos realmente evitar mudanças climáticas radicais. Existe, então, um interesse imperativo da população, e uma política de laissez-faire não será suficiente. Precisamos voltar-nos meticulosamente, num esforço solidário, reunindo a indústria e o governo, para a questão da compreensão da população. Os fatos favorecem a energia nuclear. O desafio é como usar da melhor maneira os fatos para aliviar medos, instilar confiança e aumentar a consciência do valor ambiental da geração elétrica nuclear. Para construir uma verdadeira consciência da população serão necessários projetos educacionais voltados para esse objetivo, em países onde os ministérios de energia e as empresas nucleares estão preparados para disponibilizar recursos para fortalecer as fundações sobre as quais a geração elétrica nuclear funciona. Esses projetos poderiam ser extremamente econômicos, em particular, empregando o efeito multiplicador de educadores. Cada projeto começaria com um olhar cuidadoso em relação ao que os alunos que estão aprendendo, ao que não estão aprendendo e ao que estão aprendendo incorretamente sobre a energia nuclear.

À medida que preparamos uma reação para Fukushima, temos que reconhecer uma verdade básica: esse evento não mudou em nada a realidade evidente que levou tantas nações, nestes últimos anos, a um caminho nuclear comum.

- A população mundial continuará o seu crescimento explosivo: de 3 bilhões em 1960 a quase 7 bilhões hoje, e subindo para 9 bilhões até 2050.

- A demanda mundial de eletricidade continuará a crescer ainda mais rapidamente, triplicando até 2050.

- A ciência dos sistemas ecológicos do planeta Terra continuará a nos alertar sobre a nossa necessidade de cortarmos em 80% as emissões de carbono, ou correr o risco de passar por mudanças radicais no clima do planeta, o que representará uma ameaça para toda a civilização.

- E continuará a ser verdade que o nosso mundo pode realizar uma revolução no sentido de ter uma energia limpa com um uso amplo e extensivo da geração elétrica nuclear.

Essas realidades são tão importantes e fundamentais quanto eram antes do histórico desastre natural do Japão. Portanto, o importante papel da geração elétrica nuclear também continua sendo o mesmo de antes. Encontrar os meios que permitirão que essa tecnologia de imenso valor desempenhe o seu papel fundamental e necessário na contínua melhoria das condições de vida da humanidade é o desafio que continuamos a enfrentar.

A maior lição de Fukushima, a partir da análise do evento e de suas repercussões mundiais, é que a nossa reação deve combinar uma prática cada vez mais segura com um melhor esclarecimento da população. Sem ambas, as bases da energia nuclear serão perigosamente frágeis, e assim também serão as perspectivas para a revolução mundial da energia limpa da qual depende crucialmente o futuro ambiental do nosso planeta.

5. Energia Nuclear: uma visão de futuro

Hoje, a energia nuclear está utilizando 440 reatores para produzir um sexto da eletricidade do mundo (AIEA, 2013). A partir de uma perspectiva ambiental, não seria adequado que a indústria nuclear simplesmente dobrasse, ou triplicasse, ou quadruplicasse a sua capacidade nesse século. De fato, não será adequado satisfazer as necessidades de uma revolução global de energia limpa, mesmo multiplicando a geração nuclear por dez neste século.

Devemos colocar-nos em uma trajetória para uma indústria nuclear do século XXI que atinge a utilização de nada menos que 8 000 10 000 Gigawatts de energia nuclear um aumento de 20 vezes (IEA, 2010). Planejar qualquer coisa menor seria um desastre ambiental.

Antes de rotularmos isso de fantasia, recordemo-nos de uma história. Nos anos 1980, só a França colocou em funcionamento 42 grandes reatores nucleares. De um ponto zero nos anos 1970, a França fez surgir, em uma década, 1 000 Megawatts de energia nuclear para cada milhão de cidadãos o suficiente para satisfazer virtualmente as necessidades de uma sociedade moderna para as próximas décadas (WNA, 2013).

Esta projeção simplesmente propaga a mesma conquista durante todo um século para um mundo maior que não estará começando do zero e que irá necessitar de transporte nuclear e de dessalinização, assim como de eletricidade tradicional. Se pudermos conhecer claramente os perigos que nos rodeiam e estimular lideranças nacionais e internacionais para empregar as ferramentas disponíveis, o sucesso nessa tarefa encontra-se dentro do espírito e da capacidade da humanidade.

O que é um engano perigoso é qualquer crença de que a humanidade pode evitar a calamidade ambiental sem ter energia limpa nessa escala

No início dos anos 1930, reconhecendo uma ameaça mundial iminente de um tipo inteiramente diferente, Winston Churchill lançou mão do rearmamento militar britânico como a única esperança para evitá-lo. “Nunca”, disse ele, “uma segurança tão abençoada e tão fértil foi obtida de forma tão barata.” Hoje, o mesmo poderia ser dito sobre a energia nuclear.

Outro Inglês, H. G. Wells, viu a vida como "uma corrida entre educação e catástrofe". Hoje, essa máxima se aplica a toda a humanidade. Nosso mundo está em perigo, a corrida entre educação e catástrofe está ocorrendo, e não temos tempo a perder.

Abrangendo muitos países, mas unidos por uma dedicação comum aos mais elevados padrões profissionais, a indústria nuclear mundial tem hoje uma responsabilidade monumental fazer uma contribuição vital para a vitória em uma corrida decisiva que irá determinar a sustentabilidade do futuro da humanidade. Para os profissionais da área nuclear, a história conferiu tanto uma obrigação solene quanto uma oportunidade estimulante.

Referências

EPE, Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011, Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2012. (https://ben.epe.gov.br/)

IPCC, Fifth Assessment Report (AR5), Intergovernamental Panel on Climate Change. Genebra: 2013. (http://www.ipcc.ch/)

WNA, Energy Analysis of Power Systems, World Nuclear Association. Londres: 2013

(http://www.world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Energy-Analysis-of-Power-Systems/)

JAPÃO, The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, The National Diet of Japan. Tóquio, 2012

OMS, Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation, World Health Organization. Genebra: 2013.

UNSCEAR, The Chernobyl accident: UNSCEAR's assessments of the radiation effects, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Viena, 2013.

(http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html)

AIEA, International Nuclear Event Scale - INES, International Atomic Energy Agency. Viena: 2013. (http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp)

AIEA, Power Reactor Information System (PRIS), International Atomic Energy Agency. Viena: 2013. (http://www.iaea.org/pris/)

IEA, Technology Roadmap: Nuclear Energy, International Energy Agency. Viena: 2010

(http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3906,en.html)

WNA, Nuclear Power in France, World Nuclear Association. Londres: 2013

(http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/)

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.

A polêmica sustentabilidade dos biocombustíveis

Selena Herrera
Doutoranda em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

O artigo trata da tentativa de definir a sustentabilidade da produção dos biocombustíveis, sob o ponto de vista do mercado global. Para avaliar o processo de definição, analisa-se o setor brasileiro de biocombustíveis, principalmente o etanol, como estudo de caso. O conceito de transição para a sustentabilidade permite entender que a definição de sustentabilidade é fruto da evolução dos problemas que os atores pretendem combater. Por outro lado, a caracterização dos impactos da cadeia de produção dos biocombustíveis separa a fase agrícola da industrial. A governança identificada a partir das certificações globais de sustentabilidade de biocombustíveis dá relevância ao estado como principal ator. Consequentemente, as políticas públicas adquirem um papel primordial na conservação dos recursos naturais e no fomento a indústria dos biocombustíveis, de modo a promover o desenvolvimento sustentável do país.

Palavras-chave: Desenvolvimento sustentável. Recursos naturais. Segurança energética. Governança. Mercado global.

The controversial biofuels sustainability

Abstract

This paper intends to discuss the definition process of the biofuels production sustainability from the perspective of the global market. For that, we analyse the study case of the Brazilian biofuels sector, mainly the ethanol. The sustainability transition approach sheds a light on the sustainability definition process as the result of the evolution of problems that the actors are trying to solve. On the other hand, the impacts of the value chain could be separated into the agricultural and the industrial stages. The governance identified from the global certifications for biofuels sustainability points out the State as the core actor. Ultimately, public policies have the main role of stimulating the sustainable development of the country by preserving natural resources and promoting biofuels industry.

Keywords: *Sustainable development. Natural resources. Energy security. Governance. Global market.*

Introdução

O *ecossocioeconomista*, como ele mesmo se titula, Ignacy Sachs preconiza uma biocivilização ou civilização moderna de biomassa, dados os problemas sociais, ambientais e econômicos presenciados no mundo nos últimos anos (SACHS, 2005). Na sua análise, a nova civilização deveria seguir um modelo de desenvolvimento baseado na cadeia de produção de biomassa, onde as novas gerações de biotecnologias ocupariam um lugar cada vez mais relevante. Nessa linha de pensamento, os biocombustíveis representam "uma oportunidade de ouro para repensar o desenvolvimento rural, e não apenas para atender à demanda de biocombustíveis para os automóveis". Porém, os biocombustíveis foram fomentados até hoje por razões que fogem à busca do desenvolvimento sustentável.

Os mercados nacionais de biocombustível[1] surgiram como alternativa aos combustíveis fósseis por motivos alheios ao conceito amplo de sustentabilidade e restrito a suas características específicas – como segurança energética, compromissos com a mitigação da mudança climática ou desenvolvimento rural e econômico – dependendo do país (HERRERA; PEREIRA JÚNIOR; LA ROVERE, no prelo). Isso implica que estes mercados foram concebidos como resposta a uma conjuntura nacional em que os biocombustíveis se mostraram a solução imediata mais adequada em relação aos altos preços do petróleo, da necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), do combate à pobreza no campo, da geopolítica, da macroeconomia, etc. Criados por governos que buscaram resolver novos conflitos, os biocombustíveis podem ser considerados um sistema sociotécnico, por prover a sociedade de um serviço específico, a partir da interação de atores, instituições, conhecimento e arcabouço físico (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012). Referente ao serviço, são substitutos dos combustíveis fósseis produzidos a partir de biomassa. Pelo processo de interação, são sistemas de inovação (GEE; MCMEEKIN, 2010). A definição da indústria dos biocombustíveis como um sistema de inovação permite entender que as interações entre as instituições nacionais, as tecnologias e a economia variam em função do problema que buscam resolver, afetando a abrangência geográfica, os setores envolvidos e o conteúdo tecnológico. Assim sendo, a sustentabilidade dos biocombustíveis será sempre susceptível de revisão enquanto os impactos não forem especificamente definidos pelos membros desse sistema e enquanto os interesses destes evoluírem.

O conceito de sustentabilidade aplicado aos biocombustíveis

O relatório "O Nosso Futuro Comum", criado pela Comissão Brundtland (UNITED NATIONS, 1987) em nome da ONU, propôs, pela primeira vez, em 1987, o conceito de "desenvolvimento sustentável" como aquele que "atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades". Em decorrência, sustentabilidade é um conceito integrado, composto por questões

econômicas, sociais e ambientais (três pilares), ligadas a cada atividade pelos impactos desta. A indústria dos biocombustíveis participa desta interação em nível nacional, por meio de sua contribuição à segurança energética e de seus impactos no meio ambiente e na população. Na prática, significa que os biocombustíveis deveriam ser capazes de manter sua produtividade como fonte energética sem reduzir a quantidade de recursos disponíveis ao longo do tempo (GOODLAND; EL SERAFY, 1992).

O termo sustentabilidade provém do verbo latino "sustentare", que significa favorecer, apoiar, conservar, cuidar. Em contraposição ao adjetivo sustentado, que implica um prazo de validade definido, o que é sustentável deve ser apto ou passível de sustentação ao longo do tempo. Este rigor temporário na busca de condições que perpetuam uma atividade é especialmente importante para a elaboração de políticas que pretendam contribuir com o desenvolvimento sustentável. Porém, por serem "politicamente construídos", como defendem Pilgrim e Harvey (2010), os mercados nacionais de biocombustíveis mostram-se dependentes dos interesses e dos governos que os criam e garantem sua manutenção. Estimulado por motivações econômicas, sociais e/ou ambientais, o governo intervém na demanda de biocombustíveis a partir de mandatos de mistura de curto e médio prazos e de incentivos para o mercado livre. Estas iniciativas de futuro próximo têm sua origem na combinação das expectativas imediatistas dos cidadãos e das empresas com o papel central que desempenham os atores políticos, com o apoio institucional e da regulação, no funcionamento do sistema (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012).

O conceito de sustentabilidade, com sua característica de longo prazo e baseado nos três pilares (econômico, social e ambiental), foi imposto à indústria de biocombustíveis pelo surgimento de um mercado global. A necessidade de importar levou certos países a exigirem dos países exportadores condições de produção coerentes com o motivo de seu mercado - GEE para os Estados Unidos (EUA) da América e União Europeia (UE), por exemplo. As certificações[2] de sustentabilidade adotaram então a função de atestá-las para permitir sua comercialização entre países. Na sua elaboração, foram chamados os diferentes atores para negociar o que deveria ser a definição mais apropriada para uma produção sustentável de biocombustíveis. Esta interação, entre os atores privados e públicos, de forma coordenada em diferentes fóruns de discussão, realça a importância da governança na transição para a sustentabilidade (SMITH; STIRLING; BERKHOUT, 2005). A classificação dos esquemas globais de indicadores ou certificações realizada por Herrera e Wilkinson (no prelo) em função dos atores e dos objetivos identificou uma governança global dos biocombustíveis baseada na intervenção do estado.

Daí surge a polêmica sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis e, principalmente, sobre o uso do conceito. Se, por um lado, os governos têm o poder de determinar uma transição para modos de produção mais sustentáveis em seus territórios, por outro, por meio das certificações, terão também o poder de influenciar as práticas nos países exportadores. O mercado global de biocombustíveis, hoje em dia, só é possível graças à aquisição de certificados de sustentabilidade. Ao impor suas regras, os governos importadores estão obrigando o produtor de biocombustíveis do país exportador a

modificar seus hábitos, caso elas não façam parte das exigências nacionais. A regulamentação poderia incluir os critérios de sustentabilidade para as outras atividades que utilizam os recursos, reduzindo assim os custos da certificação. Não obstante, resta a discussão sobre a adaptação da definição de sustentabilidade às condições de cada país.

Transição para a sustentabilidade

Na transição para a sustentabilidade[3], os sistemas sociotécnicos são alterados para incluir práticas cada vez mais sustentáveis (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012). Como sistema de inovação, o setor de biocombustíveis potencializa interações entre seus elementos, de modo a responder a problemas de sustentabilidade que vão surgindo à medida que o conhecimento sobre o assunto cresce. Se, no início, os problemas eram relativos ao desenvolvimento econômico e à segurança energética, com a expansão do mercado, passaram a ser revestidos de uma preocupação ambiental e social, aproximando-se do conceito da sustentabilidade baseado nos três pilares.

A primeira fase da transição experimentada pelo mercado de biocombustíveis (anos 70 a 2005) caracteriza-se pela atuação governamental específica no âmbito nacional. A indústria de biocombustíveis dos EUA e do Brasil ressurgiu na década de 70 como consequência de intervenções estratégicas dos governos nacionais, na tentativa de contrapor os impactos econômicos da dependência energética das importações de petróleo e atender ao *lobby* agrícola da cana e do milho. Do mesmo modo, a problemática global das mudanças climáticas estimulou a UE a considerar, em 2003 (Diretiva 2003/30/CE), os biocombustíveis como fonte renovável de energia para os transportes. A diferente estrutura dessa indústria nos três países confirma que os eventos globais podem dar origem a diferentes soluções que dependem de fatores múltiplos, de ordem técnica, econômica e política (GEE; MCMEEKIN, 2010).

A segunda etapa (2005 a 2009) inicia-se com a extensão do mercado para o contexto internacional. Em 2005, os EUA criaram a Lei da Política Energética, em que determinaram o Padrão de Combustíveis Renováveis (RFS, na sigla em inglês), com metas de consumo de combustíveis renováveis. Com o sucesso do desenvolvimento da capacidade de produção, o problema passou a ser os impactos sociais e ambientais, especialmente em relação às mudanças climáticas e a utilização de culturas alimentares para a produção de um combustível. A "revolta da *tortilla*", de 2007, no México, marcou o início de um debate global sobre "alimentos *versus* combustível", devido ao aumento do preço do milho nos EUA. A discussão foi alimentada, em 2008, com a publicação de Searchinger *et al*. (SEARCHINGER *et al*., 2008) denunciando o impacto ambiental das mudanças indiretas do uso do solo (ILUC, pela sigla em inglês). Estas controvérsias limitaram um posterior desenvolvimento do sistema (GEE; MCMEEKIN, 2010) e abriram os EUA às importações de biocombustíveis. Em decorrência, foi apresentada ao Brasil a oportunidade de exportar biocombustíveis aos EUA, mas também para a UE. Enquanto, no primeiro

país, o foco estava na segurança energética, nos investimentos domésticos para produção de etanol e a intenção de reduzir as emissões de GEE, a UE buscou, principalmente, suprir seu limitado mercado e se proteger das críticas. Para isso, incluiu na Diretiva RED 2009 critérios sobre biodiversidade e valores mínimos de redução de emissões de GEE para que o volume de biocombustíveis utilizado pudesse ser contabilizado no cumprimento dos compromissos relativos à mitigação das mudanças climáticas. A reformulação da problemática social e ambiental e sua articulação no sistema de inovação foram evoluindo com o avanço do conhecimento científico e a renegociação do problema. Assim, foi inculcado ao setor de biocombustíveis o conceito de sustentabilidade.

A criação de um mercado global vinculado a exigências de sustentabilidade propriamente dita compõe a terceira fase (2009 até hoje). A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, na sigla em inglês) determinou uma classificação dos biocombustíveis em função da redução de emissões de GEE quando comparadas com o uso de combustíveis fósseis. Graças à intervenção do setor empresarial sucroenergético, representado pelo Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais (ICONE) e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), o etanol brasileiro passou a ser considerado, em 2010, um "combustível avançado" (por reduzir em pelo menos 50% das emissões, se comparado com o uso de gasolina), gozando assim de privilégios frente à importação. De fato, a UNICA, principal porta-voz do agrobusiness da cana brasileira, aproveitou a abertura do mercado global para instalar estrategicamente escritórios em Washington (EUA) e em Bruxelas (Bélgica), sede da Comunidade Europeia. Entre suas funções, consta a consolidação da imagem do etanol como modelo sustentável de bioenergia e uma maior expansão do mercado. Coincidentemente, em 2008 e 2009, o Brasil exerceu o papel de vice-presidente da Parceria Global de Bioenergia[4] (GBEP, pela sigla em inglês), fórum internacional de negociações em nível governamental.

Os motivos para apoiar a produção e seus pesos relativos variam, tomando um viés mais setorial (*lobby* empresarial, etanol/biodiesel, social/ambiental, por exemplo), geopolítico, macroeconômico etc., à medida que o sistema dos biocombustíveis vai se alterando. Assim, a próxima fase da transição para a sustentabilidade poderá estar concentrada no desenvolvimento de novas tecnologias de biocombustíveis, sustentáveis e adaptadas a cada país produtor.

O caso brasileiro

A trajetória do mercado de etanol no Brasil é um claro exemplo das transições do sistema sociotécnico dos biocombustíveis[5]. Seu setor foi se consolidando graças à atuação do governo em resposta à elevação do preço do petróleo e a uma superprodução de açúcar. Em 1931, o governo lançou o primeiro mandato (Decreto nº 19.717/1931) de mistura de etanol (5%) com a gasolina (importada). Em 1938, o Decreto-Lei 737 ampliou a mistura a toda a gasolina produzida no Brasil e cita claramente os dois problemas

domésticos. Em 1975, surgiu a mesma conjuntura, porém, com mais intensidade, devido à crise do petróleo e ao forte desenvolvimento da indústria automobilística durante o regime militar. A resposta a este novo período foi o reforço da composição do sistema sociotécnico de 1931 com o programa Proálcool de 1975. O tímido estímulo de 1931 para a transformação da cana-de-açúcar em combustível iniciou a construção da infraestrutura do mercado, enquanto o Proálcool focalizou o impulso da produção no campo e a multiplicação das indústrias. Após um período de estagnação, a nova tecnologia *flex-fuel*, lançada em 2003, representou mais uma mudança no sistema, turbinando o mercado até chegar a 87% da frota de novos veículos, em 2012 (ANFAVEA, 2013).

A demanda de sustentabilidade, vinda principalmente da União Europeia, representou, no início do mercado global, poucas modificações para o complexo brasileiro da cana. A intervenção do estado no setor da cana-de-açúcar já se dirigia às questões sociais e econômicas. O programa de eliminação das queimadas no Estado de São Paulo foi resultado dos problemas respiratórios causados na população vizinha às plantações e, não, como nos outros países, para reduzir as emissões de GEE. A problemática das mudanças climáticas se espalhou devido aos compromissos dos países desenvolvidos para sua mitigação. Com ela, veio a preocupação com o desmatamento da Amazônia, vinculada ao ILUC, que, por sua vez, também tocou na questão da segurança alimentar, pelos impactos indiretos na produção de alimentos.

O mercado global representou uma nova fase da transição do sistema sociotécnico do etanol brasileiro, em função da possibilidade de exportação. Enquanto o aumento da demanda externa permitiu cogitar uma expansão da produção, o governo teve que considerar tornar suas práticas mais sustentáveis aos olhos dos países importadores. No mesmo ano da publicação da nova diretiva europeia com critérios de sustentabilidade, o governo brasileiro criou um decreto (nº 6.961/2009) para o Zoneamento Agroecológico da Cana (ZAE Cana), em que limita o financiamento público do setor à expansão e produção de cana-de-açúcar de forma sustentável. Por outro lado, empresas estrangeiras aproveitaram que a crise financeira obrigou o setor a parar os investimentos e a vender algumas usinas para entrar em território brasileiro. Desde 2008, 42 de 330 usinas do Centro-Sul já fecharam as portas e, com a fusão de algumas, o mercado se concentrou, sendo que as cinco principais empresas são de capital 100% estrangeiro (JANK, 2013; WEBIOENERGIAS, 2013). A transformação do etanol em *commodity* também exigiria um maior mercado global e, assim, iniciou parcerias com outros países, como os da África. De fato, o mercado global de biocombustíveis, especialmente o brasileiro, está de olho no continente africano, como fonte de recursos (terra principalmente) e como potencial ator na governança global.

Em 2012, já existiam aproximadamente 76 países ou regiões com mandatos ou metas de mistura de biocombustíveis com combustíveis fósseis (etanol/gasolina ou biodiesel/diesel) (REN21, 2013, p. 21). No GBEP, ao lado dos outros dois principais atores (EUA e a UE), o Brasil exerce claramente o papel de representante dos países emergentes e em desenvolvimento. Esse papel se deve à utilização de sua experiência com o etanol – regulado

por mandatos há 82 anos – como modelo de programa eficiente e sustentável para o fomento da bioenergia. Pelo olhar brasileiro, os biocombustíveis representaram uma oportunidade para reforçar a inserção política do país no contexto internacional. Do ponto de vista global, trouxeram a discussão da sustentabilidade ao processo de elaboração de políticas públicas vinculadas à produção de biocombustíveis no Brasil.

Pode-se dizer que as certificações de sustentabilidade, instrumentos de mercado bilaterais, foram as forças impulsoras de uma regulação no Brasil referente à participação do etanol no desenvolvimento sustentável do país, no sentido mais amplo (3 pilares), representado pelo ZAE Cana. Ao mesmo tempo, elas dependem das políticas públicas para seu cumprimento e estas, por sua vez, do consenso internacional que irá definir o que devem considerar para alcançar a sustentabilidade (HERRERA; WILKINSON, no prelo).

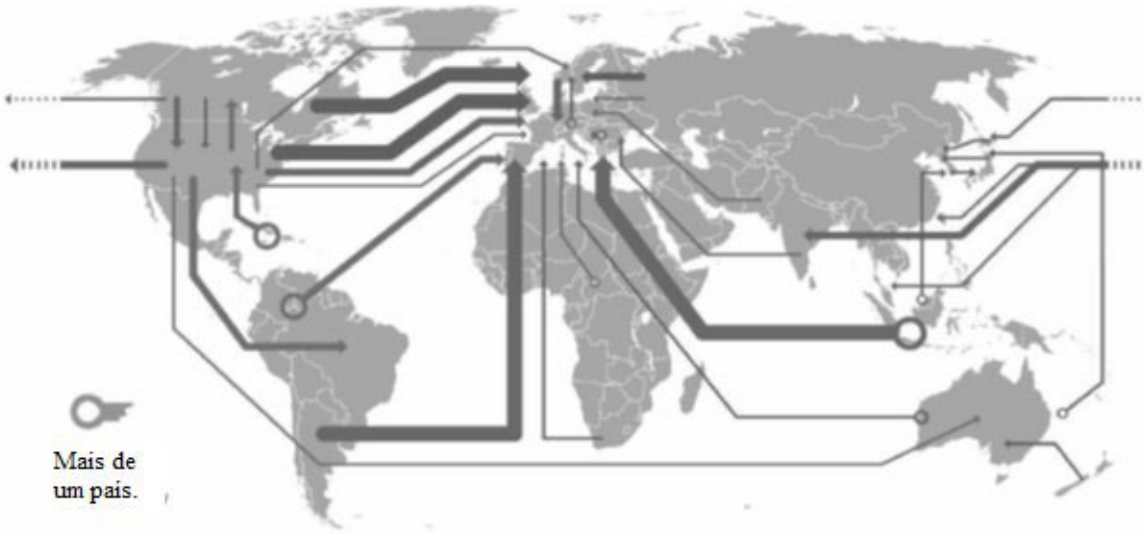
Porém, o desenvolvimento sustentável não se limita aos biocombustíveis, sendo que a cadeia de produção interage com outros mercados. Assim, as políticas públicas poderiam diferenciar-se em dois setores, em função de suas características e seus impactos, o agrícola e o industrial. No primeiro, deve-se considerar os biocombustíveis como um produto industrial oriundo da agricultura, em que competem por recursos com outros mercados. Por sua vez, o setor industrial vê-se influenciado pelos mandatos nacionais e internacionais de fomento à demanda de biocombustíveis, além dos mercados livres que podem estimulá-la, interagindo com os mercados de energia. O Brasil deu um passo nessa direção ao mudar, em 2011, a classificação do etanol, de produto agrícola, para combustível estratégico. A responsabilidade de sua regulação passou a ser, então, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), para a fase agrícola, e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o produto energético em si.

Soberania nacional: fase agrícola da produção de biocombustíveis

A matéria-prima dos biocombustíveis é a biomassa. Os biocombustíveis líquidos podem ser: de primeira geração (1G), quando originários de culturas agrícolas; de segunda geração (2G), quando são produzidos a partir de resíduos ou coprodutos de indústrias; ou de terceira geração (3G), quando as fontes não competem por terra. Para sua geração, recursos são necessários: água, terra, insumos, mão-de-obra e condições climáticas favoráveis. Estes recursos pertencem ao patrimônio nacional e, portanto, sua proteção decorre da responsabilidade do estado frente à ocupação do solo.

Soberania nacional também significa independência para o uso de seus recursos. Noventa e nove por cento dos biocombustíveis produzidos no mundo são de primeira geração, devido ao estágio inicial de comercialização e pesquisa em que se encontram a 2G e a 3G (HLPE, 2013). Como mostra a figura a seguir, existe um fluxo de biocombustíveis entre os países que obriga a considerar uma maior utilização dos recursos nacionais para atender às demandas domésticas e de outros países. Dos impactos destas demandas, vêm os motivos para polemizar a produção dos biocombustíveis.

Figura - Fluxo do comércio líquido de pellets de madeira, biodiesel e etanol, 2011.



Fonte: adaptado do REN21 (HLPE, 2013).

A maior crítica dos biocombustíveis de 1G é a competição por recursos. Ao analisar sua cadeia de produção, destacam-se a água e a terra como os recursos mais polemizados pela sua influência na agricultura (HERRERA; PEREIRA JÚNIOR; LA ROVERE, no prelo). No Brasil, tanto no caso do etanol quanto do biodiesel, as culturas utilizadas podem ser fonte de energia e alimentos (vide a cana-de-açúcar e a soja, respectivamente). Devido ao debate "alimentos *versus* combustível" pelo uso dos mesmos recursos, as políticas públicas precisam considerar uma agricultura multifuncional – e não apenas ligada ao produto final da cadeia. Os biocombustíveis são uma alternativa econômica para a agricultura de alguns países. A própria Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda analisar cada caso antes de empreender a produção de biocombustíveis, por ela poder ser vantajosa, dependendo das condições agroclimáticas e sociais (FAO, 2013). O uso dos recursos deve ser planejado para as diferentes atividades, de modo a maximizar o desenvolvimento sustentável do país.

As certificações de sustentabilidade atuais separam os fins, adicionando critérios específicos a cada produto em função do mercado desejado. Hoje, existem certificações para a avaliação dos mercados nacionais (GBEP); para a comercialização com determinados países/regiões (como, por exemplo, EUA ou UE); para provar a responsabilidade social da empresa; etc. Porém, por serem um instrumento de verificação entre empresas, devem estar baseadas numa regulação nacional que garanta a inclusão da

sustentabilidade nas atividades. Na agricultura, os recursos naturais do país devem ser preservados e o planejamento de seu uso deve permitir escolher a atividade mais adequada ao desenvolvimento sustentável. Do ponto de vista da segurança energética, as políticas públicas devem fomentar a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional.

Os biocombustíveis na política energética brasileira

No Brasil, a biomassa (da cana, lenha e carvão vegetal) contribui com 25,5% da matriz energética brasileira. Sua importância é significativa, tendo-se em conta que é a segunda fonte mais utilizada depois do petróleo e seus derivados (39,2%). A bioenergia da cana-de-açúcar (etanol e outras fontes de energia, como a bioeletricidade) ocupou, em 2012, uma parcela de 15,4% do suprimento energético nacional, quase equiparada à hidroeletricidade (13,8%), enquanto o biodiesel respondeu por 1% (EPE, 2013).

Apesar de a crise do petróleo ter sido um dos motivos para a criação do Proálcool, hoje em dia, o consumo de etanol no mercado livre brasileiro não está vinculado aos preços internacionais do petróleo. A política de controle da inflação a partir do congelamento dos preços da gasolina a um nível inferior ao internacional obriga variar o percentual de mistura do etanol anidro para controlar os preços da gasolina vendida nos postos (gasolina C). Por outro lado, o decaimento do setor, desde a crise financeira de 2008, afetou a competitividade do etanol hidratado em relação à gasolina C, reduzindo seu consumo e obrigando o país a importar gasolina para atender à demanda dos veículos leves. Além disso, o Brasil viu-se levado a importar também etanol de milho dos EUA para cumprir os mandatos de mistura e a venda de gasolina C. De fato, existe uma troca de etanol entre o Brasil (etanol de cana-de-açúcar) e os EUA (etanol de milho, menos sustentável que o brasileiro) que, em teoria, prejudica a sustentabilidade do setor. Em 2011, ocorreu o auge das importações vindas dos EUA, na ordem de um milhão de toneladas (95% do total). Em 2012, o Brasil exportou para os EUA um recorde de 2 milhões de toneladas, 66% do total (NOVACANA, 2013). Segundo um estudo da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), este negócio aumentaria em 34% as emissões de CO_2 se comparado a um incremento da produção nos EUA de 4,5 bilhões de galões entre 2010 e 2015 [4]. As razões do mercado para a promoção da sustentabilidade no transporte terrestre se desvanecem então: primeiro, devido ao aumento das emissões durante a troca; segundo, por trocar um combustível dito "avançado", conforme as regras dos EUA, por outro, menos sustentável; e, terceiro, pela dependência do Brasil das importações de gasolina e etanol; o que prejudica as mudanças climáticas e a segurança energética (HERRERA; PEREIRA JÚNIOR; LA ROVERE, No prelo).

Os biocombustíveis contribuem com a segurança energética de um país pela diversificação de fontes energéticas e pelo aumento da autonomia energética do país. Como substitutos dos combustíveis fósseis, reduzem as importações de petróleo e contribuem com a independência do país em relação à geopolítica do petróleo. De modo

geral, a produção varia em função da previsão de preços do óleo cru: preços mais elevados estimulam a produção além dos mandatos, enquanto preços baixos exigem a intervenção dos governos para cumpri-los (HUANG et al., 2012). Não obstante, no Brasil, a segurança energética, do ponto de vista da diversificação de fontes, depende de políticas públicas que assegurem a competitividade do etanol frente à gasolina para poder atender simultaneamente os mandatos e o mercado livre.

Conclusão

A sustentabilidade dos biocombustíveis é um tema polêmico, sem critérios concretos e cujo conceito se modifica com a influência dos diferentes interesses envolvidos, devido à complexidade dos impactos. A oposição entre o curto prazo desses interesses e a visão de longo prazo promulgada pelo conceito de sustentabilidade representa um desafio para a elaboração de políticas públicas. O estado, principal ator da governança do mercado global, tem a missão de atender às demandas (do combustível e por sustentabilidade) do mercado sem prejudicar os recursos nacionais, como proclama o "desenvolvimento sustentável". A influência de outros países acaba agindo como uma força impulsora na transição para a sustentabilidade, mas também aumenta a pressão sobre os recursos dos países exportadores.

As políticas públicas nacionais devem então evoluir em duas frentes: acerca da soberania dos recursos e seu uso (no longo prazo); e na matriz energética, de onde será comandada a demanda de biocombustíveis (no curto, médio e longo prazos). Se a sustentabilidade foi imposta pela necessidade de um mercado global, seus critérios são igualmente fruto da negociação internacional. O consenso alcançado pretende influenciar a regulação da produção nacional de biocombustíveis, cuja comercialização dependerá das certificações internacionais de sustentabilidade. A incorporação da diferenciação da regulação defendida neste artigo permite então afinar a estrutura da governança do mercado global identificada a partir das certificações (HERRERA; PEREIRA JÚNIOR; LA ROVERE, no prelo). Em definitiva, as políticas públicas devem promover um patamar mínimo de sustentabilidade, tendo em conta a crescente globalização dos mercados e seus impactos.

No Brasil, por exemplo, estima-se que existam 64,7 Mha (ou 7,5% do território) aptos para a produção sustentável de etanol, sendo que, hoje em dia, as plantações ocupam apenas 1% das terras agricultáveis (HERRERA; PEREIRA JÚNIOR; LA ROVERE, no prelo). Porém, conclui-se que o futuro dos biocombustíveis irá depender das políticas públicas de fomento aos biocombustíveis e de incentivos governamentais que estimulem a competitividade destes em relação aos combustíveis fósseis. Os primeiros biocombustíveis se basearam nas instituições existentes e utilizaram as culturas alimentares ("primeira geração"). Com a identificação de seus impactos, surgiu o impulso governamental pelos biocombustíveis de segunda geração, que aproveitam os resíduos e coprodutos das indústrias. Os de terceira (a partir de matérias-primas que não competem por recursos) ainda estão em fase de pesquisa. Portanto, os biocombustíveis representam uma fonte em transição que responde aos problemas que vão surgindo no abastecimento da matriz energética. Devido a um futuro incerto, esta deverá considerar tanto os combustíveis fósseis quanto outras fontes alternativas, como os carros híbridos, elétricos, etc. para suprir a demanda dos transportes.

Referências

ANFAVEA. Brazilian Automotive Industry 2013. [s.l: s.n.].

ANP. O que são os biocombustíveis. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=60467&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1381586004839>.

EPE. Brazilian Energy Balance 2013 - year 2012. Rio de Janeiro, Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2013. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf>.

FAO. Disponível em: <www.fao.org/>.

GBEP. GBEP - Global Bioenergy Partnership. Disponível em: <http://www.globalbioenergy.org/>.

GEE, S.; MCMEEKIN, A. How innovation systems emerge to solve ecological problems: Biofuels in the United States and Brazil. 2010.

GOODLAND, R. J. A.; DALY; EL SERAFY, S. Population, technology, and lifestyle: the transition to sustainability. Washington, D.C.: Island Press, 1992.

HERRERA, S.; PEREIRA JÚNIOR, A. O.; LA ROVERE, E. L. The Energy-Water-Land Nexus of the Brazilian Ethanol: Contribution for the Biofuels Sustainability Concept. Renewable and Sustainable Energy Reviews, no prelo.

HERRERA, S.; WILKINSON, J. The Role of the State in the Governance of the Global Biofuels Market – Lessons From Brazil. Environmental Politics, no prelo.

HLPE. Biofuels and food security. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Rome: [s.n.]. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/hlpe/hlpe_documents/HLPE_Reports/HLPE-Report-5_Biofuels_and_food_security.pdf>.

HUANG, J. et al. Biofuels and the poor: Global impact pathways of biofuels on agricultural markets. Food Policy, v. 37, n. 4, p. 439–451, ago. 2012.

JANK, M. S. Desafios institucionais e Tecnológicos para um novo ciclo de expansão do setor sucroenergético. Brasíla, Brazil: [s.n.].

MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. Research Policy, v. 41, n. 6, p. 955–967, jul. 2012.

NOVACANA. Disponível em: <http://www.novacana.com/>.

PILGRIM, S.; HARVEY, M. Battles over Biofuels in Europe: NGOs and the Politics of Markets. Sociological Research Online. - Sociological Research Online. - Vol. 15.2010, 3, 31 ago. 2010.

REN21. Renewables 2013 - Global Status Report. [s.l.] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2013. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf>.

SACHS, I. Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde. Estudos Avançados, v. 19, n. 55, Dezembro 2005.

SEARCHINGER, T. et al. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. Science, v. 319, n. 5867, p. 1238–1240, 29 fev. 2008.

SMITH, A.; STIRLING, A.; BERKHOUT, F. The governance of sustainable socio-technical transitions. Research Policy, v. 34, n. 10, p. 1491–1510, dez. 2005.

UNITED NATIONS. Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>. Acesso em: 9 out. 2013.

WEBIOENERGIAS. Usinas de etanol retomam fôlego em 2013. Disponível em: <http://www.webioenergias.com.br/noticias/biocombustiveis/1921/usinas-de-etanol-retomam-folego-em-2013.html>.

Notas

[1] Biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia (ANP, 2013).

[2] Certificações ou esquemas de certificação são estratégias em que critérios mínimos devem ser cumpridos pelos produtores (HERRERA; WILKINSON,

no prelo).

[3] Markard *et al*. (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012) definem as transições para a sustentabilidade como um conjunto de "processos de transformação de longo prazo, multidimensionais e fundamentais, por meio dos quais os sistemas sociotécnicos estabelecidos mudam para modos de produção e consumo mais sustentáveis".

[4]O *Global Bioenergy Partnership* (GBEP) é um fórum internacional de discussão da sustentabilidade dos biocombustíveis para orientar os governos na promoção da bioenergia tendo em conta três áreas estratégicas: desenvolvimento sustentável, mudança climática e segurança energética e alimentar (GBEP, 2013).

[5] O mercado de biodiesel começou em 2005 e pretende atender principalmente a demanda doméstica.

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.

Sistemas eletrônicos de energia renovável: desafios e soluções para uma vida sustentável

Maria Dias Bellar
Professora do Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações – DETEL/UERJ
Luís Fernando Corrêa Monteiro
Professor do Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações – DETEL/UERJ
José Paulo Vilela Soares da Cunha
Professor do Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações – DETEL/UERJ
Tiago Roux de Oliveira
Professor do Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações –DETEL/ UERJ

Resumo

Há uma tendência mundial ao crescimento do consumo de energia elétrica face aos incentivos por melhoria da qualidade de vida, especialmente nos países emergentes. Para atender a essa demanda, é preciso que a produção, distribuição e uso da energia elétrica sejam realizadas por métodos mais eficientes, economicamente viáveis e sustentáveis. Uma maior inserção das fontes de energia renovável no setor elétrico para geração estacionária e veicular é um caminho que pode ajudar a amenizar a intensidade desses desafios. Destaca-se a importância da pesquisa e desenvolvimento da eletrônica de potência por ser a tecnologia que viabiliza a integração das fontes renováveis de energia à rede elétrica ou para uso na geração isolada. É apresentado um panorama da eletrônica de potência no cenário atual das energias renováveis, com ênfase na solar fotovoltaica e eólica. São apresentados de forma sucinta alguns resultados obtidos de trabalhos desenvolvidos pelos autores nessa área.

Palavras-Chave: fonte solar fotovoltaica, turbina eólica, eletrônica de potência, Fontes renováveis de energia, sistemas eletrônicos de energia renovável.

Electronic systems with renewable energy sources
Challenges and Solutions to Sustainable Life

Abstract

There is a growing trend towards the continuous increase of electrical energy consumption worldwide, as a consequence of the intensive incentives for improvements on the quality of life, especially in the countries at newly advanced economic development. In order to satisfy these demands, the sustainable, efficient and economically viable management of the generation, distribution and usage of electrical energy is required. Increased use of renewable energy sources for stationary and vehicular purposes is the way to reduce the impact of such challenge. The importance of research and development in power electronics is highlighted, since this is the enabling technology for the widespread integration of renewables, either into the distribution grid or for stand-alone off-grid facilities. A brief overview of power electronics applied to renewable energy systems is presented, with emphasis on wind and solar photovoltaic types. Some results obtained by the authors in this field are also shortly presented.

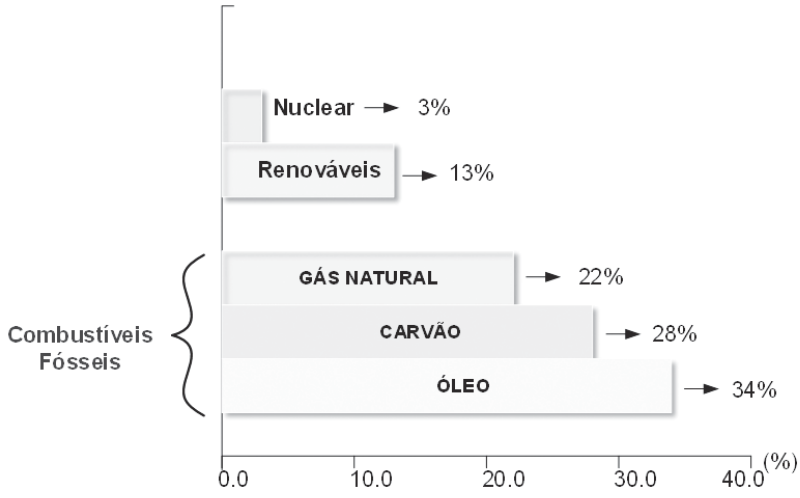
Keywords: solar photovoltaic energy source, wind turbine, power electronics, renewable energy sources, electronic systems with renewable energy sources.

1 - INTRODUÇÃO

A expansão da população junto à constante necessidade de melhorias na qualidade de vida (vestuário, alimentação, moradia e mobilidade, entre outros itens) tem se refletido no aumento da demanda por fornecimento de energia elétrica. Mundialmente, isto tem produzido uma gande pressão sobre os recursos energéticos existentes e no meio ambiente. Há algum tempo é conhecido que a queima de combustíveis fósseis, incluindo a utilizada para a geração de energia, muito contribui para o aumento da poluição do meio ambiente e do aquecimento global (BOSE, 2010; CHAN, 2006; PERRY, 2000). Tal notícia, porém, tem ressurgido na mídia (CHANG, 2013), e com dados alarmantes sobre o derretimento de gelo das calotas polares, reforçando o interesse e a urgência pela maior inserção das fontes renováveis de energia na matriz energética, bem como pela adoção de práticas e tecnologias sustentáveis. A Figura 1 apresenta um perfil (ano 2008) do panorama global da geração de energia. Observa-se que mundialmente, aproximadamente 84% de toda a energia é gerada a partir de combustíveis fósseis sendo 28% desse montante obtida do carvão, 22% do gás natural, e 34% do petróleo. Os restantes 3% e 13% são resultantes da geração nuclear e das fontes renováveis, respectivamente, sendo que no último caso são incluídas as hidroelétricas (maioria), eólica, solar, geotérmica, biocombustíveis, ondas e marés (BOSE, 2013).

A produção, conversão e uso da energia são etapas essenciais para o processo de expansão do setor energético, o que requer soluções economicamente viáveis e eficientes. Os primeiros sinais de aumento de preço do petróleo no início da década de 70, aliado a crescente demanda por energia elétrica, pressionaram os governos de diversos países por soluções para o aumento da potência instalada dos sistemas de energia. A partir daquela época, várias das soluções adotadas, por serem consideradas mais viáveis sob o ponto de vista técnico e econômico, apontaram para o aumento na instalação de novas usinas hidrelétricas, nucleares e termoelétricas. Porém, essas soluções, por causarem um grande impacto ambiental, em função dos danos à flora e à fauna, foram sendo cada vez mais difíceis de serem implantadas, ou mesmo inviabilizadas, devido às pressões políticas e sociais.

Figura 1: Panorama global da geração de energia



Fonte: Ilustração baseada em dados de (BOSE, B. K., 2013), e produzida por BELLAR, M. D.

No entanto, estudos recentes indicam que mesmo fazendo uso apenas das fontes de energias renováveis associadas a elementos armazenadores de energia (banco de baterias, e *flywheel*, por exemplo) é possível atender a toda a demanda de energia do mundo (JACOBSON, DELUCCHI, 2009). Além disso, há décadas que a eletrônica de potência tem contribuído para a melhoria da eficiência energética dos sistemas de potência, sejam estacionários ou veiculares, bem como para viabilizar o uso da energia proveniente das fontes de energias renováveis. Alguns aspectos históricos e considerações gerais sobre a aplicabilidade desta sub-área da engenharia elétrica, no sentido de viabilizar soluções para aumentar a capacidade instalada de potência com sustentabilidade ambiental, serão apresentados a seguir.

A Revolução da Eletrônica para a Sustentabilidade

A eletrônica de potência é a área que trata da conversão e do controle da energia elétrica através do uso de dispositivos semicondutores de potência, tais como o SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) e os transistores de potência do tipo MOSFET (*Metal-Oxide-Semicondutor Field Effect Transistor*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Esses dispositivos são comumente denominados por *chaves* devido ao modo de operação liga/desliga a que são submetidos. Conversores chaveados são, então, circuitos baseados em dispositivos semicondutores de potência atuando no modo liga/desliga e que realiza alguma função de conversão da energia elétrica que envolve as modalidades em corrente contínua (CC) e/ou corrente alternada (CA). É comum dizer-se que a invenção do transistor (em 1948 por Bardeen, Brattain e Shockley da Bell Laboratories) trouxe-nos a primeira revolução da eletrônica, e que a invenção do tiristor deu início a segunda revolução da eletrônica. A Figura 2 ilustra resumidamente os fatos importantes que construíram a civilização industrial que se possui nos dias atuais.

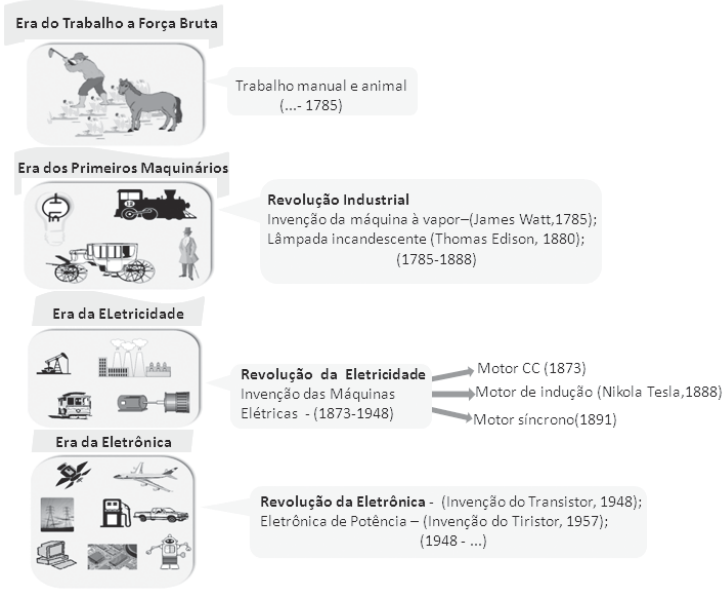
A invenção do primeiro tiristor, o SCR, em 1957 pela General Electric, foi um marco para o estabelecimento da eletrônica de potência como uma tecnologia bem sucedida para aplicações industriais, comerciais e de tração (WILSON, 2000). Alguns fatores contribuiram para a consolidação desta tecnologia: a) a superioridade das características elétricas das chaves semicondutoras frente as válvulas a vácuo, a tiratron e a ignitron; b) os avanços nos dispositivos de controle que permitiram a implementação de funções de controle em malha fechada de maior complexidade; c) o desenvolvimento da teoria e tecnologia de conversores expandindo os já conhecidos conceitos de retificação e inversão, anteriormente implementados com valvulas a vácuo; d) a crescente substituição de sistemas de controle com partes móveis por sistemas de controle eletrônicos, mais rápidos, mais eficientes, com tamanho e custos de manutenção reduzidos.

Desde os anos 1960 que as pesquisas têm sido intensas no desenvolvimento dos dispositivos semicondutores de potência. Este avanço tem sido caracterizado por melhorias seja na capacidade de bloqueio de tensão, na capacidade de corrente, seja na resposta à

frequência de chaveamento, ou na redução das perdas de condução. Atualmente estão disponíveis no comércio o IGBT de 6500 V e 750 A, e o IGCT (*Integrated-Gate Commutated Thyristor*) de 5500 V com corrente até 900 A (KOURO, S. *et al.*, 2012). A multiplicidade de dispositivos semicondutores de potência no mercado tem propiciado o aumento do uso de conversores chaveados nas mais variadas aplicações. É importante ressaltar que no cenário das fontes de energias renováveis, a eletrônica de potência é a tecnologia que viabiliza a integração de tais fontes à matriz energética, bem como a sua utilização na área veicular. Portanto, hoje grande parte da energia elétrica consumida é processada eletronicamente e isto tende a aumentar a medida em que a população cresce e a demanda às comodidades tecnológicas também. Estima-se que a substituição dos tradicionais sistemas industriais de acionamento de motores, baseados na velocidade fixa e com controles por válvulas mecânicas, pelos sistemas de eletrônica de potência à velocidade variável, possam promover a economia da energia em até 20% (BOSE, 2013). Esta redução de perdas energéticas representa uma importante contribuição à sustentabilidade uma vez que, segundo dados de (WAIDE & BRUNNER, 2011), os motores elétricos consomem 45%-46% de toda a energia elétrica consumida no mundo. No caso dos Estados Unidos, segundo o *"Electric Power Research Institute"*, os motores consomem aproximadamente 60% a 65% de toda a energia produzida pelo sistema elétrico ("*grid-generated energy"*) daquele país (BOSE, 2013).

Outro aspecto a se considerar é que o desenvolvimento de um setor energético sustentável requer uma capacidade instalada de recursos humanos com a adequada qualificação para atuar e contribuir na especificação, utilização, projeto, pesquisa e desenvolvimento de processos e equipamentos elétrico-eletrônicos, seja na indústria, na academia ou nos setores afins. No caso da eletrônica de potência, a grande variedade de suas aplicações nos diversos setores industriais, se reflete numa variedade de disciplinas ou de conhecimentos a serem adquiridos por alguém que desejar atuar na área. A Figura 3 ilustra a interdisciplinaridade dessa área de trabalho.

Figura 2: A evolução da civilização industrial



Fonte: (BOSE, B. K., 2010). Ilustração produzida por BELLAR, M. D.

Nas seções seguintes, serão abordados alguns desafios tecnológicos no cenário atual, onde se insere a pesquisa na área da eletrônica de potência, aplicada ao setor das fontes de energia renovável. Também serão apresentados sucintamente alguns resultados obtidos dos trabalhos desenvolvidos pelos autores nessa área.

Figura 3: Interdisciplinaridade da eletrônica de potência

Fonte: (MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P., 2003).
Ilustração produzida por BELLAR, M. D.

2. APLICAÇÕES ESTACIONÁRIAS E VEICULARES COM FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA

A engenharia de sistemas de potência caracteriza-se pela geração, transmissão, distribuição e controle da energia elétrica. Trata-se da sub-área mais antiga e tradicional da engenharia elétrica. Enquanto que no início do século XX, era de atuação restrita às aplicações de sistemas elétricos estacionários, os sistemas de potência foram gradualmente introduzidos às aplicações veiculares marítimas, automotivas e aeroespaciais. Atualmente o projeto do sistema de potência constitui-se no aspecto fundamental para o desenvolvimento de um veículo, seja tripulado ou robótico, seja marítimo de superfície, terrestre, submarino ou espacial (EMADI, EHSANI, MILLER, 2004). Nesse sentido, na área das aplicações com fonte renovável de energia podem ser também consideradas duas vertentes de tecnologia de eletrônica de potência: uma voltada para a geração estacionária de energia, isolada ou conectada à rede elétrica, e outra direcionada para o setor veicular.

Geração Estacionária

Atualmente, das tecnologias de fontes renováveis existentes, a eólica e a solar fotovoltaica são as que se encontram num estágio de comercialização mais avançado. Hoje o estado da arte já proporciona turbinas eólicas para a faixa de potência até 8 megawatts (MW) com projeções para 10 MW para um futuro bem próximo (BLAABJERG, MA, 2013). No caso da solar fotovoltaica, destaca-se o aumento da sua popularidade por conta de grandes avanços tecnológicos na fabricação dos painéis (ou módulos) solares com consequente redução de preço, adicionado a sua grande modularidade que facilita a utilização em residências e em meio urbano. Para competir no mercado com outras formas de fornecimento de energia disponíveis à rede elétrica, estima-se que o custo de produção de um módulo PV deverá ser de aproximadamente um dólar americano por watt. Este preço é denominado *"grid parity"* (paridade com a rede), que é o ponto em que a energia fotovoltaica tem um custo igual ou menor do que a energia fornecida pela rede de distribuição. Há dados recentes que mostram que já está ocorrendo o rompimento da barreira da paridade com a rede em algumas localidades nos Estados Unidos, indicando que a tecnologia existente encontra-se num estágio bem competitivo (FAIRLEY, 2013).

Em geral, desde o início da formação das matrizes energéticas, principalmente voltadas ao abastecimento dos grandes centros urbanos e industriais, que a solução mais adotada tem sido a da geração centralizada associada a longas linhas de transmissão. Este modelo, porém, sempre apresentou limitações, não somente frente às dificuldades para a expansão do potencial energético, já mencionadas, mas também para o atendimento às comunidades localizadas em regiões rurais ou remotas, e que continua a ser um desafio até os dias atuais (BELLAR *et. al*., 2004(a); BELLAR et. al, 2004(b); MIRANDA et. al, 2004). No entanto, na última década, tem havido uma mudança de paradigma para a geração e distribuição de energia elétrica, muito em função da inserção no mercado e maior popularização das tecnologias de fontes renováveis, que no passado eram consideradas de muito alto custo.

O uso dos conversores de eletrônica de potência permite realizar conexões com as fontes renováveis (solar, eólica e outras) de maneira que é possível a realização de instalações isoladas (de especial interesse para as zonas rurais ou remotas) ou conectadas à rede elétrica. Além disso, torna possível o uso combinado entre diferentes fontes renováveis, que pode incluir elementos armazenadores de energia, bem como fontes não-renováveis (figura 6) quando necessário, de maneira a compor um sistema descentralizado de geração de energia e que pode situar-se mais próximo dos consumidores.

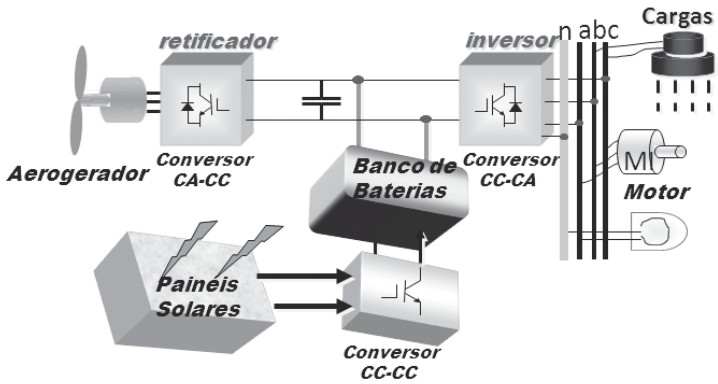
Essa unidade resultante de geração de energia, acoplada ou não à rede elétrica, tem recebido diversas denominações tais como unidade ou sistema distribuído de energia, ou sistema disperso de energia, e tem se constituído num novo paradigma para operar transformações nos sistemas de potência tradicionais rumo à sustentabilidade (GUERRERO et. al, 2010).

Há diversos aspectos a serem analisados no desenvolvimento desses sistemas distribuídos tais como: eficiência, distorção harmônica, densidade de potência dos conversores, flexibilidade para controles, confiabilidade, proteção e custos.

Também é importante destacar que, quando conectada à rede de distribuição, a geração de energia a partir de fontes renováveis pode ser usada, tanto para reduzir a dependência em energia de fontes não renováveis, como também para servir como fonte auxiliar a fim de suprir parte da demanda em caso de períodos de pico ou de falta de energia na rede de distribuição (TIRUMALA *et al*., 2002).

Na Figura 4 é apresentado um diagrama simplificado de um sistema distribuído isolado baseado em fonte eólica, solar fotovoltaica, banco de baterias e conversores de eletrônica de potência para realizar a interface entre fontes, baterias e cargas.

Figura 4: Diagrama simplificado de um sistema distribuído isolado.

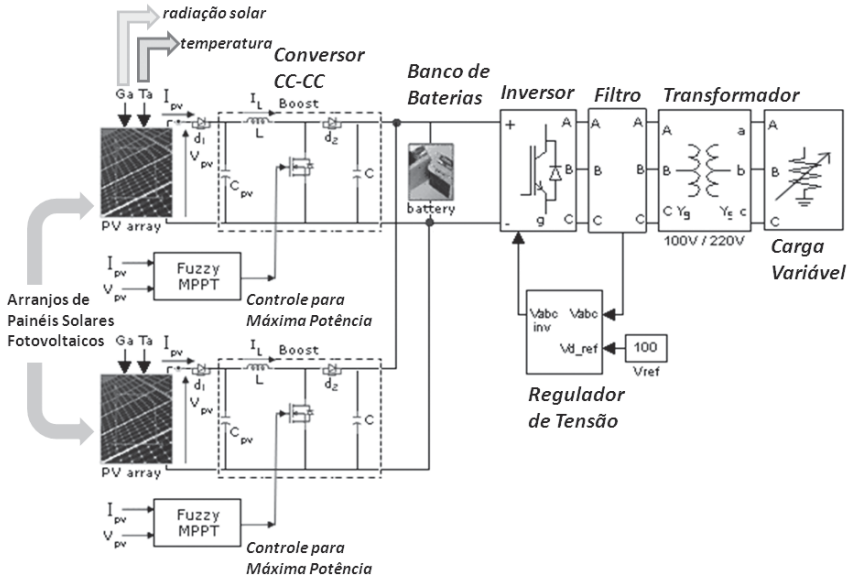


Fonte: Ilustração produzida por BELLAR, M. D.

A Figura 5 mostra um diagrama esquemático simplificado de um sistema de energia solar fotovoltaico do tipo *multi-string* (MYRZIK, CALAIS, 2003; CARRASCO *et al.*, 2006), estudado e desenvolvido em (TAVARES, 2009; TAVARES et. al, 2009). A fonte do sistema é composta por dois arranjos de painéis associados a um banco de baterias (Fosfato de Lítio do tipo EPOCH E1-12-40, fabricado por Valence). O primeiro arranjo fotovoltaico é formado por cinco painéis BP SX3200 em série e três séries em paralelo, totalizando 3 kW de potência. O segundo arranjo é formado por nove painéis KC130TM (do fabricante Kyocera) em série e três séries em paralelo totalizando 3510 W. Cada arranjo é conectado a um conversor do tipo elevador de tensão ("*Boost")* que opera com estratégias de controle por rastreamento do ponto de máxima potência ("*Maximum Power Point Tracking, MPPT"*). Resultados obtidos por simulação digital mostraram que a escolha adequada da técnica de controle MPPT pode melhorar a eficiência global do sistema e minimizar perdas de energia quando a mudança de radiação solar é frequente. Desse modo, a escolha do algoritmo de controle de MPPT pode influenciar na especificação

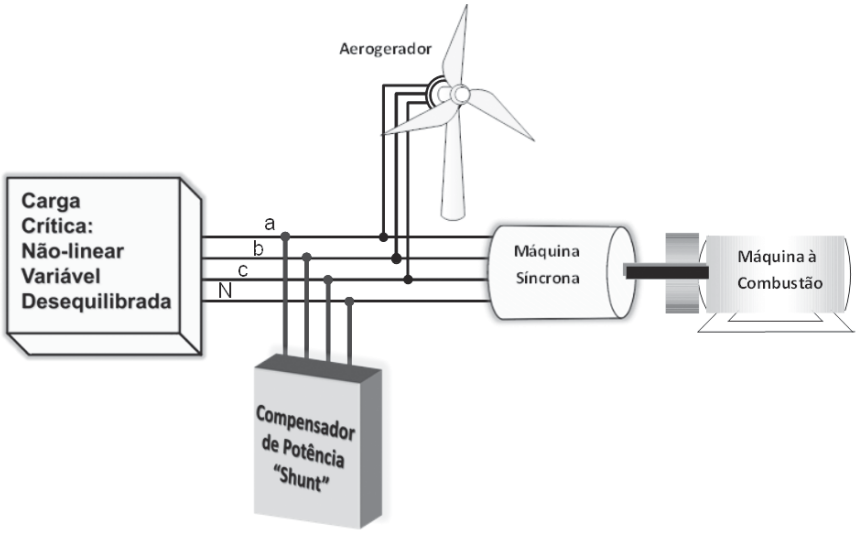
dos componentes do sistema. Isso tem um reflexo direto no peso, tamanho e custos dos equipamentos. Esses resultados estimulam a pesquisa de novas técnicas de controle de MPPT e de chaveamento dos conversores eletrônicos para aplicações com fonte solar fotovoltaica (AMINDE, 2011) ou eólica (figura 6).

Figura 5: Sistema solar fotovoltaico isolado, com potência total de painéis solares igual a 6510 W, baseado na configuração *multi-string*.



Fonte: (TAVARES, 2009). Produzida por TAVARES, C. A. P.

Figura 6: Diagrama simplificado de um sistema de geração distribuído baseado em fontes renovável e não-renovável.



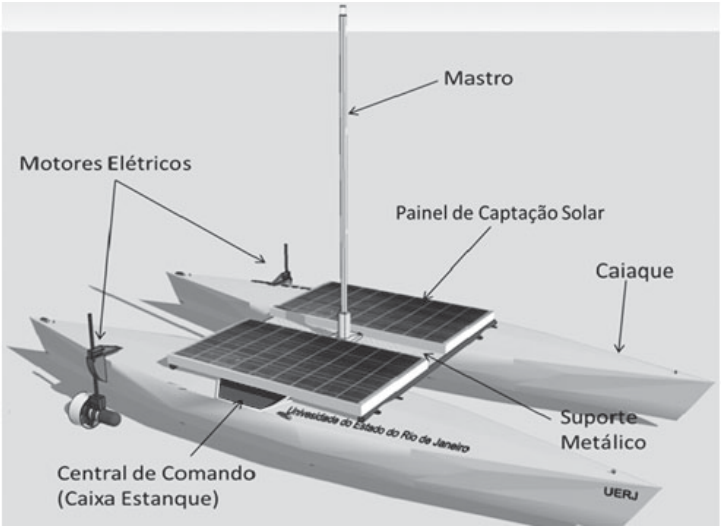
Fonte: (MONTEIRO et. al, 2009). Produzida por MONTEIRO, L.F.C.

Aplicação Veicular

Embora o veículo elétrico tenha sido inventado em 1828, os modernos veículos elétricos (*"Electric Vehicles – EVs"*), começaram a surgir no final dos anos 1980 e início dos anos 1990 (CHAN, 2013). O surgimento dos conceitos de "Mais Veículos Elétricos" (*"More Electric Vehicles – MEV"*) (EMADI, EHSANI, MILLER, 2004) e "Veículos Totalmente Elétricos" (*"All-Electric Vehicles"*, U.S. Department of Energy [on line]) deram estímulo a pesquisa de novas propostas de sistemas de potência veiculares com maior eficiência energética, capacidade para fornecer diferentes níveis de potência e atender a diversos tipos de cargas elétricas, com redução de peso e volume e maior segurança. A aplicação desses conceitos, em geral, tem resultado na substituição dos sistemas de energia convencionais, baseados na transferência energética por meios mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos, pelos sistemas elétricos baseados em eletrônica de potência. No entanto, o maior obstáculo para o uso mais amplo dos veículos elétricos situou-se na limitada capacidade energética das baterias como único sistema de armazenamento de energia. Os veículos híbridos-elétricos (*"Hybrid Electric Vehicles – HEV"*) surgiram como uma alternativa para isso, onde diferentes fontes de energia, renováveis e à combustível fóssil, associadas a elementos armazenadores de energia, funcionam de maneira integrada, o que lembra a configuração de um sistema de geração distribuída mencionado anteriormente (EHSANI, GAO, EMADI, 2010). Atualmente, essa tecnologia encontra-se já bem desenvolvida e em alto grau de comercialização, porém ainda sob continuados estudos e pesquisas.

Na Figura 7 é mostrada uma ilustração de um veículo marítimo autônomo (ou teleguiado) de superfície (CRUZ, ALVES, 2008) baseado em embarcação com casco duplo e painéis solares, que se encontra em estágio de desenvolvimento[1] no Laboratório de Eletrônica de Potência e Automação (LEPAT) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica (PEL) da Faculdade de Engenharia da UERJ (FEN/UERJ). Esse tipo de veículo encontra

Figura 7: Veículo marítimo autônomo de superfície baseado em embarcação com casco duplo.

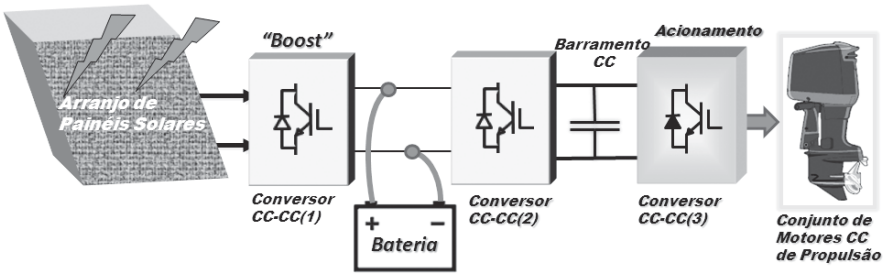


Fonte: (SCHULTZE, 2012). Ilustração produzida por SCHULTZE, H. J.

aplicações no monitoramento de dados para diversos fins tais como: melhoria no gerenciamento das condições do ecossistema marítimo; previsões de mudanças climáticas; prevenção contra danos causados por tragédias naturais ou por poluição; vigilância costeira para combate às práticas ilegais; e a viabilização da pesquisa científica. Por se tratar de um veículo elétrico e, portanto, muito dependente da energia fornecida por baterias, tem surgido na literatura inúmeras propostas de embarcações baseadas em fontes renováveis, procurando assim aumentar o período e o alcance de funcionamento do veículo (RYNNE; von ELLENRIEDER, 2010; DUNBABIN, GRINHAM, 2010). Porém nessas publicações há pouca ou quase nenhuma informação sobre a configuração do sistema de potência. Essa configuração varia em função dos tipos de cargas (instrumentação eletrônica, por exemplo) a serem supridas, das características dos motores escolhidos para propulsão, da conexão do banco de baterias, e das topologias de conversores eletrônicos de potência, entre outros aspectos.

Resultados preliminares de uma análise comparativa, entre diferentes configurações de sistemas de eletrônica de potência para propulsão de um conjunto de motores CC (muito usados em propulsão de veículos teleguiados), indicam que a configuração da Figura 8 pode apresentar um desempenho energético muito promissor para garantir maior autonomia do banco de baterias (PEREIRA, 2013).

Figura 8: Sistema de eletrônica de potência de um veículo teleguiado baseado na configuração série em linha.



Fonte: (PEREIRA, 2013). Ilustração produzida por BELLAR, M. D.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram revistos os fatos que marcaram a evolução da eletrônica e que deram curso o surgimento da eletrônica de potência. Desde então, a aplicação desta tecnologia tem proporcionado diversas soluções rumo à expansão energética com sustentabilidade, pela possibilidade de integração das fontes de energia renovável, associadas aos elementos armazenadores de energia, quando necessários, seja nos sistemas de geração estacionária ou veicular. Foram abordadas algumas dessas soluções, e alguns resultados de pesquisas realizadas pelos autores foram sucintamente apresentados. É certo, porém, que para que a sociedade no futuro se beneficie ao máximo com os resultados que essa tecnologia pode oferecer, são necessários maiores investimentos de infraestrutura educacional e laboratorial na formação de recursos humanos, direcionadas a uma consciência para o estudo, a pesquisa e a inovação no setor.

REFERÊNCIAS

AMINDE, N. O. Otimização em Tempo Real Aplicada a Sistemas Fotovoltaicos. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas Eletrônicos, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BELLAR, M. D.; AREDES, M.; SILVA NETO, J. L.; ROLIM, L. G. B.; AQUINO, A. F. C.; PETERSEN, V. Single-Phase Static Converters for Rural Distribution System. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'04, Ajaccio, Corcica, p. 1237-1242, 2004(a).

BELLAR, M. D.; AREDES, M.; SILVA NETO, J. L.; ROLIM, L. G. B.; FERNANDES, R. M.; MIRANDA, U. A.; AQUINO, A. F. C.; PETERSEN, V. C. Four Wire Single-Phase to Three-Phase System for Rural Distribution Network. In: 35th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'04, Aachen, Germany, v. IV. p. 1-7, 2004(b).

BLAABJERG, F.; MA, K., "Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1 , no. 3, pp. 139 – 152, Sept. 2013.

BOSE, B. K., "Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.4, no. 1, pp. 6 – 17, March 2010.

BOSE, B. K., "Global Energy Scenario and Impact of Power Electronics in 21st Century", *IEEE Trans. Ind. Electron*., vol. 60, no. 7, pp. 2638 – 2651, July 2013.

CARRASCO, J. M.; FRANQUELO, L. G.; BIALASIEWICZ, J. T.; GALVAN, E.; GUISADO, R. C. P.; PRATS, Ma. A. M.; LEON, J. I.; MORENO-ALFONSO, N., "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 4, p. 1002 – 1016, June 2006.

CHAN, C. C. Sustainable Energy and Mobility, and Challenges to Power Electronics. In: Proc. CES/IEEE 5th Int. Power Electron. and Motion Cont. Conf., IPEMC 2006, Shanghai, pp.1 – 6, Aug. 2006.

CHAN, C.C., "The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned", *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 1, pp. 206-212, Jan. 2013.

CHANG, K. Research Cites Role of Warming in Extremes. In: The New York Times, Sept. 5, 2013. Disponível em: http://www.nytimes.com/2013/09/06/science/earth/research-cites-role-of-warming-in-extremes.html?_r=0. Acesso em: 30 set. 2013.

CRUZ, N.A.; ALVES, J.C. Autonomous sailboats: An emerging technology for oceansampling and surveillance. In: IEEE 2008 OCEANS Conference, OCEANS'08, Quebec City, Canada, pp. 1-6, Sept. 2008.

DUNBABIN, M.; GRINHAM, A. Experimental Evaluation of an Autonomous Surface Vehicle for Water Quality and Greenhouse. In: IEEE 2010 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Anchorage, AK, pp. 5268 – 5274, May 2010.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A., *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell*

Vehicles: Fundamental, Theory and Design, 2nd edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2010.

EMADI, A.; EHSANI, M.; MILLER, J. M., *Vehicular Electric Power Systems - Land, Sea, Air,and Space Vehicles*, Marcel Dekker, Inc., 1st edition, New York, NY, U.S.A., 2004.

FAIRLEY, P., "Residential solar power heads toward grid parity", *IEEE Spectrum*, vol. 50, no. 4, pp. 12 – 13, 2013.

GUERRERO, J.M. ; BLAABJERG, F.; ZHELEV, T.; HEMMES, K.; MONMASSON, E.; JEMEI, S.; COMECH, M.P.; GRANADINO, R.; FRAU, J.I., "Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4 , no.1, pp. 52 – 64, March 2010.

JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A., "A path to sustainable energy by 2030", *Sientific American*, vol. 282, pp. 58-65, Nov. 2009.

KOURO, S.; RODRIGUEZ, J.;WU, B.; BERNET, S.; PEREZ, M., "Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies", *IEEE Ind. Appl. Mag.,* vol. 18, no. 4, pp. 26 - 39, July-Aug. 2012.

MIRANDA, U. A.; SILVA NETO, J. L.; BELLAR, M. D.; AREDES, M; FERNANDES, R. M. Implementação em DSP de um Conversor Monofásico-Trifásico (MONOTRI) para Eletrificação Rural. In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, RS, Brasil, pp. 1-6, 2004.

MYRZIK, J. M. A. CALAIS, M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - a review. 2003 IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, vol. 2, June 2003.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P., *Power Electronics Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

MONTEIRO, L.F.C. ; AFONSO, J.L. ; PINTO, J.G. ; WATANABE, E.H. ; AREDES, M. ; AKAGI, H., "Compensation Algorithms Based on the P-Q and CPC theories for Switching Compensators in Micro-Grids," *Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (Sobraep)*, v. 14, p. 259-268, 2009.

PEREIRA, M. V. P. Sistemas de Eletrônica de Potência para Barco Teleguiado Baseado em Módulos Solares Fotovoltaicos. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica – Ênfase em Sistemas de Potência, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PERRY, T. S. “The Environment”, *IEEE Spectrum*, vol. 37, no. 1, Jan. 2000.

RYNNE, P.F.; von ELLENRIEDER, K. D., “Development and Preliminary Experimental Validation of a Wind- and Solar-Powered Autonomous Surface Vehicle”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 971-983, Nov. 2010.

SCHULTZE, H. J. Projeto e Construção de uma Embarcação Teleoperada. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas Eletrônicos, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TAVARES, C. A. P. *Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

TAVARES, C. A. P.; LEITE, K. T. F.; SUEMITSU, W. I.; BELLAR, M. D. Performance evaluation of photovoltaic solar system with different MPPT methods. In: Conf. Rec. of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009, Porto, Portugal, p. 716-721, 2009.

TIRUMALA, R.; IMBERTSON, P.; MOHAN, N.;HENZE, C.; BONN, R. An efficient, low cost DC-AC inverter for photovoltaic systems with increased reliability. In: Conf. Rec. of the *IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, v. 2, p. 1095 – 1100, 5-8 Nov. 2002.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. In: Energy Series (working paper), International Energy Agency –, 2011. Disponível em: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_for_ElectricSystems.pdf

Acesso em: 30 set. 2013.

WILSON, T. G., “The Evolution of Power Electronics”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 3, pp.439-446, May 2000.

U.S. Department of Energy [on line]. Disponível em: http://energy.gov/. Acesso em: 30 set. 2013.

Nota

[1]Título do projeto - *“Projeto de Embarcações Não Tripuladas para Monitoração Ambiental e Defesa”*, com financiamento do Projeto FAPERJ – PRONEM (Edital FAPERJ no. 25/2010 – Apoio a Núcleos Emergentes de Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro – 2010), que foi concedido ao grupo LEPAT/ UERJ, sob a coordenação do Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha (FEN/Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações).

Recebido em 30 de setembro de 2013.
Aprovado em 08 de novembro de 2013.