

CAPÍTULO III Caracterização das Principais Fontes Renováveis

As principais fontes renováveis alternativas à fonte hídrica: solar, eólica e biomassa são descritas e caracterizadas segundo as condições vigentes no Brasil, incluindo potenciais e disponibilidades atuais e futuras, quando esses dados forem necessários às análises empreendidas no trabalho.

III.1 ENERGIA SOLAR

Quase todas as fontes de energia disponíveis na terra, utilizadas ou não pelo ser humano para seu sustento, podem ser trazidas para uma mesma base, origem de sua formação, a radiação solar que incide cotidianamente sobre a superfície do planeta.

Talvez a única fonte que fuja a esta regra seja a de origem nuclear, por ironia, exatamente a fonte primária de energia do próprio sol, que obtém sua potência das reações de fusão nuclear que ocorrem em sua estrutura.

CONSTANTE SOLAR – representa o valor da radiação que incide na área projetada do planeta acima da atmosfera em um ângulo reto. Esse valor é medido em $s = 1,366 \text{ kW} / \text{m}^2$.

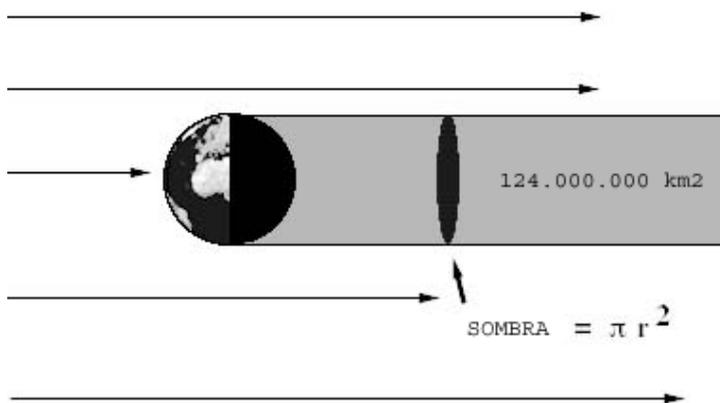


Figura III-1 – Radiação solar sobre a Terra

A radiação total incidente sobre a Terra é da ordem de:

$$R_{\text{solar}} = s \pi r^2 = 1,69 \times 10^{17} \text{ W}$$

A energia incidente em um ano:

$$E_{\text{solar}} = s \pi r^2 = 1,69 \times 10^{17} \text{ W} \times 8.760 \text{ h} = 1,48 \times 10^{18} \text{ kWh} = 1,28 \times 10^{21} \text{ kcal} = 1,28 \times 10^{14} \text{ tep}$$

Considerando que 30% desta energia é refletida de volta para o espaço, a energia absorvida por ano pelo planeta é da ordem de:

$$E_{\text{solar absorvida}} = 0,9 \times 10^{14} \text{ tep}$$

As reservas de carvão mineral, maior fonte de energia fóssil no mundo, são da ordem de $1,0 \times 10^{12} \text{ t} = 0,7 \times 10^{12} \text{ tep}$, ou seja, 128 vezes menor do que a energia solar absorvida pela Terra em um ano.

As reservas de petróleo, de gás natural e de urânio são proporcionalmente menores quando comparadas às de carvão, da ordem de cinco vezes. A Figura III-2 mostra de forma pictórica estas relações.

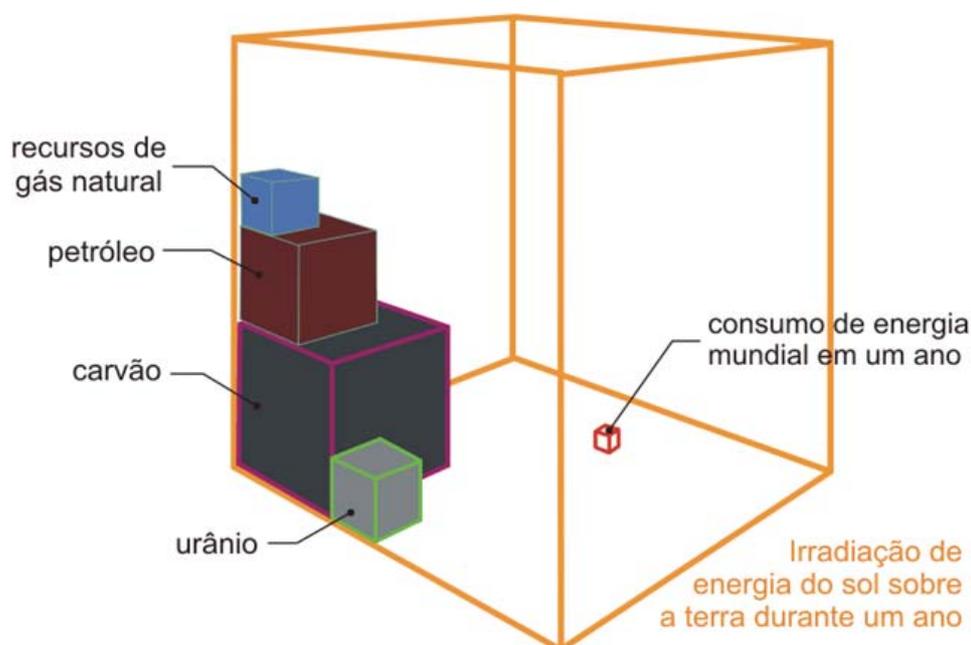


Figura III-2 – Comparação entre energia solar, reservas de combustíveis fóssil e nuclear

No espaço a radiação solar é praticamente constante. Na Terra, porém, ela varia conforme a hora do dia e do ano, assim como depende da latitude e das condições meteorológicas. Os valores máximos observados variam entre 0,8 e 1,0 kW/m².

Logicamente o Brasil, situando-se em grande parte na faixa entre o equador e o trópico de Capricórnio, dispõe de um enorme potencial para aproveitamento de energia solar. Também diferentemente de outros países, além de dispor de vastas áreas agriculturáveis, o país conta com reservas de água abundantes. Ou seja, apresenta todas as condições competitivas para

continuar liderando o aproveitamento de fontes de energia renováveis no mundo [Tolmasquim, 2003].

III.1.1 Conversão Fotovoltaica

Uma das formas de aproveitamento da energia solar é pela conversão direta em eletricidade por meio de células fotovoltaicas, componentes principais de um sistema de produção de energia elétrica a partir da radiação solar.

Os tamanhos típicos variam de 12,5 a 20 cm², no formato circular ou quadrado. Em geral elas podem ser classificadas como cristalinas (mono ou poli) ou de filme fino. Atualmente, a grande maioria das células (93%) é composta de silício na forma de cristais [Renewable Energy World, 2006].

Silício monocristalino – fabricado a partir do método de crescimento de um único cristal de silício produzido em fornos. As células são obtidas por corte das barras em pastilhas finas de 300 µm de espessura. A eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é da ordem de 15 a 18%, mas projetos de pesquisa e desenvolvimento em andamento sinalizam com eficiências superiores a 25%.

Silício policristalino – produzido a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais, resfriado lentamente até solidificar-se. No processo os átomos não se organizam em um único cristal, formando-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. As células são mais baratas de serem produzidas, mas a eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é menor do que a de cristal único, da ordem de 14%.

Filme fino – obtido por meio da deposição de camadas muito finas (espessura da ordem de 1/100 das cristalinas, ou seja, menores do que 3 µm) de materiais semicondutores sobre superfícies de vidro, metal ou plástico. Os materiais utilizados comercialmente são silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre-índio (CIS) e um composto de cobre, índio, galium e selênio (CIGS) [Renewable Energy World, 2006].

A eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia de 7 (a-Si) a 13% (CIS), com previsões de se conseguir atingir até 19%. Este fato conjugado a um custo de fabricação inferior ao das células cristalinas fez com que alguns fabricantes apostem que esta tecnologia se sobrepujará a todas as outras no futuro.

A Shell Solar manteve apenas uma linha produção de filme fino CIS no seu negócio, em sociedade com a fabricante de vidros francesa Saint-Gobain, vendendo todas suas fábricas de módulos de células cristalinas em 2005. Também a Honda Motor anunciou sua estréia no mercado solar fotovoltaico com a construção de uma fábrica de coletores de filme fino baseado no composto CIGS, com capacidade para produzir 27,5 MW por ano [REW, 2006].

Os componentes típicos de um sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica são [Tolmasquim, 2003]:

- Células fotovoltaicas: as quais são conectadas e inseridas dentro de um módulo, o coletor solar, os quais, por sua vez, são conectados em série e em paralelo, formando o arranjo necessário para atender a carga elétrica pretendida;
- Inversor: equipamento essencial para os sistemas conectados à rede elétrica, o qual converte a corrente contínua gerada nos módulos em corrente alternada;
- Baterias acumuladoras e controladoras de carga: dispositivos necessários para os sistemas isolados, que uniformizam o atendimento das cargas;
- Dispositivo para maximizar a potência de saída do arranjo de módulos (MPPT – maximum power point tracker): a máxima transferência de energia do sistema fotovoltaico é obtida quando sua impedância coincide com a da carga atendida por ele.

Curva típica de um módulo fotovoltaico de 175 W de potência nominal:

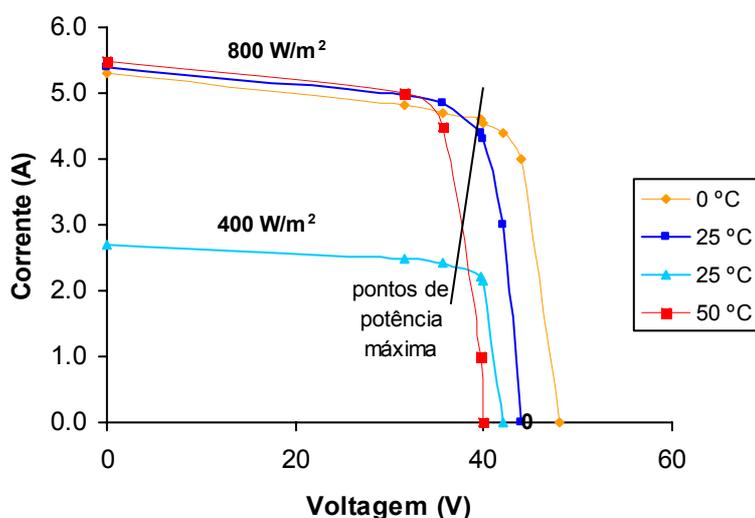


Figura III-3 – Curvas corrente tensão características de módulo fotovoltaico

A corrente e a tensão em que o módulo opera são determinados pela radiação solar incidente, pela temperatura ambiente e pelas características da carga conectada.

Os parâmetros importantes da curva são:

- Corrente de curto-circuito, I_{cc} : máxima corrente que o módulo pode entregar, sob determinadas condições de radiação e temperatura, correspondente a uma tensão nula;
- Tensão de circuito aberto, V_{oc} : máxima tensão que o módulo pode entregar, sob determinadas condições de radiação e temperatura, correspondente a uma corrente nula;
- Potência pico, P_{mp} : máxima potência que o módulo pode produzir, correspondente ao ponto da curva em que o produto $V \times I$ é máximo;
- Corrente de máxima potência, I_{mp} : corrente correspondente à máxima potência que o módulo pode produzir, sob determinadas condições de radiação e temperatura, e que fornece o valor da corrente nominal do módulo;
- Tensão de máxima potência, V_{mp} : tensão correspondente à máxima potência que o módulo pode produzir, sob determinadas condições de radiação e temperatura, e que fornece o valor da tensão nominal do módulo.

Os efeitos dos fatores ambientais sobre a característica de saída do módulo são as seguintes:

- Intensidade da radiação solar: mudança na radiação acarreta uma variação na corrente de saída para qualquer nível de tensão, sendo que a corrente de curto-circuito varia de forma diretamente proporcional com a radiação solar incidente;
- Temperatura: o aumento da temperatura do módulo acarreta uma redução da tensão e um aumento da corrente.

Por último, está indicado no gráfico o lugar comum dos pontos que disponibilizam a máxima saída para o módulo, a partir de pequenos ajustes da operação da tensão de funcionamento do sistema, função esta que é executada pelo MPP tracker.

Os módulos fotovoltaicos estão disponíveis em uma faixa de potência que vai de 50 a 300W, apesar de que módulos de 150W são os mais comuns [REW, 2006].

Módulos de silício cristalinos compõem-se de células conectadas e encapsuladas entre uma cobertura transparente, usualmente de vidro, e um fundo de vidro ou plástico. Os módulos de filme fino são constituídos de lâminas deste material encapsuladas na forma fixa ou flexível, cobertas de material transparente, também vidro ou plástico.

Os fabricantes de módulos de qualidade garantem o produto por 20 a 25 anos, geralmente considerando o mínimo de 90% da potência de saída nominal nos 10 a 12 primeiros anos de uso e de 80%, nos 10 a 15 anos restantes.

Os sistemas fotovoltaicos consistem de vários módulos conectados em série e paralelo para produzir a potência requerida na tensão necessária.

Já existem estruturas especialmente concebidas para serem inseridas naturalmente nas próprias construções, evitando a utilização de área extra e reduzindo custos de instalação, compondo telhados ou revestimentos externos dos prédios.

Essa solução, conhecida como Painéis Fotovoltaicos Integrados às construções – BIPV (“building integrated PV”) – inclui fachadas e estruturas para telhados planas ou com inclinação, compostos de módulos de células opacos ou semitransparentes, que substituem vidraças ou telhas.

Aplicações de painéis fotovoltaicos

Sistemas isolados – provêem energia para casas ou cargas não conectadas à rede elétrica, alimentando lâmpadas, refrigeradores e outras pequenas utilidades em comunidades rurais ou afastadas de grandes centros urbanos, especialmente em países em desenvolvimento, como o próprio Brasil.

Também são utilizados em aplicações comerciais e industriais, como sistemas de telecomunicações, bombeamento de água, proteção catódica de dutos, bóias para sinalização marítima, equipamentos de registros meteorológicos e outras, onde as alternativas de geração de pequena monta são menos competitivas ou menos confiáveis em relação ao sistema fotovoltaico.

Nestes casos, baterias devem ser utilizadas para prover energia durante períodos de baixa ou nenhuma luminosidade. Os tipos aplicados variam de chumbo-ácidas, mais baratas, até as de níquel-cádmio ou de íon-lítio, consideravelmente mais caras, principalmente as de íon-lítio, mas que apresentam a vantagem de não sofrerem sobre carregamento ou descarga rápida.

A vida útil das baterias depende do tipo e das condições operacionais, mas é muito inferior a vida dos módulos, variando de 2 a 10 anos, e compõe um custo importante de investimento inicial, assim como dos custos de O&M do sistema.

Um controlador ou regulador de carga é usado para manter a bateria no maior estado de carga possível, protegendo-a de descargas agudas ou sobrecargas. Alguns controladores também dispõem de MPP trackers integrados, para maximizar a potência gerada pelo sistema. Se houver necessidade de corrente alternada para atendimento da carga, um inversor de corrente DC-AC deve ser acrescentado ao circuito.

Geração Distribuída conectada à rede elétrica – o sistema supre energia para um prédio ou carga que está conectada à rede de distribuição de eletricidade.

Esses sistemas estão cada vez mais integrados às construções e a intenção é tornar essa solução comum em novas edificações residenciais, comerciais e industriais. A potência instalada típica vai da faixa de 400 W até 100 kW e, normalmente, se permite que a corrente gerada flua para a rede, quando a geração ultrapassa a demanda elétrica.

Neste caso, um inversor deve ser obrigatoriamente instalado para converter a corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada suprida à rede elétrica. A eficiência desta conversão é bastante elevada, na faixa de 94-95%.

Os inversores também podem incorporar um MPP tracker, o qual ajusta de forma contínua a impedância da carga para obter a máxima potência do sistema fotovoltaico. Quando as concessionárias de eletricidade permitem, sistemas fotovoltaicos com inversores integrados podem ser conectados diretamente à rede elétrica.

As vantagens comparativas dessa aplicação são as reduções de perdas, pois a geração de energia é realizada junto ao consumo final, dispensando o uso de baterias, quando comparado aos sistemas isolados, também reduzindo custos e impactos ambientais, além de aumentar a eficiência de conversão.

Geração Centralizada conectada à rede elétrica – o sistema supre energia para a rede de distribuição de eletricidade como alternativa à geração convencional centralizada ou para reforço da própria rede.

Existem algumas plantas de demonstração instaladas na Alemanha, Itália, Japão, Espanha, Suíça e Estados Unidos para efeito de aquisição de experiência na construção, operação e melhora de eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

Programas de Incentivos para instalação de sistemas fotovoltaicos

Comparando-se a potência instalada de sistemas fotovoltaicos com a de usinas eólicas, por exemplo, a relação é muito desfavorável para a geração solar. No mundo, a capacidade instalada está alcançando 10 GW, enquanto já existem mais de 94 GW em aerogeradores montados [REN21, 2008]. No entanto, as taxas anuais de crescimento são comparáveis às maiores observadas no setor eólico – superiores a 40%, o que indica uma tendência de triplicar a capacidade instalada a cada 3 anos.

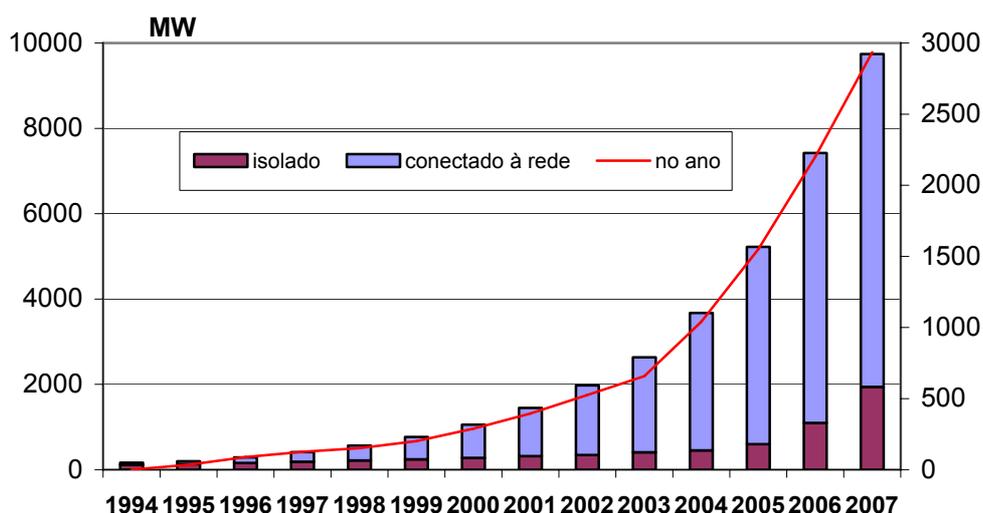


Figura III-4 – Capacidade acumulada instalada de módulos fotovoltaicos

Diversos países desenvolvem programas para incentivar a aplicação de sistemas fotovoltaicos. Os principais são Japão, Alemanha e Estados Unidos. A

idéia por de trás desses incentivos é o de que apenas uma questão de tempo e de escala separa as células fotovoltaicas de se tornarem competitivas para o usuário final de energia. Nesse tipo de aplicação de tecnologia a base de comparação de preços não é a de geração, mas na realidade, basta que os custos das instalações permitam produzir energia elétrica de forma competitiva com a tarifa final ao consumidor.

Entretanto, apesar de todos esses esforços, tem-se observado uma estabilização de preços praticados no mercado internacional, muito diferente da redução substancial obtida no período de 1975 até, aproximadamente, 1990, quando o custo do módulo fotovoltaico caiu mais de 90%, partindo de US\$ 30/W e atingindo valores inferiores a US\$ 5/W.

Esses valores não são muito diferentes dos praticados atualmente, da ordem de US\$ 4/W. A razão para isso reside no déficit atual na oferta de silício grau solar para confecção das células, o qual tem sido atendido pelo rejeito da indústria eletrônica de semicondutores, que exige uma pureza muito superior do silício aplicado (0,0001 x 0,01 ppm máximo de impurezas) [Phylipsen e Alsema, 1995].

O custo de instalação para que esta tecnologia possa difundir-se com todo seu potencial deve ainda ser reduzido em 50%, conforme veremos nas conclusões deste trabalho.

Também no Brasil já houve campanha para disseminar a aplicação desses sistemas em localidades onde não há rede elétrica disponível, sob o nome de Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM, [De Gouvello et al., 2003]. Ele foi substituído por um novo programa social do atual governo, Luz para Todos, mas com os mesmos objetivos daquele do governo anterior.

O Programa Luz para Todos tem o objetivo de levar energia elétrica para aproximadamente 16 milhões de pessoas do meio rural, sendo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia com participação da Eletrobrás e de suas empresas controladas. Elas providenciam a ligação gratuita de energia elétrica até os domicílios e a instalação de três pontos de luz e duas tomadas.

O programa está orçado em R\$ 21 bilhões, dos quais R\$ 17 bilhões proveniente de fonte federal, e é realizado em parceria com as distribuidoras de

energia e os governos estaduais. Os recursos federais virão de fundos setoriais de energia - a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) e a Reserva Global de Reversão (RGR) [Eletrobrás, 2005].

As famílias sem acesso à energia são de baixa renda e habitam em sua grande maioria localidades com Índice de Desenvolvimento Humano – IDH – também muito baixo. Cerca de 90% destas famílias têm renda inferior a três salários-mínimos e 80% vivem no meio rural. O objetivo do governo é utilizar a energia como vetor de desenvolvimento social e econômico destas comunidades, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar. A chegada da energia elétrica dará condições básicas para o acesso a serviços de saúde, educação, abastecimento de água e saneamento.

Pela legislação atual, as concessionárias de energia teriam prazo até dezembro de 2015 para eletrificar todos os domicílios sem acesso à energia no Brasil, promovendo a universalização da energia elétrica no País. Este programa tem por objetivo antecipar este prazo.

Ele poderia se tornar um grande vetor gerador de negócios para a indústria de painéis fotovoltaicos, já que, para cargas pequenas, eles são muito competitivos quando comparados à solução de se estender a rede elétrica até essas localidades.

Se considerarmos que metade da população de 16 milhões de pessoas poderia ser atendida por painéis fotovoltaicos e que a potência instalada seria de 40 W/ hab., um mercado imediato de 320 MW seria formado. Esse mercado seria suficiente para justificar a implantação de uma indústria para fornecimento desses equipamentos no Brasil, com uma receita bruta de R\$ 3,2 bilhões, para um preço estimado em R\$ 10 mil/kW instalado de todo o sistema. Esses valores cabem perfeitamente dentro do orçamento previsto [Canal Energia, 2008].

III.2 ENERGIA EÓLICA

III.2.1 Introdução

O sistema elétrico brasileiro interligado prevê um crescimento de mais de 4% ao ano durante os próximos 15 anos [EPE, 2006]. No nordeste as taxas de aumento do consumo previstas são ainda maiores, da ordem de 6%, e uma opção extremamente interessante para atendê-las é a integração de parques eólicos para geração de eletricidade.

O Brasil possui um alto potencial eólico em diversas regiões litorâneas próximas a centros de carga. Além disso, existe uma complementaridade já observada com o regime hidrológico, ou seja, os períodos de ventos mais fortes coincidem com os de menores chuvas, conforme mostrado nas figuras III-5 e III-6 [Eletrobrás, 2001].

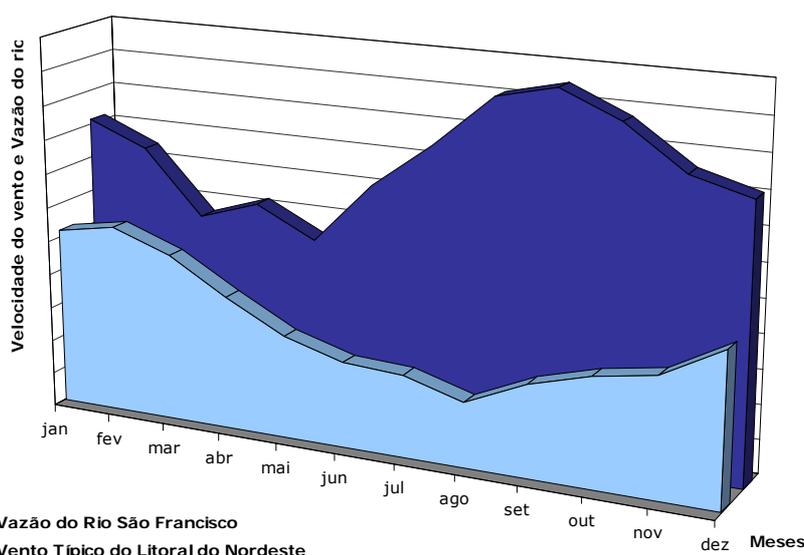


Figura III-5 – Complementaridade das fontes hídrica e eólica no nordeste do Brasil

No caso específico do Nordeste, este fato fica ainda mais relevante, pois a área com maior intensidade de ventos, o litoral setentrional, é a mais afastada do principal fornecedor de energia elétrica para a região, o sistema CHESF, resultando em grandes perdas na transmissão e, conseqüentemente, má qualidade de fornecimento. Também cabe destacar o potencial “off-shore” do Brasil. Especificamente na região nordeste, ao longo da costa do Ceará, próximo à cidade de Acaraú, existe uma faixa do mar onde a lâmina de água não passa de 10 m de profundidade. Apenas esta área apresenta um potencial para geração eólica da ordem de 10 a 12 GW, o que poderia representar uma contribuição importante para a demanda total de energia elétrica da região.

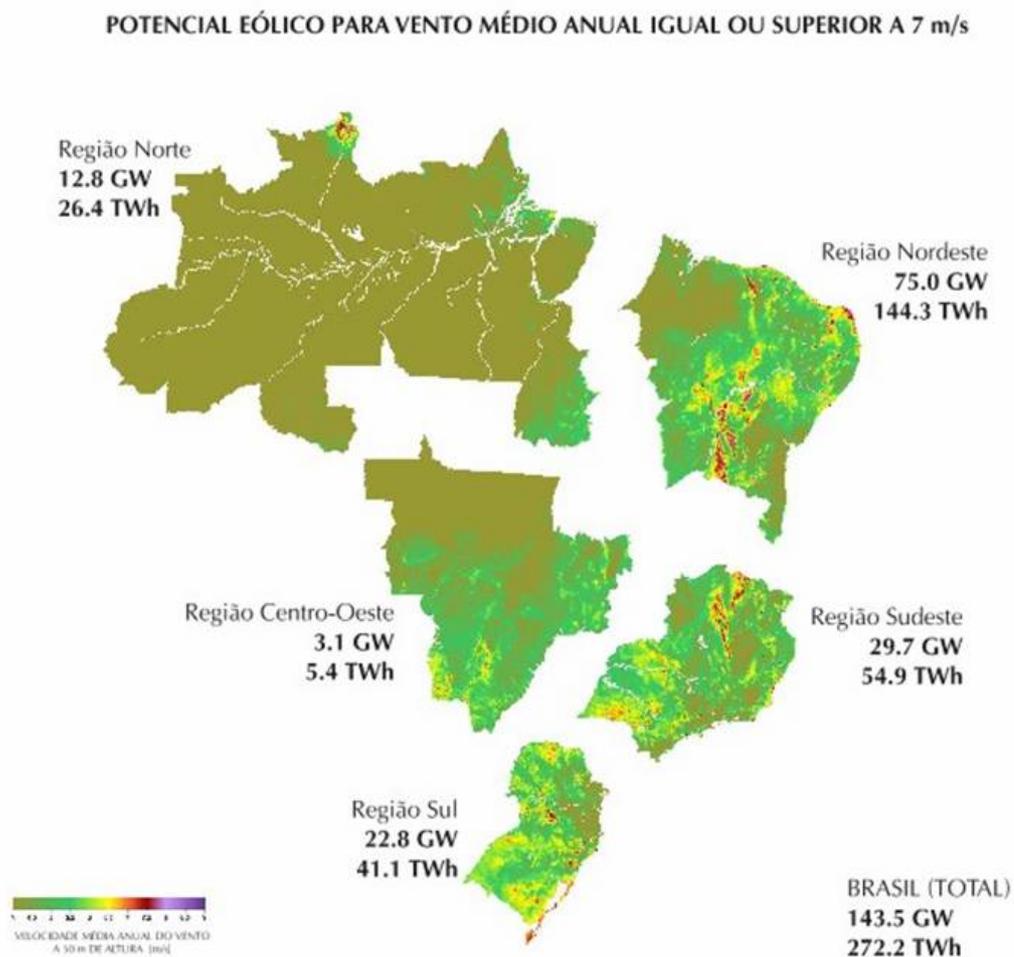


Figura III-6 – Potencial eólico no Brasil

Em 2007, a capacidade eólica instalada no Brasil era de cerca de 250 MW. No mundo, mais de 70 países, desenvolvidos ou não, utilizam energia eólica para geração elétrica, destacando-se: Alemanha – 22.247 MW; EUA – 16.818 MW; Espanha – 15.145 MW; Dinamarca – 3.125 MW; Índia – 8.000 MW; China – 6.050 MW, com um total instalado de mais de 94 GW em 2007 (vide figura III-7) [Earth Policy Institute, 2008].

A taxa média de crescimento mundial de instalação de centrais eólicas tem se mantido em torno de 30% ao ano, ou seja, a capacidade instalada dobra a cada 3 anos. Em alguns países, como a Espanha, Estados Unidos e, agora, China e Índia, estas taxas atingiram níveis espetaculares ao longo dos últimos anos, algumas vezes dobrando a capacidade instalada de um ano para outro, caso da China em 2006 e 2007, devido a uma estrutura elétrica tarifária favorável, atrelada a uma política industrial para desenvolver a fabricação das máquinas.

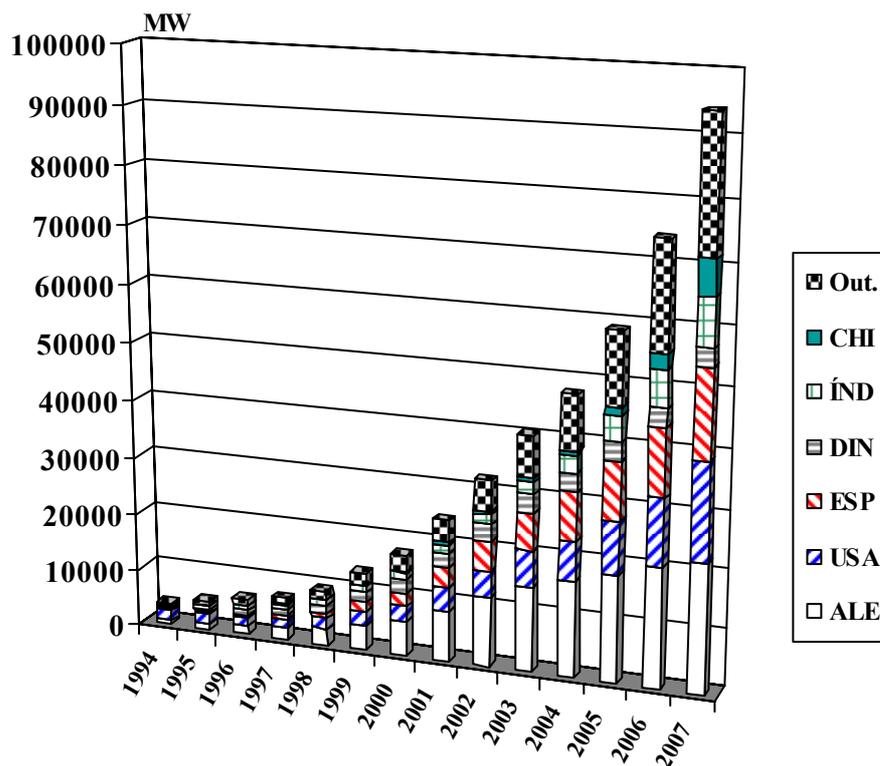


Figura III-7 – Energia eólica no mundo

III.2.2 Tipos de Aerogeradores

As classes de potência disponíveis para as máquinas consideradas de grande porte variam de 600 kW até a classe multi-megawatt. Atualmente o mercado já dispõe de aerogeradores com capacidade maior do que 3 MW e alguns protótipos de 5 MW. Este patamar de potência é o novo objetivo estabelecido pela indústria de ponta do setor, que prevê sua aplicação em usinas localizadas no oceano, em águas rasas, como as existentes ao longo da costa da Dinamarca, Holanda e Alemanha, assim como no estuário do rio Tamisa, na Inglaterra.

As opções existentes quanto aos conceitos de operação e controle de aerogeradores dividem-se basicamente em [DEWI, 1998]:

- Quanto ao tipo de controle de potência aerodinâmica: ativo, controle por passo variável das pás do rotor, ou passivo, controle por estol, onde as pás do rotor são fixas;
- Quanto à velocidade do rotor: variável ou constante, esta última imposta pela frequência da rede elétrica e por uma caixa de engrenagens;
- Quanto ao uso de caixas de engrenagens: com ou sem multiplicadores;

- Quanto ao sistema elétrico: máquinas com geradores síncronos ou assíncronos, com conexões diretas à rede ou através de conversores e, as mais complexas, que utilizam sistemas de conversão para corrente contínua e inversores, ajustando-se a frequência e tensão das redes em que estão conectadas;
- Quanto ao sistema de excitação do gerador elétrico: corrente externa ou por magneto permanente.

O desenvolvimento de tecnologias dos aerogeradores apresenta algumas tendências claras, como controle da potência máxima da máquina por passo variável⁴ das pás – “pitch control”. Este fato deriva do tamanho atual dos equipamentos, com capacidades superiores a 1,5 MW, inviabilizar a adoção do estol, com pás de perfil mais elaborado, mas que produzem cargas maiores sobre as estruturas do equipamento.

Também a tecnologia de velocidade variável dos rotores é adotada atualmente pela grande maioria dos fabricantes, pois facilita a conexão ao sistema elétrico, evitando oscilações provocadas por rajadas de vento.

O grande desenvolvimento da eletrônica de potência, com a redução de preços de inversores de frequência, por exemplo, permitiu que toda a potência gerada pelo aerogerador passasse por estes sistemas, permitindo que as usinas atendam aos parâmetros exigidos pelas concessionárias de energia para conexão à rede elétrica.

A última inovação tecnológica, adotada ainda por pequenos fabricantes de aerogeradores, diz respeito a geradores elétricos com imã permanente e caixas de engrenagens com relações de velocidades baixas ou sem caixas. Esta última solução é empregada há muito tempo pela empresa alemã Enercon, que utiliza geradores com vários pólos em suas máquinas. Contudo, quando a potência das máquinas passa para a faixa multi-megawatt, a tendência é a de que elas fiquem muito pesadas, comparadas às soluções tecnológicas concorrentes.

As principais tecnologias empregadas pelos fabricantes de aerogeradores estão indicadas na tabela III-1 [EWEC, 2006]. Certamente, as soluções que resultem em preços menores de construção e instalação e custos de manutenção baixos ainda provocarão muitas mudanças na indústria eólica,

⁴ O ângulo de ataque da pá pode ser alterado a partir do movimento de rotação na base da mesma, permitindo controlar a potência de saída do aerogerador a valores previamente estabelecidos

conforme já ocorreram no passado recente e relatado no item a seguir:
Fabricantes de Aero geradores.

Tabela III-1 – Tecnologias de aero geradores - tendências observadas

Controle por estol	▶							
Estol ativo			▶	▶				
Velocidade fixa	▶	▶	▶					
“optislip” ⁵					▶			
Multiplicador	▶	▶	▶	▶	▶	▶		
Controle ativo “pitch”		▶				▶	▶	▶
Velocidade variável				▶		▶	▶	▶
Sem ou com multiplicador pequeno							▶	▶
Geradores com imã permanente “PMG” ⁶								▶
Fabricantes	NegM Bonus Nordex Ecotec.	MHI	NegM Bônus	Ecotec.	Vestas	GE Vestas Gamesa Nordex Suzlon DeWind RePower	Enercon Lagerwey	Clipper Winwind Vensys

III.2.3 Fabricantes de Aero geradores

A fabricação de aero geradores tornou-se uma atividade bastante concentrada no mundo, com poucos fornecedores atendendo mais de 80% do mercado. Nos últimos 5 anos muitas empresas desapareceram ou foram compradas por outras, caso da Enron Eólica, adquirida pela GE, e da Bonus, adquirida pela Siemens, como o da fusão da Vestas com a Neg-Micon.

Os maiores fabricantes de aero geradores no mundo são: Vestas / Neg-Micon, da Dinamarca; Enercon e Siemens, da Alemanha; Gamesa, da Espanha e GE, dos EUA, não por acaso, os mesmos países onde existem incentivos para produção alternativa de energia elétrica pelo vento.

A participação de mercado tem sido liderada pela Vestas/Neg-Micon ao longo dos últimos anos, mas a segunda posição tem alternado posições entre a

⁵ Sistema patenteado pela Vestas de geradores assíncronos que permitem um deslizamento de até 10% na rotação do gerador

⁶ Permanent Magnet Generator

GE, Gamesa e Enercon, conforme as legislações específicas favorecem a implantação das usinas nos seus respectivos países de origem. Uma empresa da Índia, Suzlon, mas também de origem dinamarquesa, começa a despontar como um dos grandes fornecedores de máquinas, devido ao mesmo fato.

Do total dos aerogeradores vendidos em 2007, 22 GW, a distribuição por fabricante está indicada na figura III-8 [DEWI, 2008].

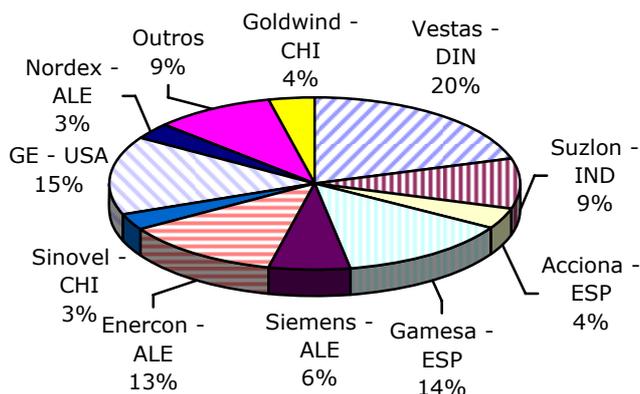


Figura III-8 – Principais fabricantes de aerogeradores – 2007

A indústria de componentes para aerogeradores no Brasil apresenta algumas posições de destaque, tais como:

- O fabricante alemão ENERCON – Wobben WindPower dispõe de uma fábrica de aerogeradores em Sorocaba, São Paulo, com capacidade instalada para produzir 300 MW anuais. Além do atendimento ao mercado interno, a Wobben exporta componentes e aerogeradores, inclusive pás com mais de 80m de comprimento para as máquinas de 2 MW.
- Uma fábrica de pás para aerogeradores – Tecsis – também instalada em Sorocaba, a qual atende primordialmente a GE, mas sem exclusividade, com capacidade para fabricar pás conforme a especificação solicitada pelo cliente.
- Fundições e metalúrgicas que fabricam componentes para a máquina de 1500 kW da GE, como, por exemplo, a Prensas Schuler, em São Bernardo do Campo, São Paulo.

III.3 BIOMASSA

Biomassa pode se originar de florestas, agricultura e correntes de rejeitos. Estes recursos podem ser descritos como se segue [ABEIOM, 2006]:

Florestas e indústrias de madeira – madeira continua sendo a maior fonte de biomassa sólida no mundo. O setor cobre um espectro variado de biocombustíveis com diferentes características: toras e cavaco de madeira, serragem e, mais recentemente, “pellets”, os quais ampliam as oportunidades para o desenvolvimento deste mercado, pois concentram a energia contida na biomassa, conferindo-lhe padrões melhor definidos.

Agropecuária – disponibiliza subprodutos na forma de esterco de animais e resíduos vegetais, mas plantações dedicadas à colheita de vegetais com o objetivo específico de geração de energia também podem ser desenvolvidas, como, por exemplo, cana-de-açúcar, canola, dendê, etc., assim como novos tipos sem uso alimentar, tais como pinhão manso e mamona.

Restos biodegradáveis – esta forma de biomassa inclui a parte orgânica de aterros sanitários de lixo, restos de madeira, esgoto, combustíveis residuais de processos químicos, etc.

As rotas para produção de fontes úteis de energia a partir de biomassa são mais complexas do que as solar (fonte: luz do sol; tecnologia para conversão: células fotovoltaicas; saída: energia elétrica) ou eólica (fonte: ventos; tecnologia para conversão: turbinas; saída: energia elétrica). Como já observado, as fontes primárias variam de florestas e resíduos de colheitas até plantações para produzir energia e aterros sanitários. As tecnologias para conversão são variadas e os produtos finais podem ser desde calor e eletricidade até combustíveis para o setor de transportes.

Os ganhos potenciais do aproveitamento das fontes de biomassa serão atingidos apenas se houver um planejamento sustentável para a sua exploração, caso contrário o setor de bioenergia pode tornar-se parte do problema que a humanidade procura solucionar.

A figura III-9 mostra de forma simplificada as diversas rotas tecnológicas para se obter fontes úteis de energia a partir de fontes primárias de biomassa.

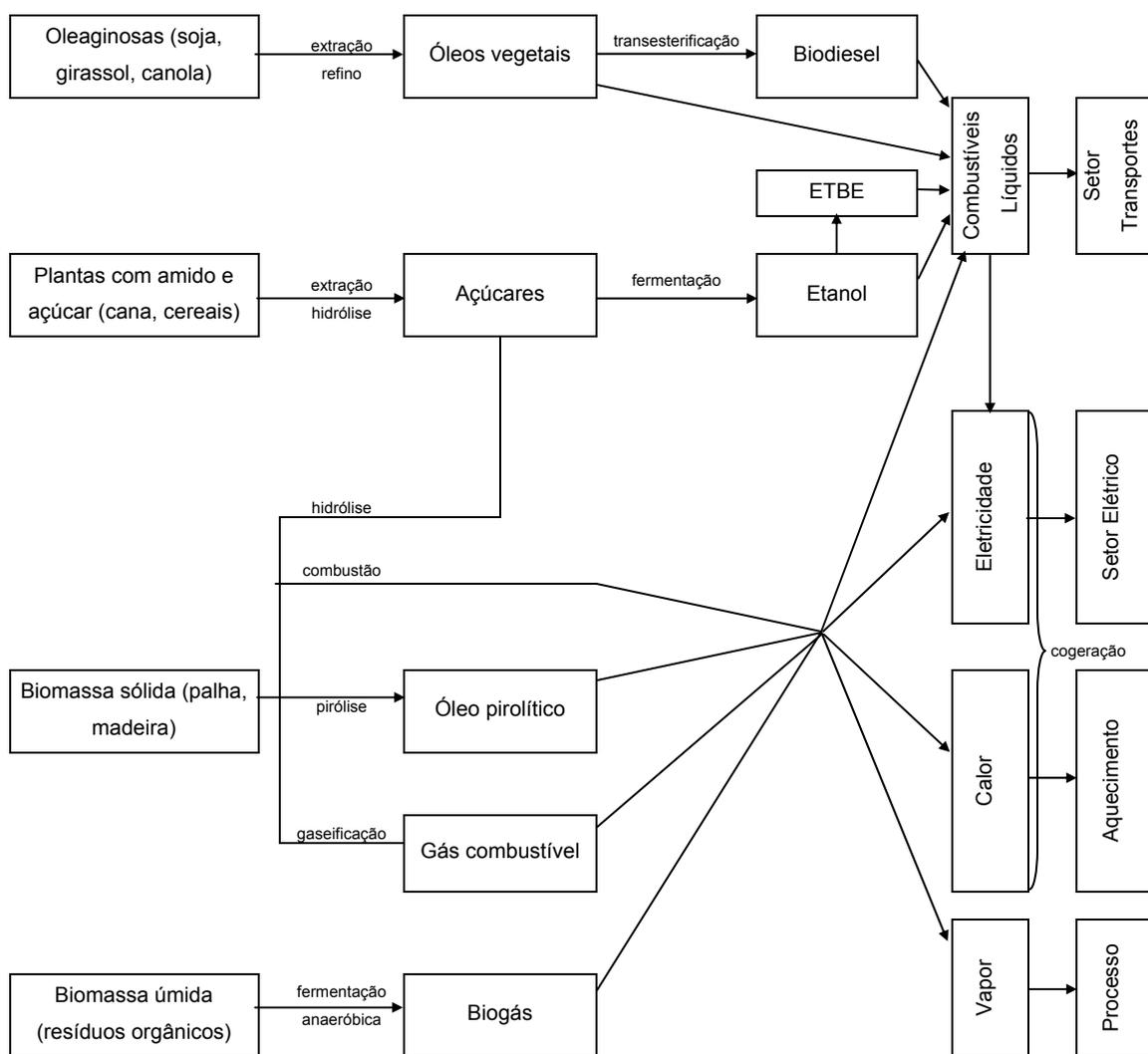


Figura III-9 – Rotas de produção de bioenergia

Dentro desta variada gama de soluções energéticas, o mundo experimenta um crescimento vertiginoso na produção e uso de biocombustíveis líquidos. A produção de etanol mais do que duplicou de 2000 a 2005, enquanto a de biodiesel quadruplicou no mesmo período.

O Brasil, em particular, despende grandes esforços nesta área desde os anos 80, com a implantação do Pró-álcool e, atualmente, 40% do mercado de combustíveis líquidos leves são atendidos por álcool derivado de cana-de-açúcar.

Um programa similar para o biodiesel está em andamento e, devido a estes fatos, o trabalho dedica especial atenção à produção de biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar e de sementes oleaginosas.

III.3.1 Cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar foi o primeiro negócio agrícola introduzido de forma intensiva no Brasil, há quase cinco séculos⁷, na zona da mata nordestina, com a finalidade de produzir açúcar para o mercado europeu. Desde então, disseminou-se pelo país, principalmente a partir do incentivo dado para a produção de álcool carburante, resposta brasileira à crise do petróleo dos anos 80. Atualmente, o estado de São Paulo é o principal fornecedor de álcool para o mercado brasileiro.

A cana-de-açúcar forma compostos orgânicos que apresentam taxas altas de fotossíntese, proporcionando rápido crescimento vegetal e boa eficiência no seqüestro de gás carbônico da atmosfera.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana e de etanol, além de maior exportador de açúcar e etanol, com mais de US\$ 8,5 bilhões em divisas a partir de 19 milhões de toneladas de açúcar e 3 bilhões de litros de etanol exportados na safra 2006/07. O negócio sucro-alcooleiro movimenta atualmente cerca de R\$ 41 bilhões por ano, com faturamentos diretos e indiretos e também é um dos setores que mais empregam no país, com estimativa de 4 milhões de empregos gerados, um milhão, diretamente. Outros dados relativos ao setor [Jornal da Cana, 2008]:

- 420 milhões de toneladas de cana-de-açúcar moídas por ano – maior produção agrícola do país seguido da soja (54 milhões) e do milho (41 milhões) [CONAB, 2006];
- Capacidade instalada para produção de etanol: 16 milhões de m³/ano, com 17,5 milhões de m³ de etanol produzidos, 50% anidro;
- Em média, 55% da produção são destinados à produção de etanol e 45%, à produção de açúcar, dependendo das variações dos preços destes produtos no mercado internacional;
- A produção brasileira de etanol é a mais competitiva do mundo, com um custo aproximado de US\$ 0,19/l.
- 5,5 milhões de hectares de área plantada, abastecendo 361 usinas e destilarias (281 no Centro-Sul e 80 no Norte-Nordeste).

⁷ Data de 1532 o primeiro engenho construído no Brasil, em São Vicente. Três anos mais tarde, em 1535, é instalado o primeiro engenho do Nordeste, em Olinda

O Anexo A.1 apresenta uma breve descrição do estágio atual do setor sucro-alcooleiro no Brasil.

III.3.1.1 Cogeração no Setor Sucro-Alcooleiro

O bagaço da cana-de-açúcar provê quase toda a energia necessária para processá-la e várias usinas já geram um excedente de energia elétrica, vendida para as distribuidoras.

No entanto, a geração elétrica nas usinas de açúcar e etanol poderia ser em muito ampliada pela utilização de sistemas de conversão de energia mais eficientes e através da recuperação de parte dos resíduos da cana, os quais, atualmente, são geralmente queimados e deixados no campo.

Este aumento de eficiência disponibilizaria mais bagaço para as caldeiras das usinas. Por outro lado, a coleta dos resíduos da cana para a usina requer um desenvolvimento nos procedimentos agrícolas e algumas usinas já estão adotando a prática e servem de exemplo demonstrativo para que ela possa se tornar corriqueira na indústria.

Quando da implantação do Pró-Álcool nos anos oitenta, todos os esforços foram dirigidos para que a produção de etanol combustível ficasse a mais barata possível. De fato, esse objetivo foi atingido e, atualmente, o preço do etanol combustível a partir da cana-de-açúcar já é mais barato do que o da gasolina (vide Figura III-10 da Copersucar).

Tanto a produção quanto o processamento da cana-de-açúcar são atividades que demandam muita energia. No Brasil, o consumo de energia para cada tonelada de cana moída, sob as condições típicas encontradas, são os seguintes [Hassuani et al., 2005]:

- 190 MJ na área agrícola - na forma de fertilizantes e outros insumos químicos e no óleo diesel consumido nas máquinas de plantio e colheita e, principalmente, na atividade de trazer, para a usina, a cana colhida.
- 1.970 MJ, na indústria – no consumo de produtos químicos e bagaço.

Entretanto, uma análise do ciclo de vida para a produção de etanol revela que, para cada unidade de energia de combustível fóssil consumido no setor, aproximadamente nove unidades de energia útil renovável, sob a forma de etanol e bagaço, são geradas [Macedo et al., 2004].



Figura III-10 - Curva de aprendizado na produção de etanol no Brasil

Este cenário tem um enorme potencial para ser melhorado, tendo em mente que o etanol representa apenas um terço da energia disponível na cana-de-açúcar. Dos outros dois terços, representados pelas fibras celulósicas contidas no bagaço e nas folhas e pontas da cana, apenas uma parte delas é efetiva e eficientemente utilizada no processo, abrindo uma janela de oportunidade para um substancial desenvolvimento de toda a indústria.

Atualmente, 90% do bagaço são queimados para processar cana de uma forma geralmente muito ineficiente e 75% dos resíduos – folhas e pontas, chamadas genericamente de palha – são queimados no próprio campo, antes da colheita, para reduzir custos de transporte. Os outros 25% não queimados também são deixados no campo, por razões agrícolas, no sentido de oferecer uma proteção ao solo. Ambas as práticas resultam em que o carbono contido nas fibras retorne para a atmosfera, na forma de CO₂.

Esta constatação indica que, com algum esforço e investimentos, esse combustível extra poderia ser mais bem aproveitado e utilizado para produzir energia para o sistema elétrico brasileiro. Para tanto, três ações devem ser implantadas:

- Aumentar a eficiência dos processos industriais para que se produza maior excedente de bagaço;
- Colher cana-de-açúcar sem queimá-la previamente, recuperando-se uma quantidade razoável da palha até a usina;
- Aplicar tecnologias mais eficientes para gerar energia elétrica.

O setor sucro-alcooleiro de São Paulo, maior consumidor de energia do país, também tem o maior potencial para cogeração de energia excedente, da ordem de 5000 MW [Suani, 2000].

Números maiores poderiam ser obtidos, melhorando-se a tecnologia utilizada na conversão de potência. Por exemplo, já é comum o aumento de pressão na geração de vapor dos 20 bar habitual para pressões de até 90 bar, quando as caldeiras das usinas são renovadas. Isto aumenta a temperatura de geração de vapor e a eficiência do ciclo, reduzindo-se o consumo de bagaço, para a mesma geração de energia.

Pelo lado do processamento da cana outros aprimoramentos podem ser cogitados, sempre com o intuito de aumentar a disponibilidade de vapor para gerar mais energia. Os acionamentos das moendas também podem ser efetuados com motor elétrico ao invés de turbinas a vapor de baixa eficiência.

A tabela III-2 permite avaliar algumas dessas alternativas [Leal, 2003]:

Tabela III-2 – Alternativas de geração em usinas de cana-de-açúcar⁸

Tecnologia	Operação	Consumo Processo kg vapor /t cana	Excedente Energia kWh/t cana	Potencial Brasil	
				GWh	MW
22bar – 300 °C TG Contrapressão	Safra	500	0 – 10	3 000	700
80bar – 480 °C TG Contrapressão	Safra	500	40 – 60	18 000	4 500
80bar – 480 °C TG Condensação	Ano todo	340	100 – 150	45 000	6 000
BIG/GT ⁹	Ano todo	< 340	200 - 300	90 000	12 000

Cabe destacar que o potencial do excedente desconta a geração para consumo próprio das usinas e a geração descentralizada e, portanto, mais próxima dos centros de consumo de carga, reduz a necessidade de investimentos em linhas de transmissão.

Outro ponto que merece destaque é o fato de que o período da safra da cana coincide com o período da estiagem, podendo constituir-se em um eficiente mecanismo de reserva para o sistema elétrico, uma vez que pode supri-lo em um regime de complementaridade com os reservatórios hídricos. Estas vantagens podem vir a mudar a política atualmente empregada ao setor elétrico brasileiro e promover a efetiva utilização desse significativo potencial de geração de energia.

⁸ Considerando moagem anual de 300 milhões de toneladas de cana

⁹ Gaseificação do bagaço, aplicando turbinas a gás

III.3.2 Oleaginosas

A utilização de sementes oleaginosas para a produção de combustível renovável, compatível com a faixa do óleo diesel mineral é uma alternativa desenvolvida recentemente, apesar de que Rudolf Diesel chegou a utilizar óleo de amendoim nos primeiros testes no tipo de motor a explosão que leva seu nome¹⁰.

O biodiesel é um combustível renovável e biodegradável, constituído por uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação química de transesterificação de qualquer triglicéride - óleo de soja, palma, girassol, mamona, óleos de fritura, gorduras animais, etc. - com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol. O metanol é o mais utilizado industrialmente no mundo.

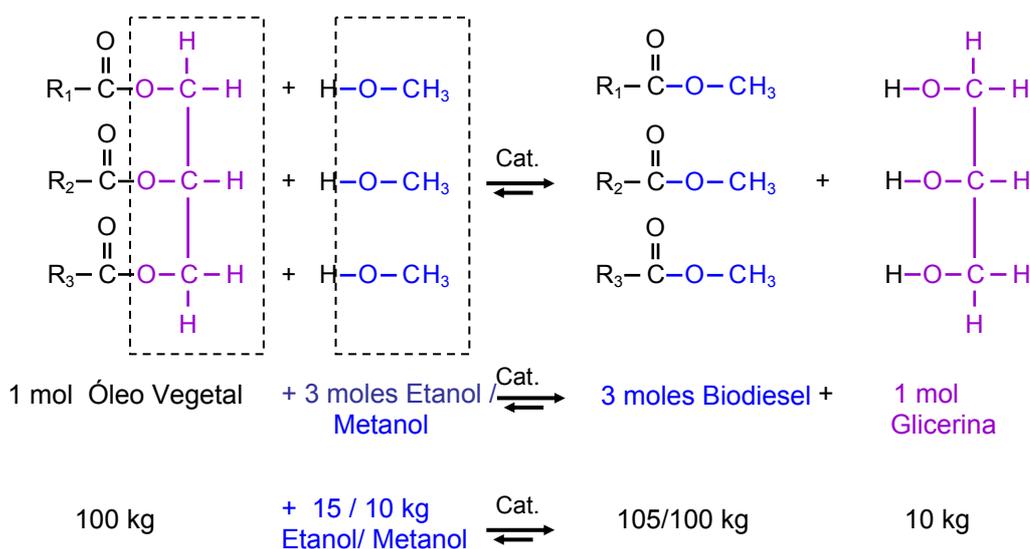


Figura III-11 – Reação estequiométrica de transesterificação

Até de uma forma mais contundente do que na indústria canavieira, o óleo produzido pode ser considerado um subproduto do aproveitamento das sementes plantadas. No mundo, as principais matérias-primas utilizadas são: soja, nos EUA, e colza (óleo de canola) na Europa. Nos dois casos, o farelo resultante da extração do óleo da semente é utilizado como proteína vegetal para alimentação de animais e de seres humanos.

O óleo bruto resultado da extração é utilizado para cozinhar alimentos. A reação de transesterificação consegue produzir um óleo combustível totalmente

¹⁰ Rudolf Diesel obteve a patente desse tipo de motor em 1893, mas apenas após quatro anos de custosos experimentos (ele quase morreu na primeira tentativa de injetar óleo, pois o motor explodiu), ele conseguiu produzir um equipamento a contento

compatível com o diesel, com algumas vantagens ao substituí-lo, como elevado índice de cetano (medida da qualidade de ignição do combustível) e boa lubricidade, sem conter compostos de enxofre em sua composição.

O governo atual tomou para si a missão de viabilizar a produção em massa deste tipo de combustível com a intenção de criar emprego no campo. O modelo é inspirado nos moldes da indústria canavieira, a partir da mobilização de pequenas e médias propriedades rurais, priorizando as oleaginosas mais intensivas em mão-de-obra e que se adaptam bem aos tipos de solo disponíveis no nordeste semi-árido e no norte do país.

As metas serão mais difíceis de serem atingidas, pois, diferentemente da cana, a produção de óleo sempre ficará atrelada à de alimento e para que os preços do farelo não desabem no mercado, uma destinação adicional à hoje existente deverá ser criada para ele. Uma das soluções aventadas sugere que a criação de gado, que ocupa grandes áreas de pastagens no país, poderia ser confinada, nos moldes dos padrões europeus, aumentando-se a demanda por farelo. No entanto, o confinamento de gado exige investimentos muito altos, o que poderia acarretar perda de competitividade do setor pecuário.

Além disso, há de se ter em mente que a capacidade energética das sementes oleaginosas é muito inferior a da cana e de que os incentivos concedidos até a data presente excluíram o agronegócio da soja, maiores produtores de grãos do país. Os esmagadores de soja são quem, definitivamente, abastecem o mercado de biodiesel, beneficiando-se da demanda crescente pelo farelo rico em proteínas, fartamente utilizado como ração animal ao redor do globo.

A aposta na mamona como grande ovo de Colombo esbarra nas dificuldades de se produzir um óleo combustível que atenda às especificações, além do que a comercialização da torta sofre restrições devido à sua toxicidade.

Por outro lado, há de se considerar que as terras utilizadas pela cultura da cana são as melhores do país e o potencial agrícola do Brasil é muito maior do que as monoculturas do passado permitiam explorar. Novas fronteiras podem ser desbravadas, como foram as do meio-oeste brasileiro com a adaptação de sementes de soja ao tipo de solo disponível na região.

A disponibilidade das fontes agrícolas para produção do biodiesel varia de acordo com o clima e as condições das regiões de produção. A produção de óleo vegetal por hectare plantado é função da produtividade (t/ha/ano) e do conteúdo de óleo de cada espécie, conforme mostrado na tabela III-3 [CONAB, 2006].

Tabela III-3 – Rendimentos para produção de óleo das principais oleaginosas

Oleaginosa	Teor de óleo (%)	Produtividade (kg/ha)	Produção de óleo (kg/ha)
Soja	18	2376	428
Palma	20	10000	2000
Mamona	50	800	400
Algodão	15	1800	270
Girassol	42	1489	625
Canola	38	1800	684

Existem várias oleaginosas que podem ser usadas na fabricação de biodiesel. As principais são: soja, palma (dendê), mamona, babaçu, pinhão manso, nabo forrageiro, algodão, girassol, amendoim, canola e gergelim. Além das oleaginosas, existem outras matérias-primas que podem ser utilizadas, tais como: sebo, óleo de fritura, algas e esgoto, mas a qualidade do biodiesel produzido normalmente é inferior a do biodiesel de origem vegetal.

A palma ou o dendê é a matéria-prima com maior produção de óleo por hectare de área plantada. A soja apresenta um rendimento de óleo por hectare inferior quando comparada às demais alternativas, com exceção do algodão e da mamona. A mamona teria melhor produtividade, se irrigada, mas ainda apresenta restrições técnicas, devido às características químicas de seu óleo que dificultam a produção de um biodiesel que atenda às especificações, e econômicas, pois o preço do óleo de mamona no mercado internacional atinge valores muito superiores aos do óleo diesel mineral.

A tabela III-4 apresenta a produção brasileira de óleos vegetais em 2004, comparando-se ao consumo de óleo diesel no país no mesmo ano, caso toda a produção fosse destinada à fabricação de biodiesel.

A predominância da soja sobre qualquer outra semente oleaginosa é óbvia, com quase 90% de participação do mercado. Também é curioso notar que, se a produção de óleo de todas as sementes fosse destinada à fabricação de biodiesel, isso representaria apenas 18,5% do consumo brasileiro de óleo diesel mineral naquele ano.

Tabela III-4 – Produção brasileira de óleos vegetais¹¹ - 2004

Origem	mil t	%	% O.D. ¹²
Soja	5.571	89,2	16,4
Algodão	268	4,3	0,8
Palma(dendê)	140	2,2	0,4
Girassol	75	1,2	0,2
Milho	64	1,0	0,2
Mamona	61	1,0	0,2
Colza(canola)	23	0,4	0,1
Amendoim	22	0,4	0,1
Palmiste	16	0,3	0,1
Outros	3	0,0	0,0
Total	6.243	100	18,5

Na tabela III-5 faz-se a mesma análise com a produção mundial de óleos vegetais. A palma adquire grande destaque, devido às grandes plantações desenvolvidas no sudoeste asiático, na Malásia e Indonésia, desde meados dos anos 90.

Tabela III-5 – Produção mundial de óleos vegetais¹³ - 2004

Origem	mil t	%	% O.D. ¹⁴
Soja	30.694	28,3	90,3
Palma (dendê)	30.651	28,3	90,2
Colza (canola)	14.916	13,8	43,9
Girassol	9.399	8,7	27,6
Amendoim	4.732	4,4	13,9
Algodão	4.400	4,1	12,9
Palmiste	3.557	3,3	10,5
Coco	3.032	2,8	8,9
Oliva	2.978	2,8	8,8
Milho	2.015	1,8	5,9
Outros ¹⁵	1.916	1,7	1,8
Total	108.290	100	318,5

No entanto, as taxas médias de crescimento da produção mundial de óleos vegetais sofreram um incremento importante nos últimos anos. A taxa média aumentou de 4% ao ano, de 1990 a 2000, para 6% ao ano, de 2000 a 2005, mais do que dobrando a produção no período 1990-2005, passando de 56 para 115 milhões de toneladas, conforme pode ser observado na figura III-12 [Oil World Annual, 2005]. Também no Brasil a produção de óleos vegetais vem crescendo a taxas significativas, com um aumento médio de 5% entre 2000 e 2005 [ABIOVE, 2006].

¹¹ Fontes – Oil World Annual - 2005; ABIOVE

¹² %O.D. - % consumo de óleo diesel no Brasil (34.000 mil t/ano). Fonte: BEN-2005

¹³ Fonte – Oil World Annual – 2005

¹⁴ %O.D. - % consumo de óleo diesel no Brasil (34.000 mil t/ano). Fonte: BEN-2005

¹⁵ Outros incluem gergelim e mamona

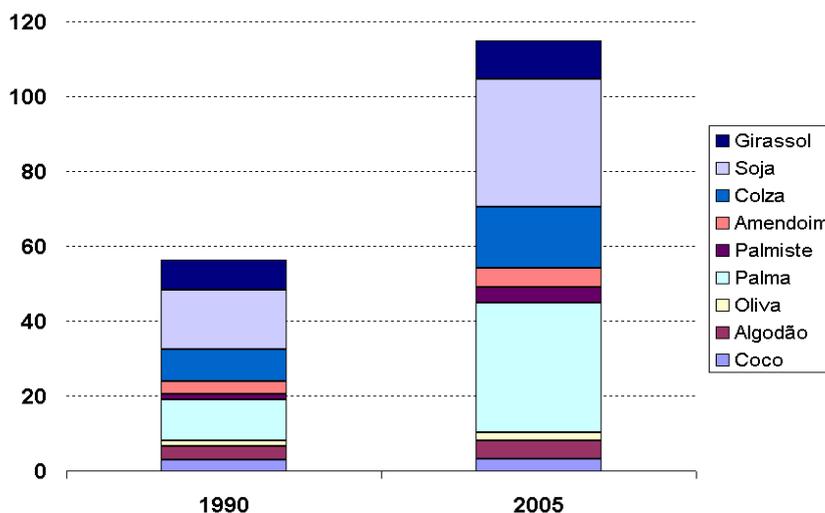


Figura III-12 – Produção mundial de óleos vegetais - milhões de toneladas

A tabela III-6 mostra uma comparação entre algumas sementes oleaginosas, milho e a cana-de-açúcar no que diz respeito a áreas plantadas e produção agrícola. Sob este aspecto, a vantagem da cana é inquestionável [CONAB, 2006].

Tabela III-6 - Produtividade agrícola de oleaginosas e milho x cana-de-açúcar

Vegetal	Área (mil ha)	Produção (mil t)	P/A (t/ha)
Soja	22.749	55.027	2,42
Palma ¹⁶	45	590	13,11
Mamona	129	103	0,80
Algodão	1.030	1.854	1,80
Girassol	49	72	1,47
Milho	12.964	42.515	3,28
Cana	5.600	340.000	60,71

Finalmente outro aspecto interessante na cadeia agroindustrial que deve ser observado diz respeito à sazonalidade da produção ao longo do ano. Tanto a palma, quanto o girassol e a mamona são plantas oleaginosas que produzem o ano todo e permitem um aproveitamento mais efetivo das usinas de transesterificação, sem a necessidade de formar, no momento da safra, estoques de grão para o ano todo. Uma mistura de todos esses grãos é a melhor solução para abastecer as usinas de transesterificação, que devem ser projetadas para tal, ou seja, aptas a receberem cargas diversas.

No Anexo A.2 pode-se consultar as características das principais oleaginosas plantadas no País e no Anexo A.3, informações sobre biodiesel.

¹⁶ Apenas na estado do Pará.