



EBC

Núcleo de Estudos de
Economias de Baixo Carbono

Relatório

CENÁRIOS E PERSPECTIVAS NO DESENVOLVIMENTO
FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA NO BRASIL

Ribeirão Preto

2012

Equipe de Coordenação do Projeto Economia de Baixo Carbono

Coordenação Geral – Rudinei Toneto Junior

Coordenação Geral Adjunta – Marcelo Pinho

Coordenação do Modelo de Equilíbrio Geral: Angelo Costa Gurgel

Coordenação SASTEC – Banco de Dados de Tecnologias: Geciane Silveira Porto e Sérgio Kannebley Jr.

Coordenação de Estudos Setoriais

Uso do Solo, Pecuária e grãos - Geraldo Bueno Martha Junior e Elísio Contini

Biocombustíveis – André Luis Squarize Chagas

Siderurgia - Germano Mendes de Paula

Alumínio – Clésio Lourenço Xavier

Cimento – Marcelo Pinho

Petróleo e Petroquímico – Eduardo Luiz Machado

Automobilístico e Aeronáutica – Cláudio Ribeiro de Lucinda

Consultores Temáticos: Energia, Eficiência Energética e Tecnologias Verdes

Paulo Seleglim Junior

Oswaldo Baffa

Auxiliares de Coordenação

Beatriz Selan

Gabriela Eusébio

Este projeto foi realizado com recursos do Fundo de Estruturação de Projetos (FEP) do BNDES. O conteúdo é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES. Informações sobre o FEP encontram-se em [HTTP://www.bndes.gov.br](http://www.bndes.gov.br).

CENÁRIOS E PERSPECTIVAS NO DESENVOLVIMENTO FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA NO BRASIL

Márcia R. Osaki, Beatriz Selan e Paulo Seleglim Jr.

INTRODUÇÃO

A necessidade de fornecer energia em escala cada vez maior e simultaneamente de maneira econômica e sustentável resulta em um desafio extremamente complexo para a humanidade cuja solução tem como condição *sine qua non* a articulação de diversas áreas das ciências básicas e engenharias, além de políticas de estado estruturadas e de longo prazo. Um olhar retrospectivo sobre as fontes de energia usadas pela humanidade desde sua pré-história revela que, claramente, o início da revolução industrial marcou uma profunda mudança entre o desenvolvimento incremental de fontes de baixa potência para rápidos avanços a partir de fontes de alta potência. Passamos da queima de lenha para o reator nuclear em pouco mais de um século. No cerne desta transformação disruptiva está nossa capacidade de ampliar a matriz energética, tanto em termos de volume quanto em termos de potência, através da aplicação de conhecimentos científicos e da tecnologia.

Assim como a oferta de água potável ou de leitos hospitalares, o consumo de energia *per capita* está fortemente correlacionado ao tamanho de população e a seu bem estar geral. Mais precisamente, o acesso a maiores volumes de energia torna possível à sociedade suportar maiores populações adequadamente nutridas, com saúde e em níveis de escolaridade progressivamente maiores. Esta afirmação pode ser corroborada pela análise quantitativa do crescimento da população mundial entre 1850 e 2000 e o correspondente crescimento da produção de energia, cf. mostrado no gráfico da figura seguinte.

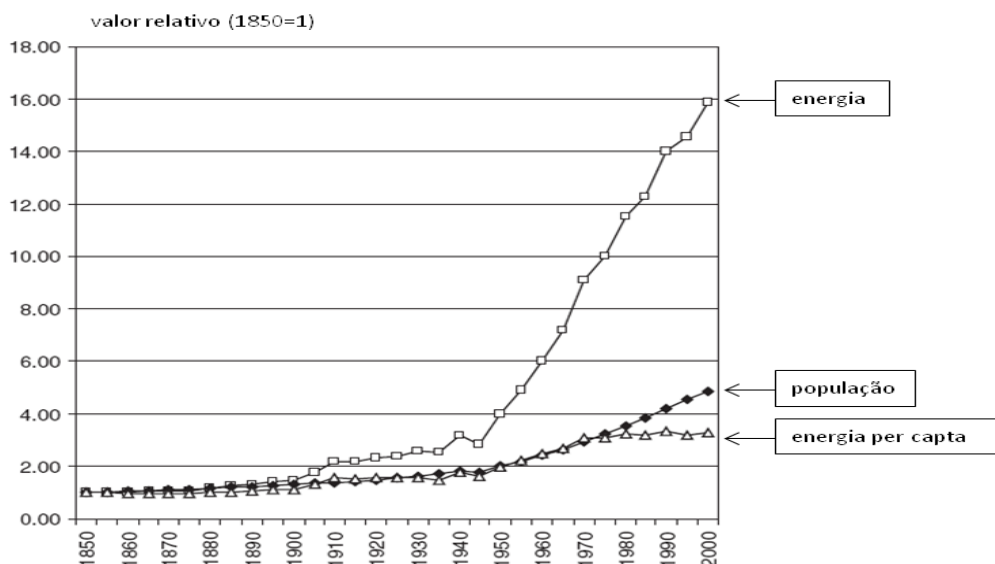


Figura 1 – Evolução histórica da população mundial, produção de energia e consumo de energia per capita normalizados em relação aos valores de 1850. (Fonte: Energy Information Administration – DOE/USA)

Quatro períodos distintos podem ser identificados quanto à produção de energia, cada um deles resultado de mudanças tecnológicas e/ou sociais de abrangência mundial. Entre 1850 e 1900, em alguns países, iniciou-se um processo intensivo de industrialização associado ao desenvolvimento de malhas ferroviárias e ao transporte marítimo. Porém, a maior parte da população não dispunha dos recursos financeiros que garantissem acesso às riquezas que estavam sendo produzidas neste processo, de modo que o efeito nos valores de energia per capita foi pouco significativo. Neste período, o crescimento da produção de energia atrelou-se ao crescimento vegetativo da população com o desenvolvimento de novas fontes de energia, sobretudo como a exploração mais intensiva do carvão, petróleo e gás natural. Pela sua “escalabilidade” e diversificação, a partir de 1900 até 1950 o acesso a estas fontes de energia tornou-se universal resultando em um aumento da produção sobre o aumento da população, com conseqüente aumento da energia per capita para o dobro do valor de 1850. No forte período de expansão econômica do pós-guerra, entre 1950 até 1975, houve um grande aumento da produção de energia, em volume e intensidade, e, novamente, a energia per capita seguiu o crescimento populacional. Finalmente, entre 1975 até o ano 2000, a possibilidade de exaustão das reservas de petróleo impôs limites no aumento do volume total de energia produzida, o que resultou em sucessivos choques de preços. Isto, por sua vez, estimulou o desenvolvimento de processos e tecnologias energeticamente mais eficientes de maneira que a energia per capita cresceu a taxas bastante inferiores relativamente ao crescimento populacional. Atualmente, tendo em vista que a preocupação com o

desenvolvimento de tecnologias energética e ambientalmente eficientes foi incorporada pelos profissionais responsáveis, assim como pela sociedade em geral, o que implica em um certo grau de saturação do desenvolvimento nesta área, este descolamento da energia per capita sugere o início de uma fase de demanda fortemente reprimida, sobretudo nos países menos desenvolvidos.

Isto fica bastante claro com a análise da correlação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo de energia per capita. O IDH incorpora fatores como expectativa de vida, nível de escolaridade, distribuição de renda, PIB per capita, taxas de pobreza e qualidade ambiental, e é normalizado numa escala de 0 a 1. Países com IDH próximo de zero possuem uma péssima qualidade de vida como Moçambique e Serra Leoa (IDHs de 0,336 e 0,410 respectivamente). Ao contrário, países com IDH próximo de 1 possuem excelente qualidade de vida sendo que a Noruega é a primeira colocada com um IDH de 0,968. A relação entre o IDH e o consumo de energia per capita, mostrado na figura seguinte, revela diversas tendências interessantes. A principal delas é que há uma relação direta entre IDH e consumo de energia, conforme antecipado anteriormente, porém há uma nítida saturação a partir de aproximadamente 2500 kgoe/pessoa. Mais precisamente, a partir deste valor de consumo de energia per capita, não há melhoria significativa em termos de qualidade de vida. O Brasil possui um IDH próximo de 0,7 e um consumo de energia per capita em torno de 1067,8 kgoe/pessoa o que coloca em perspectiva nossa real situação em termos de qualidade de vida.

Outro aspecto bastante relevante refere-se à seguinte questão: é possível elevar o IDH dos países menos desenvolvidos para valores em torno de 0,9 dado que os recursos energéticos mundiais são limitados? Partindo da população atual de cerca de 7 bilhões de pessoas e fixando uma meta de consumo per capita de 2500 kgoe/pessoa, o que teoricamente elevaria o IDH para o patamar de 0,9, obtém-se um consumo total de $628 \cdot 10^{15}$ kJ o que significaria aumentar em cerca de 33% a atual produção mundial de energia. Apesar de alcançável, esta meta está mais longe do que parece porque a população ainda está aumentando a altas taxas, sobretudo nos países nos quais o IDH é mais baixo, Índia e China por exemplo, e a necessidade de contar com reservas fósseis de energia o que implica em impactar o ambiente e, conseqüentemente, influenciar negativamente o IDH.

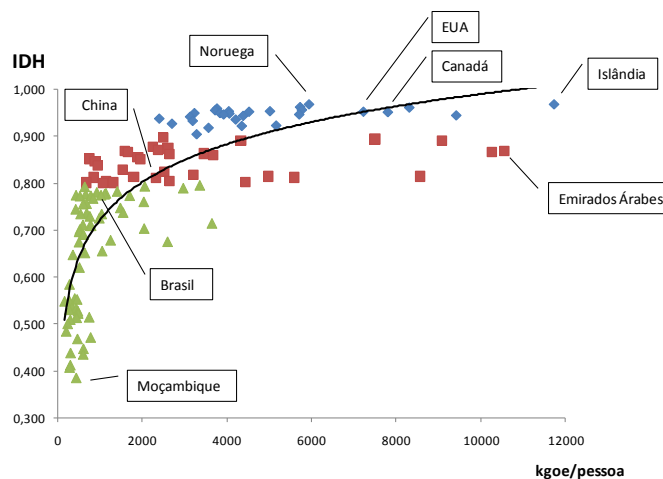


Figura 2 – Relação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo de energia per capita em quilogramas de equivalente em óleo para diversos países. (Legenda: países com IDH entre 0,901 e 1,000 (◆), entre 0,900 e 0,801 (■) entre 0,000 e 0,800 (▲).

A gravidade deste quadro tem motivado a comunidade internacional que, através do relatório Brundtland publicado em 1987 no âmbito da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, definiu metas para o desenvolvimento sustentável e parâmetros para sua aferição. Assim, conforme este relatório, a relação entre energia, riqueza e bem estar social pode ser mais bem compreendida a partir de uma análise mais detalhada dos seguintes parâmetros:

- E/P – Total de energia consumida relativamente ao total da população, reflete o acesso individual a bens, alimentos e serviços (educação, saúde, iluminação, água, etc.) energeticamente intensos
- PIB/P – Produto Interno Bruto relativamente ao total da população, reflete o acesso individual às riquezas geradas pela economia
- E/PIB – Energia total consumida relativamente ao Produto Interno Bruto, indica a demanda energética na geração de riquezas (uma empresa fornecedora de softwares pode gerar muita riqueza com um gasto mínimo de energia)
- CO₂/E – Total de emissões de CO₂ relativamente à energia total consumida, reflete a eficiência ambiental na produção de energia

Estes parâmetros podem ainda ser levantados para o grupo dos países mais ricos (OCDE – EUA, Europa, Japão, etc.) e em desenvolvimento (não-OCDE – México, China, Índia, Brasil, etc.), com destaque para os indicadores brasileiros, conforme mostrado na figura seguinte. As projeções até ano de 2030 foram obtidas a partir dos modelos do caso de referência publicados no

“International Energy Outlook” de 2008 publicado pelo Departamento de Energia do governo dos EUA (www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html).

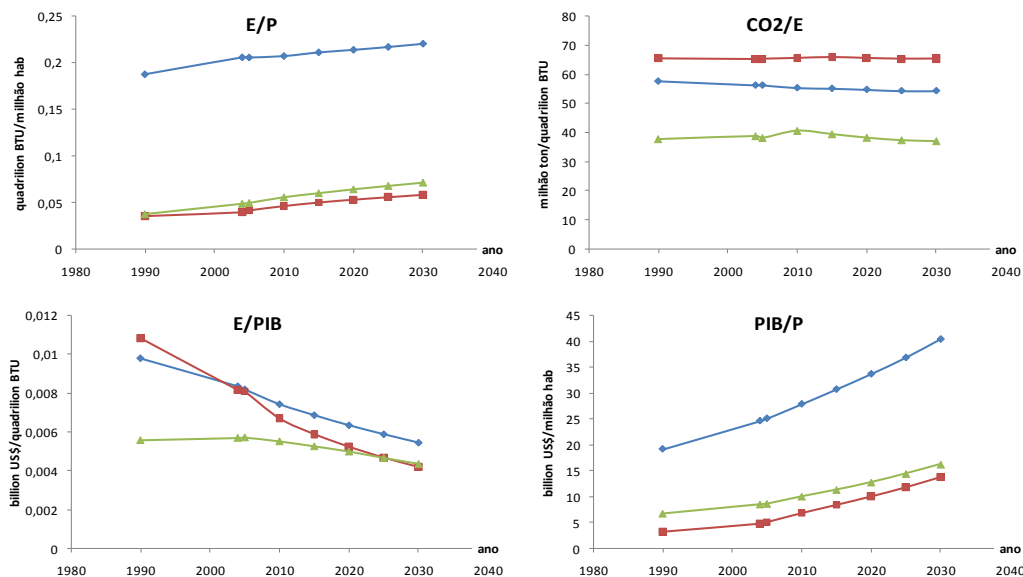


Figura 2 – Evolução de alguns dos parâmetros indicadores sociais relacionados à energia para os países da OCDE (◆), não-OCDE (■) e Brasil (▲).

Analisando o gráfico da evolução da energia per capita (E/P) fica evidente o descolamento do Brasil em relação aos demais países menos desenvolvidos, embora ainda estejamos muito distantes dos países mais ricos. Este aumento na taxa de consumo de energia per capita deverá ocorrer, para o Brasil, à custa das menores emissões poluentes relativamente tanto aos países da OCDE quanto não-OCDE, conforme se pode concluir do gráfico CO_2/E . Esta perspectiva é consequência da matriz energética brasileira estar atualmente alicerçada em cerca de 45% de fontes renováveis e na hipótese de que os programas nacionais de biocombustíveis e geração termoelétrica a partir de biomassas se consolidem de maneira a suprir o aumento projetado da demanda. A análise da demanda energética relativamente ao PIB (E/PIB) mostra que o Brasil tende lentamente para a geração de riquezas a partir de processos menos intensivos em energia, como é o caso dos países da OCDE, embora uma equiparação aos países mais ricos somente ocorreria num futuro bastante distante. Os países menos ricos, por outro lado, estão num processo de franca intensificação da demanda energética, influenciados pela China e Índia que expandem suas economias principalmente a partir de fontes não renováveis. Nosso pior resultado ocorre na análise do PIB per capita (PIB/P) que tende lentamente para a relação dos países menos ricos e reflete um problema crônico de distribuição de renda.

Os indicadores apresentados acima mostram claramente como todo esse processo gera demanda por energia e, igualmente, como a repressão dessa demanda pode afetar negativamente o desenvolvimento das nações e o bem estar social. Portanto, estamos diante de três grandes desafios que podem ser resumidos em: 1) universalizar os benefícios e o acesso à energia, 2) assegurar uma transição equilibrada da atual matriz energética, baseada preponderantemente em recursos à beira da exaustão, para uma nova matriz baseada em fontes renováveis e 3) prevenir possíveis danos ambientais decorrentes dessa nova matriz energética, bem como remediar os impactos já causados, principalmente devido à emissão de carbono fóssil.

2. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL E BRASILEIRA

Segundo o “International Energy Outlook” de 2008¹, a evolução dos diversos setores associados à energia será fortemente marcada pela transição da matriz energética, sobretudo pelo aumento da fração relativa às diversas fontes renováveis. O “Intergovernmental Panel on Climate Change – United Nations Environment Programme” (IPCC – UNEP) tem publicado previsões feitas a partir de diferentes modelos e hipóteses. Em particular duas destas previsões são interessantes para o caso brasileiro uma vez que consideram um cenário em que as preocupações ambientais são preponderantes, incluindo progressos tecnológicos substanciais e forte cooperação internacional nas questões de alterações climáticas. Outra característica compatível com as possibilidades do Brasil é a incerteza quanto ao prosseguimento ou não do nosso programa nuclear, considerado nas variações C2 e C1, conforme mostrado na figura seguinte.

¹ www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html

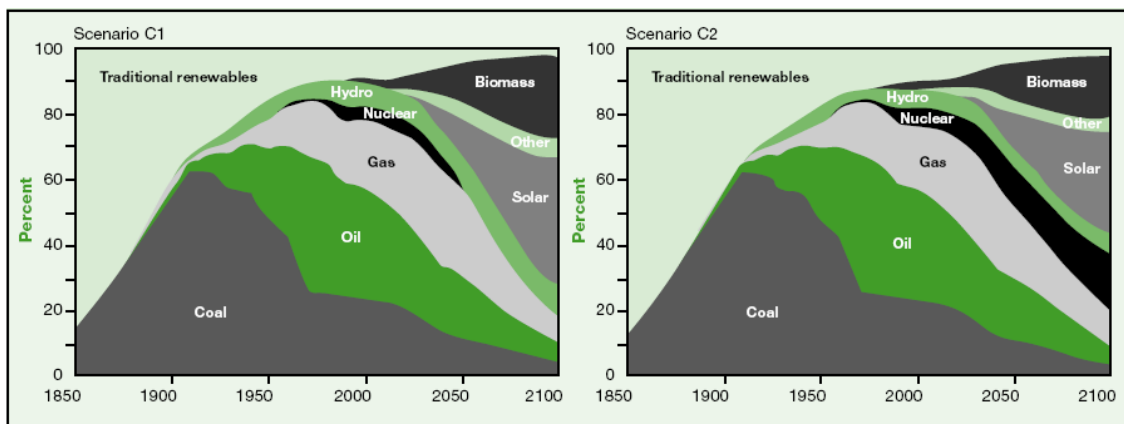


Figura 4 – Cenários de evolução da matriz energética mundial considerando que serão introduzidas taxas para promover a expansão dos renováveis e melhora na eficiência final de uso energético (Goldemberg, 2008).

Seja como for, em todos estes cenários pode-se antecipar com muita segurança que a matriz energética se dividirá de maneira aproximadamente equitativa entre combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás) e renováveis (eólica, hidráulica, solar e biomassas). Para o Brasil em específico é seguro afirmar que a fração correspondente às fontes oriundas de biomassa será substancialmente maior em função de nossas características geomorfológicas. Uma forte indicação desta perspectiva decorre de nossa atual matriz energética já fortemente baseada em fontes renováveis, conforme mostrado na figura seguinte.

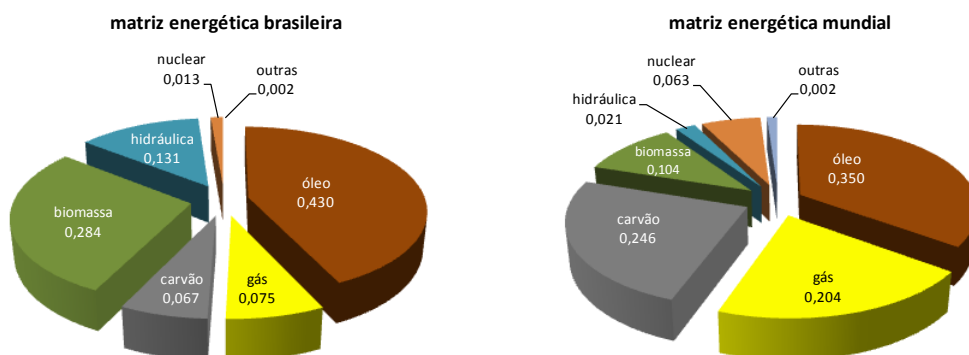


Figura 5 – Matriz energética brasileira e mundial (outras fontes incluem energia solar, eólica, geotérmica, etc.)

Adicionalmente às questões da matriz energética, o perfil de demanda por energia constitui igualmente um fator determinante na evolução dos mercados

de trabalho nesta área, bem como para o desenvolvimento tecnológico. Ganhos de eficiência de conversão e utilização da energia têm o potencial de reduzir as necessidades energéticas para uma mesma tarefa e, conseqüentemente, auxiliam na preservação das fontes não renováveis e na mitigação dos impactos ambientais decorrentes. Tais ganhos podem advir da reengenharia dos atuais processos com incorporação de novos materiais, maior conhecimento fenomenológico, por exemplo, bem como da introdução de soluções inovadoras para problemas clássicos. As aplicações envolvendo iluminação constituem um cenário bastante ilustrativo dos efeitos da introdução de uma tecnologia disruptiva. Atualmente, a iluminação baseia-se majoritariamente em tecnologias de incandescência e fluorescência, com preponderância da primeira no setor residencial e do segundo no setor comercial. A viabilização tecnológica e econômica das fontes de luz de estado sólido, energeticamente muito superiores às anteriores, promete modificar totalmente este quadro com substituição quase que total das lâmpadas incandescentes. A figura abaixo mostra uma estimativa da relação percentual das tecnologias utilizadas neste setor até o ano de 2095, publicada em um relatório do Instituto Batelle feito para o Programa Global de Estratégias Energéticas do governo dos EUA.

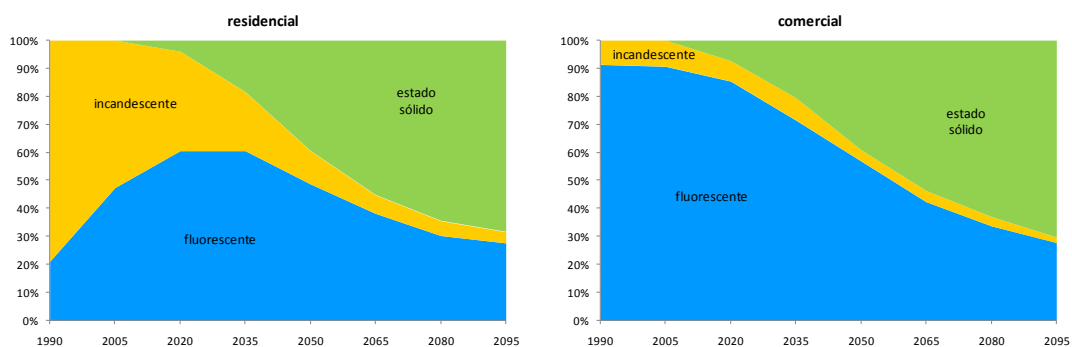


Figura 6 – Evolução das tecnologias utilizadas no setor de iluminação (End-Use Energy Technologies, Edmonds J.A. et al., 2007)

Os desafios associados à utilização da energia e as principais estratégias para sua superação podem ser melhor compreendidos considerando três grandes grupos de aplicação: edifícios, transporte e indústria. A evolução do consumo de energia nestes setores será influenciada por diversos fatores inter-relacionados dentre os quais se destacam o aumento do bem estar social, sobretudo dos países em desenvolvimento, mudanças de padrões de uso de terras, maior demanda por viagens de longa distância, intensificação e universalização do uso de aparelhos eletro-eletrônicos, etc. Atualmente, o consumo total de energia se divide de maneira mais ou menos equitativa, embora esteja previsto um aumento progressivo no setor de transporte e uma

diminuição da demanda no setor de edificações até o ano de 2095, cf. mostrado no gráfico da figura seguinte.

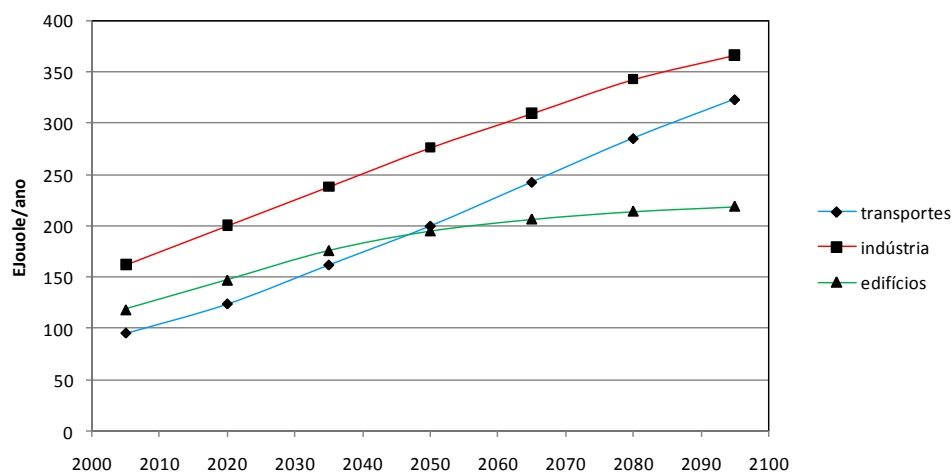


Figura 6 – Evolução da demanda energética por setor de aplicação (End-Use Energy Technologies, Edmonds J.A. et al., 2007)

O setor de edificações é extremamente variado, incluindo residências familiares, condomínios e prédios de apartamentos, até shopping centers, edifícios de escritórios, prédios industriais, armazéns refrigerados, etc. Embora haja necessidades específicas para cada um destes grupos, iluminação, climatização de ambientes e equipamentos eletro-eletrônicos são demandas comuns em praticamente todos eles. A tendência de menor utilização de energia no setor de edificações relativamente aos outros é decorrente da incorporação de tecnologias energeticamente mais eficientes como o uso de bombas de calor em sistemas de calefação, além de novos materiais e insumos como a aplicação de filtros de infravermelho em áreas envidraçadas, por exemplo. Além disso, o emprego de sistemas inteligentes para controle de iluminação, movimentação de elevadores e outros também tem contribuído significativamente para a redução relativa da demanda de energia no setor de edificações.

As projeções da demanda energética no setor de transportes apontam para um forte crescimento nas próximas décadas motivado pela maior movimentação de pessoas e cargas na medida em que os países em desenvolvimento forem alcançando patamares mais altos de desenvolvimento econômico, especialmente Brasil, China e Índia. Nesse caso, a utilização de energia está essencialmente às tecnologias de propulsão utilizadas: motores de combustão interna, motores a reação, motores elétricos, etc. A não ser pela chamada célula combustível, os avanços neste setor devem ocorrer de forma incremental tanto em termos de desempenho e eficiência energética quanto em termos de emissões poluentes. Além disso, os atuais e futuros motores

provavelmente serão majoritariamente movidos a combustíveis líquidos uma vez que ainda são imbatíveis em termos de armazenagem energética. O etanol e o biodiesel representam uma importante tecnologia ponte para o desenvolvimento sistemas de armazenagem mais eficientes. Atualmente um reservatório para gases a altas pressões é capaz de carregar somente cerca de 10% de seu peso próprio, ou seja, para armazenar 10kg de H₂ para uma célula combustível é necessário um tanque pesando 100kg. Problema semelhante ocorre com as baterias elétricas para veículos elétricos; além da baixa autonomia devido ao peso excessivo, o grande tempo de recarga e alto custo ainda comprometem seriamente a competitividade desta tecnologia.

O setor industrial é extremamente vasto, variado e heterogêneo. Alguns processos demandam relativamente pouca energia ao passo que outros, como o refino de petróleo e a fabricação de insumos químicos, têm na energia o seu principal item de custo, normalmente superando salários e matéria prima. Apesar desta variabilidade, a energia demandada se destina a alguns poucos serviços como a geração de vapor, aquecimento, acionamento mecânico, bombeio de fluidos, processos eletroquímicos, etc. O gráfico da figura seguinte mostra a demanda total por setor industrial e serviços nos EUA no ano de 2007, cf. dados do US Department of Energy. Estes dados mostram que, de uma maneira geral, os serviços associados à área térmica (vapor e aquecimento) e à área de máquinas (acionamento) são preponderantes. Atualmente, estes serviços já incorporaram as mais recentes tecnologias de forma que as eficiências energéticas atuais são relativamente altas. Por exemplo, as melhores eficiências energéticas alcançadas na produção de vapor a partir da combustão de gases, óleo ou biomassa giram em torno de 80% enquanto a eficiência de motores elétricos pode ultrapassar 90%. Assim, ganhos de eficiência energética deverão ocorrer de forma incremental a partir da incorporação de novas tecnologias e materiais. É o caso das membranas de separação molecular em substituição aos sistemas de separação por destilação em indústrias químicas e petroquímicas que requerem grandes quantidades de vapor.

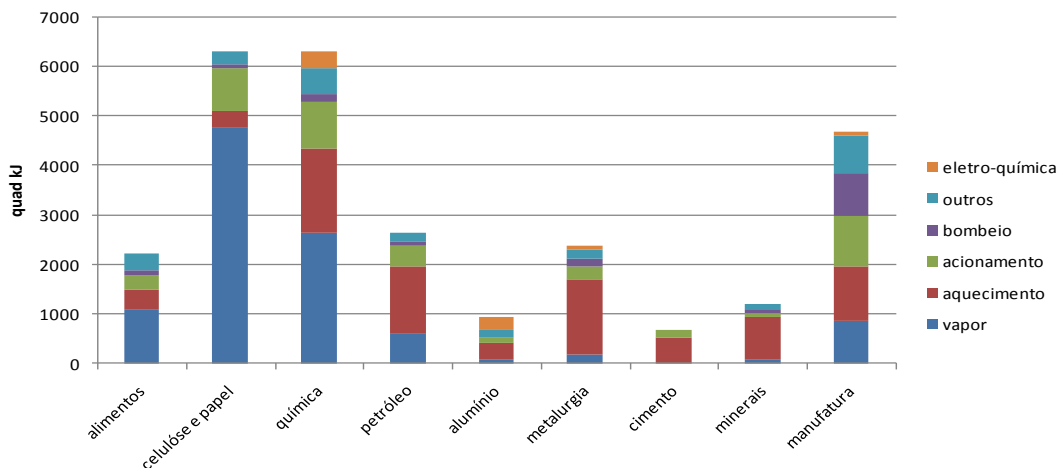


Figura 7 – Consumo de energia por serviço nos principais setores industriais em 2007 nos EUA (US Department of Energy)

3. ALTERNATIVAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS

A energia renovável é a energia que vem de recursos naturais como sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica que são recursos renováveis (naturalmente reabastecidos). São incluídos também a eletricidade e calor gerados a partir do sol, vento, oceano, hidroelétricas, biomassa, recursos geotérmicos e os biocombustíveis e o hidrogênio derivado de fontes renováveis. A energia renovável substitui combustíveis convencionais em quatro áreas distintas: geração de eletricidade, aquecimento da água, combustíveis e eletrificação rural.

A energia solar pode ser absorvida como a biomassa (fotossíntese), energia hidráulica (evaporação), eólica (ventos) e fotovoltaica, que contêm imensa quantidade de energia e que são capazes de se regenerar por meios naturais.

Energia eólica

A energia eólica está entre as tecnologias de energia renovável de mais rápido crescimento, com capacidade instalada aumentando a uma média de 30% ao ano desde 1992. É dela a maior parcela da geração de eletricidade de fontes renováveis adicionada nos últimos anos.

Em 2009 a capacidade mundial de geração de energia elétrica através da energia eólica foi de aproximadamente 158GW, o suficiente para abastecer as necessidades básicas de dois países como o Brasil (o Brasil demandou em média 70GW em janeiro de 2010). Para se ter uma ideia da magnitude da

expansão desse tipo de energia no mundo, em 2008 a capacidade mundial foi de cerca de 120 GW e, em 2007, 59 GW.

A capacidade de geração de energia eólica no Brasil vem aumentando ano a ano. Em 2008 era de 341MW, em 2009 passou 606 MW, e em 2010 atingiu o valor de 920MW. O Brasil responde por cerca da metade da capacidade instalada na América Latina, mas representa apenas 0,38% do total mundial.

Desde 2010 a China é o maior produtor de energia eólica. Em 2011 o total instalado nesse país ultrapassava 62GW, representando um aumento de 41% sobre a produção de 2010..

Em alguns países, a energia elétrica gerada a partir do vento constitui parcela importante na matriz. Na Dinamarca representa 23% da produção, 6% na Alemanha e cerca de 8% em Portugal e na Espanha (dados de setembro de 2007). Globalmente, a energia eólica não ultrapassa o 1% do total gerado por todas as fontes.

Energia Hidrelétrica

A hidroeletricidade converte a energia potencial gravitacional da água represada nas barragens através de turbinas diretamente para energia elétrica, não requerendo o uso de combustíveis. A queda d' água pode ser natural, como na Usina de Paulo Afonso, ou artificial, criada por uma barragem como na Usina Hidrelétrica de Tucuruí e na Usina Hidrelétrica de Itaipu. A queda também pode ser pequena, como no caso de uma usina maremotriz, que utiliza apenas o desnível das marés.

A energia hidrelétrica continua a ser o recurso renovável mais desenvolvido em todo o mundo: responde, hoje, pela maior parte (85%) da produção de eletricidade renovável e é uma das tecnologias disponíveis de geração de custo mais baixo.

O potencial teórico da energia hidrelétrica é da ordem de 40.000 terawatts-hora por ano (World Atlas, 1998). Considerando-se critérios econômicos e de engenharia, o potencial técnico estimado é menor, mas ainda é substancial – cerca de 14.000 terawatts-hora por ano (ou mais de quatro vezes os níveis atuais de produção).

A previsão da produção hidrelétrica é de crescimento contínuo, especialmente no mundo em desenvolvimento, onde um grande aumento da capacidade já está planejado, principalmente em países asiáticos não OCDE.

Energia Solar

A energia solar é qualquer tipo de captação de energia luminosa (e, em certo sentido, da energia térmica) proveniente do sol e posterior transformação dessa energia captada em alguma forma utilizável pelo homem, seja diretamente para aquecimento de água ou ainda como energia elétrica ou

mecânica. Para ser convertida em energia elétrica, são utilizadas células fotovoltaicas, que são semicondutores para converter fótons de luz diretamente em eletricidade.

As plantas utilizam diretamente essa energia no processo de fotossíntese. Nós usamos essa energia quando queimamos lenha ou combustíveis minerais. Existem técnicas experimentais para criar combustível a partir da absorção da luz solar em uma reação química de modo similar à fotossíntese vegetal - mas sem a presença destes organismos.

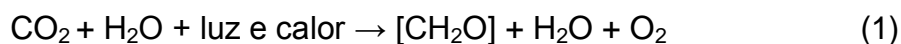
A capacidade instalada da energia fotovoltaica cresceu, em média, mais de 60% por ano de 2000 a 2004. Até recentemente, a energia solar fotovoltaica estava concentrada no Japão, Alemanha e Estados Unidos. Juntos, estes países respondem por mais de 85% da capacidade fotovoltaica solar instalada nos países OCDE. Também se espera que a energia solar fotovoltaica se expanda rapidamente na China.

O principal obstáculo a esse tipo de geração de energia é o custo, que normalmente é mais alto que o custo de geração de energia convencional e substancialmente mais elevados do que os custos de geração de energia eólica.

Biomassa

Energia de biomassa é energia química, obtida a partir do sol, por meio da fotossíntese realizada por plantas e bactérias. Silva (2010)

Durante o processo de fotossíntese, as plantas absorvem o dióxido de carbono (CO₂) e a água para produzir oxigênio (O₂) e biomassa, como mostra a equação 1. A biomassa seca geralmente contém carbono, hidrogênio e oxigênio. O combustível e alimentos liberam o CO₂ de volta para a atmosfera. O CO₂ é então reusado para o crescimento da próxima cultura e assim, ciclicamente. Gupta e Demirbas (2010)



Tipicamente, biomassa refere à parte não comestível das plantas. Podem ser incluídos: madeiras e espécies herbáceas, resíduos de madeira, resíduos agrícolas e industriais, resíduos de papel, resíduos sólidos municipais, resíduos de processamento de alimentos, resíduos animais, entre outros. Resumidamente, a tabela 1 mostra as categorias de biomassa. Gupta e Demirbas (2010)

Tabela 1 – Principais categorias de matérias-primas de biomassa. Fonte: Gupta e Demirbas (2010)

Categoria principal	Matéria-prima biomassa
Produtos de florestas	Madeira, resíduos de madeira, árvores, arbustos, serragens, cascas
Resíduos biorenováveis	Resíduos agrícolas, resíduos lenhosos, resíduos orgânicos renováveis
Culturas alimentares	Resíduos de culturas de grãos e óleos
Culturas de açúcares	Cana-de-açúcar, beterraba, melaços, sorgo
Aterros	Resíduos sólidos municipais
Resíduos orgânicos industriais	Resíduos de plásticos, óleo, couro, borracha
Algas, líquens, musgos	Cogumelos
Plantas aquáticas	Algas, resíduos da água

Para a obtenção das mais variadas fontes de energia, a biomassa pode ser utilizada de maneira vasta, direta ou indiretamente. O menor percentual de poluição atmosférica global é o principal benefício de sua utilização.

Igualmente, em relação a outras formas de energias renováveis, a biomassa, como energia química, tem posição de destaque devido à alta densidade energética e pelas facilidades de armazenamento, conversão e transporte. A semelhança entre os motores e sistemas de produção de energia de biomassa e de energia fóssil é outra vantagem, dessa forma a substituição não teria um efeito tão impactante nem na indústria de produção de equipamentos nem nas bases instituídas para transporte e fabricação de energia elétrica.

Biocombustível

Biocombustível é o combustível gerado a partir da biomassa e tem como vantagem a contribuição da diminuição dos gases do efeito estufa (GEE). Todo material orgânico gera energia, mas o biocombustível é fabricado em escala comercial a partir de produtos agrícolas como a cana-de-açúcar, mamona, soja, canola, babaçu, mandioca, milho, beterraba e algas.

O bioetanol é um biocombustível gerado a partir da cana-de-açúcar e do milho, principalmente. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a biomassa celulósica, como o bagaço da cana, árvores e gramíneas também podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de etanol celulósico ou etanol de segunda geração (2G).

O biodiesel é feito a partir de óleos vegetais como o de girassol, nabo forrageiro, algodão, mamona e soja e lipídios animais. É produzido por transesterificação e é um combustível biodegradável alternativo ao diesel de petróleo, criado a partir de fontes renováveis de energia.

Energia geotérmica

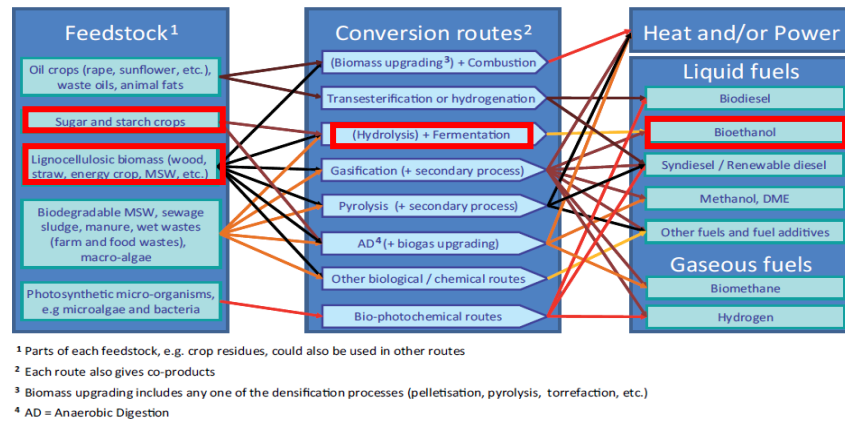
É a energia obtida a partir do calor proveniente do interior da Terra. A produção geotérmica de eletricidade só é prática, geralmente, quando existem vapor ou água subterrâneos a temperaturas superiores a 100 °C. Para temperaturas entre 50 e 100 °C, a energia geotérmica pode ser utilizada em aplicações diretas de calor, tais como: aquecimento de estufas de plantas e ambientes e fornecimento de água quente.

A capacidade global de geração de energia elétrica geotérmica é de cerca de 9GW, a maior parte concentrada na Itália, Japão, Nova Zelândia e Estados Unidos. Os campos hidrotérmicos mais quentes são encontrados na orla do oceano Pacífico, em algumas regiões do Mediterrâneo e na bacia do oceano Índico. A Islândia lidera no mundo, em termos de capacidade existente de calor direto, suprimindo cerca de 85% de suas necessidades totais de aquecimento de ambientes usando a energia geotérmica.

De acordo com a World Energy Outlook, espera-se que a capacidade e a produção energética geotérmica atinjam 25 gigawatts e 174 terawatts-hora, respectivamente, até 2030, contribuindo, assim, com 9% das novas fontes renováveis.

4. BIOENERGIAS

Matérias-primas geradas a partir da biomassa podem ser classificadas em grupos, como mostra a figura abaixo. Cada grupo pode seguir várias rotas de conversão para geração de energia, seja na forma de calor ou combustível. Como destaques podem ser citadas as culturas de açúcar e amido, utilizando a rota de conversão a partir da fermentação para a produção de etanol. Para insumos lignocelulósicos, como madeira, palha e bagaço da cana-de-açúcar, a mesma rota de conversão pode ser seguida para a obtenção do etanol.



Produção e conversão de biomassa

As plantas produzem biomassa energética sob a forma de material lignocelulósico, açúcares, amidos e óleos. O Brasil, país de bons solos, onde o sol e a água são abundantes, é um grande produtor de biomassa. De toda a biomassa que o nosso país produz, a concentração vai para a cana-de-açúcar, uma gramínea plantada no Brasil desde o início do século XVI.

O foco de interesse são os componentes da biomassa que têm um aproveitamento energético direto. No caso da cana-de-açúcar, os mais simples são os açúcares contidos no caldo, empregados no Brasil para produzir o bioetanol, nas mesmas usinas que produzem açúcar. A cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas comerciais no mundo. Brasil é o líder na produção, com aumento na produção ano a ano. A cultura da cana alcança todos os estados brasileiros e ocupa cerca de 9% da superfície agrícola do país, sendo o terceiro cultivo mais importante em superfície ocupada, depois da soja e do milho. Nogueira (2008)

A cana-de-açúcar é uma gramínea composta de espécies de gramas altas perenes, oriundas de regiões temperadas quentes a tropicais da Ásia, especialmente da Índia. A parte aérea da planta é composta pelos colmos, nos quais se concentra a sacarose, que é o carboidrato predominante e pelas pontas e folhas, que constituem a palha da cana. A palha é formada pelas folhas secas e verdes e pelas pontas, totalizando 140 kg de massa seca por tonelada de cana. Nogueira (2008)

Após o processamento da cana-de-açúcar para a fabricação de açúcar e/ou etanol, é produzido o bagaço numa quantidade que varia de 240 kg a 280 kg por tonelada de cana moída e constitui no único combustível utilizado nas caldeiras a vapor, suprimindo toda energia necessária ao processamento industrial da cana-de-açúcar.

Há uma possibilidade evidente de se utilizar toda a biomassa da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de etanol e não somente o caldo como é o processo atual. Estima-se que com o uso do bagaço para a produção

do etanol aumentaria a produção em 40%. Neste contexto, o etanol produzido a partir da biomassa lignocelulósica é uma alternativa interessante, pois matérias-primas lignocelulósicas não competem com as culturas alimentares e são mais baratas que as convencionais (Alvira, Tomás-Pejó, Ballesteros e Negro (2010).

Perspectivas mundiais do aumento da demanda por automóveis movidos a etanol, possíveis consequências e suas expectativas

O uso do etanol em carros flex-fuel ou simplesmente adicionado à gasolina constitui-se na mais importante forma de redução dos gastos de combustíveis advindos de recursos fósseis. Espera-se, então, um incremento na demanda internacional por este produto e, de fato, muitos países têm aprovado legislações sobre o incremento da produção e do consumo de etanol como combustível para os meios de transporte. A produção mundial de etanol experimentou um incremento de mais de três vezes entre 2000 e 2007, passando de 17 bilhões de litros para mais de 52 bilhões de litros. Entre 2007 e 2008, a participação do etanol na gasolina global ampliou-se de 3.7% para 5.4%, enquanto em 2010, a produção mundial de etanol alcançou 76.7 bilhões de litros, sendo os EUA os maiores produtores (21.5 bilhões de litros, o que equivale a 28% da produção global), seguidos pelo Brasil com 20,3 bilhões de litros ou 26% do *market share* global deste produto. Contudo, ainda existe um debate interessante acerca do efetivo uso do bioetanol como substituto da gasolina.

As principais preocupações desta visão estão pautadas na sua produção e uso relativamente ao aumento dos preços dos alimentos em decorrência da grande necessidade de área plantada para as culturas, assim como o balanço energético e de poluição de todo o ciclo produtivo do etanol, principalmente quando produzido a partir do milho. Estudos recentes mostram que etanol produzido do milho nos EUA tem um balanço energético positivo de aproximadamente 4:3 (4 unidades de energia renovável requerem 3 unidades de energia fóssil), enquanto o etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil tem um balanço energético de 9:1.

Dentro do contexto de biocombustíveis de segunda geração, as fibras lignocelulósicas, um importante componente das paredes das células das plantas, constitui-se como uma alternativa atrativa e promissora no aumento da produção de etanol em decorrência da possibilidade de coexistir com as culturas alimentícias sem que haja competição com eles. Por exemplo, os produtores de milho podem vender os grãos para a indústria de alimentação animal e usar as folhas, caule e espigas para a produção de etanol celulósico. Uma grande variedade de matérias primas pode ser usada para a sua produção, como bagaço da cana-de-açúcar, miscanthus, gramíneas, eucalipto, etc., bem como muitos tipos de resíduos industriais como serragem, têxtil, papel, restos de papelão, etc. Para ilustrar seu potencial, considere uma planta de conversão brasileira típica de cana de açúcar descrito pelos seguintes números:

Área Plantada	30 mil ha
Taxa de processamento de cana-de-açúcar	500 tonc/h (toneladas de cana/hora)
Produção de Etanol (sem produção de açúcar)	45 m ³ /h (primeira geração)
Produção de Açúcar (sem produção de etanol)	65 ton/h
Produção de Bagaço	150 ton/h de bagaço seco
Oferta de Bioeletricidade (do bagaço)	50 MW

É óbvio que estes números podem variar consideravelmente, principalmente o excedente de eletricidade que depende da pressão do funcionamento da caldeira e da temperatura. Em vez de ser transformada em energia elétrica, o excesso de bagaço pode ser convertido em etanol de 2ª geração a uma taxa máxima teórica de aproximadamente 42 m³/ h. Assim, é possível dobrar a produção de etanol sem necessidade de aumentar a área total plantada.

Infelizmente esta perspectiva ainda está distante porque etanol de segunda geração ainda não é economicamente viável. Apesar da Lei de Segurança e Independência Energética dos Estados Unidos de 2007 exigir um consumo total de etanol de 136 bilhões de litros até 2022, com uma parcela crescente de etanol celulósico (1,9 bilhões de litros até 2012 e 60,5 bilhões de litros em 2022), a produção de etanol celulósico é irrelevante neste país ou em qualquer outro país também. Tal rota de conversão é restrita a laboratórios de pesquisa e plantas industriais de demonstração de pequeno porte, sendo que o principal entrave para a produção em escala industrial é o seu custo de produção. Há um consenso entre cientistas, engenheiros e economistas que a razão subjacente para isso é uma falta generalizada de conhecimento científico, o que impede o desenvolvimento de tecnologias robustas para biocombustíveis de 2ª geração que seria a base de custos para processos industriais competitivos. Mas esses problemas também são ótimas oportunidades, como será elaborado na seção seguinte.

Processos de produção de etanol de primeira e segunda geração

A produção industrial de etanol baseia-se quase que exclusivamente na fermentação. Esse tipo de fermentação é um processo biológico, mediante o uso de leveduras, que convertem o açúcar simples em energia celular, dióxido de carbono. Sua reação química pode ser expressa por $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CO_2 + 2C_2H_5OH + \text{calor}$. A fermentação é um processo que ocorre apenas em condições anaeróbicas e a energia contida no etanol ainda é extremamente grande, então, é normalmente associado com organismos unicelulares capazes

de sobreviver com pouca energia. Em condições aeróbicas, os organismos geralmente oxidam os açúcares (respiração) já que esse processo libera muita energia, cujo excesso é armazenado como gordura. Esse processo metabólico é frequentemente usado por organismos mais complexos e que demandam energia como as plantas que armazenam o excesso de energia por meio da construção de cadeias mais longas de açúcares simples (polissacarídeos), unidas por ligações glicosídicas, como mostrado na **Figura 1**. Os vários tipos de amido constituem um excelente exemplo, porque eles são a principal fonte de alimento dos seres humanos.

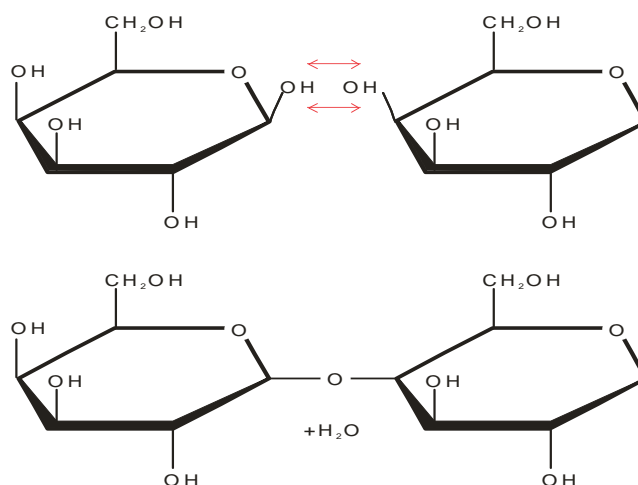


Figura 1 – Formação de um dissacarídeo (lactose) por meio de uma ligação glicosídica entre dois monômeros de açúcar

O principal ponto aqui é que a recuperação de energia por meio da metabolização de um polissacarídeo se torna progressivamente mais difícil conforme a cadeia de açúcar fica mais complexa. Portanto, para permitir a fermentação, é necessário disponibilizar açúcares simples por meio da quebra das ligações glicosídicas por uma ação externa. Na natureza, vários organismos vivos desenvolveram estratégias para usar essa fonte de energia, incluindo a produção direta de enzimas por fungos e bactérias, ou a combinação de ácidos e de ação mecânica em ruminantes. É por isso que não podemos ser alimentados diretamente com grãos em estado natural como trigo, arroz e feijão, sem antes submetê-los a qualquer processo de cozimento. Na pré-história, o controle humano do fogo permitiu uma grande diversidade de fontes alimentares e esta é uma das principais razões para o sucesso da raça humana como espécie.

Ao contrário dos amidos, a celulose é um polissacarídeo formado pela polimerização de dezenas de milhares de monômeros de açúcar. Ela é principalmente sintetizada por plantas verdes e representa 33% da biomassa

total das plantas do planeta, atingindo 90% de algodão e 50% em espécies lenhosas.

A celulose é o principal componente da parede celular da planta, possibilitando-lhes resistir a tensões mecânicas externas (o seu próprio peso, vento, etc.) e a pressão osmótica, que atua como uma barreira seletiva de modo a manter a água no interior da célula. Ela está dividida em camadas e redes de microfibras de celulose que formam emaranhados de filamentos de hemicelulose e pectina. Os espaços vazios são preenchidos com uma substância polimérica amórfica chamada lignina, que age como um aglomerante e proporciona resistência à compressão. Este arranjo altamente elaborado é similar a uma estrutura de concreto reforçado, sendo mais comumente encontrado em plantas lenhosas que surgiram mais recentemente na natureza (plantas superiores). Por esse motivo apenas alguns poucos microrganismos podem se alimentar de lignina, já que eles não tiveram tempo para desenvolver enzimas específicas para a sua degradação. Na verdade esta é uma estratégia de sobrevivência muito bem-sucedida de plantas superiores (eles não podem fugir dos organismos que as atacam) e deve ser creditado aos mecanismos de evolução e seleção natural. Todas essas características são os principais obstáculos para acessar açúcares mais simples para a fermentação, propriedade conhecida como recalcitrância. Portanto, a utilização de celulose para a produção de etanol só pode ocorrer se a sua recalcitrância for superada, isto é, se os monômeros de açúcar tiverem sido previamente libertados para o processo de fermentação.

Em geral, a melhor forma de gerar açúcares simples para a fermentação é um processo composto por duas fases: 1) ruptura de macroestruturas ligno-celulósicas (pré-tratamento) e, subsequentemente, 2) quebra de ligações glicosídicas (hidrólise). Um estudo realizado no Laboratório Nacional de Energia Renovável por Lynd *et al.* (1996) [1] demonstra que a hidrólise do material ligno-celulósico é inferior a 20%, enquanto se precedido por uma das principais técnicas de pré-processamento, é possível atingir mais de 90% do limite teórico. Várias técnicas de pré-tratamento têm sido desenvolvidas, em particular para materiais tais como palha de trigo, espigas de milho e várias gramíneas. As técnicas tradicionais incluem o tratamento ácido e de explosão de vapor, com ou sem amônia ou solventes orgânicos. Técnicas mais inovadoras foram desenvolvidas com base na utilização de fluidos supercríticos, irradiação de microondas, de deslignificação biológica, além do pré-tratamento alcalino e com ozônio. Todas estas técnicas apresentam vantagens e desvantagens que dependem das condições de funcionamento e do tipo de biomassa pré-tratada. No entanto, nenhuma delas é viável para a indústria brasileira de cana-de-açúcar a qual, tipicamente, tem centenas de toneladas de biomassa a ser processada a cada hora. Uma técnica muito promissora desenvolvida em alguns centros de pesquisa no Brasil e no mundo

baseia-se na pressurização de água líquida quente seguida de despressurização explosiva.

Uma vez que as macroestruturas ligno-celulósicas tiverem sido quebradas ainda é necessário um processo de despolimerização da celulose e da hemicelulose em açúcares simples que possam ser eficientemente fermentados. A quebra das ligações glicosídicas pode ser feita por meio de uma reação de hidrólise, isto é, uma reação com moléculas de água. No caso da celulose, essa reação é conhecida como celulólise ($[C_6H_{10}O_5]_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$) que, para ocorrer de forma eficiente, deve ser catalisada pela ação de um algum adjuvante químico, geralmente um ácido ou um coquetel de enzima. A celulólise ácida (ou simplesmente "hidrólise ácida", como é conhecido no jargão da indústria) é um método muito tradicional e data de meados de 1800, quando as primeiras técnicas para a produção de etanol foram desenvolvidas a partir de resíduos de madeira. O calcanhar de Aquiles da hidrólise ácida é a necessidade de neutralizar e separar o catalisador ácido e seus subprodutos, resultando em perdas inevitáveis de açúcares fermentáveis, bem como a contaminação no processo de fermentação por compostos inibidores. Outro problema importante é a necessidade de materiais resistentes à corrosão, tais como aço inoxidável ou revestimentos cerâmicos especiais, o que aumenta imensamente o custo do equipamento requerido para o processamento. Embora a hidrólise ácida tenha um amplo histórico técnico adquirido durante uma longa história de aplicações industriais bem sucedidas, sua aplicação na produção de etanol celulósico enfrenta dificuldade para incorporar os avanços tecnológicos que levam ao aumento da eficiência energética e de custos, minimizando ou eliminando a geração de resíduos poluentes.

Além do uso de soluções ácidas, a ruptura de ligações glicosídicas também pode ser catalisada por enzimas. A hidrólise enzimática é um processo natural usado por várias espécies na busca por energia. Ruminantes e alguns tipos de cupins pode sacrificar celulose, devido a uma associação simbiótica com bactérias capazes de produzir enzimas celulolíticas, também conhecidas como celulasas. Da mesma forma, alguns tipos de fungos são capazes de produzir enzimas celulolíticas altamente eficazes. Por exemplo, o fungo *Trichoderma reesei* produz uma série de celulasas capaz de hidrolisar a celulose em uma grande quantidade de açúcares simples. A fermentação da biomassa sacrificada por enzimas celulolíticas é amplamente facilitada, especialmente porque é uma sequência de reações que, em geral, está associada ao metabolismo dos organismos vivos. É por esta razão que uma temperaturas e pHs amenos são adequados para a produção da enzima e para a sua eficácia sobre a celulose, evitando assim a formação de compostos inibitórios da celulólise ou da fermentação. Consequentemente, o processo tende a ser mais simples e mais barato (não é necessário proteção contra a corrosão e

resistência a altas temperaturas) e com uma produção mínima ou facilmente tratada de resíduos prejudiciais para o meio ambiente.

Contudo, na atual conjuntura tecnológica, a celulólise enzimática não é capaz de produzir concentrações elevadas de açúcares fermentáveis em escala industrial, tornando-a inadequada para aplicações comerciais. Além disso, dadas às condições típicas de uma usina de cana-de-açúcar no Brasil, o celulólise de centenas de toneladas de biomassa por hora implica numa taxa de produção de enzimas maior do que a capacidade dos biorreatores atuais. Porém, estes problemas devem ser vistos como duas grandes áreas de pesquisa e desenvolvimento que, portanto, podem ser entendidas como oportunidades de negócios estratégicos a serem exploradas. Embora seja conhecida há muito tempo, a aplicação em escala industrial de celulólise enzimática é recente com pouco mais de quinze anos de experiência. Por exemplo, não apenas a ação enzimática sobre a celulose é mal compreendida, como também as misturas enzimáticas eficazes feitas para biomassas específicas, dentre elas bagaço ou miscanthus que ainda não foram desenvolvidas. Pode-se superar esta barreira por meio da pesquisa por novas enzimas, bem como o uso de modificação genética dos fundos produtores de cellulases. A biologia molecular é, portanto, uma área de pesquisa muito promissora, bem como o desenvolvimento de biorreatores de nova geração que incorporem tecnologias inovadoras, principalmente os baseados em Dinâmica dos Fluidos Computacional e Algoritmos de Inteligência Artificial usados para otimizar o design e a operação dos processos de conversão biológicos.

5. Conclusões

As perspectivas da expansão mundial da demanda por transportes têm colocado muita pressão sobre os cientistas e engenheiros para o desenvolvimento eficiente, robusto e competitivo de processos industriais de larga escala para os biocombustíveis, dentre os quais o bioetanol é provavelmente o mais importante. Grandes problemas de sustentabilidade já foram considerados e relacionados principalmente com o balanço energético total e o esgotamento do solo em decorrência da intensificação da agricultura adicionalmente aos impactos do preço dos alimentos. A produção de etanol de segunda geração a partir de culturas específicas (eucalipto, miscanthus, etc.) ou a partir de resíduos agrícolas ou industriais (sabugo de milho, palha, etc.), constitui uma rota de conversão muito promissora, já que pode, literalmente, coexistir sem competir com as culturas alimentares. Por exemplo, existem interessantes estudos sobre a consorciação do milho com diferentes espécies de *Brachiaria* gerando um aumento na eficiência global fotossintética, sendo a

primeira uma fonte de alimento de amido e a segunda constitui-se na principal fonte de celulose para a conversão em biocombustível.

A cana-de-açúcar tem uma das maiores eficiências fotossintéticas no reino vegetal, capaz de converter cerca de 1% da energia solar incidente em biomassa com um alto teor de sacarose, que é facilmente fermentada e convertida em bioetanol. Seu cultivo em larga escala está bem estabelecido no Brasil, principalmente após o desenvolvimento das tecnologias flex-fuel, que permitiu aos consumidores escolher qualquer proporção de gasolina/etanol, dependendo dos preços de mercado. Contribuiu para esse quadro a combinação simultânea de condições favoráveis, tais como uma boa incidência de luz solar, temperaturas amenas, padrão de chuva regular e adequado, disponibilidade de terra arável, solos férteis, pesquisas de longo prazo para desenvolver híbridos adaptados às condições específicas, etc. Apesar de um balanço energético global altamente favorável quando comparado a outras biomassas, ainda há muito a ser feito para melhorar a eficiência de conversão, minimizar as emissões de GEE, preservar a fertilidade do solo, dos recursos hídricos e assim por diante. É necessário, também, ampliar a taxa de processamento para valores superiores a 1000 tsc/h, de forma a permitir economias de escala. Vários modelos agroindustriais integrados para a produção sustentável e a conversão de biomassa em biocombustíveis e produtos de maior valor agregado têm sido propostos. A fundamentação desse modelo como uma típica (referência) usina industrial de cana-de-açúcar revela vários obstáculos e gargalos para a sua implementação, principalmente devido à falta de conhecimento científico e a ausência de tecnologias robustas e com custos competitivos para o processamento em alta escala relacionadas ao etanol de 2ª geração.

Portanto, de modo a superar essas dificuldades, uma ampla gama de pesquisas precisa ser articulada, passando pela genética, ciência biomolecular e biologia celular para projeto de engenharia e otimização, processamento industrial e avaliação da sustentabilidade. Possíveis temas de pesquisa e ações futuras são: 1) compreender a estrutura e a composição da biomassa ligno-celulósica, 2) desenvolvimento do genoma de plantas modernas e transformações genéticas que permitam estudos avançados da fotossíntese e do metabolismo delas com o intuito de ampliar a eficiência da célula de conversão, 3) a definição de práticas agrícolas sustentáveis com foco especial na preservação da água e do solo, necessidades e logísticas para energia e matérias-primas, 4) identificação de novas rotas de conversão bioquímicas, que envolvem biologia estrutural da enzima e processamento de proteínas, com especial relevância para os biocombustíveis e bioquímicos de valor agregado, 5) desenvolvimento de processos industriais e equipamentos inovadores com custos competitivos para a transformação de biomassa e 6) construção de ferramentas para avaliação da viabilidade econômica, da pegada ecológica e

dos impactos sociais destas novas tecnologias. Para atender a essas expectativas, será necessário orquestrar tanto a pesquisa induzida como a exploratória, sendo a primeira responsável por descobertas científicas que são a base de tecnologias radicais permitindo grandes saltos evolutivos e a segunda com a promoção da sua consolidação por meio de uma série de inovações incrementais resultantes da experimentação, refinamento e testes mais realistas.

Referencial Bibliográfico

ALVIRA, P., TOMÁS-PEJÓ, E., BALLESTEROS, M., & NEGRO, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review.

Bioresource technology, Elsevier Ltda, v.101, n. 13, p. 4851-61, 2010.

GUPTA, R. B.; DEMIRBAS, A. Gasoline, diesel, and ethanol biofuels from grasses and plants. Cambridge University Press, 2010, 230 p.

SILVA, C. G. De sol a sol: energia no século XXI. (Série inventando o futuro). São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 128 p.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. tradução, Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. – [São Paulo]: FAPESP; [Amsterdam]: InterAcademy Council; [Rio de Janeiro]: Academia Brasileira de Ciências, 2010. 300 p.