

©Copyright, 2006. Todos os direitos são reservados. Será permitida a reprodução integral ou parcial dos artigos, ocasião em que deverá ser observada a obrigatoriedade de indicação da propriedade dos seus direitos autorais pela INTERFACEHS, com a citação completa da fonte. Em caso de dúvidas, consulte a secretaria: interfacehs@interfacehs.com.br

ENERGIA MICROBIOLÓGICA

Renata Grisoli ¹, Suani Teixeira Coelho ², Patricia H. L. S. Matai ³

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Energia da USP. rgrisoli@iee.usp.br

² Programa de Pós-Graduação em Energia da USP. suani@iee.usp.br

³ Programa de Pós-Graduação em Energia da USP e Escola Politécnica da USP.
pmatai@usp.br

RESUMO

O crescente consumo de combustíveis fósseis faz com que a ameaça de racionamento e elevação dos custos destes recursos estejam cada vez mais presentes. Diante disso, o desenvolvimento de novas tecnologias se faz necessária para assegurar o suprimento energético das populações. Baseado em pesquisas e observações é possível identificar um enorme potencial com relação à utilização de microrganismos para geração de energia, principalmente com relação aos seus subprodutos. Este artigo tem como objetivo relacionar as principais utilizações microbiológicas no setor energético. Para isso foram abordadas quatro principais fontes de energia: etanol, biodiesel, metano e hidrogênio, considerando seus usos, vantagens e necessidades de pesquisa. É notória a aplicabilidade dos microrganismos na produção de energia, mas para que haja viabilidade em alguns sistemas ainda é necessário um maior desenvolvimento da ciência e tecnologia mundial.

Palavras-chave: Energia, energia microbiológica; energia renovável.

Cada vez mais a energia ganha destaque quando analisada a sua importância para atendimento das necessidades da sociedade em geral, movimentando indústrias, transporte, comércio e demais setores econômicos de um país. Segundo projeção realizada pelo Energy Information Administration – EIA (2008), o consumo de energia no mundo tende a aumentar cerca de 50% de 2005 a 2030, sobretudo nos países considerados em desenvolvimento.

Em meio a essa nova era, embasada nos conceitos de sustentabilidade de produção em diferentes sociedades, é preocupante considerar, do ponto de vista ambiental, uma nova revolução e desenvolvimento de certos países, sem se preocupar com as consequências e a qualidade da energia que será consumida.

Sabe-se que concomitantemente ao consumo de energia, as emissões de dióxido de carbono também irão aumentar em cerca de 51% no período de 2005 a 2030 (IEA, 2008). Isto se deve principalmente à base das fontes energéticas no mundo, que é constituída, em sua maioria, de combustíveis fósseis. Na Figura 1 estão relacionados os aumentos nas emissões desse gás de efeito estufa, ressaltando a diferença entre países em desenvolvimento e países desenvolvidos.

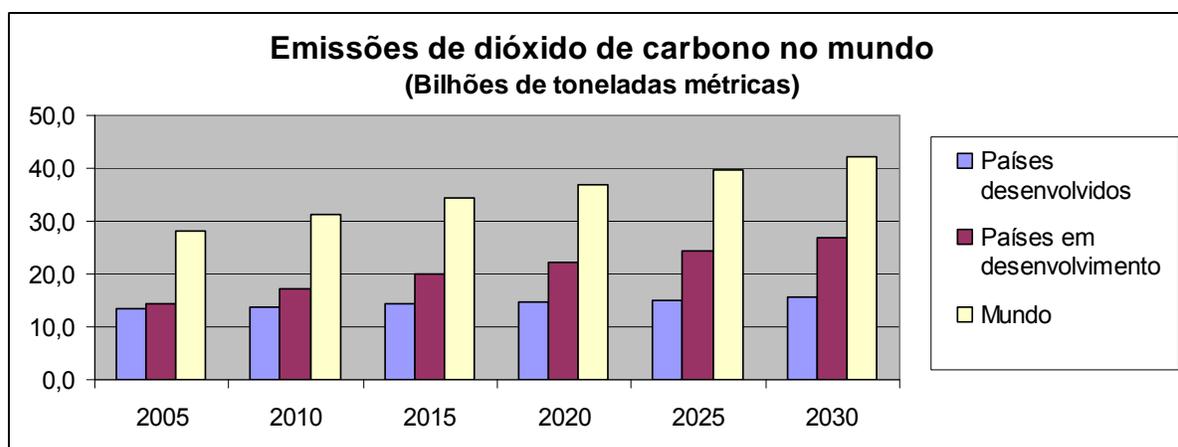


Figura 1 – Comparação entre o aumento nas emissões de gás carbônico entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Fonte: IEA, 2008.

Assim, diante do aumento de consumo de energia e da preocupação ambiental faz-se necessária a introdução de fontes e formas de geração de energia que estejam direcionadas ao desenvolvimento sustentável.

Porém, a sustentabilidade do sistema socioeconômico mundial está intrinsecamente relacionada às trajetórias de desenvolvimento tecnológico realizadas pelos principais blocos de países, trajetórias que se formam por causa de opções de matérias-primas de desenvolvimento. Assim, tais trajetórias estão intimamente relacionadas às opções que foram feitas em matéria de industrialização e de consumo energético no passado (FURTADO, 2003).

Também relacionado à disponibilidade de matéria-prima, há a correlação dos inúmeros conflitos e especulações sobre essas fontes. Casos como a exploração e o uso do petróleo permanecem sempre em pauta, e por mais que ainda haja a descoberta de reservas e suprimentos para segurança energética relacionada a essa fonte, sabe-se da brevidade desses recursos. Assim, novas tecnologias devem ser consolidadas para assegurar a qualidade ambiental e a energia para as futuras gerações.

Diversos trabalhos têm sido realizados procurando uma energia do futuro, e a aposta de inúmeros especialistas está na utilização de microrganismos. Nesse novo conceito de aplicabilidade de energia microbiológica, a ideia é utilizar microrganismos para converter a energia química da biomassa em combustíveis e outras formas de energia utilizável.

1. Microrganismos

Microrganismos estão agrupados basicamente pelos seres procarióticos (bactérias e *arqueas*), os eucarióticos unicelulares (protozoários, microalgas e leveduras), os eucarióticos coloniais (certas espécies de protozoários) e os eucarióticos multicelulares simples (fungos filamentosos), nos quais se observam níveis muito simples de diferenciação celular (PELCZAR et al., 1997).

Os microrganismos unicelulares podem existir como células isoladas, o que se pode observar quando estão esparsos em meios líquidos ou formando colônias de indivíduos da mesma espécie quando aderidos a um substrato sólido. Podem, ainda, ser encontrados constituindo comunidades multiespecíficas complexas (biofilmes), que se encontram firmemente aderidas a superfícies orgânicas vivas (folhas, mucosas e dentes) ou sobre material inorgânico (rochas ou superfícies metálicas) (BLACK, 2002).

Com relação à distribuição desses seres é possível observar uma prevalência universal. São encontrados em praticamente todos os ambientes, onde quer que as condições físicas e químicas o permitam, incluindo-se condições ambientais extremas, como temperaturas abaixo de 0°C em ambientes glaciais, acima de 100°C em fontes termais oceânicas a grandes profundidades, em condições de extrema salinidade, em lagos saturados de cloreto de sódio ou hidróxido de sódio e, até mesmo, em fraturas de rochas quilômetros abaixo da superfície terrestre (BLACK, 2002).

Apesar de haver milhares de espécies microbiológicas identificadas, estima-se que elas correspondam a menos de 10% dos microrganismos existentes no planeta (GARCIA, 1995); o restante das espécies permanece desconhecido para a comunidade científica. Ainda assim, diante destes valores, apenas uma pequena porcentagem das espécies microbianas conhecidas pode ser cultivada em laboratório em meios sintéticos ou em culturas celulares.

Sendo assim, os estudos dos microrganismos são de grande importância, tanto academicamente quanto em relação à sua aplicabilidade. O entendimento de suas atividades em ambiente natural é extremamente relevante para a simulação em laboratório, e posteriormente

utilizando tais modelos de microrganismos é possível conduzir a novos conceitos sobre a evolução molecular e a genômica, com grande potencial de exploração na indústria, agricultura, produção de alimentos e restauração ambiental.

2. Energia Microbiológica

Para muitos, o conceito de energia permeia diversos campos do conhecimento, mas basicamente sua definição se refere à capacidade de realização de trabalho (LA ROVERE, 1985). Sendo assim, observa-se que durante vários séculos o homem sempre buscou formas de obtenção de energia para realização de suas atividades. Porém, nos últimos anos a crescente busca por fontes energéticas mais sustentáveis fez que inúmeros estudos e processos direcionados à produção de energia através do uso de microrganismos ganhassem destaque. Há várias considerações para a utilização da energia microbiológica, principalmente por ela possuir vantagens sobre os combustíveis fósseis.

Primeiramente, o processo baseia-se na capacidade que os microrganismos têm de converter a energia química da biomassa em energia útil, sendo considerado um processo limpo de produção de energia. Além disso, esse tipo de energia não provoca impactos ambientais e nem envolve a produção de materiais perigosos, e também, sua produção pode ser realizada localmente, próximo da região onde há demanda, minimizando os custos relacionados ao sistema de distribuição (BUCKLEY; WALL, 2006).

As resistências com relação à utilização da energia microbiológica ainda giram em torno da consolidação de certas tecnologias e de sua inviabilidade econômica, em alguns processos em escala industrial.

Este artigo tem por objetivo tratar das principais aplicações microbiológicas para geração de energia, analisando as vantagens e os possíveis impasses para difusão dessas tecnologias.

CONVERSÕES ENERGÉTICAS

Com base nas leis fundamentais de conversões energéticas, os microrganismos têm a capacidade de produzir combustíveis tais como bioetanol, biodiesel, metano e hidrogênio, os quais possuem grande destaque no cenário mundial (BUCKLEY; WALL, 2006) e serão discutidos a seguir.

1. Bioetanol

Bioetanol é a denominação para o etanol produzido principalmente a partir da fermentação de hidrocarbonetos presentes na biomassa e/ou da fração biodegradável de resíduos (BRÁS et al.,

2006), sendo atualmente o principal biocombustível utilizado no mundo (CEC, 2006) e com perspectivas para ampliação de sua produção e consumo.

O principal uso do bioetanol é como combustível líquido, misturado à gasolina ou usado como insumo na fabricação de aditivo à gasolina (o MTBE, derivado do petróleo, tem sido proibido pelo risco de contaminação de águas subterrâneas). O uso como combustível (na proporção de 20% a 100%) é praticamente exclusivo do Brasil e dos Estados Unidos, enquanto o uso como aditivo (2% a 10%) ocorre nos Estados Unidos, na Europa, Índia e China, por exemplo (USDA, 2006).

A produção mundial de etanol é de mais de 40 bilhões de litros, concentrada em poucos países. Dez deles corresponderam por 89% da oferta em 2005, com destaque para Estados Unidos e Brasil, que juntos detêm 70% da produção, seguidos por China e Índia (Figura 2). Além da China (que produz etanol principalmente do milho) e da Índia (com base na cana-de-açúcar), importantes investimentos estão sendo feitos na Tailândia (com base na cana e na casca de arroz) e no Paquistão (do melão) para aumento da produção de etanol (CGEE, 2005).

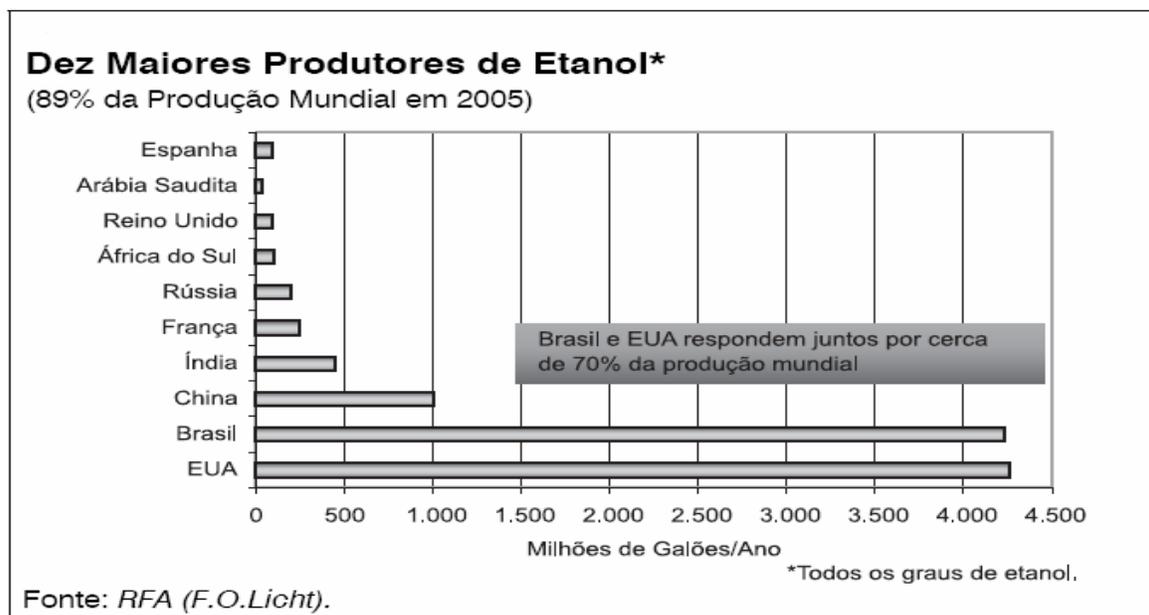


Figura 2 – Produção de etanol por países (CGEE, 2005).

De um modo geral, o etanol pode ser obtido pela via bioquímica de fermentações de açúcares ou pela via química de síntese, a partir da hidratação do etileno. O mais difundido é o processo de obtenção do etanol a partir da fermentação realizada por microrganismos. Diversas espécies de levedura têm a capacidade de gerar álcool etílico a partir de hidrocarbonetos. Para a qualidade e eficiência do processo, é importante que, durante a fermentação, sejam usadas

linhagens únicas e com grande capacidade fermentativa. Elas devem ser acompanhadas constantemente (TORTORA et al., 2005).

A identificação das leveduras é realizada de acordo com a taxonomia e, molecularmente, por técnicas modernas de biologia molecular. A espécie de levedura mais usada nas destilarias é a *Saccharomyces cerevisiae*, sendo o gênero *Saccharomyces* o de maior incidência. A eficiência de fermentação hoje chega até 18% de concentração de etanol nos processos industriais (TORTORA et al., 2005).

Tecnologias de processos convencionais de fermentação alcoólica com reciclo de fermento (contínua em múltiplos estágios ou em batelada alimentada) estão consolidadas, ainda que apresentem potencial de aperfeiçoamento para melhoria de *performance*, ganhos de rendimento, produtividade, maior estabilidade operacional e menor consumo energético (CGEE, 2005).

Esses avanços tecnológicos correspondem, entretanto, a simples mudanças incrementais que, embora não revolucionem radicalmente os processos de produção, possibilitam melhorias operacionais e ganhos de eficiência, pela introdução de novos equipamentos (CGEE, 2005).

Mudanças mais radicais na tecnologia de produção do etanol estariam ligadas aos processos que possibilitarão a utilização de novas matérias-primas, como a biomassa lignocelulósica. Diferentemente do etanol convencional, o bioetanol através de enzimas é feito com base em materiais da biomassa celulósica ou, mais rigorosamente, lignocelulósica. Os esquemas de produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica são referidos como uma segunda geração de biocombustíveis, cujo processamento é uma das mais promissoras tecnologias em fase de desenvolvimento (CEC, 2006). Essas novas tecnologias de processamento do etanol são fundamentais sobretudo nos países desenvolvidos, em que as matérias-primas hoje utilizadas competem com a produção de alimentos e os custos de produção são ainda altos em comparação com o petróleo ou o etanol da cana. Sua importância decorre, também, do fato de o etanol celulósico ter potencial de extrair pelo menos duas vezes mais combustível da mesma área de terra e da disponibilidade da biomassa, uma matéria-prima praticamente sem valor (TECHNOLOGY REVIEW, 2006). A produção de etanol lignocelulósico emerge, assim, como um novo paradigma mundial.

Porém, enquanto a conversão de carboidratos, açúcar e amido em etanol são relativamente simples, a conversão da biomassa é muito mais complexa e requer pré-tratamento. De fato, esses processos, que têm suas raízes na antiga química da madeira, em especial na Alemanha em tempos de guerra e ainda hoje empregados na Rússia, são conhecidos há mais de 80 anos. Mas as inovações mais radicais na produção de etanol com base nos materiais lignocelulósicos envolvem modificações genéticas de microrganismos que produzem enzimas que digerem a celulose e a hemicelulose encontradas na parede celular da planta, bem como variedades transgênicas de plantas mais produtivas (DOE, 2006).

Aspectos relacionados ao uso do bioetanol

O bioetanol é considerado um combustível versátil com métodos de produção e utilização já bastante difundidos. Sendo líquido, o bioetanol se insere na atual infraestrutura de combustíveis e é competitivo em termos de custos com o petróleo; mostra-se bem sucedido nas questões técnicas para produção em escala comercial (BUCKLEY; WALL, 2006).

Porém, ainda há algumas questões insatisfatórias na eficiência de reação para produção de etanol no geral, podendo ser melhorada a produtividade. Além disso, há outro dilema quando se refere à utilização de substratos sólidos para conversão de lignocelulose em etanol. A disponibilidade de substrato para microrganismos é muito baixa quando comparada aos líquidos. Assim, há a necessidade de utilização de enzimas que degradem a cadeia celulósica e exponham mais os substratos, fazendo que haja a fermentação do substrato, mas o processo ainda está sendo estudado, e no momento ainda é considerado difícil e caro (BUCKLEY; WALL, 2006).

Sendo assim, a Academia Americana de Microbiologia (BUCKLEY; WALL, 2006) enumera os principais avanços que devem ocorrer para que a conversão de lignocelulose em etanol se torne mais competitiva:

- Otimização do processo de pré-tratamento para diferentes tipos de biomassa;
- Obtenção de enzimas mais eficientes para degradação de lignocelulose e hemicelulose;
- Desenvolvimento de organismos mais eficientes para fermentação;
- Redução nos custos de produção de enzimas que degradam lignocelulose e celulose.

BIODIESEL

O biodiesel é um biocombustível considerado alternativo na utilização de diesel de fontes não renováveis, e sua importância se dá pelo fato de o diesel ser um dos principais componentes da matriz de transportes no mundo.

O biodiesel é um éster de ácido graxo, renovável e biodegradável, obtido comumente a partir da reação química de óleos ou gorduras, de origem animal ou vegetal, com um álcool na presença de um catalisador (reação conhecida como transesterificação) (KRAWCZYK, 1996). Nessa reação é utilizado um catalisador alcalino que converte óleos vegetais ou gorduras animais e metanol em ésteres metílicos de ácidos graxos. Como catalisadores alcalinos são utilizados principalmente hidróxido de sódio e potássio, graças ao seu baixo custo (AKOH et al., 2007).

Com o aumento dos estudos buscando maior eficiência na produção de biodiesel, há algum tempo, inúmeras pesquisas provaram que é possível a realização da transesterificação através de enzimas (PARK et al., 2005; DU et al., 2004; WANG et al., 2006). Atualmente há grande interesse em promover essas reações, justamente por sua maior eficiência de produção de

biodiesel, maior grau de purificação, menor consumo de energia (reações podem ocorrer em condições mais amenas) e produção de menos co-produtos ou resíduos.

É possível observar que a maioria das pesquisas se concentra agora na determinação da otimização de condições de reação (uso ou não de solventes, temperatura, conteúdo de água, níveis de ácidos graxos livres, percentual de conversão, entre outros) para melhorar o rendimento da produção de biodiesel quando comparada à catálise química (AKOH et al., 2007).

1. Principais vantagens da transesterificação enzimática

As enzimas possuem vantagens devidas ao fato de suas reações poderem ocorrer em ambientes amenos, além de serem específicas, reutilizáveis, e ter a capacidade de serem manipuladas geneticamente para melhorar a eficiência. As enzimas utilizadas na transesterificação são as lipases, que têm a capacidade de degradar lipídeos. Um dos maiores problemas com relação ao uso de enzimas era a sua inativação diante do uso de metanol, porém isto já está sendo estudado, e uma metodologia de adição do metanol por etapas já está sendo implementada (AKOH et al., 2007).

2. Biodiesel de microalgas

Além da produção de biodiesel através da transesterificação enzimática, os microrganismos ainda podem contribuir para a produção desse biocombustível através da extração de óleos de microalgas e seu posterior processamento.

Recentes estudos (FAO, 2006) mostraram que os óleos encontrados nas microalgas possuem similaridade quanto às características físico-químicas e químicas dos de óleos vegetais em geral, e que diante disso elas podem ser consideradas potenciais matérias-primas para a produção de biodiesel.

Na Tabela 1 observa-se que os óleos de algumas espécies de microalgas apresentam composição em ácidos graxos (SHEEHAN et al., 1998) semelhante à de óleos vegetais, como por exemplo, os óleos de dendê, mamona e soja, com respectivamente, 22%, 45-50% e 18% de lipídeos (CÂMARA, 2006).

Tabela 1 – Percentual de lipídeos em algumas microalgas em relação à sua massa seca

Microalga	% de lipídeos	Microalga	% de lipídeos
Scenedesmus obliquus	12-14	Euclena gracillis	14-20
Scenedesmus dimorphus	16-40	Prymnesiumparvum	22-38
Chlamydomonas rehinnhardii	21	Prophyridium cruentum	09-14
Chlorella vulgaris	14-22	Spirulina Platensis	04-09
Spirogyra sp.	11-21	Synechococcus sp.	11
Dunaliella tertiolecta	64-71		

Fonte: Teixeira, 2006.

De acordo com as pesquisas iniciais, as microalgas se mostraram potencialmente adequadas para a produção de biocombustíveis, porém há muitos estudos a ser feitos para revelar o seu real rendimento e eficiência.

Assim, com base em estimativas, o cultivo de microalgas apresenta várias características favoráveis como: custos parcialmente baixos para a colheita e transporte e menor gasto de água, quando comparados aos de cultivo de plantas; pode ser realizado em condições não adequadas para a produção de culturas convencionais. Além disso, as microalgas apresentam maior eficiência fotossintética que os vegetais superiores e podem ser cultivadas em meio salino simples; e, por fim, são eficientes fixadoras de gás carbônico (TEIXEIRA, 2006).

Apesar da falta de dados, alguns pesquisadores já realizam algumas estimativas de produção. De acordo com Briggs (2004) a produção deverá situar-se entre 7,7 mil e 23 mil litros de óleo por hectare cultivado ao ano.

Assim, observa-se que os estudos com relação à produção de biodiesel estão bastante relacionados com a microbiologia e a enzimologia, e que avanços científicos e tecnológicos podem em médio prazo acelerar a inserção desse biocombustível na matriz energética de muitos países.

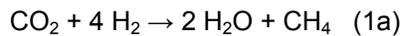
METANO

O metano, assim como o dióxido de carbono e o óxido nitroso, é um importante gás traço da atmosfera. A habilidade do metano em absorver a irradiação infravermelha faz dele um gás 20 a 30 vezes mais eficiente que o dióxido de carbono como um gás de efeito estufa (PAZINATO, 2007).

Estima-se que a digestão anaeróbia com formação de metano seja responsável pela completa mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível na terra. O processo de formação do gás metano se refere às reações de fermentação da matéria orgânica, o catabolismo fermentativo, pelo qual a matéria orgânica se auto-oxida através do rearranjo de elétrons na molécula fermentada (ALVES et al., 2004).

Na primeira reação, denominada metanogênese, formam-se os gases dióxido de carbono e o metano. Vale ressaltar que essa reação é a reação global da metanogênese, visto que pode ocorrer por dois caminhos. O primeiro denomina-se metanogênese hidrogenotrófica (produção de metano a partir de hidrogênio), reação 1a, realizado por praticamente todas as bactérias metanogênicas. O segundo e principal caminho é realizado por poucas espécies de bactérias, porém é responsável pela maior parte das conversões, convertendo o carbono orgânico na forma de acetato a metano, denominando-se metanogênese acetotrófica (LUBBERDING, 1995), reação 1b.

(metanogênese hidrogenotrófica)



(metanogênese acetotrófica)



1. Processo de anaerobiose

Em linhas gerais, o processo de anaerobiose se dá em cinco etapas gerais (adaptado de CHERNICHARO, 1977):

Hidrólise: por ação de bactérias fermentativas hidrolíticas ocorre hidrólise de materiais particulados complexos em materiais dissolvidos mais simples, ou seja, há a quebra das cadeias poliméricas, sendo reduzidas em moléculas menores que são capazes de atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas.

Acidogênese: por ação de bactérias fermentativas acidogênicas os compostos oriundos da fase de hidrólise são convertidos em diversos compostos mais simples.

Acetogênese: as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas.

Metanogênese: é a etapa final no processo de degradação da matéria orgânica, sendo esta convertida em metano e dióxido de carbono por ação de bactérias metanogênicas.

Sulfetogênese: se houver presença de sulfatos, sulfitos e mesmo enxofre elementar, por ação de bactérias sulforredutoras compostos intermediários passam a ser utilizados por estas, alterando as rotas metabólicas no digestor anaeróbio. Assim, as bactérias sulforredutoras passam a competir com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas pelos substratos disponíveis.

Na Figura 3 está descrito o processo de degradação anaeróbia e a conseqüente produção de gás metano, evidenciando as fases e agentes produtores.

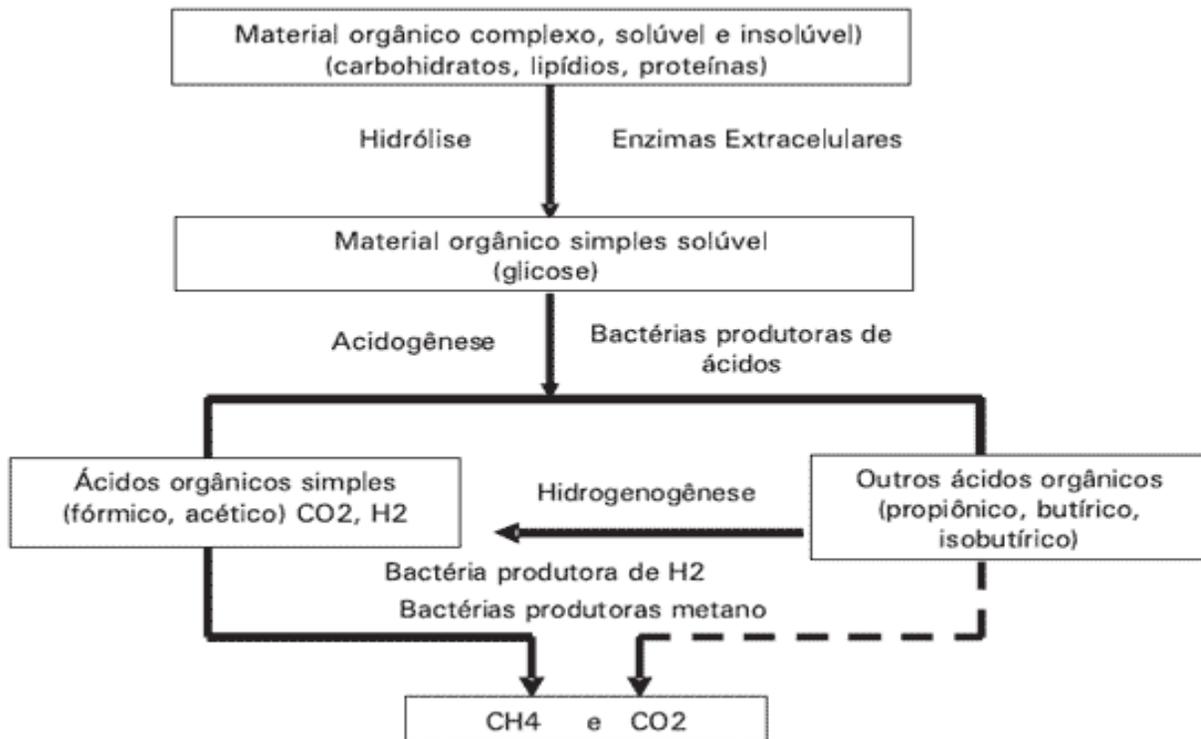


Figura 3 – Representação do processo de produção de gás metano.

Fonte: Santos, 2001.

2. Aproveitamento energético do metano

Após essa produção microbiológica é obtido o metano, que é um gás inodoro e incolor, pouco solúvel em água. Quando adicionado ao ar se transforma em mistura de alto teor explosivo, podendo ser utilizado para geração de energia. Porém, de acordo com a sua característica de ser um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento cerca de 20 vezes maior que o do dióxido de carbono, ele é responsável por 25% do aquecimento global (EPA, 2007). Assim, contribuindo para o desenvolvimento sustentável a utilização desse gás, proveniente das principais fontes emissoras, que são os aterros e lixões, para a ser uma alternativa viável para geração de energia, principalmente energia térmica.

Até há pouco tempo considerado apenas como subproduto da digestão anaeróbica, o biogás entra no cenário de fontes renováveis de energia podendo ser apresentado como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades pecuárias e agrícolas,

destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, haja vista a redução do seu potencial para o aumento do efeito estufa ao mesmo tempo em que sua conversão energética pode auxiliar o desenvolvimento humano (COSTA, 2002).

O biogás pode substituir outros combustíveis utilizados na indústria de acordo com a sua equivalência energética, na qual leva-se em consideração o seu poder calorífico e a eficiência média de combustão (CARDOSO FILHO, 2001). A Tabela 2 mostra a equivalência de 1 Nm³ de biogás com outros tipos de combustíveis.

Tabela 2 – Equivalência de 1 Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis

Combustível	Quantidade equivalente a 1 Nm³ de biogás
Carvão mineral	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Gasolina amarela	0,61 L
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	0,45 L
kWh	1,43
Álcool etílico carburante	0,80 L
Carvão mineral	0,74 kg

Fonte: adaptado de Cardoso Filho, 2001.

Assim, apesar das inúmeras vantagens para utilização do biogás como fonte energética, as principais desvantagens estão relacionadas à necessidade de pesquisas com relação ao rendimento e eficiência no processo de conversão. Projetos vêm sendo realizados utilizando biorreatores e outros novos sistemas em engenharia, porém ainda faltam avanços para consolidar a técnica (BUCKLEY; WALL, 2006). Além disso, algumas limitações técnicas com relação à utilização de metano como biocombustível devem ser ultrapassadas, como por exemplo, a digestão da biomassa para produção desse gás. O processo ainda não está consolidado, pela dificuldade encontrada na digestão da lignina (composto das paredes vegetais) por esses tipos de microrganismos anaeróbicos (BUCKLEY; WALL, 2006).

HIDROGÊNIO

Com relação aos outros processos de geração de energia através de microrganismos, a produção de hidrogênio é a que possui a maior vantagem graças à sua flexibilidade. Pode ser produzido por uma série de maneiras diferentes, por diferentes organismos. No entanto, o armazenamento e a distribuição de hidrogênio são problemáticos. Mas o desenvolvimento de um combustível líquido com alto teor de hidrogênio poderia resolver alguns problemas de armazenagem e de transporte, permitindo o seu uso com a malha de distribuição e de infraestrutura tecnológica já em vigor hoje (ANDRADE, 2003).

O hidrogênio é o mais simples e mais comum elemento, compondo 75% da massa do universo e 90% de suas moléculas, como a água e as proteínas nos seres vivos. É extremamente ativo, e misturas dos gases hidrogênio e oxigênio são inflamáveis, até mesmo explosivos, dependendo da concentração. Quando queimado com oxigênio puro, os únicos subprodutos são o calor e a água. Quando queimado com ar, constituído por cerca de 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio, alguns óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio com ar produz menos poluentes atmosféricos do que os combustíveis fósseis tais como petróleo e carvão (PRADO et al., 2006).

Sendo, portanto, abundante, não poluente atóxico, e apresentado como a solução para o agravamento do efeito estufa e para a poluição produzida pelas fontes não-renováveis, o hidrogênio poderia, ao menos teoricamente, atender a todas nossas necessidades. Infelizmente, o hidrogênio esbarra ainda em um problema paradoxal: além de caro, ainda não há tecnologia para produzi-lo de forma limpa. Embora o hidrogênio, ligado ao oxigênio, seja muito abundante em forma de água, suas moléculas não se encontram em estado puro: ele é um vetor de energia e não uma fonte. Portanto é preciso primeiro produzi-lo e armazená-lo (BUCKLEY; WALL, 2006). Por enquanto, a única forma economicamente viável para produzir hidrogênio é extraí-lo do petróleo ou do gás natural. A corrida pelo hidrogênio limpo e sua produção em larga escala é um dos grandes desafios tecnológicos da ciência (PORTAL H_2 , 2008).

Atualmente, os diversos métodos de produção de hidrogênio podem ser classificados através das três principais matérias-primas utilizadas: combustíveis fósseis, água e biomassa. Alguns dos processos mais significativos estão citados no Quadro 1:

Quadro 1 – Principais métodos de produção de hidrogênio, de acordo com a matéria-prima

Métodos de produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis	Métodos de produção de hidrogênio através da água	Métodos biológicos de produção de hidrogênio
Reforma de gás natural	Eletrólise da água	Biofotólise da água (algas e cianobactérias)
Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados	Fotólise da água	Fotodecomposição de compostos orgânicos

		(bactérias fotossintéticas)
Pirólise a plasma de gás natural	Eletrólise do vapor	Fermentação de compostos orgânicos (bactérias fermentativas)
Gaseificação de carvão mineral	Decomposição termoquímica da água	Sistemas híbridos usando bactérias fermentativas e bactérias fotossintéticas (otimização)
	Processo fotoeletroquímico	

Fonte: Prado et al., 2006.

1. Produção biológica do hidrogênio

A produção de hidrogênio a partir de certos microrganismos está relacionada com o próprio metabolismo destes seres, os quais utilizam a energia química para realização de trabalho. Essa energia química pode ser obtida a partir de energia luminosa no que diz respeito às células fotossintéticas e através da oxidação de compostos de carbono, principalmente carboidratos, para células heterotróficas. Os organismos degradam moléculas energéticas, como forma de obter energia livre, a qual é transformada em ATP, que é o principal transportador de energia química em todas as células. A maior parte da produção biológica de hidrogênio da biosfera ocorre a partir da oxidação da matéria orgânica, que decompõe um substrato em CO_2 e H_2 . Esse processo de degradação libera elétrons. O processo de geração de hidrogênio ocorre como forma de dissipar elétrons contidos na célula e também permite geração de energia adicional ao metabolismo celular (PRADO et al., 2006).

Microrganismos produtores de hidrogênio

Diante deste processo metabólico de obtenção do hidrogênio, os sistemas biológicos de microrganismos produtores de H_2 podem ser divididos em duas categorias, conforme o Quadro 2: fotossintetizantes e fermentativos. Na primeira categoria, os microrganismos produtores de hidrogênio são dependentes da luz como fonte primária de energia e na segunda, os microrganismos obtêm energia a partir da oxidação de moléculas energéticas e não necessitam de luz para a sua sobrevivência. No entanto, em ambos os casos, o hidrogênio é produzido a partir da decomposição de um substrato (PRADO et al., 2006).

Quadro 2 – Identificação das principais espécies produtoras de bio-hidrogênio

Classificação	Microrganismos
---------------	----------------

Algas verdes	Scenedesmus obliquus, Chlamydomonas reinhardii, Chlamydomonas moewusii
Cianobactérias	Anabaena azallae, Anabaena CA, Anabaena variabilis, Anabaena cylindrical, Nostoc mucorum, Nostoc spongiaeforme, Westiellopsis prolífica
Bactérias fotossintéticas	Rhodobacter sphaeroides, Rhodobacter capsulatus, Rhodobacter sulidophilus, Rhodopseudomonas sphaeroides, Rhodopseudomonas palustris, Rhodopseudomonas capsulate, Rhodospirillum rubrum, Chromatium sp., Mami PSB 1071, Chlorobium limicola, thiocapsa rosepersicina, Halonacterium halobium
Bactérias fermentativas	Enterobacter aerogenes, Enterobacter cloacae, Clostridium butyricum, Clostridium pasterianum, Desulfibrio vulgaris, Megashaera elsdenii, Citrobacter intermedius, Escherichia coli.

Existe uma gama de variáveis sendo estudada com objetivo de maximizar a produção de H₂. Prado et al. (2006) (Quadro 3) relacionam as principais vantagens e desvantagens da obtenção de H₂ de acordo com cada grupo de microrganismos.

Quadro 3 – Estudo comparativo dos processos de produção de bio-hidrogênio

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Algas Verdes	Substrato: Água	Necessidade de Iluminação
Cianobactérias	Substrato: Água A Nitrogenase produz principalmente H ₂ Possuem a habilidade de fixar N ₂	Necessidade de Iluminação Natural Inibição da nitrogenase pelo O ₂ A Hidrogenase deve ser cancelada para não degradar o H ₂ formado CO ₂ presente no gás
Bactérias Fotossintéticas	Substrato: diferentes resíduos e efluentes Habilidade de usar amplo espectro de luz	Necessidade de iluminação constante CO ₂ resíduo da fermentação O resíduo da fermentação necessita tratamento para não criar problemas de poluição

Bactérias Fermentativas	Substratos: ampla variedade de fontes de carbono, como amido, sacarose, melão, xilose etc. Pode produzir H_2 o dia todo (não necessitam iluminação) Produzem metabólitos secundários de grande valor agregado Processo Anaeróbio, logo não há problemas de inibição pelo O_2	O resíduo da fermentação necessita tratamento para não criar problemas de poluição CO_2 presente no gás
--------------------------------	---	--

Fonte: Prado et al., 2006.

Apesar das inúmeras vantagens pela utilização do hidrogênio como fonte energética ainda há algumas barreiras que certamente não serão solucionadas em curto prazo. O melhor entendimento dos processos bioquímicos poderá contribuir com soluções relacionadas à questão da baixa eficiência de conversão, e possivelmente poderão aumentar a viabilidade desse processo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em detrimento dos combustíveis fósseis, é possível observar um campo que certamente receberá incentivo e que, ao contrário dos modelos energéticos seguidos até então, se bem manipulado, poderá promover o abastecimento e o desenvolvimento sustentável das civilizações.

É fato que esse tipo de modelo deve contar com investimentos para o desenvolvimento tecnológico e a viabilidade comercial, porém algumas técnicas já se mostram bastante representativas e são vistas como argumentos para o desenvolvimento de muitas outras.

O sistema energético convencional será obrigado a assimilar conhecimento de microrganismos ancestrais, mas que, no entanto, podem ser entendidos e considerados como a energia do futuro.

REFERÊNCIAS

AKOH, C. C.; CHANG, S.; LEE, G.; SHAW, J. Enzymatic approach to biodiesel production. *J. Agric. Food Chem.*, v.55, p.8995-9005, 2007.

ALVES, H. B.; MOCHIDA, G. A.; Da CRUZ, G. J. G.; DUMA, M.; GOMES, C. S. Precipitação química e cloração para combate a maus odores em estações de tratamento de esgoto anaeróbias. *Sanare – Revista Técnica da Sanepar*, Curitiba, v.21, n.21, p.19-32, jan.-jun. 2004.

BLACK, J. G. *Microbiologia: fundamentos e perspectivas*. 4.ed. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 2002.

BRÁS, A. M.; MIRANDA, F.; HIPÓLITO, L.; DIAS, L. S. *Biomassa e produção de energia*.

Disponível em:

www.draedm.minagricultura.pt/draedm/centrodocumentacao/revista_pdf/06.Biomassa_AldaBr%C3%A1s.pdf. Acesso em: 29 set. 2008.

BRIGGS, M. Wide scale biodiesel production from algae. University of New Hampshire, 2004.

Disponível em: www.unh.edu/p2/biodiesel/article_alge.html. Acesso em: 2 set. 2008.

BUCKLEY, M.; WALL, J. *Microbial energy conversion*. American Society for Microbiology, nov. 2006.

CÂMARA, G. M. S.; HEIFFIG, L. S. *Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel*. Piracicaba (SP): Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Produção Vegetal, Universidade de São Paulo, 2006.

CARDOSO FILHO, E. P. *Fatores que influenciam na digestão anaeróbia de efluentes líquidos*. São Paulo: Cetesb, 2001. (mimeogr.)

CEC – Commission of the European Communities. *Communication from the Commission: an EU strategy for biofuels*. Brussels, 2006.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE-Nipe/Unicamp. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo*. Relatório final, dez. 2005.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v.5. p.13-77, 1977.

COSTA, D. F. *Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização*. (Monografia). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

DOE. *MultiYear Program Plan 2007-2012*. Office of the Biomass Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, aug. 2005.

DU, W.; XU, Y.; Liu, D.; ZENG, J. Comparative study on lipasecatalyzed transformation of soybean oil for biodiesel production with different acyl acceptors. *J. Mol. Catal. B: Enzym.*, v.30, p.125-129, 2004.

EIA – Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2008*. Disponível em: www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html. Acesso em: 23 ago. 2008.

EPA – Environmental Protection Agency. *Methane*. Disponível em: www.epa.gov/methane/. Acesso em: 28 ago. 2008.

FAO. *Chapter 6 – Oil production*. Disponível em: www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm. Acesso em: 25 ago. 2008.

FURTADO, A. *Crise energética e trajetórias de desenvolvimento tecnológico*. (Ciclo de Seminários: Brasil em desenvolvimento). Rio de Janeiro, 2003.

GARCIA, E. S. Biodiversity, biotechnology and health. *Cad. Saúde Públ.*, Rio de Janeiro, v.11, n.3, p.495-500, jul.-set. 1995.

KRAWCZYK, T. Biodiesel: alternative fuel makes inroads but hurdles remain. *Inform*, n.7, p.801-829, 1996.

LA ROVERE, E. L.; ROSA, L. P.; RODRIGUES, A. P. (Org.). *Economia e tecnologia da energia*. Rio de Janeiro: Marco Zero; Finep, 1985.

LUBBERDING, H. J. *Applied anaerobic digestion*. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1995.

PARK, E. Y.; MORI, M. Kinetic study of esterification of rapeseed oil contained in waste activated bleaching earth using *Candida rugosa* lipase in organic solvent system. *J. Mol. Catal. B: Enzym.*, v.37, p.95-100, 2005.

PAZINATO, J. M. Isolamento e identificação de microrganismos metanogênicos em solos de Terra Preta Antropogênica (TPA) e de várzea (Gleissolos) da Amazônia Oriental. 188p. Tese (Doutorado) – Ecologia de Agroecossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/CENA. Piracicaba (SP), 2007.

PELCZAR, M. J. et al. *Microbiologia: conceitos e aplicações*. São Paulo: Makron Books, 1997. v.1.

PORTAL H₂ Fuel Cell Energy. Disponível em: www.portalh2.com.br. Acesso em: 28 ago. 2008.

PRADO, A. C.; SOMMER, E. M.; BONAMIGO, P. R. Produção biológica de hidrogênio. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Disponível em: www.eng.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_grad/trabalhos_grad_2006-1/hidrogenio.doc. Acesso em: 1 set. 2008.

SANTOS, T. M. B. dos. *Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frangos de corte*. 179p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Unesp, Jaboticabal (SP), 2001.

SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T.; BENEMANN, J.; ROESSLER, P. *A look back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae*. Colorado, 1998.

TECHNOLOGY REVIEW. *Redesigning life to make ethanol*. Technology Review – an MIT Enterprise. Disponível em: www.technologyreview.com/printer_friendly_article.aspx?id=17052. Acesso em: 25 set. 2008.

TEIXEIRA, C. M. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. Disponível em: www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/agricultura/MicroalgaComo.pdf. Acesso em: 1 set. 2008.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. *Microbiologia*. 8.ed. São Paulo: Artmed, 2005.

USDA – United States Department of Agriculture. Bioenergy, US Department of Agriculture, Office of Energy Policy and New Uses. In: RENEWABLE RESOURCES AND BIOREFINERIES CONFERENCE, York, UK, set. 2006.

WANG, L.; DU, W.; LIU, D.; LI, L.; DAI, N. Lipase-catalyzed biodiesel production from soybean oil deodorizer distillate with absorbent present in tert-butanol system. *J. Mol. Catal. B: Enzym.*, v.43, p.29-32, 2006.

Artigo recebido em 24.04.2009. Aprovado em 05.06.2009.