

USO DE BIOMASSA NAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL¹

Use of Biomass in Fuel Cells

Vladimir Rafael Melian Cobas² e Electo Eduardo Silva Lora²

Resumo: Este trabalho é uma avaliação técnica das possibilidades reais de geração de eletricidade com células a combustível, usando a biomassa como fonte de energia primária. Abordam-se questões referentes à produção de hidrogênio a partir de biomassa e as limitações dos diferentes tipos de células a combustível para usar gás de biomassa como combustível. Também são propostos diferentes esquemas de acoplamentos entre a unidade produtora do biocombustível e a SOFC. A SOFC (célula a combustível de óxido sólido) é identificada como a mais flexível para utilizar o gás combustível proveniente de biomassa.

Palavras-chave: Células a combustível, biomassa, limpeza do gás.

Abstract: A technical evaluation was carried out on the real possibilities of generating fuel cell electricity using biomass as primary energy source. Hydrogen production from biomass and the limitations of different types of fuel cells in using biomass gas are discussed. Different biofuel production/cleaning system layouts and SOFC are proposed. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) is identified as the most flexible cell to use biofuels.

Keywords: Fuel cells, biomass, gas cleaning system.

1 INTRODUÇÃO

Como vem sendo reconhecido, a biomassa pode desempenhar importante papel no balanço energético global. Problemas com os combustíveis fósseis, como recursos limitados e danos ambientais, vêm aumentando o interesse nas fontes renováveis de energia. Tecnologias como motores de combustão interna, turbinas a gás e motores Stirling vêm sendo estudados, acoplados a tecnologias de conversão de biomassa. A principal aplicação dessas tecnologias deve acontecer na geração de energia em pequena e média escala (dezenas de kW até dezenas de MW), pela inviabilidade econômica de

transportar a biomassa necessária para gerar potências elevadas. Entre as limitações com relação a essas tecnologias podem-se mencionar as baixas eficiências e emissões de outros poluentes (NO_x , SO_x y particulados).

A principal limitação da biomassa como combustível é a baixa densidade energética, cinco a dez vezes menor que a dos combustíveis fósseis utilizados hoje. Esta limitação evidencia a necessidade de desenvolver tecnologias eficientes para aproveitar ao máximo a energia do combustível.

Entre as tecnologias mais eficientes para geração de eletricidade encontram-se as células a combustível, que podem atingir

¹ Recebido para publicação em 14.2.2007 e aceito em 9.3.2007.

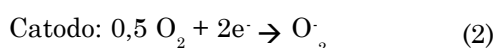
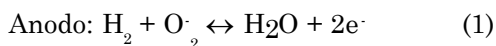
² NEST-IEM. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Ave BPS, Pinheirinos, Itajubá-MG, <vlad@unifei.edu.br>.

eficiências de conversão acima de 40%, inclusive em faixas de potência pequenas. As pesquisas para o acoplamento entre ambas as tecnologias vêm aumentando nos últimos anos.

2 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (FC)

As FCs representam uma concepção diferente na geração de eletricidade, que é principalmente obtida a partir da conversão da energia térmica de um combustível em potência. A operação das FCs baseia-se na conversão direta da energia química do combustível em eletricidade. A partir de reações eletroquímicas produz-se uma diferença de potencial, que gera corrente elétrica entre dois eletrodos, anodo e catodo, fechando um circuito elétrico entre estes. Simultaneamente ao fluxo de elétrons, entre anodo e catodo, há também um fluxo de íons através de um meio condutor, eletrólito. Na reação eletroquímica as moléculas dos reagentes envolvidos são quebradas e recombinadas. Os principais reagentes são o hidrogênio como combustível e o oxigênio como agente oxidante. Para que a reação eletroquímica aconteça com uma condutividade iônica apropriada por meio do eletrólito, é necessário um meio químico e térmico apropriado, ou seja, um catalisador e uma temperatura. O catalisador e a temperatura variam conforme o tipo de FC. As equações 1 a 3 mostram as reações que ocorrem na FC (usando H_2 e O_2 como reagentes).

A Figura 1 mostra as partes principais e o princípio de funcionamento da FC. Pode-se observar que, dependendo do tipo de FC, ânions ou cátions são transportados através do eletrólito e a direção de movimentação deles varia. Isto faz com que a água seja produzida em um ou outro lado da FC (anodo ou catodo).



Reação eletroquímica global:



No Quadro 1 está um resumo dos principais tipos de FCs, suas características e sua aplicação. Como se pode observar nesse quadro, as FCs apresentam elevadas eficiências de conversão e são consideradas tecnologia limpa, se funcionarem com hidrogênio. O hidrogênio não se encontra disponível em grandes quantidades, é necessário produzi-lo. O hidrogênio utilizado nas FCs é fundamentalmente obtido por meio da reforma a vapor de combustíveis fósseis, principalmente o gás natural.

A reforma de combustíveis fósseis consiste na separação das moléculas de carbono e hidrogênio, que formam o hidrocarboneto, em um reator catalítico. Este processo, se bem que em menor escala (devido à eficiência das FCs), também emite CO_2 . Para afirmar que as FCs são realmente renováveis, o combustível a ser utilizado deve ser obtido a partir de uma fonte renovável (solar, eólica, biomassa etc.).

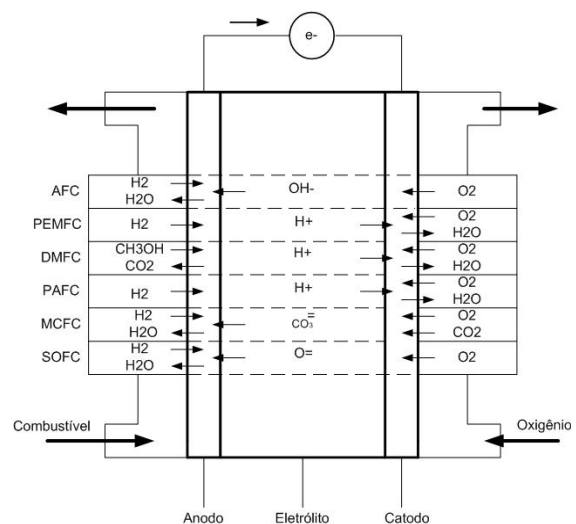


Figura 1 – Princípio de funcionamento das FCs.
Figure 1 – FCs working principle.

Quadro 1 – Características principais das FCs (BLOMEN; MUGERWA, 1993; HOOGERS, 2002)
Table 1 – FC main characteristics (BLOMEN; MUGERWA, 1993; Hoogers, 2002)

Tipo ⁽¹⁾	η (%)	T. (°C)	Potência kW	Eletrólito	Aplicação
AFC*	50	60-100	10-100	Alcalino: Solução de KOH (líquido)	Naves espaciais Estacionária
PEMFC*	45	80-120	1-1.000	Polímero Ácido fluorosulfonato tipo Nafion (sólido)	Transporte Portátil Estacionária
PAFC*	45	200	100-5.000	Ácido fosfórico H ₃ PO ₄ (líquido)	Geração estacionária
MCFC*	50	650	100-10.000	Carbonato fundido de K ou Na (líquido)	Estacionária
SOFC*	50	800-1.000	1.000-100.000	Óxido metálico sólido, tipicamente Zircônio estabilizada YSZ (sólido)	Estacionária

⁽¹⁾AFC- FC alcalina, PEMFC- de membrana de intercâmbio de protons, PAFC- de ácido fosfórico, MCFC- de carbonato fundido e SOFC- de óxido sólido.

3 A BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL PARA FCs

Basicamente todos os combustíveis que contêm H₂ podem ser utilizados em uma FC. Junto a recursos energéticos fósseis como o petróleo, gás natural ou carvão, há outros recursos renováveis, como resíduos orgânicos (que podem ser convertidos em biogás por meio de biodigestão), madeira e outras fontes lignocelulósicas (que podem ser gaseificadas) ou cultivos energéticos, como a cana-de-açúcar (que podem ser convertidos em etanol e posteriormente reformados).

O uso sustentável de biomassa na geração de eletricidade é uma alternativa que pode trazer importantes benefícios ambientais, tanto para mitigar emissões de gases de efeito estufa como no sequestro de carbono. Biocombustíveis são atualmente utilizados com tecnologias convencionais de geração, fundamentalmente turbinas a vapor, com baixas eficiências e gerando quantidades significativas de NO_x, SO_x e particulados. A substituição de tecnologias convencionais por FCs, utilizando biocombustíveis, permitiria o uso mais eficiente desses recursos, reduzindo as emissões de NO_x a valores insignificantes (PEHNT; RAMESÖHL, 2004).

Teoricamente o uso de biocombustíveis pode reduzir o custo da energia gerada. Alguns tipos de biocombustíveis podem ser mais baratos que os combustíveis convencionais, como o gás natural. Isto se cumpre quando o biocombustível utilizado é um subproduto de outros processos, por exemplo, o metano produzido em uma planta de tratamento de resíduos. O Quadro 2 mostra os custos médios de vários tipos de combustíveis.

4 ACOPLAMENTO DE FCs A FONTES DE BIOCMBUSTÍVEIS

As propriedades físicas do biocombustível têm implicação técnico-econômica muito importante no processo de utilização de biomassa como combustível. Quando o combustível produzido é gasoso, como é o caso de gaseificação, biogás e gás de aterro sanitário, a produção de eletricidade geralmente se limita ao lugar onde se encontra a biomassa, por causa dos elevados custos associados ao transporte, à manipulação e ao armazenamento. No caso de combustíveis líquidos (exemplo álcool), já existe uma infra-estrutura que permite produzir eletricidade a distâncias razoavelmente grandes do local de fabricação do combustível.

O combustível proveniente de biomassa, para ser utilizado em FCs, requer limpeza e tratamento, o que aumenta a complexidade do sistema dependendo do tipo de FC a ser utilizada. A Figura 2 mostra um esquema simplificado do processo de tratamento dos

principais biocombustíveis para serem utilizados em uma FC. Na Figura 2 podem-se observar o aumento da complexidade e, conseqüentemente, o custo do sistema quando FCs de baixa temperatura são utilizadas.

Quadro 2 – Custo médio para vários tipos de combustíveis em US\$ MJ⁻¹ (XENERGY, 2002; BARON, 2004)

Table 2 – Average cost for different fuels US\$ MJ⁻¹ (XENERGY, 2002; BARON, 2004)

Combustível	Custo (US\$ MJ ⁻¹)
H ₂ de Reforma	22
Gás natural	7,3
Gás de aterro sanitário controlado (LFG)	2-3
Gás de digestão anaeróbica (ADG)	1,6
Gaseificação de biomassa (BG)	> 53
Etanol	13 (fermentação cana) 16-20 (hidrólise celulose)

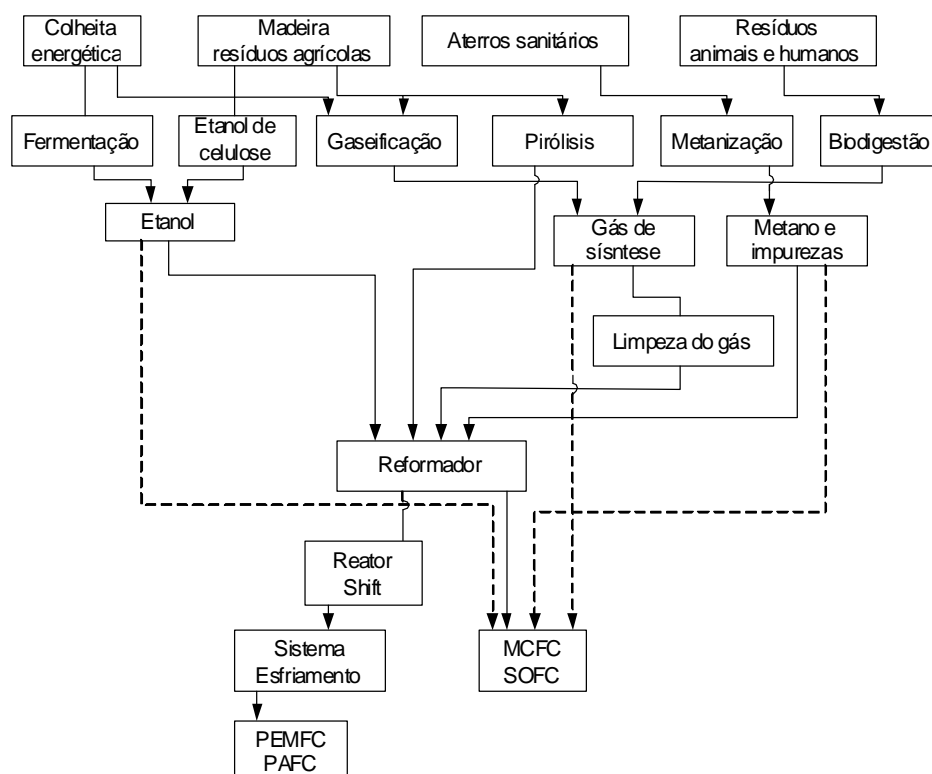


Figura 2 – Possíveis rotas para o acoplamento de FC e biocombustíveis.
Figure 2 – FC and bio fuel linkages.

As FCs que operam a baixas temperaturas (AFC, PEMFC e PAFC) requerem H_2 de pureza elevada, por isto o biocombustível deve ser processado para eliminar impurezas e reformado para se obter um H_2 usável. O processo de reforma é endotérmico e requer temperaturas elevadas (650–950 °C), o que impede a integração direta com FCs de baixa temperatura. Além disso, na reforma o CO é produzido, e as FCs de baixas temperaturas não toleram níveis elevados de CO, portanto é necessária uma outra etapa em um reator água-gás (reator de shift) para reduzir o conteúdo de CO.

Para as FCs de alta temperatura (MCFC, SOFC), a reforma, ou parte desta, pode ocorrer dentro da própria FC, devido às elevadas temperaturas de operação e à maior tolerância às impurezas. Nas FCs de elevada temperatura, o CO também é utilizado como combustível.

Conseqüentemente, a integração térmica da gaseificação de biomassa é mais simples com SOFC e MCFC, já que a temperatura da gaseificação (600-800 °C) está na faixa de temperatura de operação dessas FCs. Por outro lado, os gases de biodigestão e de aterros sanitários se encontram a temperaturas baixas, portanto um sistema de pré-aquecimento seria necessário, independentemente do tipo de célula, para garantir as reações no reformador. Utilizando FCs de alta temperatura, é possível sustentar esse processo com o uso da temperatura dos gases de exaustão da própria FC.

5 LIMITAÇÕES

As principais limitações para o uso de biocombustíveis em FCs concentram-se na natureza dos biocombustíveis (baixo poder calorífico) e na complexidade das instalações necessárias, o que impõe barreiras econômicas, mas que podem ser superadas com políticas de incentivo.

Os elevados custos estão associados com a produção do combustível renovável e com

a necessidade de tratamento deste (limpeza, colheita e reforma do gás, modificações do sistema etc.). Como foi mostrado no Quadro 2, o custo dos gases produzidos por meio da gaseificação é elevado em relação ao gás natural e ao H_2 produto de reforma. Porém, os gases de biodigestão e de aterro sanitário são muito mais atrativos economicamente, até mesmo que o gás natural. Hoje o biocombustível mais atrativo economicamente é o que se obtém como subproduto de outro processo (por exemplo, o gás de digestão anaeróbica de uma planta de tratamento de resíduos).

Todos os sistemas de produção de gás de biomassa requerem um sistema de limpeza. Os biocombustíveis contêm elementos que podem causar problemas, como a desativação do catalisador do reformador e da própria FC. O impacto desses elementos depende da sensibilidade da FC diante dos diferentes contaminantes. A sensibilidade das FCs diante dos principais componentes do gás de biocombustíveis é mostrada no Quadro 3. Pode-se observar que as FCs de alta temperatura apresentam maior tolerância, o que as aponta como as mais atrativas para serem utilizadas em projetos com biomassa.

São vários os elementos necessários para o tratamento e a limpeza do gás produzido: dessulfurizador, filtros, lavadores, leitos de proteção etc. O dessulfurizador é necessário, uma vez que o enxofre pode, inclusive em pequenas quantidades, envenenar o catalisador do reformador e o anodo da FC. Este elemento é necessário também para o tratamento do gás natural. Os halogênios também precisam ser eliminados, e para isto se usa um leito de proteção composto de K_2CO_3 ou KOH. Para o gás de gaseificação de biomassa é necessário um sistema para eliminar o material particulado, este geralmente consiste de filtros, lavadores de gases e outros sistemas mais complexos, como sistemas de esfriamento e condensação do gás.

Quadro 3 – Impacto das principais espécies gasosas nos biocombustíveis nas FCs
Table 3 – Impact of main gas species on FC fuel cells

Tipo	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível
CO ₂	Diluyente	Diluyente	Recirculado	Diluyente
CO	Veneno (>10ppm) ^(1,2)	Veneno (>10ppm ⁽²⁾ , 1 % no ânodo)	Reac. con H ₂ O formando H ₂	Reac. con H ₂ O formando H ₂
NH ₃	Não estudada	Veneno >2 ppm fosfato de amônia no eletrólito	Inerte <1% vol.	Combustível <5.000 ppm
CH ₄	Inerte, combustível com reformador	Inerte, combustível com reformador	Combustível (reforma interna ou externa)	Combustível reformado
C ₂ -C ₆		Veneno >0,5% de olefinas	Entupimento e deposição de carbono. Com reformador é combustível ⁽⁵⁾	Combustível – similar à MCFC com HC mais pesados
Enxofre	Veneno > 0,1ppm	Veneno >20 ppm de H ₂ S ^c , >50 ppm de H ₂ S +COS ⁽³⁾	Veneno >10 ppm de H ₂ S em combustível, 1 ppm SO ₂ em oxidante	Veneno >1 ppm H ₂ S ⁽³⁾
Halogênios (HCl)	Não estudado	Veneno >4 ppm ⁽⁴⁾	Veneno >0,1 - 1ppm ⁽³⁾	Veneno >1 ppm ⁽³⁾
Metais Alcalinos			Perdas no eletrólito se >1-10 pm ⁽⁶⁾	

⁽¹⁾ Ledjeff, Roes, Wolters (2000), ⁽²⁾ Kordesch Simader (1996), ⁽³⁾ Fuel Cell Handbook 5th Edición (2000), ⁽⁴⁾ Speigel, et al. (1999), ⁽⁵⁾ Bossart et al. (1990) e ⁽⁶⁾ Lobachyov e Richter (1998).

6 SISTEMAS DE LIMPEZA PARA SOFC COM DIFERENTES BIOCOMBUSTÍVEIS

Como mostrado no Quadro 3, são várias as impurezas contidas no gás produto de biocombustíveis que precisam ser removidas antes de entrar na FC. As FCs de alta temperatura toleram melhor essas impurezas, mas ainda assim a complexidade do sistema de limpeza é notável. As SOFC são as de maior flexibilidade de combustível, por isso são tratadas com mais profundidade a seguir.

7 SOFC COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Na Figura 3 está o esquema básico de uma SOFC acoplada a um gaseificador de leito fixo e fluxos concorrentes. Nesse esquema considera-se a biomassa com umidade de 50%. Primeiramente a biomassa é seca, aproveitando os gases de exaustão do sistema; este pré-aquecimento eleva a temperatura da biomassa acima de 100 °C, que, em seguida,

entra no gaseificador. O gás produzido sai do gaseificador aproximadamente a 600 °C e entra em um ciclone, onde são removidos os particulados e os compostos alcalinos condensados. O gás que sai do ciclone é resfriado em um trocador de calor até aproximadamente 200 °C, a fim de condensar compostos alcalinos, e posteriormente entra em um filtro de mangas, onde esses compostos são removidos junto com o material particulado menor de 5 µm. Em seguida o gás entra em um precipitador eletrostático úmido, onde são removidos o alcatrão e o material particulado restante.

O gás limpo que sai do precipitador eletrostático é aquecido acima de 400 °C, produto da troca de calor com o fluxo proveniente do ciclone. Para entrar na SOFC o gás já limpo é reaquecido pelos gases exauridos do anodo da própria SOFC. O mesmo acontece com o ar que entra no catodo. Este reaquecimento é necessário para garantir um gradiente de temperatura apropriado entre a entrada e a saída da SOFC. Uma parte da exaustão

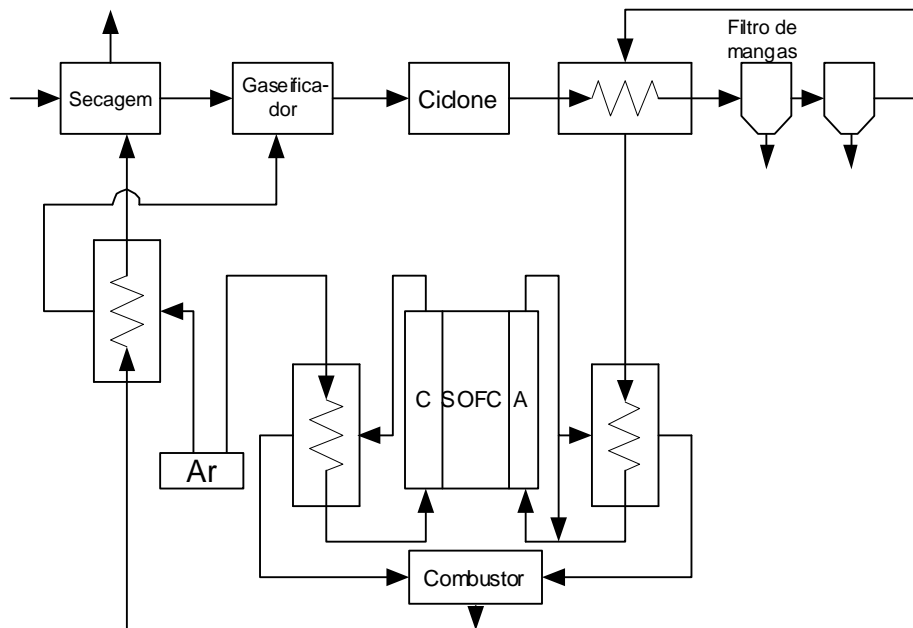


Figura 3 – Célula a combustível de óxido sólido acoplada a um gaseificador de biomassa e a um sistema de limpeza do gás.

Figure 3 – SOFC coupled to Biomass Gasifier and gas cleaning system.

anódica é recirculada e misturada com o combustível que entra no anodo, para evitar a formação de carbono na superfície do catalisador, o que pode desativar a superfície de reação e provocar danos irreversíveis.

8 SOFC COM GÁS DE ATERRO SANITÁRIO

Na Figura 4 está o esquema de um conjunto SOFC/sistema de limpeza à base de gás de aterro sanitário (LFG). O LFG passa primeiramente por um filtro, onde é removido o material particulado; depois em um reator com leito de carvão, à temperatura ambiente, é removido o enxofre, quebrando as moléculas de sulfuro de hidrogênio por meio da reação de Claus ($H_2S + 1/2O_2 \rightarrow H_2O + S$). Uma unidade condensadora esfria o gás até o ponto de orvalho da água contida neste, para sua remoção, e também são removidos alguns hidrocarbonetos pesados. O gás passa, então,

por um secador regenerativo, para tirar o resto de unidade do gás, e por um leito de carvão ativado, para remover compostos orgânicos voláteis (VOC). O gás usado para regenerar estes dois estágios é queimado em um incinerador junto com hidrocarbonetos e particulados extraídos nos estágios de filtração e condensação anteriores. Finalmente, o gás passa por um outro filtro, para extrair o material particulado remanescente.

O gás já limpo entra em um dessulfurizador, para eliminar possíveis traços de enxofre. Em seguida entra no reformador e, posteriormente, na SOFC. Similarmente ao esquema com gás de gaseificação de biomassa, esse sistema apresenta uma recirculação da exaustão anódica para esquentar o combustível e evitar a formação de carbono. O ar que entra na célula é pré-aquecido pelos gases de exaustão da SOFC, que são queimados em uma câmara de combustão.

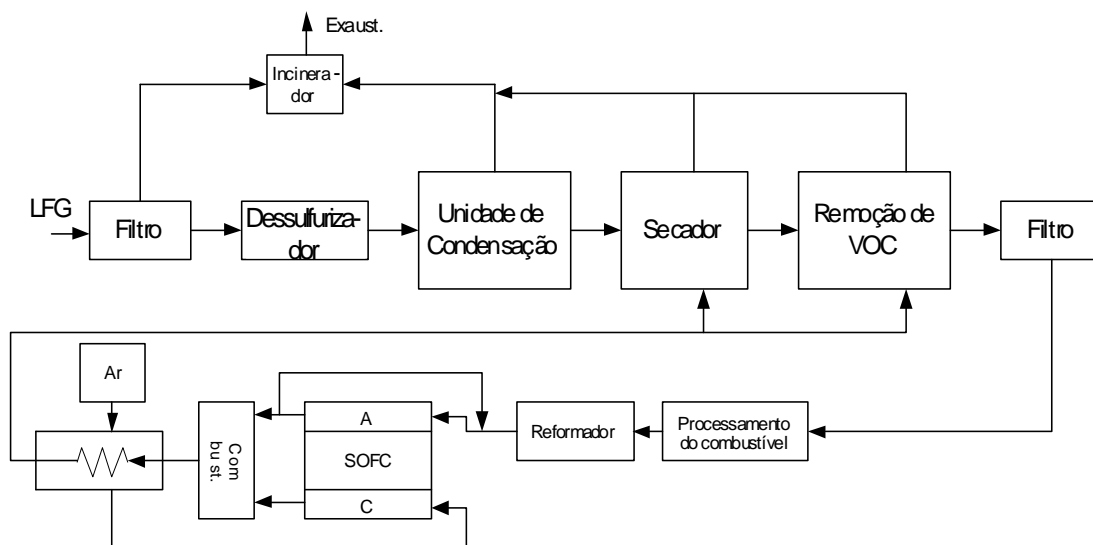


Figura 4 – SOFC com sistema de limpeza para operar com gás de aterro sanitário.
Figure 4 – SOFC and cleaning system using Landfill Gas.

9 SOFC COM GÁS DE BIODIGESTÃO

A Figura 5 mostra o esquema de um sistema SOFC alimentado com gás de biodigestão. Inicialmente o gás entra em um filtro coalescente, para remoção de sólidos, água e bactérias, depois o gás passa por um leito de carbono, onde o enxofre é eliminado pelo craqueamento do H_2S , por meio da reação de Claus. Uma injeção controlada de ar é necessária para manter o nível de O_2 entre 0,3 e 0,5% do volume. O leito de carbono do dessulfurizador é impregnado de hidróxido de potássio, o mesmo usado no sistema que usa gás de aterro sanitário. Este material tem sido testado, e tem apresentado capacidade de absorção elevada quando gerado em condições ambiente, removendo 100% do H_2S , com tempos de residência pequenos (SPIEGEL et al., 2000). O teor de enxofre no gás de digestão anaeróbica é elevado, por isso são usados dois estágios de dessulfurização com capacidade de operação reversa através de válvulas. Antes de entrar na SOFC, é necessário remover os alógenos, passando o

gás por um lavador de gás. Em seguida o gás passa pelo hidrodessulfurizador, que consiste de um leito de óxido de zinco, e finalmente pelo reformador.

10 POTENCIAL ENERGÉTICO DE DIFERENTES BIOCOMBUSTÍVEIS

A composição dos biocombustíveis gasosos obtidos da gaseificação de biomassa (BG), do gás de digestão anaeróbica (ADG) e do gás de aterro sanitário controlado (LFG) muda de acordo com as características químicas da biomassa utilizada. Valores médios da composição desses combustíveis (%Vol) são mostrados no Quadro 4. Em adição a essas espécies também se encontram impurezas como enxofre, alcatrão, amônia etc., já tratadas anteriormente.

O etanol C_2H_5OH pode ser produzido tanto da cana-de-açúcar como de resíduos florestais ou municipais. É um combustível líquido e relativamente mais limpo que os combustíveis gasosos citados anteriormente,

não requerendo um complexo sistema de limpeza. Este combustível é objeto de outros estudos, não tendo sido abordado neste trabalho.

Usando as composições mostradas no Quadro 4, pode-se avaliar o potencial energético aproveitável mediante o uso desses combustíveis em uma SOFC.

Para avaliar o combustível procedente de cada tipo de biomassa, geralmente são consideradas as principais reações químicas por meio das quais se pode obter a máxima quantidade de H₂. Essas equações estão no Quadro 5. Na realidade, o processo é muito mais complexo e ocorrem muito mais reações

em cada caso. Com as reações mostradas no quadro pode-se ter uma idéia genérica do potencial energético de cada combustível.

11 PRINCIPAIS PROJETOS E TESTES

Dos biocombustíveis analisados os mais utilizados em células a combustíveis têm sido o gás de digestão anaeróbica e o gás de aterros sanitários. A maioria desses projetos tem sido implementada com a célula de ácido fosfórico PC25 de 200 kW, desenvolvida pela UTC Fuel Cells/ONSI, a qual se encontra em estado comercial. Em 2001 já existiam nove unidades PC25 operando com ADG e três operando com LFG, nos Estados Unidos.

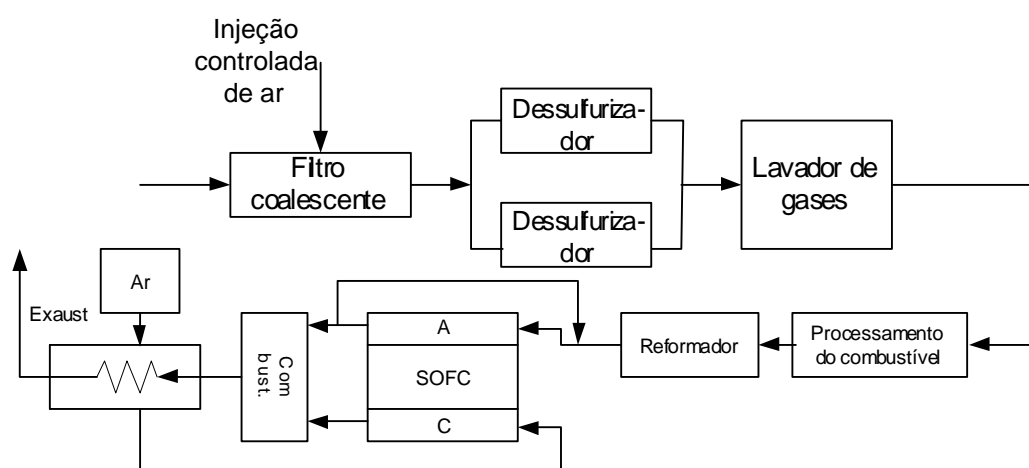


Figura 5 – Sistema de limpeza e SOFC, usando gás de biodigestão.
Figure 5 – SOFC using Anaerobic Digestion Gas and Cleaning system.

Quadro 4 – Composição média dos principais gases biocombustíveis (BARON, 2004)

Table 4 – Average composition of the main biofuel gases: Landfill gas (LF), Anaerobic Digestion Gas (ADG) and Biomass Gasification (BG), (BARON, 2004)

Biocombustível	Composição Média (% Vol)
LFG	57 CH ₄ , 42 CO ₂ , 0,5 N ₂ , 0,2 H ₂ , 0,2 O ₂
ADG	57-70 CH ₄ , 30-40 CO ₂ , 1-10 N ₂ , 0-1 H ₂
BG (leito fixo e fluxos concorrentes)	40-50 N ₂ , 22-27 CO, 10-15 H ₂ , 10-15 CO ₂ , 2-3 CH ₄

Quadro 5 - Principais biocombustíveis e equações para sua conversão em H₂

Table 5 - Main biofuels and equations for H conversion

Tipo de Biocombustível	Equação
LFG	CH ₄ + H ₂ O → CO + 3H ₂ (reforma) CO + H ₂ O ↔ CO ₂ + H ₂ (shift)
ADG	CH ₄ + H ₂ O → CO + 3H ₂ (reforma) CO + H ₂ O ↔ CO ₂ + H ₂ (shift)
BG	CH ₄ + H ₂ O → CO + 3H ₂ (reforma) CO + H ₂ O ↔ CO ₂ + H ₂ (shift)
Etanol	C ₂ H ₅ OH + 3H ₂ O → 6H ₂ + 2CO ₂ (reforma)

No Japão, a *Fuji Electric* instalou seis de suas unidades de 100 kW, também do tipo PAFC, para usar biogás produto do lixo e de plantas de tratamento de esgoto. Em 2002, a *Fuji Electric* colocou em funcionamento duas unidades de 100 kW no centro de purificação de esgoto da cidade de Yamagata, representando uma redução de 1,140 t ano⁻¹ de CO₂, 460 kg ano⁻¹ de NO_x e 412 kg ano⁻¹ de SO_x. A eficiência de conversão obtida é de 38%, gerando 100 kW elétricos (KUBOTA et al., 2003).

Spiegel et al. (1999) apresentaram resultados de uma PAFC que opera com gás de aterro sanitário na planta de Pernose, em Sun Valley, Califórnia. Foram obtidos níveis muito baixos de emissões: 0,77 ppmV de CO, 0,12 ppmV de NO_x, e zero emissão de SO_x. A célula do tipo PC25 atingiu 137 kW de potência e 37,1% de eficiência elétrica.

Alguns projetos demonstrativos têm sido realizados mediante o uso de MCFC. Uma planta piloto foi instalada pela empresa alemã MTU, na cidade de Ahlen, utilizando o protótipo HotModule de 250 kW. A planta tem capacidade de operar com gás natural, obtendo-se 250 kW, e biogás, gerando 150 kW; esta planta encontra-se ainda em fase de testes (KRUMBECK et al., 2005). Um outro

projeto desenvolvido nos Estados Unidos usando biogás na planta de tratamento de esgoto de King County alimenta uma MCFC de 1 MW, desenvolvida pela *Fuel Cell Energy*. Uma outra planta de 250 kW da mesma empresa foi instalada em Los Angeles. No Japão também têm sido instaladas plantas de 300 kW desenvolvidas pela empresa IHI, usando biogás, e duas plantas de 250 kW desenvolvidas pela *Fuel Cell Energy*, usando gás de biodigestão.

Nos últimos anos nota-se o crescimento na utilização das SOFC. Na Inglaterra foi instalada uma planta demonstrativa em Cannock, usando gás do aterro sanitário, em uma SOFC tubular unitária (STANIFORTH; KENDALL, 1998). A *Sulzer Hexis* operou com sucesso uma planta de 1 kW em Lully, na Suíça, por mais de 2.500 horas, com uma eficiência elétrica de 26,5%.

Em 2001, a *ESF (European Science Foundation)* fundou uma rede com a finalidade do uso da fermentação de biomassa em FCs (BFCNet). Essa rede tem como objetivo juntar conhecimento e experiências na área de biogás e células a combustível.

A gaseificação de biomassa se encontra um pouco mais atrasada, no entanto também existem projetos demonstrativos nessa área. O projeto FICBF, que forma parte do programa de estruturação da comunidade européia, tem como intuito o acoplamento de uma MCFC com um gaseificador de leito fluidizado.

Em 2002, o *Ascent Power System e a Community Power Corporation* operaram com sucesso uma SOFC acoplada a um gaseificador, durante 24 horas de teste de laboratório.

Outros projetos da União Européia contam com fundos consideráveis para o estudo do acoplamento de SOFC com gaseificador de biomassa, entre estes se destacam o projeto *Green FC* e o *Biocellus*, que juntos contam com 14 milhões de euros.

12 CONCLUSÕES

A utilização de biocombustíveis para acionar FCs pode trazer benefícios ambientais significativos, produto da combinação entre a elevada eficiência das FC e o uso de combustíveis renováveis. Esses sistemas só não representam um benefício para áreas rurais ou isoladas. Empreendimentos deste tipo podem ter uma contribuição significativa no atendimento a novos consumidores, no crescimento do consumo energético de países em desenvolvimento como o Brasil.

Vários projetos demonstrativos têm sido realizados ao redor do mundo, combinando células a combustível com biocombustíveis provenientes de gaseificação de biomassa, gás de aterro sanitário e biodigestão. As FCs de alta temperatura têm sido identificadas como as mais apropriadas para operar com esses combustíveis, dada a sua tolerância às impurezas e a possibilidade de melhor integração térmica com o processo.

Está demonstrado que existem sistemas de limpeza para gases produzidos a partir de biocombustível que podem, em curto prazo, ser usados em sistemas de FC com elevada eficiência e baixíssimas emissões. A principal limitação para implantação destes sistemas é o custo ainda muito alto das células a combustível. São necessárias políticas de incentivo para testar e aprimorar esses sistemas, até o amadurecimento comercial.

REFERÊNCIAS

- BARON, S. Biofuels and their use in fuel cells. **Revista Fuel Cell Today**. Disponível: <www.fuelcelltoday.com>. Acessible: 20 nov. 2004.
- BLOMEN, L. J. M. J.; MUGERWA, M. N. **Fuel cells systems**. New York: Plenum Press, 1993. 614 p.
- BOSSART, S. J.; CICERO, D. C.; ZEH, C.M.; BEDICK, R.C. **Gas stream cleanup, technical status report**. Morgantown: Morgantown Energy Technology Center Report, 1990. 66 p. (No. DOE-METC-91/0273)
- EG&G Services/Parsons Inc./ SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION. **Fuel cell handbook** 5.ed. Washington: U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, 2000. 352 p.
- HOOGERS, G. **Fuel cell technology handbook**. New York: CRC Press, 2002. 368 p.
- KORDESCH, K.; SIMADER, G. **Fuel cells and their applications**. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1996. 375 p.
- KRUMBECK, M.; KLINGE, T.; DÖDING, B. First european fuel cell installation with anaerobic digester gas in a molten carbonate fuel cell. **Journal of Power Sources**, n. 157, p. 902-905, 2006.
- KUBOTA, K.; KURODA, K.; AKIYAMA, K. Present status and future prospects of biogas powered fuel cells units. **Fuji Electric Review**, v. 49, n. 2, p. 68-72, 2003.
- LEDJEFF-HEY, K.; ROES, J.; WOLTERS, R. CO₂-scrubbing and methanation as purification system for PEFC. **Journal Power Sources**, n. 86, p. 556-561, 2000.
- LOBACHYOV, K. V.; RICHTER, H. J. An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system. **Revista Energy Convers**, v. 39, n. 16, p. 1931-1943, 1998.
- PEHNT, M. S. RAMESOHL. **Fuel cells for distributed power: benefits, barriers and perspectives**. Study by WWF, in co-operation with Fuel Cell Europe. 2004. <www.panda.org/epo>.
- SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L. Test result for fuel cell operation on anaerobic digester gas. **Journal of Power Sources**, n. 86, p. 283-288, 2000.
- SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L.; TROCCIOLA, J. C. Fuel cell operation on landfill gas at Penrose Power Station. **Energy**, v. 24, n. 8, p. 723-742, 1999.
- STANIFORTH, J.; KENDALL, K. Biogas powering a small tubular solid oxide fuel cell. **Journal of Power Sources**, v. 71, p. 275-277, 1998.
- XENERGY. Toward a renewable power supply: The use of bio-based fuels in stationary fuel cells. Prepared by Northeast regional Biomass Program. Washington: 2002.