



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
DE ENERGIA COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL**

**José Geraldo de Melo Furtado(*)
CEPEL**

**Eduardo Torres Serra
CEPEL**

**Alcides Codeceira Neto
CHESF**

RESUMO

Sistemas de geração de energia com células a combustível de pequeno e médio portes têm sido recentemente enfatizados para aplicações residenciais e comerciais no âmbito da geração distribuída de energia elétrica, uma vez que as células a combustível são os mais eficientes geradores de energia conhecidos.

Neste trabalho se empreende um estudo acerca da otimização energética e do desempenho operacional de um sistema de co-geração à base de células a combustível de membrana polimérica trocadora de prótons, de 5 kW de potência elétrica nominal, existente no laboratório de células a combustível do CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

PALAVRAS-CHAVE

Células a Combustível, Geração Distribuída, Gás Natural, Avaliação Energética, Co-geração

1.0 - INTRODUÇÃO

O mundo contemporâneo é fortemente dependente da energia elétrica e, segundo os trabalhos de Kotamarty *et al.* (1) e de Diniz *et al.* (2), em função do contínuo desenvolvimento sócio-econômico em escalas global e nacional, esta dependência só tende a aumentar, paralelamente às crescentes exigências por qualidade e confiabilidade da energia elétrica fornecida, bem como a preocupação em minimizar as perdas e os custos de transmissão e distribuição de energia elétrica, além dos enormes prejuízos que podem decorrer de falhas no fornecimento de eletricidade (3, 4). Contudo, este aumento quantitativo e qualitativo da demanda por energia elétrica deverá ocorrer, cada vez mais, de forma ambientalmente sustentável, em função das crescentes restrições às emissões de gases causadores do efeito estufa, associadas aos tradicionais processos de geração termelétrica à base de combustíveis fósseis, que se constituem na maior parcela da matriz elétrica mundial (4).

Neste cenário global, a Geração Distribuída (GD) de energia tem recebido grande atenção, principalmente nos mercados onde as demandas energéticas caracterizam-se pela busca por elevadas eficiência e qualidade, geração de menor porte e com menores impactos ambientais. Embora a definição de GD não seja objeto de consenso, segundo Melo *et al.* (5) pode-se conceituá-la como a geração de energia elétrica, em unidades de pequeno porte (em geral, de no máximo 30 MW de potência elétrica), localizadas no ponto de carga ou próximas a ele (portanto, prescindindo de sistemas de transmissão), conectadas ou não (operando isoladamente) à rede elétrica de distribuição.

Dentre as principais tecnologias de geração energética que têm sido consideradas com potencial para aplicação

em GD as células a combustível têm merecido amplo destaque em função da elevada eficiência de geração e de possibilitar uma redução na emissão de poluentes, embora, conforme considerado por Serra *et al.* (4), em curto prazo, a GD estaria ainda associada ao uso de combustíveis fósseis, em função tanto de sua maior disponibilidade a custo relativamente baixo quanto da extensa infra-estrutura já existente. De fato, no atual cenário energético mundial tem ocorrido uma contínua valorização do gás natural (GN), para uso industrial, no setor de transportes e na geração de energia elétrica, como o combustível de origem fóssil de menor impacto ambiental quanto às emissões de gases causadores do efeito estufa. Neste sentido, o GN tem sido considerado como um combustível de transição em relação ao estabelecimento da Economia do Hidrogênio (6, 8) ou ao mercado com predomínio de combustíveis descarbonizados, em função de sua maior razão hidrogênio/carbono quando comparado ao petróleo, seus derivados, e ao carvão. Como o gás natural é também um valioso insumo do setor petroquímico, o seu emprego como energético deve essencialmente ocorrer em processos caracterizados por elevada eficiência energética. Dessa forma, o uso do gás natural em sistemas de geração de energia com células a combustível, seja diretamente (em CaC que operam em temperaturas elevadas) ou indiretamente, mediante à produção de hidrogênio por processos termoquímicos, tem sido amplamente considerado (2, 4, 7, 9). Neste cenário, as CaC deverão ocupar uma posição de destaque na GD, a médio e longo prazos, à medida que atinjam custos unitários de instalação e operação competitivos com as demais tecnologias, ocupando, gradativamente, nichos de mercado específicos para sistemas de alta qualidade de energia ou que possam se beneficiar dos incentivos para introdução de tecnologias de geração de menor impacto ambiental ou, no futuro, ambientalmente sustentáveis.

Em trabalhos anteriores (10, 11) consideramos o processo de ativação eletroquímica da CaC de membrana polimérica trocadora de prótons (do inglês *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, PEMFC), de 5 kW de potência elétrica, existente no Laboratório de Células a Combustível do CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), bem como apresentamos uma análise energético-econômica do sistema de GD constituído pela CaC considerada e por um reformador de gás natural. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise acerca da otimização energética do sistema de GD (PEMFC-5kW + Reformador de GN) aqui considerado, centrada na caracterização do reformador como equipamento responsável pelo fornecimento de hidrogênio e na influência da temperatura de operação da CaC sobre o desempenho eletrotérmico do sistema.

2.0 - MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Todos os ensaios elétricos apresentados e discutidos neste trabalho foram efetuados no sistema de GD formado por uma unidade PEMFC de 5 kW de potência elétrica nominal e um reformador de GN, ambos mostrados na Figura 1.



FIGURA 1 – Sistema de Geração Distribuída de Energia à base de célula a combustível de membrana polimérica trocadora de prótons do Laboratório de Células a Combustível do CEPEL.

A unidade PEMFC, de 5 kW de potência elétrica, é constituída por um empilhamento (*stack*) – o bloco central com capa de alumínio, no interior do gabinete central, mostrado na Figura 1 – de noventa CaC unitárias de área efetiva

igual a 380 cm² cada uma, e um conjunto de sistemas auxiliares de processo, de monitoração e de controle, que visam assegurar o estabelecimento das condições adequadas para o funcionamento da unidade, principalmente no que diz respeito às condições de umidificação dos gases reagentes e do eletrólito polimérico, bem como ao gerenciamento térmico e hídrico do empilhamento. O sistema é modular e flexível possibilitando a substituição do empilhamento. O sistema de eletrônica de potência (inversor CC/CA) é formado por pontes de IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), filtros e o transformador, possibilitando o fornecimento de tensão e corrente elétrica alternadas (127/220 V, 60 Hz). A modularidade e grau de integração da configuração total permitem minimizar os problemas de paradas de manutenção característicos de geradores convencionais. Adicionalmente, as características supracitadas e os parâmetros de saída possibilitam a conexão em paralelo com a rede, permitindo que o sistema funcione tanto como um no-break/estabilizador quanto como um retificador/suavizador da forma de onda disponibilizada à carga, reduzindo picos e eventuais quedas de nível de tensão e apresentando distorção harmônica total inferior a 1%. Estas características permitem a operação com cargas isoladas ou conectado à rede elétrica, sem perda de desempenho, e credenciam o sistema para aplicações onde o fornecimento de energia elétrica é bastante crítico, principalmente no que diz respeito aos requisitos de confiabilidade e qualidade.

O reformador de gás natural – gabinete à direita na Figura 1, apresentando o reator encamisado com um cilindro branco de isolamento térmico –, adquirido junto à empresa norte-americana *IdaTech*, produz hidrogênio mediante a reforma catalítica a vapor do gás natural, sendo nominalmente capaz de produzir 65-68 l/min de H₂, a 13,8 kPa, com um consumo de até 35 l/min de gás natural, a 2-5 kPa, e 4,8-5,0 l/h de água deionizada. O reformador utiliza um sistema de membranas de paládio para purificação do gás reformado, possibilitando o fornecimento de hidrogênio de elevada pureza, com apenas 0,5-1,0 ppm de CO, 1,8-3,0 ppm de CO₂ e no máximo 180 ppm de CH₄, compatível com o uso em células a combustível de baixa temperatura de operação.

A unidade PEMFC é capaz de operar tanto com o hidrogênio produzido pelo reformador de GN quanto com aquele fornecido em cilindros, bem como com misturas de ambos. A alimentação de hidrogênio, operando em regime na potência nominal, é de 60-70 l/min, a 1,2-1,4 bar. A CaC também pode operar tanto com oxigênio puro fornecido em cilindros quanto com ar ambiente insuflado por um soprador, em vazões da ordem de 100-700 l/min. Um sistema de resfriamento à água garante a operação do empilhamento à cerca de 40-48°C, com máxima temperatura de operação de 62°C, em função das características do eletrólito, mas que usualmente não é praticada, com o objetivo de preservação do mesmo. Este sistema também tem possibilidade de fornecer água quente, a uma temperatura típica de 38-45°C, resultante da potência térmica gerada na CaC, a qual, numa unidade comercial, poderia ser aproveitada para aquecimento de água para uso doméstico ou comercial, constituindo-se assim num sistema de co-geração.

Todos os dados de tensão (potencial de operação, U), corrente elétrica (I) e potência elétrica (P), utilizados neste trabalho, foram obtidos diretamente do sistema de monitoramento da unidade PEMFC, sob condições estáveis de operação em regime estacionário, mediante a permanência mínima de um minuto, do sistema em cada condição de potencial e corrente estudada, e através do acoplamento de uma carga elétrica (CC), a qual foi empregada para simular a condição de um consumidor hipotético. Os resultados de potência térmica foram obtidos a partir de medições de temperatura da água do sistema de arrefecimento do conjunto de geração (incluindo o rejeito térmico do reformador de GN) e supondo-se perdas da ordem de 25% nos respectivos sistemas de transferência térmica, principalmente em função da baixa qualidade termodinâmica do rejeito térmico no caso considerado (por se tratar de uma CaC de baixa temperatura de operação). Todos os resultados subsequentes são valores médios e as barras de erro foram utilizadas (quando foi o caso, em função da escala adotada) para representar a variação do parâmetro considerado em relação ao seu valor médio.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados acerca do desempenho do reformador de GN, onde o parâmetro “Grau de Utilização do Reformador (%)” refere-se a que percentagem da sua capacidade nominal de produção de hidrogênio ele está efetivamente operando. Em função deste parâmetro tem-se a vazão do hidrogênio produzido e as vazões de consumo de GN e de água deionizada, bem como a eficiência de conversão energética (ECE), determinada com base no poder calorífico inferior dos respectivos gases, do equipamento processador de combustível. Verifica-se que embora a relação entre as vazões consideradas e o grau de utilização do reformador seja, como esperado, praticamente linear, nota-se que nas proximidades da capacidade nominal de operação do reformador ocorre um desvio em relação à tendência, evidenciando um decréscimo na eficiência (conforme visto na curva da ECE), que, ao longo de toda a faixa, variou de 54,2 a 64,2% atingindo, nos testes realizados, um máximo de 64,9% entre 80 e 90% da capacidade nominal de operação, intervalo no qual ocorre um maior incremento (mudança na declividade da curva verde) no consumo de água, cujo pico é de 68,4 ml/min. De fato, em todo o intervalo de produção de hidrogênio por reforma a vapor de hidrocarbonetos é comum o uso de excesso de água com o intuito de minimizar a formação de coque (12). O pico de produção de hidrogênio pelo reformador de GN foi de 61,6 l/min, correspondendo a um consumo de 26,4 l/min de GN, o que corresponde a

uma taxa de produção de hidrogênio cerca de 22% inferior àquela da produção teórica. A cerca de 50% da capacidade de produção do reformador, esta discrepância é da ordem de 18%.

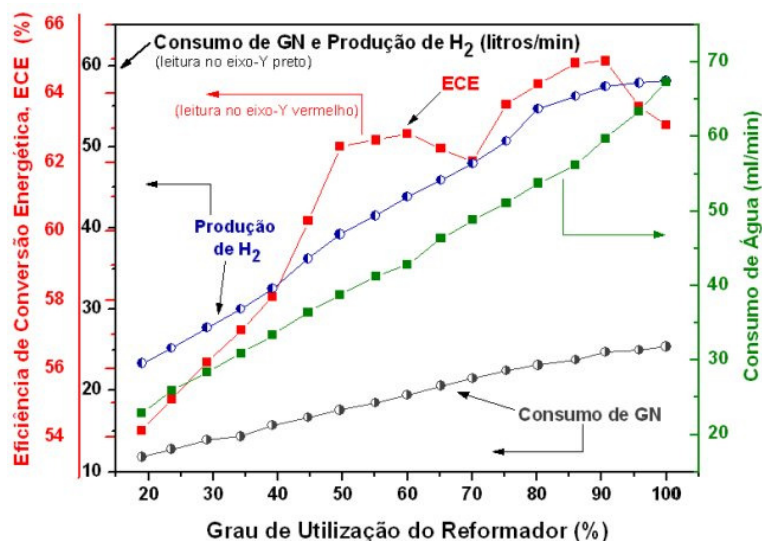


FIGURA 2 – Curvas de desempenho características do reformador de GN: Consumo de GN, produção de hidrogênio, consumo de água e eficiência de conversão energética em função do grau de utilização do reformador (nível percentual de utilização em relação a sua capacidade nominal de produção).

A Figura 3 apresenta três curvas de potencial (tensão) versus corrente elétrica, obtidas em três diferentes temperaturas de operação, características da unidade PEMFC 5 kW. Nota-se claramente a influência da temperatura de operação sobre o desempenho da CaC, uma vez que as três curvas mostram, para uma mesma corrente solicitada, potenciais (níveis de tensão) diferentes. Por exemplo, para uma corrente de 60 A, tomada como um ponto característico da região de operação da unidade, a diferença de potencial entre as curvas a 40 e a 30°C é de 9% (6,1 V) e entre as curvas a 40 e a 50°C é de 5,4% (3,6 V), o que representa uma perda de potência da ordem de 0,37 e 0,22 kW respectivamente, quando comparado à operação a 40°C. Além disso, os próprios potenciais de circuito aberto associados às curvas I x U a 30, 40 e 50°C são, respectivamente, 87,1; 89,1; 87,8 V.

Adicionalmente, o gráfico de diferença de potencial entre as curvas I x U nas temperaturas consideradas em função da faixa de corrente solicitada, apresentado no detalhe da Figura 3, mostra que esta diferença apresenta basicamente três regiões distintas de comportamento, que são essencialmente coincidentes com as três regiões características da curva I x U de uma CaC. De fato, na região de baixa corrente, até cerca de 20 A, tem-se os menores valores para estas diferenças de potencial, atingindo picos locais justamente na transição para a região de correntes elétricas intermediárias, até cerca de 100 A, na qual as diferenças de potenciais aumentam continuamente. Após os 100 A, na região de altas correntes, para ambas as curvas, as diferenças de potenciais aumentam mais acentuadamente, atingindo valores máximos de 14,4 e 10,6 V respectivamente para as curvas de diferenças entre 40 e 30°C e entre 40 e 50°C. É de se notar que a melhor curva I x U (maiores potenciais para as mesmas correntes) foi aquela obtida a 40°C. Conforme os dados apresentados na Figura 3, tanto a 30°C quanto a 50°C, os respectivos potenciais são sempre inferiores àqueles obtidos a 40°C. Como as reações eletrocatalíticas que ocorrem na PEMFC são termicamente ativadas, entende-se que os potenciais obtidos a 30°C sejam sempre inferiores àqueles obtidos a 40°C. Contudo, o comportamento I x U a 50°C também é inferior àquele exibido a 40°C, ao longo de toda a faixa de corrente considerada, embora a discrepância em relação ao melhor resultado, neste caso, seja significativamente inferior àquela existente entre as curvas I x U a 40°C e a 30°C. Dessa forma, o comportamento I x U a 50°C pode ser interpretado como indicativo de que nesta temperatura as características do eletrólito (membrana Nafion) são ligeiramente inferiores àquelas a 40°C e que a operação prolongada na condição da primeira temperatura provavelmente provocaria uma redução mais acentuada da eficiência da PEMFC estudada em função da degradação do eletrólito. Esta observação pode ser ainda corroborada pelo fato de que este comportamento é mais significativo em altas densidades de corrente, sob as quais as solicitações eletrotérmicas sobre o eletrólito são mais intensas, sendo justamente nesta região que se observa as maiores discrepâncias globais. Outro aspecto a ser notado é que, somente a 40°C, a CaC opera com potenciais por célula a combustível unitária (90 unidades) da ordem de 0,60 V ou superior, ao longo de toda a

faixa de potência do equipamento.

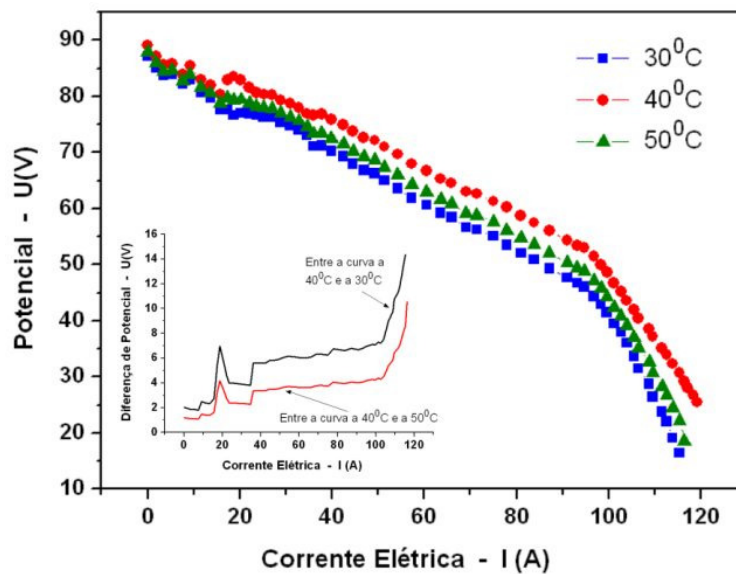


FIGURA 3 – Curvas de desempenho ($I \times U$) da PEMFC de 5 kW de potência nominal em três diferentes temperaturas de operação. No detalhe: diferença de potencial de operação entre as curvas $I \times U$ a 40°C e 30°C e a 40°C e 50°C no intervalo de corrente elétrica de operação.

Em adição ao que foi constatado pela análise dos resultados apresentados na Figura 3, mostra-se na Figura 4(a) as curvas de corrente elétrica versus potência elétrica ($I \times P$) obtidas nas três temperaturas estudadas, bem como as respectivas curvas de diferença de potência elétrica obtida entre as curvas a 40 e a 30°C e entre as curvas a 40 e a 50°C. Na região de máximas potências o sistema operando a 40°C atinge a potência nominal (5 kW), ao passo que a operação a 30°C e a 50°C resultam, respectivamente, em máximas potências iguais a 4,36 e 4,63 kW, representando perdas de potência da ordem de 13% e 8% respectivamente. Ou seja, em valores médios, a alteração da temperatura de operação do sistema em 10°C, para mais ou para menos, pode resultar numa perda de potência também da ordem de 10% para o sistema considerado. De fato, à medida que o processo eletrocatalítico que resulta na geração de energia elétrica pela CaC se desenvolve, ocorre a produção conjunta de calor e água, bem como alteram-se as concentrações dos gases reagentes. Para que a membrana eletrolítica continue a operar de forma estável, segura e eficiente, variáveis como a pressão, a temperatura e a umidade relativa devem ser mantidas sob controle, tanto no anodo quanto no catodo de cada uma das CaC unitárias. O gerenciamento adequado destas variáveis é um problema bastante complexo e vem sendo destacado como algo crítico para CaC do tipo PEMFC, sendo conhecido pela expressão “gerenciamento hidrotérmico” e impactando fortemente sobre a potência desenvolvida pelo sistema de geração (6, 13).

Entretanto, um sistema de GD à base de CaC pode também atuar como um sistema de co-geração, mediante o aproveitamento do rejeito térmico tanto da CaC quanto daquele do processador de combustível primário. No caso de CaC do tipo PEMFC, este rejeito térmico está disponível em baixa temperatura, como é o caso considerado no presente trabalho, e pode somente ser utilizado para aquecimento de água. Em outros tipos de CaC, que operam em temperaturas bem mais elevadas (650-1000°C) que as PEMFC, o rejeito térmico apresenta alta qualidade termodinâmica e pode ser empregado em sistemas de geração em ciclo combinado (4, 6). A Figura 4(b) apresenta as curvas de potência elétrica nas vizinhanças das regiões de máximas potências – faixa de corrente elétrica de 80 a 100 A – bem como as respectivas curvas de potências térmicas disponíveis mediante o aproveitamento do calor rejeitado, seja apenas na PEMFC ou no caso de co-geração global (na PEMFC e no reformador). Verifica-se que na situação de operação próxima à potência nominal do sistema de GD – atingida apenas a 40°C – as potências térmicas (P_T) disponíveis, somente na CaC, são da ordem de 4,2; 6,4 e 6,8 kW para operação da PEMFC a respectivamente 30, 40 e 50°C e, no conjunto formado pela CaC e o reformador, as potências térmicas são da ordem de 5,5; 7,7 e 8,1 kW para as mesmas temperaturas de operação anteriormente consideradas. A disponibilidade térmica é maior a 50°C em função da maior temperatura da água de arrefecimento do sistema, mas, nesta situação, a potência elétrica nominal não é atingida, o que significa dizer que uma parcela da energia do combustível primário não está sendo utilizada para a geração elétrica, mas sim está sendo apenas disponibilizada termicamente, reduzindo o fator de utilização do combustível e a eficiência

global do sistema. A despeito disso, em situações específicas, pode ser interessante o dimensionamento e especificação de um sistema GD com CaC com base na demanda térmica do consumidor (4).

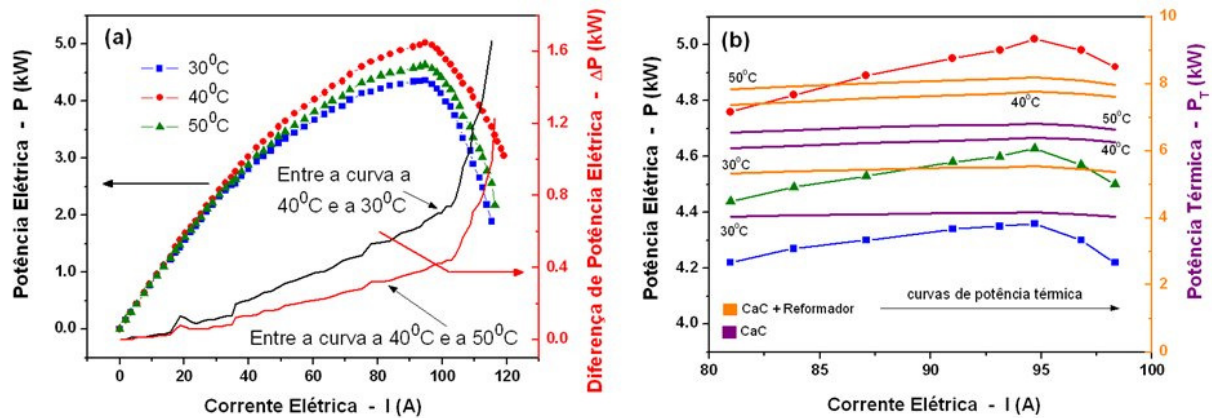


FIGURA 4 – (a) Curvas de desempenho ($I \times P$) da PEMFC de 5 kWe de potência nominal em três diferentes temperaturas de operação e as respectivas curvas de diferença (perda) de potência elétrica entre as curvas $I \times P$ a 40°C e 30°C e a 40°C e 50°C no intervalo de corrente elétrica de operação. (b) Detalhe mostrando as curvas $I \times P$ na faixa de corrente de máxima potência, mostrando ainda as curvas de potência térmica disponíveis.

Com efeito, ainda em relação às considerações sobre eficiência, na Figura 5, tem-se a relação entre a eficiência do sistema de geração elétrica (CaC e o sistema de condicionamento de potência) e o nível de potência elétrica solicitado, em função de duas bases de cálculo: considerando-se o poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio (ou seja, somente a eficiência de geração da CaC) ou do GN (neste caso, eficiência global de geração elétrica de todo o sistema, incluindo o reformador), apresentando também a eficiência de conversão energética (GN/H₂) do reformador. Como observado por Barbir (13), a eficiência do sistema em carga parcial pode ser, por vezes, ligeiramente superior do que aquela do sistema operando em potência nominal, principalmente devido ao fato de que a eficiência da CaC é maior em cargas (potências) menores, já que ela estará operando em potenciais mais elevados. Para o caso da PEMFC estudada, isto só ocorre acima de 60% da potência nominal de operação, conforme evidenciado na Figura 5, onde os dados apresentados referem-se à operação a 40°C, temperatura esta que se mostrou, em função das análises anteriores, a temperatura ótima de operação do sistema avaliado. Dois outros fatores secundários, que contribuem para a redução da eficiência do sistema operando em carga total, são as elevadas perdas térmicas no reformador (que, em geral, trabalha com altas vazões de ar) e o somatório das potências parasitas associadas aos equipamentos e subsistemas auxiliares do sistema de geração, os quais, em situação de carga máxima, representam também maiores perdas.

É interessante notar que a curva de eficiência mostrada na Figura 5, para o sistema sob estudo, é bastante similar àquela do sistema residencial de geração de 3 kW, também baseado numa PEMFC, estudado por Barbir *et al.* (14). Em ambos os casos, a partir de aproximadamente 30% da potência nominal, a variação da eficiência em função do aumento da carga é bastante inferior em relação àquela característica do terço inicial da faixa de potência. Por outro lado, abaixo de 30% da potência nominal, decorre a observação de que não é produtivo operar sistemas de geração deste tipo em situação de carga parcial muito reduzida (elevada capacidade ociosa), o que corrobora outras avaliações da literatura (15-17). Além disso, conforme os resultados de uma análise energética do sistema sob estudo, apresentada em outro trabalho (11), é justamente nesta faixa que ocorre a maior variabilidade do potencial em função da corrente elétrica solicitada. Contudo, em se tratando de sistema de co-geração, a eficiência global pode ser consideravelmente incrementada, uma vez que boa parte da energia térmica disponível pode ser aproveitada. De fato, no trabalho acima considerado (11), estimou-se os principais parâmetros econômicos que caracterizam a operação do sistema em questão, tanto em situações de co-geração como de pura geração elétrica, indicando que há uma redução da ordem de até 20% no custo da energia elétrica gerada no primeiro caso em relação ao segundo. Ainda com base nos resultados apresentados na Figura 5, verifica-se que para potências elétricas superiores a 3,0 kW a eficiência de geração elétrica da CaC é praticamente constante e a maior variabilidade está associada à eficiência de conversão energética do reformador.

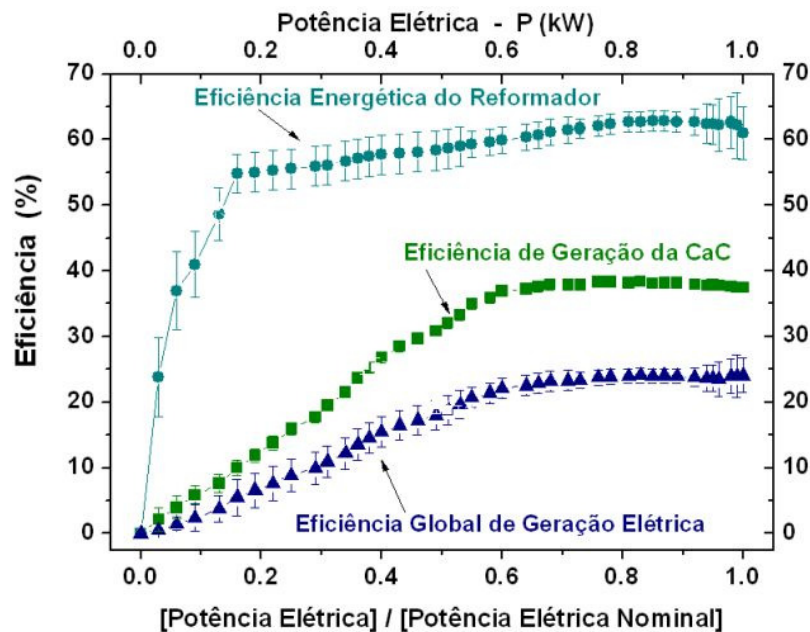


FIGURA 5 – Relações entre as eficiências e o nível de potência do sistema de geração (PEMFC).

4.0 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o sistema de geração de energia à base de células a combustível analisado apresenta temperatura ótima de operação de 40°C, na qual o sistema consegue atingir a potência nominal de operação (5 kWe), apresentando potenciais por célula a combustível unitária da ordem de 0,60 V ou superior ao longo de toda a faixa de potência do equipamento. Tanto a 30°C quanto a 50°C ocorrem perdas de potência da ordem de 10% em relação à potência nominal. A eficiência do sistema de geração é praticamente estável para potências elétricas superiores a 3,0 kW, com o pico de eficiência elétrica da célula a combustível correspondendo a cerca de 38% e de eficiência global de geração elétrica da ordem de 28%.

Adicionalmente, foram apresentadas as curvas características de produção de hidrogênio e de consumo de gás natural e de água do reformador de gás natural utilizado no sistema de geração de energia estudado neste trabalho, o qual apresentou a máxima taxa de produção de hidrogênio igual a 61,6 l/min, correspondendo a um consumo de 26,4 l/min de gás natural, mostrando que a máxima eficiência deste equipamento é obtida em vazões elevadas, entre 80 e 90% da vazão nominal de produção de hidrogênio.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KOTAMARTY, S., KHUSHALANI, S., SCHULZ, N. Impact of distributed generation on distribution contingency analysis, Electric Power Systems Research, Num. 78, pp. 1537–1545, 2008.
- (2) DINIZ; J. H., CARVALHO; A. M., BARROS; D. M. C. R. Geração distribuída de energia: conceitos, tecnologias e perspectivas, Anais XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003.
- (3) HINGORANI, N. G., GYUGYI, L., Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, New York, IEEE Press, 2000.
- (4) SERRA; E. T., FURTADO; J. G. M., SOARES; G. F. W., CODECEIRA NETO; A. Células a Combustível: Uma Alternativa para Geração de Energia e sua Inserção no Mercado Brasileiro. 1ª ed. Rio de Janeiro: CRESESB/CEPEL, 2005.
- (5) MELO, S. G., ANTUNES, F. L. M., DAHER, S. Geração Distribuída: Geração de Energia Elétrica com um Sistema a Gás Natural de Baixo Custo, XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003.
- (6) CARRETTE; L., FRIEDRICH; K. A. Fuel Cells - Fundamentals and Applications, Stimming, U., Fuel Cells, Vol. 1, Num. 1, 2001.

- (7) SERRA, E. T. Utilização de Células Combustíveis de baixa potência na Geração Distribuída, XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Campinas, outubro de 2001.
- (8) BLANCHETTE Jr., S. A hydrogen economy and its impact on the world as we know it, Energy Policy, Num. 36, pp. 522–530, 2008.
- (9) RADULESCU, M., AYL, V., LOTTIN, O., FEIDT, M., ANTOINE, B., MOYNE, C., LE NOC, D., LE DOZE, S. Natural gas electric generator powered by polymer exchange membrane fuel cell: Numerical model and experimental results, Energy Conversion and Management, Num. 49, pp. 326–335, 2008.
- (10) FURTADO; J. G. M., CAVALCANTI, E. S. C., SIQUEIRA, D. A., OLIVEIRA, R. N., SERRA, E. T. Avaliação de desempenho de um sistema de geração distribuída de energia com células a combustível, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Rio de Janeiro, outubro de 2007.
- (11) FURTADO; J. G. M., SILVA Jr., F. R., SILVA, C. A., SOARES; G. F. W., LOPES, F. C., SERRA, E. T., CODECEIRA NETO, A. Análise energético-econômica de um sistema estacionário de geração de energia com células a combustível e reforma de gás natural, 4^o Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC 2008), Campinas, setembro de 2008.
- (12) UEMIYA, S. Brief Review of Steam Reforming Using a Metal Membrane Reactor, Topics in Catalysis, Vol. 29, N. 1-2, p. 79, 2004.
- (13) BARBIR, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier Academic Press, 2005.
- (14) BARBIR, F., JOY, G. C., WEINBERG, D. J. Development of Residential Fuel Cell Power Systems, Fuel Cell Seminar, pp. 483-486, Portland, 2000.
- (15) GIGLIUCCI, G., PETRUZZI, L., CERELLI, E., GARZISI, A., LA MENDOLA, A. Demonstration of a residential CHP system based on PEM fuel cells, Journal of Power Sources 131, pp. 62–68, 2004.
- (16) HUBERT, C-E., ACHARD, P., METKEMEIJER, R. Study of a small heat and power PEM fuel cell system generator, Journal of Power Sources 156, p. 64–70, 2006.
- (17) SIQUEIRA, D. A., ORLANDE, H. R. B., CAVALCANTI, E. S. C., FURTADO, J. G. M., SERRA, E. T. Waste Heat Recovery Modelling of a Residential-scale Stationary Fuel Cell System, Proceedings on the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Curitiba, 2006.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

José Geraldo de Melo Furtado

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 29 de março de 1974.

Doutorado (2005) e Mestrado (2001) em Engenharia de Materiais: COPPE/UFRJ. Graduação (1997) em Engenharia Química: UFRJ

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde julho de 2002

Pesquisador do Departamento de Tecnologias Especiais – DTE

Membro da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais (SBPMat) e da American Ceramic Society (ACERS).

Eduardo Torres Serra

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 12 de janeiro de 1948.

Doutorado (1980) e Mestrado (1975) em Engenharia Metalúrgica e de Materiais: COPPE/UFRJ. Graduação (1970) em Engenharia Metalúrgica: IME

Empresas: CBV – Indústria Mecânica (1970-1973), Companhia Telefônica Brasileira (1973-1975), CEPEL (1975-1986), TECMAT Tecnologia de Materiais (1987-1991), CEPEL desde 1992

Pesquisador Consultor – Diretoria Geral

Coordenador do Comitê de Estudos D1 do CIGRÉ-Brasil

Alcides Codeceira Neto

Nascido em Recife - PE, em 23 de junho de 1961.

Doutorado (2000) e Mestrado (1995) em Engenharia Mecânica (Tecnologia de Turbinas a Gás): Cranfield University – Inglaterra; Graduação em Engenharia Elétrica: UFPE (1983).

Empresa: Engenheiro da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, desde 1984.

Professor Adjunto da Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco, desde 1989.

Membro da ASME (American Society of Mechanical Engineers) / IGTI (International Gas Turbine Institute), desde 2000, onde atua em atividades científicas e administrativas no “Cycle Innovations Committee”.