

Análise termodinâmica de um ciclo de potência com célula a combustível sofc e turbina a vapor

Alexandre Sordi^{1*}, Ennio Peres da Silva², Daniel Gabriel Lopes¹ e Samuel Nelson Melegari de Souza³

¹Laboratório de Hidrogênio, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Rua Lev Landau 381, Cx. Postal 6039, 13083970, Barão Geraldo, Campinas, São Paulo, Brasil. ²Laboratório de Hidrogênio, Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas. ³Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: Autor para correspondência. e-mail: asordi@fem.unicamp.br

RESUMO. O objetivo deste artigo foi realizar a análise termodinâmica de um sistema híbrido, SOFC / ST (célula a combustível tipo SOFC e turbina a vapor ST). O combustível considerado para a análise foi o gás metano (biogás) produzido por meio da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos. A metodologia utilizada foi o balanço de energia do sistema SOFC / ST, considerando a reforma interna do metano na célula a combustível, de forma a obter a sua eficiência elétrica. O resultado foi comparado a um ciclo combinado convencional de turbina a gás e turbina a vapor (GT / ST) para potências entre 10 MW e 30 MW. A eficiência do sistema híbrido SOFC / ST variou de 61% a 66% em relação ao poder calorífico do metano; e a eficiência do ciclo combinado GT / ST variou de 41% a 55% para o mesmo intervalo de potência. Para geração distribuída a célula a combustível SOFC é a tecnologia mais eficiente.

Palavras-chave: célula a combustível, ciclo Rankine, balanço de energia.

ABSTRACT. Thermodynamic analysis of a power cycle such as SOFC fuel cell and steam turbine. The objective of this article was to analyze the thermodynamic of a hybrid system, SOFC / ST (SOFC fuel cell and ST steam turbine). The fuel for the analysis was the gas methane (biogas) produced through the anaerobic digestion of the organic residues. The utilized methodology was the energy balance of the system SOFC / ST, considering the internal reforming of methane in the fuel cell, in a way to obtain its electric effectiveness. The result was compared to a conventional combined cycle of gas turbine and steam turbine (GT / ST) for powers between 10 MW and 30 MW. The efficiency of the hybrid system SOFC / ST varied from 61 to 66% in relation to the lower heating value of methane; and the efficiency of the combined cycle GT / ST varied from 41 to 55% within the same power interval. For distributed generation, the SOFC fuel cell is the most efficient technology.

Key words: fuel cell, Rankine cycle, energy balance.

Introdução

As pesquisas envolvendo as fontes renováveis de energia e tecnologias de conversão mais eficientes têm ganhado importância no cenário mundial. Entre essas se destaca o uso energético do hidrogênio em células a combustível. A célula a combustível, FC, é uma tecnologia de geração de potência que converte um combustível, geralmente o hidrogênio, diretamente em eletricidade e calor através de reações eletroquímicas.

Uma vez que hidrogênio não se encontra livre na natureza, é necessário retirá-lo dos compostos onde ele se encontra. São inúmeras as fontes de hidrogênio na natureza, três exemplos são: a água, o

etanol e o metano. A produção de hidrogênio a partir dessas fontes é possível pelos respectivos processos tecnológicos: a eletrólise da água e a reforma de hidrocarbonetos.

Dentre as fontes de hidrogênio destaca-se neste trabalho o metano. Esse é um gás que está associado a muitos processos orgânicos fundamentais, como por exemplo, a digestão anaeróbica de restos de animais, plantas, lixo orgânico etc. O metano é encontrado, na prática, sempre misturado com outros gases, como hidrocarbonetos (gás natural), dióxido de carbono e gases sulfídricos, entre outros. Ele também é emanado para a atmosfera pela fermentação anaeróbia nas bacias das estações de tratamento de efluentes industriais e em aterros

sanitários. Nesse caso, o gás produzido resulta em uma mistura de 57% de metano CH_4 , 42% de dióxido de carbono (CO_2), e 1% de outros gases como a amônia (NH_3), o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e hidrogênio (H_2).

A produção de hidrogênio a partir do metano pode ser realizada através da tecnologia de reforma a vapor, a qual envolve uma reação endotérmica e catalítica do metano com vapor d'água a uma temperatura entre 800% a 900°C. O aproveitamento do hidrogênio produzido dessa forma em FC de baixa temperatura (60°C) como a PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) exige um sistema de purificação, uma vez que o gás de síntese resultante da reforma do metano é uma mistura de hidrogênio e de outros gases como o monóxido de carbono CO e dióxido de carbono CO_2 .

A FC de alta temperatura (1000°C) tipo SOFC (*Solide Oxide Fuel Cell*) pode operar utilizando o metano diretamente, uma vez que a alta temperatura de operação permite a reforma interna desse gás na SOFC. Além disso, a SOFC, por rejeitar calor a alta temperatura, possibilita a co-geração (co-produção de eletricidade e calor) e também a operação em sistemas híbridos com turbinas a gás (ciclo *Brayton*) ou turbinas a vapor (ciclo *Rankine*).

O objetivo deste artigo é analisar a máxima eficiência elétrica que, teoricamente, pode ser alcançada combinando uma SOFC e uma turbina a vapor. Essa máxima eficiência é comparada à tecnologia já consagrada do ciclo combinado, turbinas a gás e turbinas a vapor. As potências analisadas neste trabalho são de escala de geração distribuída, ou seja, de no máximo 30 MW.

Célula a combustível

Existem quatro principais tipos de células a combustível para aplicações terrestres. São elas a PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), a PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), a MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) e a SOFC (*Solide Oxide Fuel Cell*). Respectivamente, as duas primeiras são de baixa temperatura (60°C e 200°C) e as duas últimas são de média e alta temperatura (600°C e 1000°C).

Célula a combustível SOFC

A SOFC é ainda uma tecnologia em fase de desenvolvimento, mas é considerada a FC mais promissora para geração distribuída de eletricidade com co-geração. Ela poderá ser utilizada para geração de potência em larga escala, como por exemplo, em indústrias. Quando comparada com a MCFC ela é menor e mais durável para uma mesma potência (Souza et al., 2004).

A alta temperatura de operação (800% a 1000°C) torna possível o emprego de hidrocarbonetos leves (gás natural, gás de síntese de carvão, gás de síntese de biomassa, biogás) diretamente, ou seja, com reforma interna. Dependendo da escala de potência de uma SOFC, o calor de exaustão pode ser utilizado para geração de mais eletricidade por meio de um sistema híbrido com turbina a gás ou com turbina a vapor (DOE, 2002).

A empresa americana Siemens-Westinghouse fabricou o maior sistema com célula SOFC tubular (Figura 1). O consórcio holandês-dinamarquês EDB/Elsam de empresas de energia, opera o sistema que supre 109 kW elétricos e 63 kW de calefação para as residências do distrito da cidade holandesa de Westervoort. A eficiência elétrica do sistema atinge 46%, com valores de emissões de NO_x , SO_x , CO e compostos voláteis abaixo de 1 ppm para cada poluente. Unidades comerciais com potências entre 250 e 1000 kW já estão funcionando. Uma unidade de 250 kW também foi instalada no Centro Nacional de Células a Combustível nos EUA.

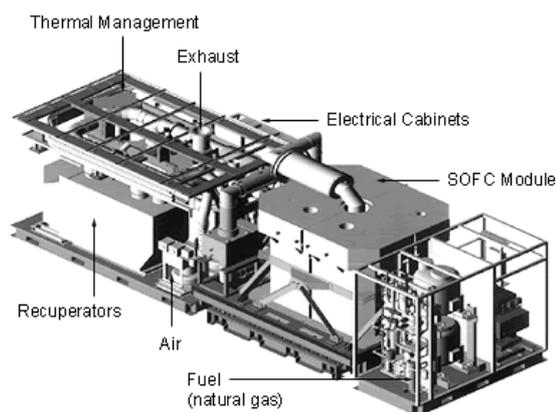


Figura 1. Esquema interno da unidade SOFC Siemens-Westinghouse 100 kW.

As principais reações eletroquímicas da SOFC estão listadas na Tabela 1, de acordo com Perry et al. (1997) e DOE (2002). A condução de íons oxigênio é realizada por meio de um eletrólito sólido cerâmico. Dentre os tipos de eletrólitos estudados a zirconia estabilizada com yttria (YSZ) tem sido a mais eficiente para a alta temperatura da SOFC (Larminie e Dicks, 2003).

Tabela 1. Reações no anodo e catodo da célula a combustível SOFC.

FC	Íon condutor	Reação ânodo	Reação cátodo
SOFC	O^{2-}	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
		$\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

Fonte: Adaptado de Perry et al. (1997) e DOE (2002).

O gás metano

No Brasil, há um grande potencial para o aproveitamento energético do metano gerado nos lixões, estações de tratamento de esgoto, das agroindústrias, entre outras fontes. De acordo com estudos recentes do Ministério do Meio Ambiente, o potencial energético dos aterros sanitários em 91 cidades brasileiras é de 344 MW, e em 2015 estima-se em 440 MW. Para que o potencial brasileiro possa ser realmente explorado, o lixo deve ser disposto em locais controlados; atualmente, apenas 20% dos esgotos recebem algum tratamento, e nas estações de tratamento de esgoto o biogás gerado dentro dos tanques é liberado para a atmosfera. No Brasil, são geradas 54 mil toneladas de resíduos sólidos municipais por dia. Em uma cidade brasileira cada habitante gera em torno de 0,4 a 0,7 kg/dia de resíduo, porém, apenas 21,8% desse resíduo são adequadamente dispostos em aterros controlados e sanitários, enquanto 76,1% são depositados em lixões a céu aberto.

O metano é um importante gás de efeito estufa. A concentração desse gás na atmosfera aumentou de 0,7 ppmv no período pré-industrial para 1,7 ppmv atualmente (2003), tornando-o responsável por cerca de 15% do efeito de aquecimento global. A concentração do metano na atmosfera cresce cerca de 3% ao ano na atualidade, contra 1,2% ao final da década de 1970 (Pathak *et al.*, 2003).

O gás metano emanado da degradação de matéria orgânica (lixo, esgoto, resíduos animais), sendo um gás combustível é uma fonte renovável de energia. Aproveitar o potencial energético desse gás constitui uma forma de incentivar a difusão das fontes renováveis e também de contribuir para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

Sistema híbrido de uma SOFC e turbina a vapor (SOFC / ST)

Este sistema utiliza um HRSG (*Heat Recovery Steam Generation*) que opera com o fluxo gasoso a alta temperatura proveniente da exaustão da célula a combustível. Esse fluxo de exaustão primeiramente é empregado no pré-aquecimento do metano, da água e do ar à montante da célula. De acordo com DOE (2002), esse tipo de sistema é menos complexo e menos eficiente do que o híbrido, célula a combustível e turbina a gás. Mas em aplicações para co-geração onde o suprimento de calor é requerido, ele pode fornecer vapor para processo.

O biogás, antes de ser direcionado para a SOFC, deve passar por um sistema de purificação para remoção do H₂S. É importante observar que a máxima concentração de H₂S admissível no fluxo gasoso, para a SOFC, é de 1 ppm, conforme DOE

(2002) e Baron (2004).

O princípio de operação de um sistema híbrido SOFC / ST mostrado na Figura 2 consiste do descrito a seguir. Os números da Figura 2 indicam cada ponto do sistema onde foi feito o balanço de massa e energia, os resultados estão ilustrados na Tabela 2. O gás metano deve ser pré-aquecido até uma temperatura de 700°C e misturado com vapor de água também a 700°C. Essa mistura de metano e vapor de água dará origem ao processo de reforma interna na SOFC. O oxidante (ar atmosférico) deve ser pré-aquecido até 450°C à montante do catodo da FC. Os gases de exaustão da célula (anodo e catodo) a uma temperatura de 1000°C são direcionados para um combustor para a queima dos produtos não reagidos na célula (metano não reformado, hidrogênio e monóxido de carbono), elevando a temperatura do fluxo gasoso. Após o pré-aquecimento dos gases reagentes o fluxo gasoso, proveniente do combustor, passa por um HRSG para produção de vapor a uma pressão de 5 MPa e 400°C. O vapor a esta pressão é expandido em uma turbina a vapor de condensação até a pressão de 8 kPa. A eficiência do sistema depende principalmente das eficiências da célula a combustível, do HRSG, e da turbina a vapor.

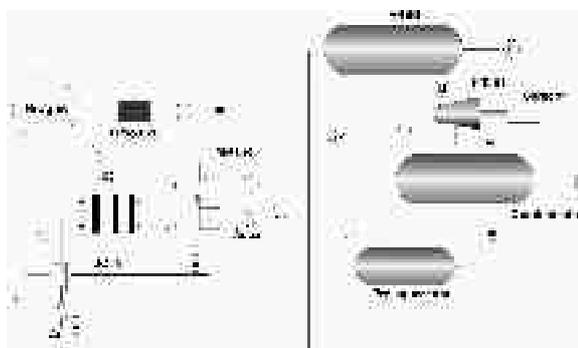
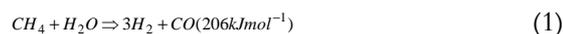


Figura 2. Sistema híbrido de SOFC / ST.

A reação de reforma vapor interna na SOFC, ocorre de acordo com a equação (1) abaixo, segundo Larminie e Dicks (2003):



Foi considerada uma eficiência de reforma do metano de 90%. Desta forma, os produtos de exaustão do anodo da SOFC contem metano. Também se considerou a oxidação catalítica do hidrogênio e do monóxido de carbono no anodo, que ocorre segundo a equação (2):



O hidrogênio e o monóxido de carbono não reagem totalmente no anodo, há um fator de utilização do combustível que deve ser considerado nos cálculos. Esse é definido segundo a equação (3):

$$U_f = \frac{H_{2,consumido} + CO_{consumido}}{H_{2,in} + CO_{in}} \quad (3)$$

Na equação (3) q numerador representa o gás de síntese produzido da reforma interna do metano, que efetivamente foi consumido na reação eletroquímica do anodo da SOFC. O denominador representa a quantidade total de gás de síntese produzida. O fator de utilização foi considerado de 80% para o combustível (H₂ e CO) e de 25% para o oxidante (ar), conforme foi reportado por Lobachyov e Richter (1998) e McIlveen-Wright et al., (2000). Devido ao fator de utilização o gás de exaustão do anodo contém CH₄, H₂, CO que podem ser queimados em um combustor, aumentando a temperatura do fluxo gasoso.

Considerando a operação da FC em regime permanente, não havendo variação de energia cinética e potencial, o trabalho produzido pela FC é elétrico, sendo calculado pela equação (4):

$$W = - \left[\sum_i (N_i \bar{g}_i)_P - \sum_i (N_i \bar{g}_i)_R \right] - TS_{ger,vc} \quad (4)$$

na qual:

W = Trabalho elétrico útil produzido pela célula a combustível (kW);

N_i = Fluxo molar da espécie química i (kmol/s);

g_i = Função de Gibbs específica molar da espécie gasosa i (kJ/kmol);

TS_{ger,vc} = Irreversibilidades geradas em uma célula a combustível (kW)

O termo TS_{ger} é a irreversibilidade na FC, ou seja, são as perdas que provocam as quedas de produção de trabalho elétrico e tensão de operação. Na FC existem três tipos de irreversibilidades a serem consideradas para o cálculo do trabalho elétrico útil e da tensão real de operação, que são: polarização por concentração, polarização por ativação e polarização ôhmica. A polarização por concentração ocorre devido ao consumo de reagentes pela reação eletroquímica ser superior à capacidade de transporte desses, formando-se um gradiente de concentração; a polarização por ativação ocorre devido à lentidão da reação eletroquímica que ocorre na superfície

dos eletrodos; e a polarização ôhmica é devida à resistência interna ao fluxo de íons no eletrólito e ao fluxo de elétrons nos eletrodos da FC, e está diretamente ligada ao tipo de material do eletrólito e eletrodos, e à temperatura de operação. As irreversibilidades variam de acordo com o tipo de FC e as condições de operação.

Para se obter a tensão de operação, deve-se calcular primeiramente o potencial de equilíbrio de Nerst nas condições de operação padrão (101 kPa e 298 K), segundo a equação (5):

$$E = \frac{-G}{n_e F} \quad (5)$$

na qual:

G = Energia livre de Gibbs (kJ/kmol);

E = Potencial de equilíbrio de Nerst (V);

F = Constante de Faraday (96487 C/kmol-eq);

n_e = Número de elétrons na reação (2e)

A tensão real de operação da FC é calculada subtraindo-se do potencial de equilíbrio de Nerst as irreversibilidades, conforme a equação (6):

$$V = E - \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} \quad (6)$$

na qual:

η_{act} = Polarização por ativação (V);

η_{ohm} = Polarização ôhmica (V);

η_{conc} = Polarização por concentração (V).

A eficiência elétrica da FC é calculada considerando-se a entalpia de reação do metano (equações 7 e 8), ou seja, o poder calorífico inferior:



$$\eta_{el} = \frac{W}{Q_{CH_4} * \Delta H_{CH_4}} \quad (8)$$

Os produtos de exaustão da célula apresentam uma temperatura igual a 1000°C. Os gases de exaustão do anodo são H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, os quais são direcionados a um combustor juntamente com o ar de exaustão do catodo. Promovendo-se a combustão tem-se um aumento de temperatura. Os gases de combustão são utilizados para elevar a temperatura do metano, água e ar, em recuperadores de calor. A eficiência dos recuperadores foi considerada de 90%.

Os gases de saída do terceiro trocador de calor são aproveitados em um HRSG que produz vapor superaquecido para acionamento da turbina, a eficiência do HRSG foi considerada de 75%.

Características das turbinas a gás

Para comparar a eficiência do sistema híbrido SOFC / ST ao ciclo combinado com turbina a gás / ST, é necessário também observar as características das turbinas a gás. De acordo com Boyce (2002), as turbinas a gás são classificadas em três principais categorias, considerando-se a escala de potência. As unidades *Industrial Heavy-Duty gas turbines* são utilizadas para potências acima de 15 MW, as unidades *medium-range gas turbines* compreendem potências entre 5 MW e 15 MW e as *small gas turbines* compreendem potências abaixo de 5 MW. As respectivas eficiências dessas máquinas variam de 30% para *small gas turbines*, até 50% para *Heavy-Duty gas turbines* de grande porte (100 MW). Para esse trabalho as características de turbinas a gás para a análise foram: temperatura de combustão de 1100°C a 1300°C, relação de compressão entre 15:1 e 35:1.

A modelagem termodinâmica dos sistemas foi realizada utilizando-se o *software* EES (*Engineering Equation Solver* versão 7.2).

Resultados e discussão

Por meio da modelagem termodinâmica do sistema SOFC / ST da Figura 2 foram obtidos os dados do balanço de massa e energia dispostos na Tabela 2. A potência elétrica gerada pela célula a combustível nesse caso foi de 10.000 kW, com uma eficiência elétrica igual a 48%; a potência gerada pela turbina a vapor foi de 2830 kW. A eficiência do ciclo a vapor (Rankine) é fortemente influenciada pela eficiência da turbina a vapor, cujo valor varia de acordo com a escala de potência. A eficiência elétrica do sistema híbrido para 10.000 kW foi igual a 61%. Um ciclo combinado de turbina a gás e turbina vapor de mesma potência desenvolve uma eficiência de 41%.

O gráfico da Figura 3 ilustra as eficiências dos sistemas para potências, entre 10.000 kW a 30.000 kW, da célula a combustível e da turbina a gás. A FC é uma tecnologia modular, ou seja, pode-se construir células em escala de Watts até vários MegaWatts. A eficiência delas varia pouco com o fator de escala em comparação com as turbinas a gás e a vapor. Desta forma observa-se um crescimento mais acentuado na eficiência do ciclo combinado turbina a gás / ST. A tendência é que as turbinas a gás sejam tão eficientes quanto as células a combustível para potência acima de 30 MW (turbinas avançadas), essa tendência também é reportada por DOE (2002).

Para geração distribuída, teoricamente os sistemas com célula a combustível tipo SOFC são mais eficientes do que as turbinas a gás, utilizando

metano como combustível. Um exemplo é o protótipo de uma SOFC com potência de 250 kW da Westinghouse que desenvolve uma eficiência de 45% utilizando gás natural como combustível. Este protótipo apresenta uma superioridade de eficiência em relação às micro-turbinas a gás, por exemplo, de no mínimo 15%.

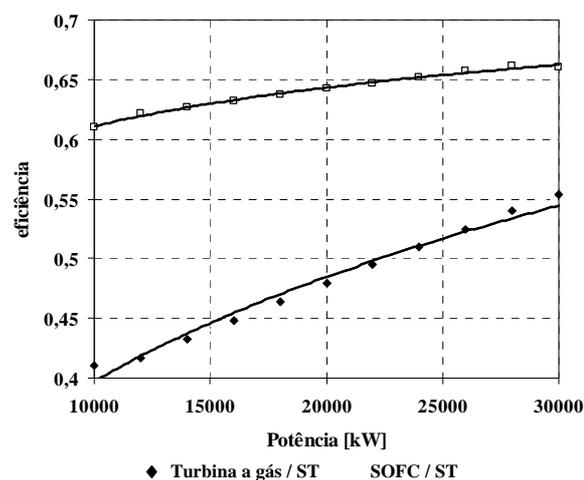


Figura 3. Eficiências dos dois sistemas para geração distribuída de eletricidade.

Tabela 2. Balanço de massa e energia do sistema SOFC / ST.

Ponto	Vazão (kg/s)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)
1	0,389	25,0	50.128,0 ¹
2	0,779	25,0	104,3
3	15,55	25,0	250,8
4	0,389	700,0	52.442,0 ¹
5	0,779	700,0	4.364,0
6	15,55	450,0	739,5
7	16,72	1.162,0	1.513,0
8	16,72	1.130,0	1.459,3
9	16,72	1.009,0	1.255,9
10	16,72	757,0	849,3
11	16,72	197,0	131,6
12	4,84	400,0	3.216,0
13	1,03	150,0	2.748,7
14	3,81	41,5	2.263,2
15	-	-	-
16	3,81	41,5	160,1
17	4,84	170,0	723,1

1 – Somado ao poder calorífico inferior do metano.

Na Figura 4 ilustram-se as respectivas temperaturas dos gases quentes da célula e do vapor produzido no HRSG. O ponto P indica a temperatura de *pinch*, que é a diferença entre a temperatura de saturação da água para a pressão de 5 MPa e a temperatura dos gases quentes. O valor do *pinch* é de 20°C, quanto menor esse valor tanto maior deverá ser a área necessária para a troca de calor do HRSG. O ponto A é temperatura de *approach* (15°C) que é a diferença entre a temperatura de saturação e a temperatura na saída do economizador. A temperatura dos gases na saída do HRSG foi de 215°C, sendo que o recomendado é de no mínimo 130°C para evitar corrosão.

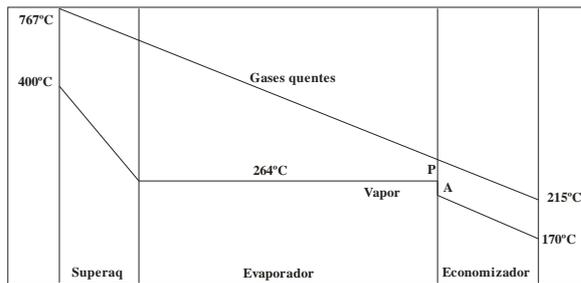


Figura 4. Temperaturas dos fluidos no HRSG.

É possível a produção de vapor para processo (co-geração), no caso de plantas de geração distribuída em indústrias que produzem grande quantidade de resíduos que podem ser degradados para gerar biogás. São exemplos as grandes indústrias do setor de alimentos, como abatedouros de aves e suínos, as indústrias de papel, também as usinas de cana-de-açúcar.

Pode-se optar somente pela co-geração, sem geração extra em turbina a vapor, ou gerar menos eletricidade na turbina utilizando uma parte do vapor para processo. Nesse caso, a eficiência elétrica do sistema decresce à medida que a potência gerada pela turbina decresce. Para ilustrar um exemplo, fez-se a turbina a vapor, conforme a Figura 2, trabalhar com uma contra-pressão, significando que o vapor de exaustão da turbina sai com uma quantidade considerável de entalpia. Fez-se isso para o caso em que uma determinada indústria necessita de 14 t/h de vapor com pressões entre 0,8 MPa e 1,5 MPa. Na Figura 5 ilustra-se a variação da potência produzida pela turbina para uma variação da pressão de exaustão da turbina entre 8 kPa a 1500 kPa. A eficiência do sistema SOFC / ST decresce para 54% para uma contrapressão de 1500 kPa.

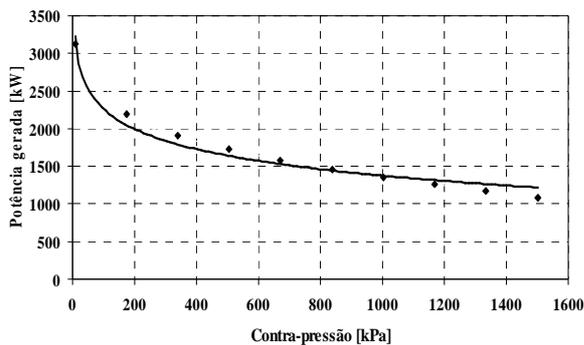


Figura 5. Potência produzida pela turbina em função da variação da pressão de exaustão.

Considerando-se a alta eficiência, o baixo ruído e a confiabilidade da energia gerada a FC é uma tecnologia promissora para geração distribuída de

eletricidade e co-geração. Ela também é vantajosa do ponto de vista ambiental, pois praticamente não emite NOx quando comparada com as turbinas a gás. Entretanto, a sua desvantagem é o alto custo que supera 5.000 US\$ / kW, especialmente a SOFC, cujos materiais dos seus componentes apresentam valores mais elevados em virtude da alta temperatura de operação. A vida útil das FCs, de uma forma geral, é de cerca de 40.000 horas em média. Para geração distribuída com tempo de operação anual de 7.400 horas, significa uma vida útil em torno de 5 anos, bem abaixo da vida útil das turbinas a gás (20 anos). Esses fatores fazem com que a FC não seja economicamente competitiva frente às turbinas a gás ou mesmo aos motores de combustão interna.

Conclusão

Para escala de geração distribuída de eletricidade (até 30 MW) um sistema híbrido de célula a combustível SOFC / ST é mais eficiente do que um ciclo combinado convencional de turbina a gás / ST. A eficiência daquele sistema pode alcançar até 66% utilizando o gás metano como combustível, sendo também possível a produção de vapor para processo (co-geração) em uma indústria que tenha uma produção suficiente de resíduos para produzir o gás metano. O sistema com SOFC também é uma opção interessante, do ponto de vista de eficiência energética, para o aproveitamento do metano gerado dos lixões, do esgoto urbano, dos resíduos agropecuários como a suinocultura, por exemplo. Do ponto de vista ambiental, a célula a combustível também é vantajosa porque não há uma combustão do gás metano, e desta forma, praticamente não há emissões de NOx para a atmosfera.

A desvantagem da FC, entretanto, é do ponto de vista econômico. O alto custo de investimento e a baixa vida útil resultam em um custo de geração de energia que ainda não é competitivo com as turbinas a gás.

Referências

- BARON, S. Biofuels and their use in fuel cells. *Fuel Cell Today, Opening doors to fuel cell commercialisation*. Imperial College, 2004.
- BOYCE, M.P. *Handbook for cogeneration and combined cycle power plants*. New York: ASME., 2002.
- DOE – U.S. Department of Energy. *Fuel Cell Handbook*. Morgantown: EG & G Services Parsons, Inc, 2002.
- LARMINIE, J.; DICKS, A. *Fuel Cell Systems Explained*. London: John Wiley Sons Ltd, 2003.
- LOBACHYOV, K.V.; RICHTER, H.J. An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system. *Energy Convers. Manag.*, Kidlington, v. 39, n. 16,

p. 1931-1943, 1998.

McLLVEEN-WRIGHT, D.R. *et al.* Wood gasification integrated with fuel cells. *Energy*, Kidlington, v. 19, p. 223-228, 2000.

PATHAK, H. *et al.* Methane emission from rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic plain in relation to irrigation, farmyard manure and dicyandiamide application. *Agriculture / Ecosyst. Environ.*, London, n. 97, p. 309-316, 2003.

PERRY, R.H. *et al.* *Perry's chemical engineers handbook*. New York: McGraw-Hill, 1997.

SOUZA, A.C.C. *et al.* Estudo de um sistema híbrido empregando célula de combustível de óxido sólido (SOFC) e turbina a gás. *In: PRIMEIRA SEMANA DE ENERGIA / SEGUNDO WICaC – WORKSHOP DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL*, 2004. Campinas. *Anais...* Campinas: Unicamp, 2004.

Received on October 21, 2005.

Accepted on April 03, 2006.