



POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE PORTO ALEGRE. PARTE II – ANÁLISE EXERGÉTICA

Aline Lima da Silva – adasilva26@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia

A. Bento Gonçalves, 9500

91501-970 – Porto Alegre – RS

Nestor Cezar Heck – heck@ufrgs.br

Instituição Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia

Resumo: Este trabalho dá continuidade ao estudo relacionado à conversão do biogás em um sistema de cogeração baseado em células a combustível de alta temperatura do tipo óxido sólido. No artigo anterior, foi apresentado um modelo estacionário com base na termodinâmica e fenômenos de transporte para simular o desempenho do sistema de cogeração. Com o uso de diferentes ferramentas computacionais, como Excel, Matlab e FactSage, avaliou-se a eficiência do sistema considerando-se somente a Primeira Lei da Termodinâmica; verificou-se que o sistema fornece uma eficiência elétrica de 50% e uma eficiência global (energia elétrica+ térmica) de 78%, com relação ao poder calorífico inferior do metano. O presente trabalho tem por objetivo complementar o estudo anterior, de modo que o desempenho do sistema de cogeração proposto também seja quantificado com base na Segunda Lei da Termodinâmica; com isso, será possível identificar, localizar e quantificar as principais fontes de irreversibilidades termodinâmicas do sistema de conversão. Assim sendo, a metodologia da análise exergética é aplicada à unidade de geração combinada de calor e eletricidade, e a destruição de exergia em cada componente da planta de operação é determinada. Finalmente, o desempenho exergético do sistema é avaliado pelos critérios de eficiência exergética (η_{Ex}), exergia total de saída (Ex_{Tot}), taxa de destruição de exergia ($Ex_{Dest.}$) e coeficiente de desempenho exergético (EPC). O sistema proposto apresenta $\eta_{Ex}=50,5\%$ e $EPC = 0,9$.

Palavras-chave: Célula a combustível; Biogás; Exergia; Simulação termodinâmica



ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM BIOGAS PRODUCED IN WASTEWATER TREATMENT FACILITIES LOCATED IN PORTO ALEGRE. PART II – EXERGY ANALYSIS

Abstract: *This work presents a continuation about biogas conversion in a cogeneration system based on Solid Oxide Fuel Cells. In the previous study, we presented a steady-state model based on thermodynamics and transport phenomena to simulate the performance of the proposed cogeneration system. With the use of different computational tools, such as Excel, Matlab and FactSage, the system efficiency was evaluated considering only the First Law of Thermodynamics; it was found that the system offers a net AC electrical efficiency of 50% and a global efficiency of 78%, with respect to methane LHV. The present work aims to complement our previous study, so that the system performance is also quantified based on the Second Law of Thermodynamics; thereby, one can identify, locate and quantify the main sources of thermodynamic irreversibilities in a conversion system. In this way, the exergy analysis methodology is applied to the whole combined heat and power (CHP) system, and the exergy destruction within each plant component is calculated. Finally, the exergetic performance of the system is evaluated by different criteria, such as exergetic efficiency (η_{Ex}), total exergy output (Ex_{Tot}), exergy loss rate ($Ex_{Dest.}$) and exergetic performance coefficient (EPC). For the proposed cogeneration system, $\eta_{Ex}=50,5\%$ and $EPC = 0,9$.*

Keywords: *Fuel Cell; Biogas; Exergy; Thermodynamic simulation*

1. INTRODUÇÃO

Em um atual contexto de desenvolvimento sustentável promovido pelos governos, o uso eficiente da energia é de extrema importância. A utilização da energia pode ser determinada de forma efetiva mediante a análise conjunta da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, ou seja, por meio da aplicação do conceito de exergia. A análise energética, baseada unicamente na Primeira Lei (princípio da conservação de energia), permite uma interpretação apenas quantitativa das energias envolvidas e todas as formas de energia são tratadas igualmente. Uma análise completa deve incorporar também a Segunda Lei, a qual afirma que a energia, além de ter quantidade, também tem qualidade, e que os processos reais ocorrem no sentido da diminuição da qualidade da energia. A quantificação da qualidade de energia, ou do potencial para realizar trabalho, resultou na definição das propriedades exergia e entropia (DINCER & ÇENGEL, 2001). Ao contrário da energia, a exergia é consumida em todos os processos reais à medida que a entropia é produzida (BÖSCH *et al.*, 2007). A entropia nunca é destruída, sendo sempre criada em processos reais (DINCER & ÇENGEL, 2001). É interessante mencionar que a fundamentação teórica do conceito de exergia foi estabelecida no século XIX, com o desenvolvimento da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, mas foi introduzida como uma ferramenta de análise de processos nos anos 50 por Keenan (1951) e Rant (1956). A análise exergetica é aceita como uma ferramenta útil de *design*, avaliação, otimização e melhoria dos sistemas de energia (BEJAN *et al.*, 1996; ROSEN & DINCER, 2004), permitindo complementar a análise energética. A análise de exergia de um processo fornece a localização, o tipo e a magnitude das irreversibilidades (KOTAS, 1995). Com isso, é possível ter um melhor entendimento do processo bem como propor alterações no *design* de uma planta de cogeração e ajustar os parâmetros operacionais, visando-se o aumento da eficiência exergetica.



No estudo anterior publicado pelos autores (LIMA DA SILVA & HECK, 2015), avaliou-se o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's) de Porto Alegre usando-se células a combustível de alta temperatura do tipo óxido sólido (SOFC) como sistema de conversão. Desenvolveu-se, então, um modelo estacionário, com base na termodinâmica e fenômeno de transportes, para a simulação de uma planta de operação. Na realização dos cálculos, diferentes ferramentas computacionais (Excel, Matlab e FactSage) foram empregadas. O desempenho da unidade de cogeração foi avaliado considerando-se somente a Primeira Lei da Termodinâmica e, verificou-se que o sistema proposto oferece uma eficiência elétrica ($\eta_{el.}$) de 50% e eficiência global (η_{CHP} , elétrica+térmica) de 78%.

O presente trabalho tem por objetivo complementar o estudo anterior, de modo que o desempenho do sistema de cogeração proposto também seja quantificado com base na Segunda Lei da Termodinâmica. Desse modo, a metodologia da análise exérgica é aplicada à unidade de geração combinada de calor e eletricidade (CHP), e a destruição de exergia em cada componente da planta de operação é determinada. Finalmente, o desempenho exérgico do sistema é avaliado pelos critérios de eficiência exérgica ($\eta_{Ex.}$), exergia total de saída (Ex_{Tot}), taxa de destruição de exergia ($Ex_{Dest.}$) e coeficiente de desempenho exérgico (EPC).

2. METODOLOGIA

A simulação de operação da planta está descrita no artigo anterior (LIMA DA SILVA & HECK, 2015). Como resultado da simulação, obtêm-se a composição das correntes materiais, a potência elétrica líquida AC fornecida pelo módulo de células SOFC, calor recuperado na unidade de cogeração. Com estes dados, é possível conduzir a análise exérgica de acordo com a metodologia descrita na seção 2.2 deste artigo.

2.1. Descrição da planta de operação com *stack* de SOFCs

A Figura 1 mostra o *lay-out* de uma planta de geração combinada de calor e eletricidade (CHP – *Combined Heat and Power*), baseada em *stacks* de células SOFC. Devido à alta temperatura de operação (850°C), células SOFC permitem que o biogás seja reformado no próprio ânodo da célula que contém Ni como catalisador. Este tipo de reforma é conhecido como reforma interna direta, em que o biogás é convertido em outras espécies, como H₂, CO, CO₂, e H₂O, no interior da célula. Contudo, existe um grande potencial para a deposição de carbono no ânodo da SOFC, o que leva à desativação do catalisador bem como a possíveis falhas mecânicas; desse modo, o biogás passa primeiramente por uma pré-reforma, tendo o metano uma conversão de 20-25% no pré-reformador. O restante é convertido no próprio interior da célula. O hidrogênio e o monóxido de carbono são eletroquimicamente convertidos em H₂O e CO₂ no ânodo da célula, por meio da reação com os íons O²⁻ que são conduzidos através de um eletrólito iônico sólido no sentido cátodo→ânodo. Enquanto o ânodo é abastecido com o biogás pré-reformado, o cátodo é abastecido com ar. Como o gás que sai do ânodo é rico em H₂O e CO₂, utiliza-se uma recirculação desse gás, aproveitando-o para a reforma do biogás. Nesta abordagem, 65% do gás de saída do ânodo são utilizados no processo de reforma (reciclado), enquanto que os outros 35% são direcionados para o combustor para um aproveitamento essencialmente térmico (reação exotérmica de oxidação no combustor e aproveitamento de seu calor sensível para pré-aquecimento do ar quando passa pelo trocador de calor). O gás de saída do ânodo encontra-se na temperatura de operação de célula; por isso, quando é feita a sua recirculação, aproveita-se o calor sensível para aquecimento do biogás pré-reformado (produto da reforma parcial do biogás no pré-reformador mais biogás não-convertido) antes de entrar do ânodo, o que é muito



importante, pois a mistura gasosa deve entrar na célula a uma temperatura suficientemente alta para evitar o efeito de resfriamento causado pela reforma interna, que é altamente endotérmica. Este resfriamento no ânodo poderia levar a um gradiente de temperatura significativo no interior do *stack*. Além disso, o calor sensível do gás de saída do ânodo é aproveitado para aquecimento da mistura gasosa que entrará no pré-reformador. O gás de saída do cátodo, contendo aproximadamente 16% de O₂, é utilizado no combustor e seu calor sensível também é aproveitado para o aquecimento do ar. No combustor, ocorre a reação de oxidação do H₂ e CO que não foram utilizados na reação eletroquímica. Note que o H₂ não é 100% utilizado na reação eletroquímica; sua utilização fica na faixa de 60-85%. O gás quente que sai do combustor pode ser aproveitado para aquecimento de água, e a temperatura de saída do gás deve ficar 50°C acima do ponto de orvalho. É importante salientar que o biogás antes de passar pelo compressor deve ser purificado. O gás sulfídrico é um contaminante capaz de desativar severamente o catalisador de Ni, e o recobrimento de enxofre na superfície do catalisador diminui enormemente a quantidade de sítios catalíticos disponíveis para as reações de reforma e eletroquímicas. Conforme ilustrado na figura, o *stack* da SOFC gera corrente contínua (DC); após o inversor, a corrente alternada (AC) atende ao consumo da própria planta e à demanda de carga do usuário. A planta proposta em combinação com o uso de biogás de ETE's ilustra claramente o conceito de *Geração Distribuída*.

REALIZAÇÃO

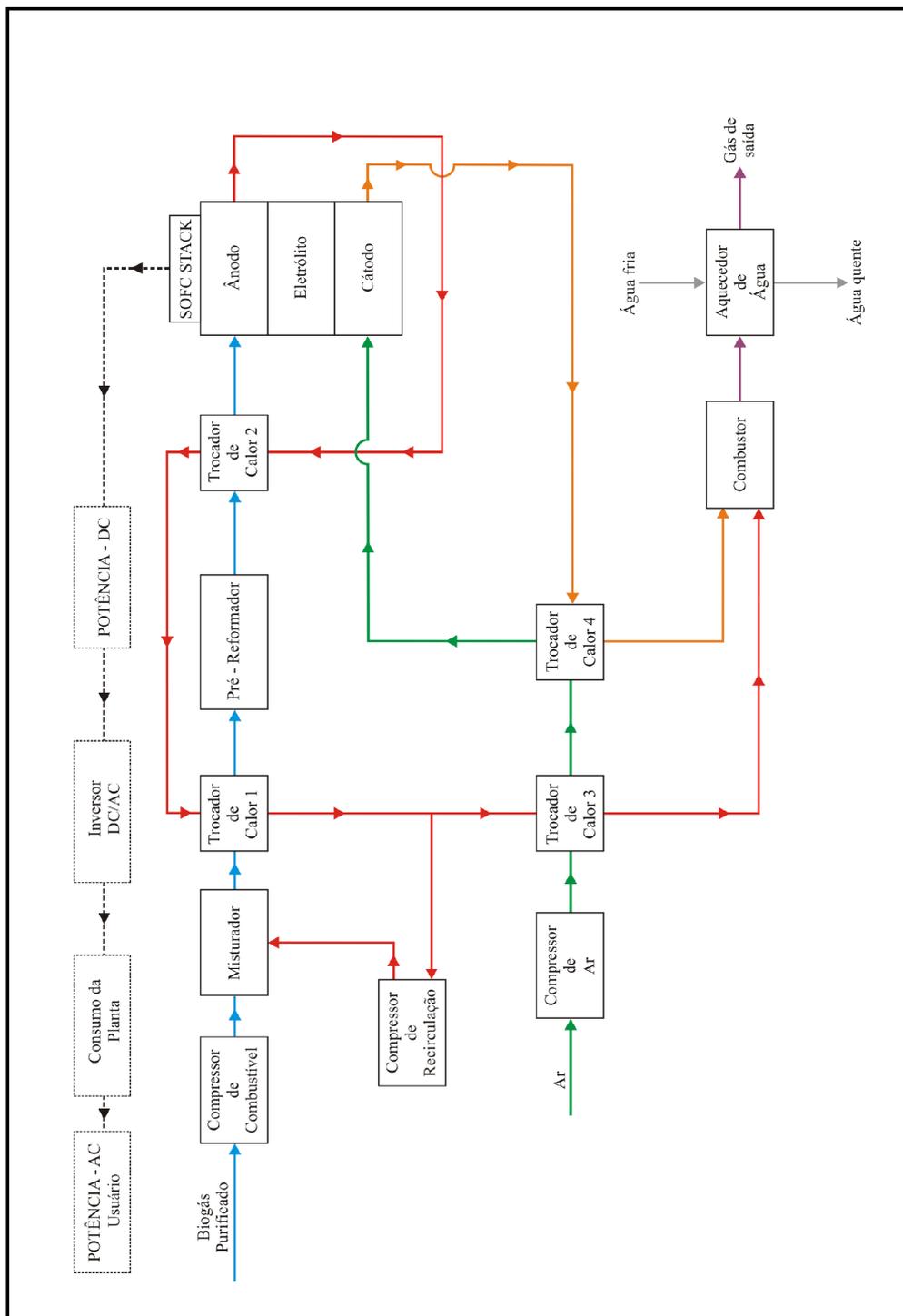


CORREALIZAÇÃO



INFORMAÇÕES

Figura 1. Representação da planta de geração combinada de eletricidade e calor usando SOFC e biogás.



2.2. Análise exergetica

Energia é uma grandeza que se conserva; contudo, quando a energia é convertida de uma forma à outra, a capacidade de produzir trabalho é perdida irreversivelmente. Além disso, nem toda a forma de energia tem o mesmo valor ou capacidade de ser transformada em outras formas. O conceito de exergia permite o cálculo de perdas termodinâmicas e a classificação da verdadeira transformabilidade de diferentes formas de energia. A energia pode ser agrupada em duas categorias: Energia disponível (exergia), que pode ser completamente convertida em trabalho útil, e energia que não pode ser transformada em qualquer outra forma (anergia). Diferentemente da energia, a exergia não pode ser conservada, devido a sua destruição por processos irreversíveis que conduzem ao aumento de entropia. O conceito de exergia pode ser definido, portanto, como o trabalho máximo realizável por um sistema para alcançar o equilíbrio térmico, mecânico e químico com o ambiente, que está em um estado de referência caracterizado por uma temperatura T_0 e pressão P_0 (BEDRINGAS *et al.*, 1997).

Aplicando-se a primeira e segunda lei da termodinâmica ao volume de controle de um componente do sistema, obtém-se a Equação (1) para o balanço de exergia:

$$Ex_{Dest.} = \sum_j Q_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) - W + \sum_i (Ex_i)_{in} - \sum_i (Ex_i)_{out} \quad (1)$$

onde o primeiro termo do lado direito da equação acima se refere à exergia associada com a transferência de calor (Ex_Q), sendo governada pela eficiência de Carnot. Q representa a transferência de calor através da fronteira do sistema em uma temperatura constante T . O segundo termo é a exergia associada ao trabalho (Ex_W). $Ex_{Dest.}$ é a destruição de exergia em um dado componente do sistema; $Ex_{Dest.} = T_0 S_{ger}$, onde S_{ger} é a entropia gerada em um processo irreversível. Os termos $(Ex_i)_{in}$ e $(Ex_i)_{out}$ correspondem à exergia total da corrente i que entra e sai do sistema, respectivamente. A exergia total de uma corrente material i é dividida em exergia química (Ex_{chem}), física (Ex_{fis}) e de mistura (Ex_{mix}), sendo descrita pela Equação (2) (HAJJAJI *et al.*, 2012):

$$Ex_i = Ex_{chem} + Ex_{fis} + Ex_{mix} \quad (2)$$

onde

$$Ex_{chem} = n(x_{0,l} \sum_k x_{0,k} Ex_{k,l}^{chem,0} + x_{0,v} \sum_k y_{0,k} Ex_{k,v}^{chem,0}) \quad (3)$$

Os termos $Ex_{k,l}^{chem,0}$ e $Ex_{k,v}^{chem,0}$ representam a exergia química padrão de uma espécie k nas fases líquida e vapor, respectivamente. Os valores são apresentados na Tabela 1 e foram calculados usando-se a composição do ambiente de referência definida por Szargut *et al.* (1988). A exergia química de uma corrente material é a parte de sua exergia total que resulta da diferença no potencial químico – avaliado nas condições de referência (T_0 , P_0) – entre os componentes puros do processo e os componentes do ambiente de referência nas suas respectivas concentrações ambientais (HINDERINK *et al.*, 1996).

A exergia física de uma corrente material é trabalho máximo que pode ser obtido quando a corrente é trazida reversivelmente de seu estado atual ao estado que corresponde às condições ambientais em T_0 e P_0 . Ex_{fis} é dada por (HINDERINK *et al.*, 1996):

$$Ex_{fis} = \Delta_{\text{estado atual-estado referência}} \left\{ n \left(x_l \left(\sum_k x_k H_k^l - T_0 \sum_k x_k S_k^l \right) + x_v \left(\sum_k y_k H_k^v - T_0 \sum_k y_k S_k^v \right) \right) \right\} \quad (4)$$

Tabela 1 – Exergia química padrão molar de diferentes espécies no estado de referência ($T_0=298,15\text{K}$ e $P_0=1\text{atm}$).

Espécie	Exergia (kJ/mol)
H ₂ O(v)	9,5
H ₂ O(l)	0,9
N ₂	0,7
CO ₂	19,9
CO	275,1
O ₂	3,9
H ₂	236,1
CH ₄	831,7

A exergia de mistura (Ex_{mix}), que sempre tem um valor negativo, é calculada por (HINDERINK *et al.*, 1996):

$$Ex_{mix} = \Delta_{mix} H - T_0 \Delta_{mix} S \quad (5)$$

onde

$$\Delta_{mix} M = n \left(x_l \left(M^l - \sum_k x_k M_k^l \right) + y_v \left(M^v - \sum_k y_k M_k^v \right) \right) \quad (6)$$

M é uma propriedade termodinâmica. $M^{(v)}$ corresponde à propriedade termodinâmica da mistura na fase líquida (vapor).

Nas equações (3)-(6), n é a vazão molar (mols/s), k é a espécie química em uma dada corrente material, x_l e x_v correspondem às frações molares de líquido e vapor, respectivamente; x_k e y_k correspondem às frações molares das espécies k na fase líquida e vapor, respectivamente, e H_k e S_k correspondem à entalpia molar e entropia molar, respectivamente, da espécie k . Os subscritos l e v se referem à fase líquida e fase vapor, respectivamente.

A exergia total de saída do sistema de cogeração é dada pela Equação (7):

$$Ex_{Tot.} = Ex_{W,SOFC} + Ex_{Q,\text{aquecedor de água}} \quad (7)$$

onde

$$Ex_{W,SOFC} = W_{SOFC-AC} \quad (8)$$

$$W_{SOFC-AC} = W_{SOFC-DC} \times \eta_{inv.} - W_{compressores} \quad (9)$$

$$W_{SOFC-DC} = N_{cel} \times V_{cel} \times j \times A_{cel} \quad (10)$$

$Ex_{W,SOFC}$ é a exergia associada à potência elétrica líquida obtida pelo módulo das células SOFC. N_{cel} é o número de células no módulo, V_{cel} é o potencial da célula, j é a densidade de corrente e A_{cel} é a área da célula. $W_{SOFC-AC}$ é a potência elétrica líquida do módulo e $\eta_{inv.}$ é a eficiência do inversor. $W_{compressores}$ corresponde à potência elétrica consumida nos compressores (combustível, recirculação e ar).

$Ex_{Q,aquecedor\ de\ água}$ é a exergia associada ao calor recuperado no aquecimento de água e é calculada por $Ex_{água\ fria} - Ex_{água\ quente}$.

A eficiência exergetica de uma unidade de cogeração é dada pela razão entre a exergia total de saída e a exergia do combustível de entrada (biogás purificado, neste caso):

$$\eta_{Ex.} = \frac{Ex_{Tot.}}{Ex_{combustível}} \quad (11)$$

Outro critério que pode ser adotado para avaliação de desempenho do sistema é o coeficiente de desempenho exergetico EPC (*Exergetic Performance Coefficient*), o qual é definido como a razão entre a exergia total de saída e o total de exergia destruída no sistema (AKKAYA *et al.*, 2008):

$$EPC = \frac{Ex_{Tot.}}{Ex_{Dest.,Tot}} \quad (12)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a análise exergetica tem-se a grande vantagem de localização das irreversibilidades no sistema, ou seja, pode-se identificar em quais componentes ocorre a maior taxa de destruição de exergia, e isso contribui para propor alterações no *design* e parâmetros de operação visando-se minimizar a destruição da exergia. A Tabela 2 mostra a destruição de exergia ($Ex_{Dest.}$) nos diferentes componente do sistema (Fig.1). Como pode ser observado, a maior perda de exergia ocorre no módulo das células SOFC (32,96%), o que se deve principalmente às reações químicas e eletroquímicas. No entanto, convém mencionar que este valor é muito inferior à taxa de destruição de exergia em um motor de combustão interna. Carolino (2011) simulou uma unidade de cogeração para operação com biogás cujo sistema de conversão era um motor de combustão interna. Verificou-se que o motor, devido ao processo de combustão altamente irreversível, era o equipamento da planta com a maior taxa de destruição de exergia, correspondendo a 75%. A Tabela 2 mostra que o trocador de calor #4 é o segundo componente com maior taxa de destruição de exergia (25,94%). Esse comportamento é devido a grande diferença de temperatura nas correntes de operação; o ar é aquecido de uma temperatura de 315 a 993K antes de entrar no cátodo da célula, devido ao abaixamento da temperatura do gás de saída do cátodo de 1123 a 437K. Esta grande diferença nas temperaturas envolvendo o trocador de calor leva a significativa destruição de exergia; portanto, ajustes no *design* da planta proposta poderiam contribuir para reduzir essas perdas de exergia. O combustor catalítico é o terceiro componente com maior taxa de destruição de exergia (15,62%), o que se deve à ocorrência de reação química. Em estudo similar, Akkaya e colaboradores (2008) verificaram que as maiores perdas ocorrem no módulo de células SOFC (28,07%) e no combustor catalítico (14,83%), com valores consistentes com os encontrados no presente estudo.

A Tabela 3 mostra os parâmetros de operação da unidade de cogeração juntamente com a eficiência elétrica com base na 1ª Lei da Termodinâmica ($\eta_{el.} = \frac{W_{SOFC-AC}}{n_{CH_4} \times PCI_{CH_4}}$) e as eficiências globais baseadas na 1ª Lei (η_{CHP}) e na 2ª Lei (eficiência exergética, $\eta_{Ex.}$). Como esperado, a eficiência exergética (50,5%) é menor do que a eficiência global baseada unicamente na 1ª Lei (78,6%). A eficiência exergética calculada por Carolino (2011) para uma unidade de cogeração operando com biogás e motor de combustão interna como sistema de conversão foi de 36,2%. O valor baixo da eficiência exergética para o caso do motor de combustão tem como explicação a taxa de destruição de exergia muito elevada. Portanto, substituir o motor por célula a combustível significaria aumentar a eficiência exergética do sistema, promovendo o uso mais eficiente da energia. Para uma densidade de corrente de 0,78 A.cm⁻², os valores de $\eta_{Ex.}$ e EPC encontrados por Akkaya e colaboradores (2008) ficam em torno de 45% e 0,80, consistente com os valores de 50% e 0,90 encontrados no presente estudo.

Tabela 2 – Destruição de exergia nos diferentes componentes da unidade de cogeração.

Componentes	$Ex_{Dest.}$ (W)	(%)
Compressor de combustível	1,14	0,09
Compressor de recirculação	1,03	0,08
Compressor de ar	25,06	2,07
Misturador	22,10	1,82
Trocador de calor #1	3,36	0,28
Trocador de calor #2	6,49	0,54
Trocador de calor #3	13,93	1,15
Trocador de calor #4	314,39	25,94
Pré-Reformador	29,04	2,40
Combustor	189,39	15,62
SOFC <i>stack</i>	399,49	32,96
Aquecedor de água	103,61	8,55
Gás de saída	103,09	8,50
Exergia destruída total ($Ex_{Dest.,Tot}$)	1212,13	100

Tabela 3 – Parâmetros de operação e análise de desempenho para unidade de cogeração.

Parâmetro	Valores da simulação
Densidade de corrente ($A \cdot cm^{-2}$)	0,77
Potencial de operação da célula unitária (V)	0,63
Número de células no módulo	24
Área ativa de uma célula (cm^2)	100
Utilização de combustível (%)	85
$Ex_{W,SOFC} = W_{SOFC-AC}$ (W)	1043
$Ex_{Q,aquecedor}$ de água (W)	51
$Ex_{Tot.}$ (W)	1094
$Ex_{combustível}$ (W)	2168
$\eta_{Ex.}$ (%)	50,5
EPC	0,9
$\eta_{el.}$ (%)	50,4
η_{CHP} (%)	78,6

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, o desempenho de uma unidade de cogeração operando com biogás cujo sistema de conversão é um módulo de células a combustível foi analisado. Embora a célula a combustível seja um sistema muito eficiente, é a fonte de destruição de exergia mais importante da planta. No entanto, sua taxa de destruição de exergia, em torno de 33%, é muito inferior ao reportado na literatura para o motor de combustão interna (75%). Desse modo, a utilização de células a combustível poderia aumentar a eficiência exérgica do sistema, promovendo o uso mais eficiente da energia. A eficiência exérgica da planta operando com módulo de células SOFC (50%) é substancialmente maior ao encontrado na literatura para unidades operando com motor (36%).

A análise exérgica fornece um melhor entendimento da localização das irreversibilidades do sistema, mostrando quais componentes poderão ser otimizados. A análise efetuada neste trabalho foi para uma condição fixa de operação, que permitiu conhecer os componentes com maior contribuição para a destruição de exergia. Estudos de sensibilidade complementarão esta análise; a análise da variação de parâmetros de operação poderá determinar a configuração de maior eficiência exérgica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro (Bolsa de Pós-Doutorado – Edital 09/2012 – DOCFIX, concessão: SPI 2842-25.51/12-0 e FPE 161/2011).



REFERÊNCIAS

AKKAYA A.V., SAHIN B., ERDEM H.H. An analysis of SOFC/GT CHP system based on exergetic performance criteria. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 2566-2577, 2008.

BEDRINGAS, K.W., ERTESVAG, I.S., BYGGSTOYL S., MAGNUSSEN B.F. Exergy analysis of solid-oxide fuel-cell (SOFC) systems. **Energy**, v. 22, p. 403-412, 1997.

BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. pp. 39-163.

BÖSCH, M. E., HELLWEG, S., HUIJBREGTS, M. A. J. e FRISCHKNECHT, R. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, p. 181-190, 2007.

CAROLINO, C.G. **Análise energética e exergetica de um processo de valorização de biogás**. Portugal, 2011. Tese (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Escola Superior de Biotecnologia, Universidade Católica Portuguesa.

DINCER, I., ÇENGEL, Y. Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. **Entropy**, v. 3, p.116-149, 2001.

HAJJAJI, N., PONS M.N., HOUAS A., RENAUDIN V. Exergy analysis: An efficient tool for understanding and improving hydrogen production via the steam methane reforming process. **Energy Policy**, v. 42, p. 392-399, 2012.

HINDERINK, A.P., KERKHOF, F.P.J.M., LIE, A.B.K., DE SWAAN ARONS J., VAN DER KOOL, H.J. Exergy analysis with a flowsheeting simulator – I. Theory; calculating exergies of material streams. **Chemical Engineering Science**, v.51, p. 4693-4700, 1996.

KEENAN, J.H. Availability and irreversibility in thermodynamics. **British Journal of Applied Physics**, v. 2, p. 183-192, 1951.

KOTAS, T. **The exergy method of thermal plant analysis**. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1995. pp. 317.

LIMA DA SILVA, A., HECK, N.C. Potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás das estações de tratamento de esgoto de Porto Alegre. In: **VI Seminário sobre Tecnologias Limpas**. Porto Alegre, 8 a 10 de junho de 2015.

RANT, Z. Exergy, a new world for 'Technical available work'. **Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens**, v. 22, p.36-37, 1956.

ROSEN, M., DINCER, I. Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 43, p. 121-133, 2004.