

ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMA DE TRIGERAÇÃO ACIONADO POR CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE CARBONATO FUNDIDO OPERANDO COM REFORMA INTERNA PARA APLICAÇÃO EM SETOR TERCIÁRIO

João Victor Alves Laurentino*

Grazielma Ferreira de Melo**

Resumo: O setor terciário apresenta necessidades energéticas de eletricidade, calor e refrigeração características do seu segmento. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo propor um sistema de trigeração acionado pela tecnologia da célula a combustível de carbonato fundido operando com reforma interna, investigando sua viabilidade energética na geração de potência no atendimento dessas necessidades. A partir da modelagem do sistema no software *Engineering Equation Solver* (EES), o sistema proposto apresentou eficiência de primeira lei, termodinâmica, de utilização do combustível e do sistema respectivamente de 41,3%, 79,6%, 91,4%, 81,9%, representando uma ótima viabilidade energética da tecnologia empregada e do sistema como um todo. A quantificação da produção de hidrogênio na reforma a vapor interno a célula modelada pelo software *Gaseq Chemical Equilibrium*, atingiu o marco da fração molar de 53,55%, o que significou uma efetiva capacidade técnica da célula a combustível de carbonato fundido operar com reforma interna nas condições de operação da tecnologia. Assim, a análise revelou um alto índice de viabilidade do sistema do ponto de vista energético, e sua aplicabilidade no setor terciário para atendimento de demandas de eletricidade, calor e refrigeração é recomendado.

Palavras-chave: Análise Energética; Células a Combustível; Trigeração.

ENERGETIC ANALYSIS OF TRIGENERATION SYSTEM DRIVEN BY MOLTEN CARBONATE FUEL CELL OPERATING WITH INTERNAL REFORM FOR APPLICATION IN THE TERTIARY SECTOR

Abstract: The tertiary sector has energy needs for electricity, heat and cooling that are characteristic of its segment. In this sense, this work aims to propose a trigeneration system powered by molten carbonate fuel cell technology operating with internal reform, investigating its energy feasibility in generating power to meet these needs. From the modeling of the system in the *Engineering Equation Solver* (EES) software, the system proposed first-law, thermodynamic, fuel utilization and system efficiency, respectively, of 41.3%, 79.6%, 91.4%, 81.9%, represents an excellent energetic viability of the technology used and of the system as a whole. The quantification of hydrogen production in the internal steam reforming of the cell modeled by the *Gaseq Chemical Equilibrium* software, reached the milestone of the molar fraction of 53.55%, which means an effective technical capacity of the molten carbonate fuel cell to operate with reform in the operating conditions of the technology. Thus, an analysis revealed a high level of viability of the system from an energy point

* Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: joao.laurentino@ufpe.br

** Centro Universitário do Vale do Ipojuca. E-mail: gferreirademelo@outlook.com

of view, and its applicability in the tertiary sector to meet the demands of electricity, heat and cooling is recommended.

Keywords: Energetic Analysis; Fuel Cells; Trigeneration.

INTRODUÇÃO

O aumento da rigorosidade legislativa brasileira quanto as emissões de carbono e seus impactos ambientais ocasionados pela instalação e funcionamento de plantas de geração de potência, pede que sistemas como o de cogeração e trigeração sejam cada vez mais difundidos para um maior aproveitamento dos potenciais energéticos encontrados nos diferentes combustíveis primários dos meios de geração (GUIMARÃES *et al.*, 2016).

A inviável construção de novas hidroelétricas no Brasil pelos impactos ambientais produzidos por seu emprego como alteração do ecossistema local e deslocamento de população, assim como o cenário econômico atual do país para investimentos no setor energético, promove como alternativa de suprir as demandas energéticas a geração de energia independente e descentralizada de grandes usinas elétricas (TAKAKI, 2006). A análise energética aplicada a sistemas de geração de potência a partir de combustíveis primários é indispensável para uma investigação de maior aproveitamento dos potenciais envolvidos nos processos de conversão energética associados a geração de energia útil.

O setor terciário, por sua vez, tem entrado na discussão como um potencial setor para a utilização de sistemas energéticos que se empregam de tecnologias de cogeração e trigeração para as suas utilidades (ANDREOS, 2013; SALES, 2008; BERECHÉ, 2007). A instalação de sistemas de cogeração e trigeração no setor terciário está também associada aos altos custos e riscos envolvidos na captação direta de energia elétrica oriunda da rede. Este setor costumeiramente se configura como tendo demandas energéticas de baixo e médio porte, e, portanto, o acionamento a partir da tecnologia da célula a combustível pode apresentar uma adequada performance no atendimento dessas necessidades.

As tecnologias que são amplamente utilizadas para acionamento primário de sistemas de cogeração e trigeração são: o motor de combustão interna, turbina a gás e a vapor. Porém, a célula de combustível já se encontra em fase de implementação

em sistemas de cogeração e trigeração, como estudos contemporâneos apontam (CHAHARTAGHI; KHARKESHI, 2018; HAGHGHI *et al.*, 2019; BARELLI *et al.*, 2011; VERHAERT *et al.*, 2016; FACCI *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2016). A partir da teoria termodinâmica, este trabalho tem por objetivo analisar as potencialidades energéticas nas transformações e reações envolvidas no sistema de geração proposta, a fim de se investigar a viabilidade energética do sistema com a quantificação de seus rendimentos e eficiências globais associados. Sendo necessário também, realizar a quantificação da produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor interna a célula nos seus parâmetros de funcionamento.

METODOLOGIA

As demandas apresentadas neste trabalho para simulação do sistema proposto, são baseados em valores apresentados na literatura para estabelecimentos do setor terciário (SALES, 2008; ANDREOS, 2013; SILVEIRA, 1994). O parâmetro adimensional ALFA estabelece uma relação entre as demandas de eletricidade e térmica representado pela Equação 1 a seguir.

$$ALFA = \frac{E_{el}}{S_{term}} \quad (1)$$

Onde:

E_{el} : Demanda de eletricidade;

S_{term} : Demanda térmica.

A demanda térmica, no caso da trigeração, é a soma das energias na forma de calor e frio (refrigeração). Diferentes valores de ALFA são encontrados nas aplicações de sistemas energéticos a depender do setor econômico (segmento), visto que suas demandas assumem valores característicos das suas necessidades utilitárias. Silveira (1994) apresenta valores para diferentes segmentos do setor terciário representados pela Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de alfa para diferentes segmentos.

SETOR TERCIÁRIO	ALFA
Hospital	0,500
Hotéis/Motéis	0,600
Restaurantes	0,600
Universidades	0,600
Lojas de varejo	4,300

Fonte: Silveira (1994), adaptado.

Os valores de ALFA da Tabela 1, representam a média de cada segmento do setor industrial ou terciário. O valor de ALFA para as demandas deste trabalho foi determinado através da Equação 2 e 3, tendo o resultado de ALFA demonstrado na Equação 4.

$$E_{el} = 1000kW \quad (2)$$

$$S_{term} = 1212kW \quad (3)$$

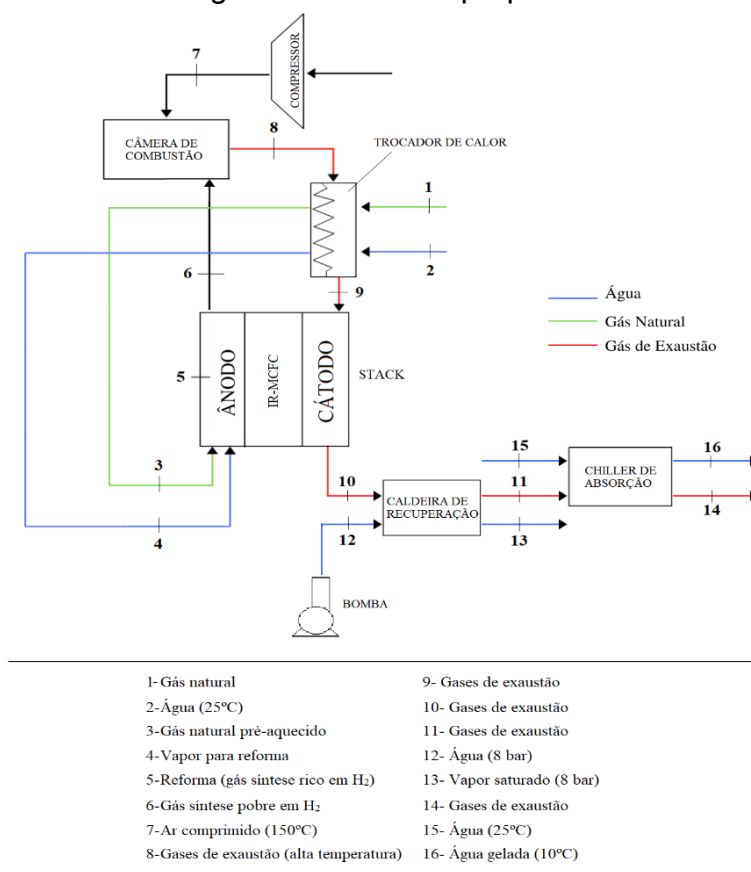
$$ALFA = \frac{1000kW}{1212kW} = 0,825 \quad (4)$$

Portanto, as demandas analisadas se enquadram nos intervalos de um sistema energético que atende a utilidades do setor terciário, e o valor se apresentou mais próximo de estabelecimentos como os de hospitais, hotéis, restaurantes e universidades.

O sistema proposto é demonstrado na Figura 1, o sistema de trigerção atua em regime *topping* (cobertura) e de paridade elétrica. O sistema é composto por um único *stack* (pilha) de células de 1000 kW líquido de eletricidade. O gás natural e o vapor para reforma entram no ânodo do *stack* onde acontece a reação de reforma gerando o hidrogênio. Os gases que não reagem na reação eletroquímica são enviados para uma câmara de combustão e queimados com a injeção de ar comprimido a 150°C (PEIXOTO; INDRUSIAK, 2011), os gases de exaustão então passam por um trocador de calor onde troca-se energia térmica com a água e gás natural para geração de vapor de reforma e pré-aquecimento do combustível, respectivamente. Os gases de exaustão então continuam através do cátodo, enquanto o oxigênio e dióxido de carbono contido nele reage na célula gerando eletricidade. A exaustão que sai da célula encontra-se em alta temperatura pela reação exotérmica na formação de água pela célula, e então passa pela caldeira de recuperação gerando vapor. A caldeira de recuperação exibe eficiência de 65% (MARCHIONNI, 2004; MATELLI, 2001) e opera a pressão de 8 bar, uma bomba faz a alimentação da caldeira

para geração de 450 kg/h de vapor saturado. Os gases de exaustão, antes de serem lançados na atmosfera, são passados por um *chiller* de absorção de H₂O/LiBr de duplo efeito e queima indireta de coeficiente de performance (COP) de 1,2 com finalidade de condicionamento de ambientes na geração de água gelada a 10°C. Qualquer demanda excedente de eletricidade deve ser encaminhada a rede. A célula a combustível de carbonato fundido deve operar a plena carga 24 h/dia.

Figura 1 – Sistema proposto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Utilizando-se do *Software Engineering Equation Solver* como modelagem para cada componente do sistema, o balanço de massa e energia obedece às Equações 5 e 6 respectivamente.

$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum \dot{n}_e h_e = \dot{W}_s + \dot{Q}_s + \sum \dot{n}_s h_s \quad (5)$$

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (6)$$

Onde:

$\dot{Q}$: Calor admitido ($\dot{Q}_e$) ou extraído ($\dot{Q}_s$) do componente;

$\dot{W}$: Trabalho admitido ($\dot{W}_e$) ou extraído ($\dot{W}_s$) do componente;

$\dot{n}$: Vazão molar admitida ($\dot{n}_e$) ou extraída ($\dot{n}_s$) do componente;

h : Entalpia admitida (h_e) ou extraída (h_s) do componente;

$\dot{m}$: Vazão mássica admitida ($\dot{m}_e$) ou extraída ($\dot{m}_s$) do componente.

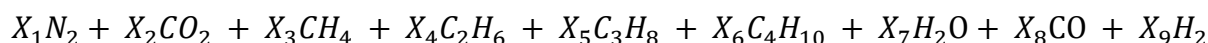
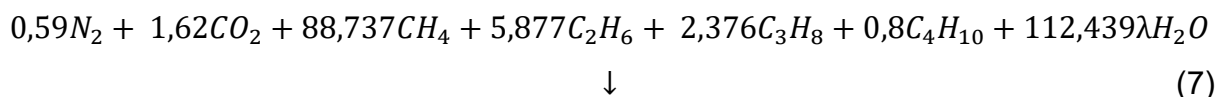
O cálculo para determinar a quantidade de vapor necessário para que ocorra o processo de reforma é determinado em função de um parâmetro fixo denominado razão vapor/carbono (λ), em que se tem a razão entre a quantidade de vapor para a reforma e a quantidade de átomos de carbono de uma amostra do gás natural. Para fins de simulação de cálculo, considerou-se uma amostra de 100 mols de gás natural de frações molares apresentada na Tabela 2, desse modo, uma vez sabida a quantidade de cada composto na amostra, é possível determinar a quantidade total de átomos de carbono na amostra selecionada, resultando em 112,439 mols de átomos de carbono.

Tabela 2 – Composição do gás natural.

Composto Químico.	Fração Molar. (%)
CH ₄	88,737
C ₂ H ₆	5,877
C ₃ H ₈	2,376
C ₄ H ₁₀	0,8
N ₂	0,59
CO ₂	1,62
TOTAL:	100%

Fonte: Silva (2018), adaptado.

Portanto, a reação da reforma tem a forma da Equação 7:



Os coeficientes dos produtos da reação de reforma a vapor, identificados por X_j , foram obtidos através de simulação pelo programa computacional *Gaseq Chemical Equilibrium*, tal *software* objetiva determinar o estado termoquímico de mínima energia livre de Gibbs. A minimização da energia livre de Gibbs é um método direto e vantajoso para o sistema, pois determina o número de fases dos sistemas assim como descreve e quantifica as composições no equilíbrio, considerando a conservação de

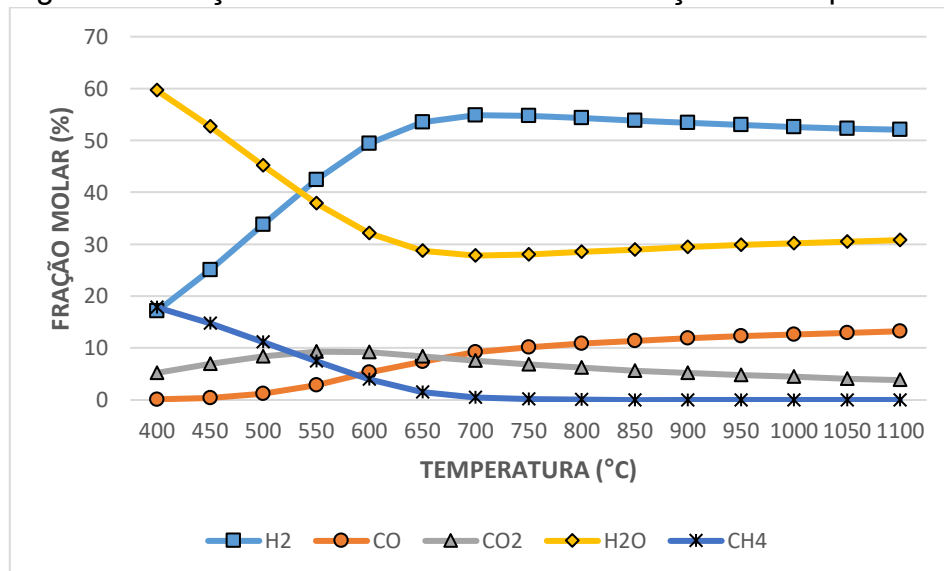
massas, igualdades das fugacidades e a energia mínima do sistema total em estudo, garantindo o equilíbrio para os sistemas termodinâmicos (TRINDADE JÚNIOR, 2011).

O software utiliza o Método Lewis NASA para encontrar o equilíbrio para condições especificadas de temperatura e pressão. Esse método é conveniente para modelos termodinâmicos devido os comportamentos de equilíbrio das espécies, natureza não convexa e as equações serem do tipo não-linear (ALENCAR, 2007). Os dados de entradas são: amostra de 100 mols da composição do gás natural, razão vapor/carbono igual a 3, temperatura de 650 °C e pressão de 101,325 kPa para a reação de reforma.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para diferentes temperaturas, a reforma a vapor apresenta diferentes eficiências na produção de hidrogênio. A Figura 2 demonstra, em função da temperatura, as frações molares oriundas da reforma a vapor para a composição do gás natural especificado, razão de vapor/carbono (λ) igual a 3 e pressão de 1 atm.

Figura 2 – Frações molares da reforma em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pelos autores.

É notório que os hidrocarbonetos mais pesados da composição do gás natural (C_{2+}) não apresentam frações molares significativas (a fração molar se apresenta na forma de traços) na composição do gás síntese produto da reforma, e que o hidrogênio passa a ser dominante na mistura a partir de 600°C. A produção de H_2 tem seu ápice

a temperatura de 700°C onde a fração molar desse componente na mistura chega a 54,87% e o CH₄ é praticamente consumido.

No sistema proposto, a reação de reforma acontece interno a tecnologia da célula a combustível de carbonato fundido na temperatura de funcionamento de 650°C, sendo, portanto, próxima da configuração de produção máxima de hidrogênio. A Tabela 3 a seguir apresenta os valores para a reação de reforma a vapor na temperatura, pressão e razão de vapor/carbono de operação.

Tabela 3 – Frações molares da reforma.

COMPOSTO	FRAÇÃO MOLAR (%)
H ₂	53,55
CO	7,635
CO ₂	8,424
H ₂ O	28,773
N ₂	0,0923
O ₂	0
CH ₄	1,524
C ₂ H ₆	3,58 10 ⁻⁶
C ₃ H ₈	3,45 10 ⁻¹¹
C ₄ H ₁₀	3,69 10 ⁻¹⁶

Fonte: Elaborado pelos autores.

As eficiências energéticas objetivo da pesquisa foram encontradas a partir do equacionamento no *Engineering Equation Solver* e estão representadas na Tabela 4. Uma discussão desses resultados é realizada em seguida, em comparação a resultados da literatura científica em sistemas de geração energética que se utilizam do acionamento de células combustível.

Tabela 4 – Resultados e eficiências.

Eficiências:	η_I (%)	η_{th} (%)	η_{comb} (%)	$\eta_{sistema}$ (%)
Resultados:	41,3	79,6	91,4	81,9

Fonte: Elaborado pelos autores.

A eficiência da célula de gerar eletricidade em função do poder calorífico e vazão do gás natural (η_I), apresentou valores padrões da literatura. A célula a combustível de carbonato fundido, quando operada em um ciclo combinado,

apresenta valores tipicamente abaixo de 40% como no trabalho de El-Emam e Dincer (2011) em que a célula opera combinada a uma turbina a gás e atinge a marca de 37,45%. O mesmo se repete no trabalho de Mehrpooya *et al.* (2017), em que a célula a combustível de carbonato fundido opera combinada a um motor Stirling em uma planta de trigerção, e atinge a marca de 30% de eficiência. No caso em que a célula opera na forma de acionamento primário da planta ou de forma híbrida, isto é, quando se utiliza ao mesmo tempo mais de uma fonte primária de energia para geração de eletricidade na planta (BARBOSA, 2004), a célula apresenta valores acima dos 40%, como no trabalho de Rashidi *et al.* (2008) em que a célula trabalha sob uma planta híbrida e atinge a marca de 43,4%. Matelli (2001), exibe para essa eficiência o valor de 40,1% na planta de um hospital. Silveira *et al.* (1999), alcança a marca de 44,6% na geração de eletricidade para um sistema de cogeração de potência e vapor. Silveira *et al.* (2001), em um sistema de cogeração, dessa vez de potência e refrigeração por absorção, atinge a marca de eficiência em eletricidade de 42,27%. A variação dessa eficiência está fortemente relacionada a vazão que é admitido o gás natural na planta, uma vez que a variação do poder calorífico inferior (PCI) desse gás não varia muito de uma fonte para outra. Portanto, nesse quesito, a eficiência de eletricidade da planta proposta (41,3%) se apresenta satisfatória e de valor padrão em células a combustível de acionamento primário em plantas.

A eficiência termodinâmica (η_{th}) contabiliza a geração de eletricidade no *stack* em função do máximo trabalho elétrico obtido na célula dividido pela energia liberada na reação química no processo reversível. Matelli (2001), apresenta para essa eficiência um valor de 79,6%. Como trata-se de uma mesma reação contabilizada do ponto de vista reversível, essa eficiência é idêntica para as mesmas condições de operação de pressão e temperatura da célula e, portanto, pode ser também chamada de eficiência teórica.

A eficiência de utilização do combustível (η_{comb}) pelo sistema é um parâmetro importante na viabilidade do ciclo proposto. Esse parâmetro pode ser tomado muitas vezes como pré-definido na literatura, e assume valores no intervalo de 50% a 90% (HAGHGHI *et al.*, 2019). Na condição em que ele é calculado, apresenta-se acima de 80%. Silveira *et al.* (1999), alcança a marca de 83,9% na utilização de combustível para um sistema de cogeração de potência e vapor. Silveira *et al.* (2001), em um sistema de cogeração, dessa vez de potência e refrigeração por absorção, atinge a marca de eficiência na utilização de combustível de 86,48%. Um sistema

convencional de trigeriação para aplicação comercial de armazenamento frigorífico foi estudado por Soltani *et al.* (2020), obtendo uma eficiência de utilização do combustível de 89.59%. A eficiência de 91,4% para o sistema de trigeriação proposto se apresenta ligeiramente acima dos padrões de utilização do combustível. Esse marco demonstra novamente um exaustivo uso da energia térmica contida nos gases de exaustão e também um limite da utilização do poder calorífico do combustível pela planta, visto que parâmetros como a liberação da exaustão na atmosfera a temperaturas no mínimo superiores a 120°C deve ser atendido.

A eficiência do sistema proposto ($\eta_{sistema}$) mostrou-se de grande justificativa para a viabilidade do sistema proposto. Mehrpooya *et al.* (2017) avaliou uma planta de trigeriação baseada em célula a combustível de carbonato fundido, no qual o calor residual aciona um motor stirling e um sistema de refrigeração por absorção e os gases de exaustão acionam uma turbina e um trocador de calor na geração de vapor encontrando uma eficiência de 71,7% para a planta para uma geração líquida de 4479kW. Chang *et al.* (2017) analisou um sistema residencial de trigeriação baseado na célula a combustível PEMFC e um subsistema Rankine orgânico acoplado a um sistema de compressão de vapor para geração de frio, avaliou a influência da temperatura ambiente sob o sistema de trigeriação, e apresentou 73,9% no verão da cidade de Wuhan na temperatura de 36°C. Peng *et al.* (2020), analisa um ciclo combinado da célula a combustível de óxido sólido (SOFC) e um sistema de trigeriação de turbina a vapor e atinge a marca de 73,99%. Essas eficiências estão associadas a sistemas de trigeriação em ciclos combinados de células com sistemas térmicos e apresentam valores inferiores a 80% (SILVA, 2018).

No caso de sistemas de trigeriação em que a demanda elétrica do sistema é completamente atendida por uma célula a combustível, as eficiências podem assumir valores entorno dos 80%, como no trabalho de Chahartaghi e Kharkeshi (2018) que para um sistema de trigeriação acionado por uma célula do tipo PEM a eficiência do sistema chegou à marca de 81,55%. Haghghi *et al.* (2019), efetua uma pesquisa ao calcular a eficiência de um sistema de trigeriação acionado por célula a combustível de carbonato fundido na geração líquida de energia elétrica de 1439 kW, obtendo uma eficiência da planta de 79,9%. As eficiências de sistemas de trigeriação e cogeração acionados por células a combustível de baixas temperaturas do tipo PEM, para uma mesma demanda energética, apresentam valores maiores do que em células que funcionam a altas temperaturas como a célula a combustível de carbonato fundido

(BARELLI *et al.*, 2011), embora essas duas últimas apresentem eficiência elétrica maior do que a primeira.

A eficiência do sistema proposto de 81,9% se encontra dentro dos padrões de alta eficiência para sistemas que se utilizam da trigerção de acionamento primário por células a combustível na literatura, apresentando uma ótima viabilidade termodinâmica e técnica de aplicação. Existem, porém, maneiras de melhorar ligeiramente os rendimentos da planta deste trabalho. A busca por compressor e bomba de maior eficiência isentrópica, assim como por maiores eficiências da caldeira de recuperação e o COP do *chiller* de absorção, pode apresentar uma conservação maior da energia térmica dos gases de exaustão, podendo-se, portanto, aumentar a demandada total do sistema para aplicações mais robustas do setor terciário. Pressões menores da caldeira de recuperação ocasiona uma necessidade maior de energia térmica dos gases de exaustão para a geração de vapor, porém, demanda uma menor potência da bomba para levar a água a pressão da caldeira.

CONCLUSÃO

A produção de hidrogênio pela reforma a vapor do gás natural interna a célula, na temperatura de 650 °C e razão vapor/carbono igual a 3, apresentou fração molar de 53,55%, o que significou uma efetiva capacidade técnica da célula a combustível de carbonato fundido operar com reforma interna. As eficiências de primeira lei, termodinâmica, de utilização do combustível e do sistema foram respectivamente de 41,3%, 79,6%, 91,4%, 81,9%. Essas duas últimas se apresentaram ligeiramente acima dos padrões de alta eficiência de plantas que se utilizam de cogeração e trigerção, e expressa um uso exaustivo da energia térmica contida nos gases de exaustão para geração de energia útil no sistema proposta. A análise energética revelou um alto índice de viabilidade energética do sistema como um todo, e sua aplicabilidade no setor terciário para atendimento de demanda elétrica, calor e frio é recomendado.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Harley Souza. **Estudo numérico da termo-aerodinâmica de câmaras de combustão para turbinas a gás: aplicação ao caso de micro turbinas.** 2007.
- ANDREOS, Ronaldo. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do Estado de São Paulo.** orientador: Dr. José R. Simões Moreira. 2013. 168 f. dissertação de mestrado (programa pós-graduação em energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2013.
- BARBOSA, Claudomiro Fábio de Oliveira, PINHO, João Tavares, PEREIRA, Edinaldo José da Silva *et al.* **Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica.** In: Encontro de energia no meio rural, 5., 2004, Campinas.
- BARELLI, L.; BIDINI, G.; GALLORINI, F.; OTTAVIANO, A. An energeticeexergetic comparison between pemfc and sofc-based micro-chp systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, ITÁLIA, v. 36, ed. 4, p. 3206-3214, 2011.
- BERECHE, R. P. **Avaliação de sistemas de refrigeração por absorção h₂O/libr e sua possibilidade de inserção no setor terciário utilizando gás natural.** Orientador: Silvia Azucena Nebra de Perez. 2007. 209 F. dissertação de mestrado (pós-graduação em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas - sp, 2007.
- CHAHARTAGHI, Mahmood; KHARKESHI, Behrad Alizadeh. Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with pem fuel cell as a prime mover. **Applied Thermal Engineering**, Iran, v. 128, p. 805-817, 2018.
- CHANG, Huawei; WAN, Zhongmin; ZHENG, Yao; CHEN, Xi; SHU, Shuiming; TU, Zhengkai; CHAN, Siew Hwa. Energy analysis of a hybrid PEMFC–solar energy residential micro-CCHP system combined with an organic rankine cycle and vapor compression cycle. **Energy Conversion and Management**, Wuhan, v. 142, p. 374-384, 2017
- EL-EMAM, Rami Salah; DINCER, Ibrahim. Energy and exergy analyses of a combined molten carbonate fuel cell e gas turbine system. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 36, p. 8927-8935, 2011.

- FACCI, A. L.; LORETI, G.; UBERTINI, S.; BARBIR, F.; CHALKIDIS, T.; ESSLING, R. P.; PETERS, T.; SKOUFA, E.; BOVE, R. Numerical assessment of an automotive derivative chp fuel cell system. **Energy Procedia**, v. 105, p. 1564–1569, 2017.
- GUIMARÃES, H. N. et al. **Análise exergética de um sistema de trigeração integrado com ciclo de rankine e energia solar**. Congresso brasileiro de energia solar, VI., 2016, Belo Horizonte. Belo Horizonte: [s. n.], 2016. 8 p
- HAGHGHI, Maghsoud Abdollahi *et al.* Thermodynamic, exergoeconomic, and environmental evaluation of a new multi-generation system driven by a molten carbonate fuel cell for production of cooling, heating, electricity, and freshwater. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 199, 2019.
- MARCHIONNI, L. **Análise da cogeração aplicada em micro empresas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- MATELLI, JOSÉ ALEXANDRE. **Sistemas de cogeração baseados em células combustível aplicados em hospitais**. 2001. 136 f. Dissertação de Mestrado (grau de mestre em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- MEHRPOOYA, M.; SAYYAD, S.; ZONOUZ, M. J. Energy, exergy and sensitivity analyses of a hybrid combined cooling, heating and power (cchp) plant with molten carbonate fuel cell (mcfc) and stirling engine. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, Holanda, v. 148, p. 283–294, 2017.
- PEIXOTO, D.; INDRUSIAK, M. Análise do sistema de resfriamento de uma planta de ar comprimido. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, V.12, ed.17, p.55-66, 2011.
- PENG, Michael Yao-Ping; CHEN, Chunchun; PENG, Xuhui; MAREFATI, Mohammad. Energy and exergy analysis of a new combined concentrating solar collector, solid oxide fuel cell, and steam turbine cchp system. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, China, v. 39, 2020
- RASHIDI, R. *et al.* **Energy and exergy analyses of a hybrid molten carbonate fuel cell system**. Journal of Power Sources, [s. l.], v. 185, p. 1107–1114, 2008.
- SALES, LEANDRO DA SILVA. **Viabilidade técnico-econômica de sistemas de cogeração para atender a demandas elétricas, térmicas e de refrigeração em aplicações de pequeno e médio porte**. orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho. 2008. 345 f. (pós-graduação em engenharia mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá - mg, 2008.

- SILVA, FELLIPE SARTORI DA. **Determinação do custo de energia gerada através da utilização de células a combustível de carbonato fundido e turbina a vapor em um ciclo combinado**. Orientador: Dr. José Alexandre Matelli. 2018. 116 f. Dissertação de mestrado (pós-graduação em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá - SP, 2018
- SILVEIRA, José Luz. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário**. Orientador: Dr. Carlos Alberto Luengo. 1994. 216 f. tese de doutorado (pós-graduação em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas - SP, 1994.
- SILVEIRA, JOSÉ LUZ; LEAL, ELISANGELA MARTINS; RAGONHA JR, LUIZ F. Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water. **ENERGY**, V. 26, N. 10, P. 891-904, 2001.
- SOLTANI, Majid et al. Technical and economic evaluations of combined cooling, heating and power (CCHP) system with gas engine in commercial cold storages. **Energy Conversion and Management**, v. 214, p. 112877, 2020.
- SOUZA, M. F. P. **Estudo do impacto da tarifa do crédito de carbono sobre a otimização de sistemas térmicos**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- TAKAKI, Alessandro Tomio. **Análise do aproveitamento do gás natural em plantas de cogeração e trigerção de energia em indústrias frigoríficas**. 2006. 179f. dissertação de mestrado (grau de mestre em engenharia mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - SP, 2006.
- TRINDADE JÚNIOR, Valter Nunes et al. **Aplicação do método da minimização da energia de gibbs no cálculo de equilíbrio químico e de fases em sistemas eletrolíticos**. 2011.
- VERHAERT, I.; MULDER, G.; DE PAEPE, M. Evaluation of an alkaline fuel cell system as a micro-chp. **Energy Conversion and Management**, Oxford, Inglaterra, v. 126, p. 434–445, 2016.
- YANG, P.; ZHANG, H.; HU, Z. Parametric study of a hybrid system integrating a phosphoric acid fuel cell with an absorption refrigerator for cooling purposes. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, Inglaterra, v. 41, n. 5, p. 3579–3590, 2016.