

AVALIAÇÃO DO REAPROVEITAMENTO DE CALOR EM ELETROLISADORES ALCALINOS

Abstract— The growing global energy consumption, the search for reduction in carbon emissions and climate problems highlight the importance of investment in low environmental impact energy systems. In this sense, the Generation and Storage Systems of Electrical Energy based on Hydrogen (AEH2) have been promising technological alternatives. However, the overall efficiency of an AEH2's is too limited, something between 25 to 30%. Due to hydrogen's properties, a considerable portion of power is drained by the storage system and another important portion is converted into heat by the AEH2's equipments. In this research, it is intended to increase the efficiency of an AEH2 through theoretical and experimental studies of the heat usage from its components, more specifically the equipment responsible for the hydrogen production, the electrolyzer. An experimental plant was conceived with this type of equipment for data acquisition, testing and research. The equating and the mathematical modeling of the electrolyzer are based on the equipment of the experimental plant. Also, the computational model is validated by experiments in the CEESP/UFMS. The potential of power generation and heat reutilization of the electrolyzer were evaluated from the model developed with this purpose.

Keywords— Energy storage, hydrogen, electrolyzer, efficiency, heat.

Resumo— O crescente consumo mundial de energia, a busca pela redução nas emissões de carbono e os problemas climáticos realçam a importância dos investimentos em sistemas de energia de baixo impacto ambiental. Neste sentido, o emprego de Armazenadores de Energia Elétrica utilizando Hidrogênio (AEH2) tem se mostrado uma alternativa tecnológica promissora. No entanto, a eficiência global dos AEH2s é muito limitada, em torno de 25 a 30%. Devido às propriedades do hidrogênio, uma parcela considerável de potência é consumida no seu armazenamento e outra importante parcela é convertida em calor pelos equipamentos do AEH2. Neste trabalho, busca-se aumentar a eficiência dos AEH2 através do estudo teórico e experimental do aproveitamento do calor de seus componentes, mais especificamente do equipamento responsável pela produção de hidrogênio, o eletrolisador. Uma planta experimental foi utilizada para levantamento de dados, realização de ensaios e pesquisa. Foram desenvolvidos o equacionamento e a modelagem matemática do eletrolisador baseados no equipamento da planta experimental. O modelo computacional foi validado a partir da realização de experimentos no laboratório do CEESP/UFMS. A partir do modelo desenvolvido foi avaliado o potencial de geração de potência e de aproveitamento de calor do eletrolisador.

Palavras-chave— Armazenadores de energia, hidrogênio, eletrolisador, eficiência, calor.

1 Introdução

O suprimento de energia em suas diversas formas é um fator de suma importância, uma vez que desenvolvimentos social, econômico e tecnológico de uma nação estão intimamente ligados à sua demanda energética. Os recursos energéticos destinados à geração de eletricidade são, em grande parte, baseados na queima de combustíveis fósseis, representando cerca de 66% da totalidade da geração mundial (International Energy Agency, 2017). No entanto, a utilização destes recursos é um dos principais causadores do aquecimento global, devido aos seus altos níveis de emissão de carbono (United Nations, 2015).

Uma das alternativas para expandir a matriz energética e torná-la menos poluente é o investimento em fontes renováveis (eólica, solar, etc.). Entretanto, um dos inconvenientes destas fontes é a intermitência de sua energia primária, pois ela é suscetível a oscilações e descontinuidades, o que compromete a qualidade, a estabilidade e a confiabilidade de um sistema elétrico (Miller & Edmonds, 2013).

O emprego de armazenadores de energia elétrica (EES – Electrical Energy Storage Systems) aumenta o aproveitamento da energia gerada pelas fontes renováveis e facilita a sua inserção na rede elétrica. Além disso, os EES auxiliam na regulação do sistema elétrico, podem servir como reserva de energia para atender uma súbita e imprevisível demanda, e ainda podem atuar na poda de pico, armazenando energia fora do horário de ponta e injetando-a durante o período de máxima demanda (Zakeri & Syri, 2015).

Entre as diversas opções tecnológicas de EES, destacam-se os Armazenadores de Energia Elétrica utilizando Hidrogênio (AEH2). Se o hidrogênio (H_2) utilizado em um AEH2 for gerado a partir de recursos energéticos renováveis, ele pode ser considerado um combustível renovável. Nesse contexto, o H_2 mostra-se como um portador de energia versátil para o futuro, complementando a eletricidade e com grande potencial para substituir os combustíveis fósseis. Além do mais, a tecnologia de geração e armazenamento de energia utilizando H_2 tem as características de elevada densidade de potência, baixa taxa de auto descarga, modularidade e baixo impacto ambiental (Revankar & Majumdar, 2014).

A Figura 1 apresenta a estrutura simplificada de um AEH2. Nesta figura, o sistema apresentado é composto por um conversor CA/CC, que converte a corrente alternada da rede elétrica em corrente contínua, um eletrolisador (ELE), que utiliza a energia elétrica para produção de H_2 a partir da eletrólise da água, um armazenador de H_2 , para estocagem do gás, uma célula a combustível (CaC), a qual utiliza o H_2 para gerar energia elétrica, e um conversor CC/CA, que converte a corrente contínua em corrente alternada e faz a interligação com a rede de energia elétrica. O hidrogênio produzido pelo ELE é acondicionado no armazenador de H_2 , mas também pode ser disponibilizado em um barramento externo para utilização direta como combustível gasoso. De forma similar, o H_2 utilizado pela CaC é proveniente do armazenador interno ou pode ser oriundo de uma fonte externa.

Um dos inconvenientes dos AEH2s é a baixa eficiência elétrica do ciclo completo, desde o consumo de energia da rede elétrica para geração e armazena-

mento de H_2 até a sua utilização para geração de eletricidade. A eficiência elétrica global fica entre 25 e 30% (International Energy Agency, 2015; Meena et al., 2014). Uma parcela da energia consumida pelo AEH2 é utilizada pelos demais componentes intrínsecos ao sistema (circuitos de controle, sensores, válvulas, bombas, etc.). Porém, quantidades apreciáveis de energia são convertidas em calor pelos equipamentos, as quais têm potencial para ser reaproveitadas, aumentando assim a eficiência do sistema.

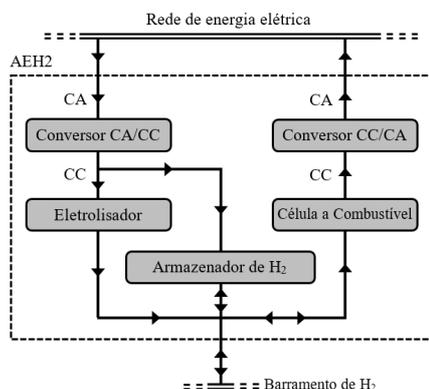


Figura 1. Estrutura simplificada de um AEH2

O armazenamento de H_2 pode ser feito na sua forma gasosa, em que uma parte da energia é usada para comprimir o gás e armazená-lo sob alta pressão, na sua forma líquida, em que uma parte da energia é necessária para liquefazer o H_2 e armazená-lo a temperaturas criogênicas, e na forma de compostos intermediários, em que calor é retirado/cedido de uma liga metálica para auxiliar o H_2 a se combinar/desassociar dela com facilidade. Portanto, independente da tecnologia empregada, o armazenamento de H_2 em grandes quantidades implica em um consumo adicional de energia, representado na Figura 1 como um consumo em corrente contínua.

O armazenamento de H_2 na forma de compostos intermediários, mais especificamente em hidretos metálicos (HM), apresenta a particularidade do consumo de potência diretamente na forma de calor.

2 AEH2 com reaproveitamento de calor

A Figura 2 ilustra a proposta de um AEH2 com aproveitamento de calor. Nessa estrutura, o armazenador de H_2 , por ser tratar de HM, não consome energia elétrica adicional, mas energia térmica derivada dos demais componentes.

O fluxo de calor na Figura 2 ocorre de diversas formas, dependendo das condições de operação dos equipamentos. O processo de armazenamento de H_2 em HM envolve uma reação exotérmica, ou seja, há liberação de calor. Essa energia térmica pode ser transferida para o barramento de calor e acondicionada para utilização posterior. Por outro lado, a liberação de H_2 , processo de dessorção, é uma reação endotérmica, em que há absorção de calor. Essa energia pode ser cedida pelo barramento de calor.

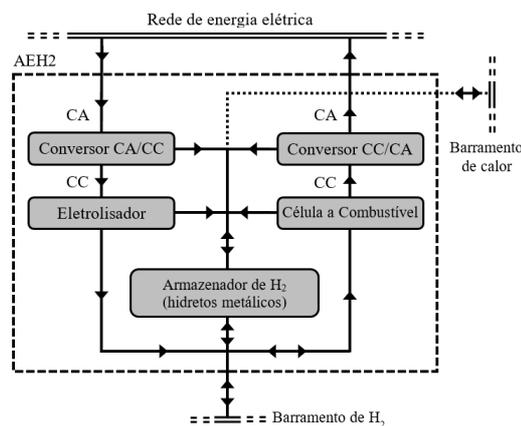


Figura 2. Proposta de um AEH2 com aproveitamento de calor

O ELE libera calor devido à reação de eletrólise, o que tende a elevar a sua temperatura. A eficiência do ELE é influenciada por diversos fatores, mas principalmente pela temperatura na qual a eletrólise está sendo desencadeada. Em geral, os maiores níveis de eficiência são atingidos em altas temperaturas. No entanto, para não comprometer o desempenho do ELE deve-se evitar que a sua temperatura exceda os limites estipulados pelo fabricante, o que normalmente é feito por meio de dissipadores de calor com ventilação forçada.

Na estrutura proposta na Figura 2, a energia térmica excedente gerada na eletrólise é retirada pelo barramento de calor a fim de garantir que a temperatura não exceda a máxima permissível. Desta forma, além de se eliminar o consumo de energia relacionado à ventilação forçada, a energia térmica extraída do ELE pode ser reaproveitada e utilizada posteriormente para, por exemplo, ceder calor ao HM para auxiliar no processo de dessorção de H_2 .

O calor gerado pelos demais componentes do AEH2 também pode ser reaproveitado, assim como, quando disponível, pode-se incluir a energia térmica de outras fontes renováveis (termosolar, geotérmica superficial, etc.), as quais podem complementar o ciclo das trocas térmicas com os dispositivos da Figura 2, fornecendo ou absorvendo calor.

Neste trabalho é abordado o ELE, apresentando a modelagem matemática e a avaliação do reaproveitamento do calor excedente gerado na reação de eletrólise para aumento da eficiência.

3 Modelagem matemática do eletrolisador

A planta experimental utilizada nesta pesquisa encontra-se no laboratório do CEESP/UFSP e é constituída por um módulo eletrolisador alcalino, modelo HP da Piel-McPhy Energy (McPhy Energy, 2015). Esse ELE já possui os componentes necessários para a geração de H_2 : circuitos de controle, válvulas, bomba, pilha eletrolisadora, sistema de resfriamento, elementos de proteção, etc. (Gonzatti et al., 2016). As principais especificações técnicas deste módulo são: potência máxima de 3.000 W, temperatura máxima de operação de 65 °C, 30 conjuntos

anodo/catodo, pressão máxima de 15 barg, produção máxima de H₂ de 400 NL·h⁻¹ e pureza do H₂ produzido igual a 99,5 ± 0,2% (McPhy Energy, 2015).

Para que ocorra a reação de eletrólise, uma tensão elétrica mínima deve ser aplicada ao eletrolisador, a tensão reversível. Essa tensão pode ser calculada a partir da variação da energia livre de Gibbs (Green & Perry, 2007):

$$\Delta\bar{g}_f = \Delta\bar{h}_f - T \cdot \Delta\bar{s} \quad (1)$$

onde $\Delta\bar{g}_f$ é a variação da energia livre de Gibbs molar de formação (J·mol⁻¹), $\Delta\bar{h}_f$ é a variação da entalpia molar de formação (J·mol⁻¹), $\Delta\bar{s}$ é a variação de entropia molar (J·mol⁻¹·K⁻¹) e T é a temperatura (K).

O processo completo para o cálculo de $\Delta\bar{g}_f$, $\Delta\bar{h}_f$ e $\Delta\bar{s}$ é descrito em Larminie e Dicks (2003).

Assim, a tensão mínima necessária para que ocorra a eletrólise da água pode ser expressa pela Eq. (2) (Ulleberg, 2003).

$$V_{rev} = \frac{\Delta\bar{g}_f}{2 \cdot F} \quad (2)$$

onde V_{rev} é a tensão reversível do eletrolisador (V) e F é constante de Faraday (96.485 C·mol⁻¹).

A energia total necessária para realizar a eletrólise da água é equivalente à variação da entalpia. Portanto, a tensão termoneutra do eletrolisador V_{tn} está relacionada com a demanda total de energia e é obtida por (Ulleberg, 2003):

$$V_{tn} = \frac{\Delta\bar{h}_f}{2 \cdot F} \quad (3)$$

A curva de polarização do eletrolisador foi construída usando a relação empírica da Eq. (4), a qual é utilizada para modelar o processo eletroquímico de eletrólise (Ulleberg, 2003).

$$V_{cel} = V_{rev} + r \cdot J + s \cdot \log(t \cdot J + 1) \quad (4)$$

onde V_{cel} é a tensão de uma única célula eletrolisadora (V), J é a densidade de corrente do eletrolisador (A·m⁻²), r é um parâmetro da resistência ôhmica do eletrólito (Ω·m²), s é um parâmetro da sobretensão nos eletrodos (V) e t é um parâmetro da sobretensão nos eletrodos (m²·A⁻¹).

A densidade de corrente do eletrolisador (J), na Eq. (4), é expressa por:

$$J = \frac{I}{A_{elet}} \quad (5)$$

onde I é corrente do eletrolisador (A) e A_{elet} é a área do eletrodo do eletrolisador (m²).

Os parâmetros r , s e t na Eq. (4), neste trabalho, são modificados de acordo com as Equações (6), (7) e (8) de forma a considerar a sua dependência térmica.

$$r = r_1 + r_2 \cdot (T - 273,15) + r_3 \cdot (T - 273,15)^2 \quad (6)$$

$$s = s_1 + s_2 \cdot (T - 273,15) + s_3 \cdot (T - 273,15) \quad (7)$$

$$t = t_1 + \frac{t_2}{T - 273,15} + \frac{t_3}{(T - 273,15)^2} \quad (8)$$

onde r_k são os coeficientes da resistência ôhmica do eletrólito e s_k e t_k são os coeficientes de sobretensão nos eletrodos.

A tensão de saída da pilha eletrolisadora, ou simplesmente eletrolisador, é determinada por:

$$V = n \cdot V_{cel} \quad (9)$$

onde V é a tensão de saída do ELE e n é o número de células associadas em série.

A eficiência do eletrolisador foi calculada através da Eq. (10) (Parizzi, 2008).

$$\eta = \eta_F \cdot \eta_r \cdot \eta_e \quad (10)$$

onde η é a eficiência do eletrolisador, η_F é a eficiência de Faraday, η_r é a eficiência reversível e η_e é a eficiência energética.

Na Eq. (10), a eficiência de Faraday (η_F) é definida como a relação entre o valor instantâneo de H₂ produzido e o seu valor máximo teórico. Uma expressão empírica que descreve esse fenômeno é apresentada na Eq. (11) (Ulleberg, 2003).

$$\eta_F = \frac{J^2}{f_1 + J^2} \cdot f_2 \quad (11)$$

onde f_1 e f_2 são constantes ajustáveis de acordo com a resposta do ELE.

A eficiência reversível (η_r) na Eq. (10) é definida como sendo a relação entre a energia elétrica que é convertida em energia química ($\Delta\bar{g}_f$) e a energia total disponível no processo ($\Delta\bar{h}_f$), portanto:

$$\eta_r = \frac{\Delta\bar{g}_f}{\Delta\bar{h}_f} \quad (12)$$

A eficiência energética (η_e) na Eq. (10) é calculada por (Carnieletto, 2011):

$$\eta_e = \frac{V_{tn}}{V_{cel}} \quad (13)$$

A produção de hidrogênio em uma pilha eletrolisadora é diretamente proporcional à circulação de corrente elétrica, sendo estimada através da Eq. (14) (Larminie & Dicks, 2003).

$$\dot{N}_{H_2} = \eta_F \cdot \frac{n \cdot I}{2 \cdot F} \quad (14)$$

onde \dot{N}_{H_2} é a taxa de produção de H₂ (mol·s⁻¹).

A produção de hidrogênio também pode ser expressa na forma de taxa mássica:

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{N}_{H_2} \cdot M_{H_2} \quad (15)$$

onde \dot{m}_{H_2} é a taxa mássica de produção de H_2 pelo eletrolisador ($kg \cdot s^{-1}$) e M_{H_2} é a massa molar do hidrogênio ($0,002016 kg \cdot mol^{-1}$).

ou, ainda, na forma de taxa volumétrica:

$$q_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\rho_{H_2}} \quad (16)$$

onde q_{H_2} é a taxa volumétrica de produção de hidrogênio pelo eletrolisador ($m^3 \cdot s^{-1}$) e ρ_{H_2} é a densidade do H_2 gerado pelo ELE ($kg \cdot m^{-3}$).

A densidade do hidrogênio (ρ_{H_2}) na Eq. (16) é obtida utilizando a equação de estado dos gases, por meio da Eq. (17) (Green & Perry, 2007).

$$\rho_{H_2} = \frac{M_{H_2} \cdot p_{H_2}}{R \cdot T} \quad (17)$$

onde p_{H_2} é a pressão absoluta do H_2 (Pa) e R é a constante universal dos gases ($8,3145 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$).

A partir da primeira lei da termodinâmica pode-se descrever o calor responsável pela variação da temperatura do ELE (Winterbone & Turan, 2015):

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{rea} - \dot{Q}_{perd} - \dot{Q}_{troc} \quad (18)$$

onde m é a massa total do eletrolisador (kg), c é o calor específico total do ELE ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), \dot{Q}_{rea} é a taxa de calor gerada pela reação de eletrólise (W), \dot{Q}_{perd} são as perdas térmicas do eletrolisador para o ambiente (W) e \dot{Q}_{troc} é a taxa de fluxo de calor entre a pilha e seu trocador térmico (W).

O calor gerado pela reação de eletrólise (\dot{Q}_{rea}) na Eq. (18) foi determinado pela Eq. (19).

$$\dot{Q}_{rea} = n \cdot I \cdot (V_{cel} - V_{tn}) \quad (19)$$

As perdas térmicas do ELE para o ambiente na Eq. (18), por simplificação, são estimadas por (Valverde-Isorna et al., 2016; Winterbone & Turan, 2015):

$$\dot{Q}_{perd} = h \cdot A \cdot (T - T_{amb}) \quad (20)$$

onde h é o coeficiente de transferência térmica global do ELE ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), A é a área da superfície exposta do ELE (m^2) e T_{amb} é a temperatura ambiente (K).

Considerando que o trocador de calor do ELE é constituído por um sistema de ventilação forçada, o fluxo de calor (\dot{Q}_{troc}) na Eq. (18) pode ser estimado por:

$$\dot{Q}_{troc} = q_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot \rho_{ar} \cdot (T - T_{amb}) \quad (21)$$

onde q_{ar} é a taxa volumétrica de ar do trocador de calor do ELE ($m^3 \cdot s^{-1}$), $c_{p,ar}$ é o calor específico do ar à pressão constante ($1.006 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) e ρ_{ar} é a densidade do ar na entrada do trocador de calor ($kg \cdot m^{-3}$).

A densidade do ar ρ_{ar} na Eq. (21) é obtida pela equação de estado dos gases, por meio da Eq. (22) (Green & Perry, 2007).

$$\rho_{ar} = \frac{M_{ar} \cdot p_{ar}}{R \cdot T_{amb}} \quad (22)$$

onde M_{ar} é a massa molar do ar ($0,028964 kg \cdot mol^{-1}$) e p_{ar} é a pressão absoluta do ar na entrada do trocador de calor do eletrolisador (Pa).

4 Estimação de parâmetros do modelo

As Equações (4), (5), (6), (7) e (8) são utilizadas para obtenção da curva de polarização do ELE levando em consideração sua dependência térmica, o que é feito através do ajuste dos parâmetros r_k , s_k e t_k . A Figura 3 apresenta alguns dados coletados durante um experimento conduzido com o ELE.

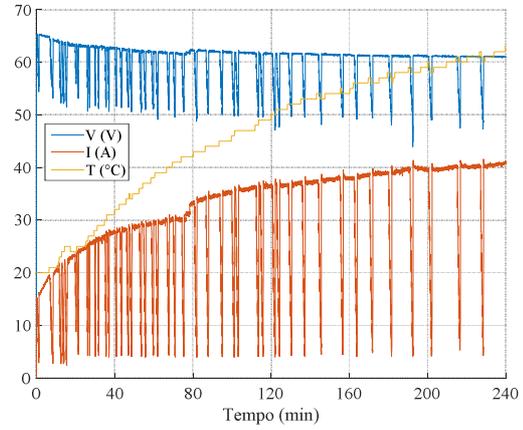


Figura 3. Dados coletados durante um experimento com o ELE

Na Figura 3, a tensão apresentada é referente à pilha eletrolisadora (30 células associadas em série). A temperatura do módulo partiu dos 20 °C, atingindo uma temperatura próxima de 63 °C quando, por prevenção, o experimento foi interrompido (a temperatura máxima de operação é 65 °C). Pela figura, verifica-se que o controlador limita a corrente da pilha em função de sua temperatura, impedindo altos níveis de corrente em baixas temperaturas.

A Figura 4 ilustra os pontos obtidos a partir dos dados de tensão, corrente e temperatura da Figura 3. Os dados apresentados na forma de asteriscos (*) representam os valores médios das medições efetuadas sob uma mesma temperatura. Nesta figura, a tensão apresentada é para uma única célula eletrolisadora (V_{cel}) e a corrente elétrica é expressa na forma de densidade de corrente (J), obtida pela Eq. (5).

A partir dos dados experimentais da Figura 4 e da Eq. (4) aplica-se o método não-linear dos mínimos quadrados com o algoritmo trust-region utilizando a ferramenta “Curve Fitting Toolbox” do Matlab (MathWorks, 2018a). Assim, são encontrados os valores de r , s e t para cada temperatura, considerando a tensão reversível do ELE expressa pela

Eq. (2). Deste modo, obtêm-se os ajustes individuais das curvas para cada temperatura, representados na Figura 4 na forma de linhas contínuas.

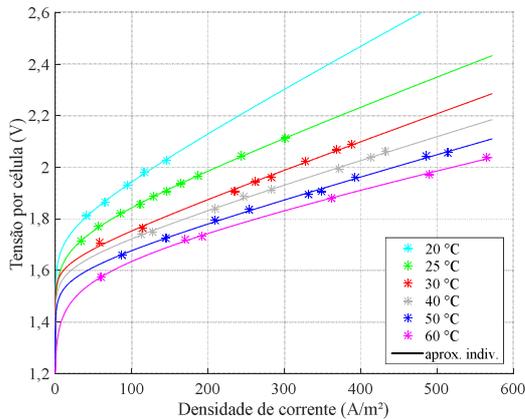


Figura 4. Dados coletados e ajustes individuais das curvas

De maneira semelhante, a partir dos valores encontrados para r e da Eq. (6), aplica-se novamente o método não-linear dos mínimos quadrados para encontrar as aproximações iniciais para os parâmetros r_1 , r_2 e r_3 (r_k). Na sequência, repete-se este processo para os valores de s e t , utilizando as Equações (7) e (8), respectivamente, para encontrar as aproximações iniciais para os parâmetros s_1 , s_2 e s_3 (s_k) e t_1 , t_2 e t_3 (t_k).

O ajuste final de curvas é efetuado com base nas Equações (4), (6), (7) e (8) utilizando a função de regressão não-linear “fitlm” do Matlab (MathWorks, 2018b). Para tanto, leva-se em consideração todos os dados coletados e tomam-se as aproximações iniciais encontradas como sendo os valores iniciais para os parâmetros r_k , s_k e t_k . Assim, obtêm-se o ajuste final das curvas apresentadas na Figura 5 na forma de linhas contínuas. Os valores finais encontrados para esses parâmetros são listados na Tabela 1.

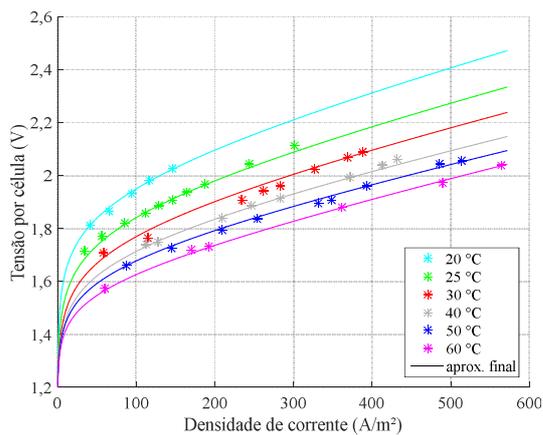


Figura 5. Ajuste final das curvas

Para o cálculo da eficiência da pilha eletrolisadora, Eq. (10), é necessário o ajuste dos parâmetros f_1 e f_2 da eficiência de Faraday, Eq. (11). A Figura 6 apresenta alguns dados coletados durante um experimento conduzido com a pilha. A partir destes dados e com base nas Equações (11), (14), (15), (16) e (17), obtêm-se os pontos (η_F -exp) apresentados na Figura 7,

os quais representam os valores da eficiência de Faraday obtidos a partir dos dados experimentais.

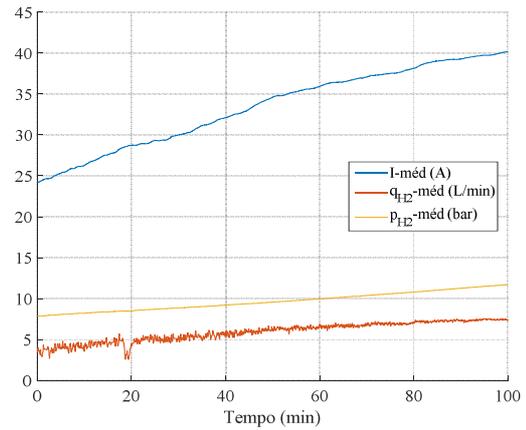


Figura 6. Dados coletados da pilha eletrolisadora para ajuste dos parâmetros da eficiência de Faraday

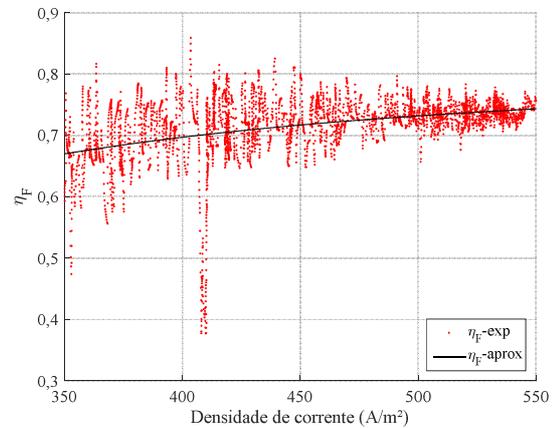


Figura 7. Eficiência de Faraday experimental e aproximada

Utilizando a ferramenta “Curve Fitting Toolbox” do Matlab, aplica-se o método não-linear dos mínimos quadrados com o algoritmo trust-region, Eq. (11), de forma a encontrar os parâmetros f_1 e f_2 , tomando-se como entrada os valores experimentais. Ainda na Figura 7, mostra-se a curva de aproximação resultante (η_F -aprox) utilizando os valores encontrados para f_1 e f_2 (listados na Tabela 1).

O ajuste dos parâmetros do modelo térmico foi feito a partir de dados levantados experimentalmente. Para isso, manteve-se a ventilação forçada operando continuamente à máxima potência e efetuou-se a medição da taxa volumétrica de ar. Na sequência, mediram-se as temperaturas do ar de entrada (temperatura ambiente) e de saída do trocador de calor. Assim, estimou-se a taxa de fluxo de calor entre a pilha e seu trocador de calor (\dot{Q}_{troc}) de acordo com a Eq. (21). Após encontrar os coeficientes da curva de polarização e da eficiência de Faraday, realizou-se uma aproximação para os valores de c e h . Estes parâmetros foram determinados utilizando a ferramenta de otimização “Response Optimization Tool” do ambiente Simulink/Matlab (MathWorks, 2018c). Essa ferramenta minimiza o erro entre o sinal de saída do modelo e o sinal de referência (temperatura levantada experimentalmente) a partir da sintonia dos parâmetros

tros selecionados (Valverde-Isorna et al., 2016). Os valores encontrados para estes parâmetros são listados na Tabela 1.

5 Validação do modelo e simulações

A Tabela 1 lista os parâmetros utilizados nas simulações. Os parâmetros são provenientes das especificações técnicas do módulo eletrolisador ou obtidos através de experimentos, aferição, estimação ou, ainda, baseados em literatura específica.

Tabela 1. Parâmetros considerados para simulação do ELE.

Parâmetro	Módulo	Unidade
A_{elet}	0,07	m^2
A	0,4	m^2
c	2.200	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p,ar}$	1.006	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
f_1	24.340	$A^2 \cdot m^{-4}$
f_2	0,7925	-
F	96.485,3399	$C \cdot mol^{-1}$
h	6	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
M_{ar}	$28,9644 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot mol^{-1}$
M_{H_2}	$20,1588 \cdot 10^{-4}$	$kg \cdot mol^{-1}$
m	20	kg
n	30	-
$q_{ar,m\acute{a}x}$	0,05	$m^3 \cdot s^{-1}$
R	8,3145	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
r_1	$9,9351 \cdot 10^{-4}$	$\Omega \cdot m^2$
r_2	$-1,8963 \cdot 10^{-5}$	$\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$
r_3	$2,1495 \cdot 10^{-7}$	$\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-2}$
s_1	0,1195	V
s_2	$-3,1804 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot ^\circ C^{-1}$
s_3	$-8,8231 \cdot 10^{-6}$	$V \cdot ^\circ C^{-2}$
t_1	6,2178	$m^2 \cdot A^{-1}$
t_2	-355,3438	$m^2 \cdot ^\circ C \cdot A^{-1}$
t_3	6,078,8	$m^2 \cdot ^\circ C^2 \cdot A^{-1}$

As Figuras 8 a 10 apresentam os resultados obtidos através de simulação e os dados obtidos nos experimentos com o ELE. Na Figura 8, o módulo foi configurado para limitar a corrente máxima da pilha em 25 A, na Figura 9 a corrente foi limitada em 30 A e na Figura 10 a corrente não foi limitada. Nestes três experimentos a ventilação forçada permaneceu operando continuamente à máxima potência.

Nos experimentos com limitação de corrente da pilha eletrolisadora (Figuras 8 e 9), observa-se que a temperatura tende a estabilizar-se em um valor inferior à temperatura máxima de operação ($65^\circ C$). Por outro lado, quando não há limitação de corrente (Figura 10), a temperatura tende a ultrapassar os valores máximos de operação da pilha.

Pela tendência de variação da temperatura da pilha no experimento sem limitação de corrente, verifica-se que o resfriamento do módulo ELE foi subdimensionado e não consegue extrair todo o excesso de calor. Esta ascensão da temperatura também é confirmada na Figura 3. Portanto, o sistema de resfria-

mento teria de ser modificado para que a pilha pudesse operar continuamente à máxima potência.

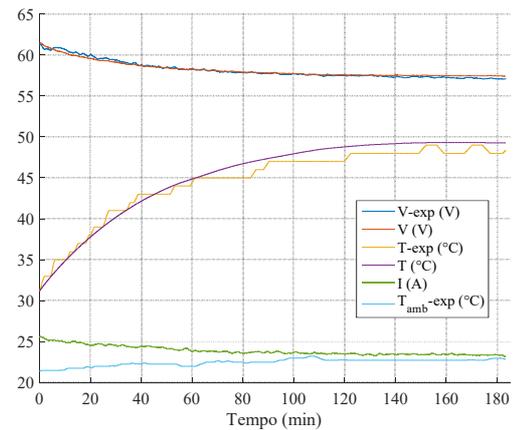


Figura 8. Operação do ELE com limitação de corrente em 25 A

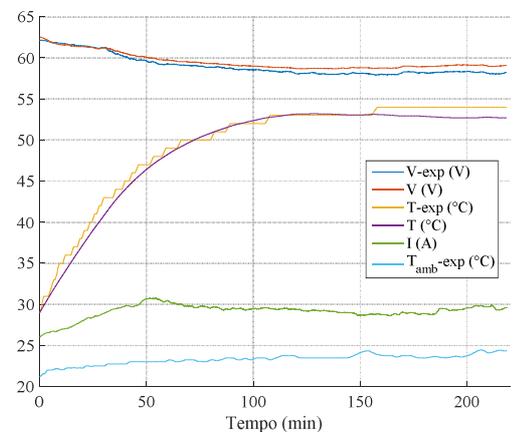


Figura 9. Operação do ELE com limitação de corrente em 30 A

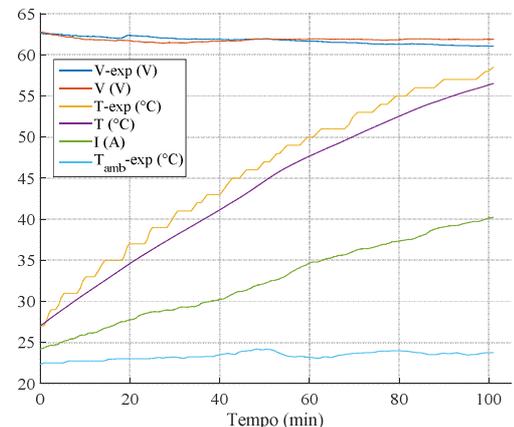


Figura 10. Operação do ELE sem limitação de corrente

As Figuras 11 e 12 apresentam resultados complementares do experimento da Figura 10. Na Figura 11 são apresentadas as potências envolvidas na operação da pilha, em que os sinais na forma " \dot{Q}_a " são representados como " dQ_a ". A Figura 12 expressa os sinais da Figura 11 normalizados em relação à potência elétrica de entrada da pilha eletrolisadora de forma a ilustrar o balanço de energia da pilha.

Pela Figura 12, nota-se que praticamente metade da potência fornecida à pilha é utilizada para geração de H_2 e em torno de 28% é convertida em calor.

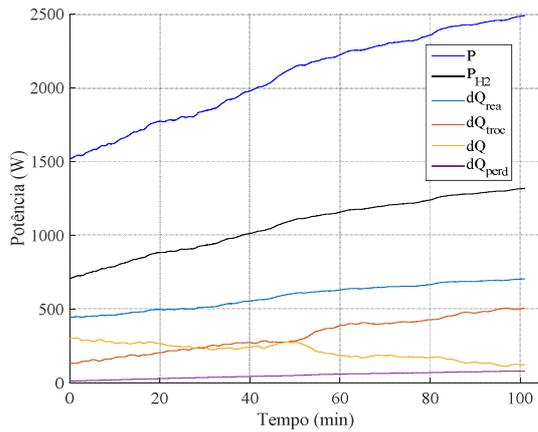


Figura 11. Potências na operação da pilha eletrolisadora

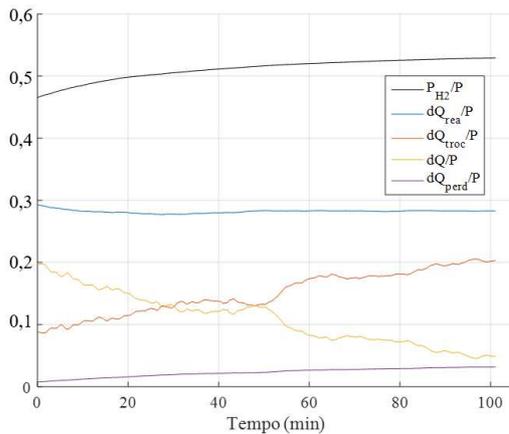


Figura 12. Balanço de energia da pilha eletrolisadora

A Figura 13 apresenta os resultados das simulações da pilha operando sem a ação do trocador de calor. Para fins de comparação, considerou-se que a corrente da pilha possui comportamento similar à Figura 10, ou seja, não há limitação de corrente máxima, mas ela aumenta de forma gradativa em função da temperatura (controle automático do módulo).

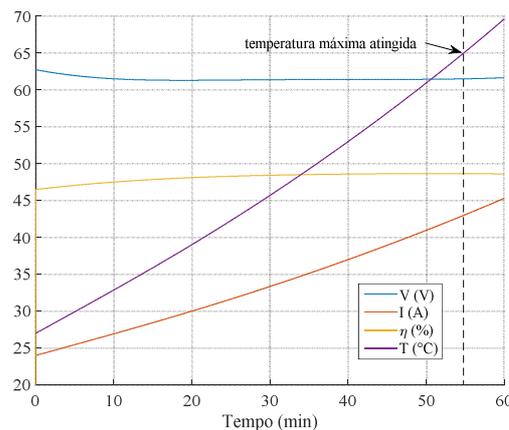


Figura 13. Operação da pilha eletrolisadora sem resfriamento

Uma vez que não estão sendo consideradas as trocas térmicas para resfriamento da pilha, a temperatura máxima de operação rapidamente é atingida, o que ocorre próximo aos 55 min da simulação.

6 Reaproveitamento de calor do ELE

Para evitar que a pilha atinja a sua temperatura máxima é imprescindível a extração do calor excedente. Uma vez que essa energia térmica é removida e reaproveitada, ela é incluída na energia total disponível na saída da pilha, o que aumenta a eficiência do ELE. Para avaliar o reaproveitamento de calor foi considerado um sistema ideal de trocas térmicas e considerou-se que a corrente da pilha aumenta com a temperatura (Figura 10).

Para garantir uma pequena margem de segurança, considerou-se que o sistema de trocas térmicas remove todo o excesso de calor da pilha sempre que a sua temperatura seja superior a 60 °C, se ela for inferior não há trocas de calor.

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados da simulação. Pela Figura 14 verifica-se que a temperatura de 60 °C é atingida aos 49 min da simulação, quando o trocador de calor entra em ação. Após isto, a temperatura não sofre mais elevação, visto que todo o calor excedente gerado na pilha é removido. A corrente elétrica fica limitada em 40,5 A (dependente da temperatura). Antes do trocador de calor entrar em operação, a energia total aproveitada na saída da pilha é equivalente à quantidade de energia contida no H₂ produzido. Quando o trocador de calor entra em ação, toda a energia removida por ele é considerada reaproveitada e, então, incluída à energia total disponível na saída da pilha (P_{tot}), o que leva a um aumento da eficiência do eletrolisador.

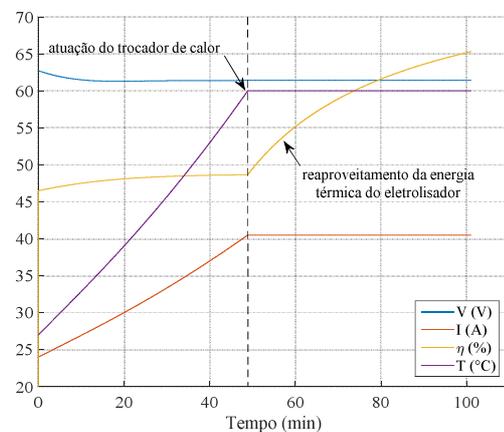


Figura 14. Operação do ELE com máximo reaproveitamento de calor

Aos 100 min da simulação, a energia total utilizada pelo ELE foi de 3.754 Wh, sendo 2.453 Wh aproveitados na saída da pilha, 403 Wh utilizados para aquecimento até 60 °C e 115 Wh perdidos em trocas térmicas com o ambiente. A eficiência do ELE atingiu 65%, tendendo a 78% em regime permanente.

Para se obter resultados mais próximos a uma situação prática, simulou-se a operação da pilha com diferentes níveis de eficiência do trocador de calor. A Figura 16 apresenta estes resultados, onde se verifica que o reaproveitamento da energia térmica excedente, mesmo com pequenos níveis de eficiência do trocador de calor (η_{troc}), contribui significativamente

para o aumento da eficiência final do ELE. No caso de somente metade do calor ser efetivamente reaproveitado, a eficiência final do ELE atinge 64,5%, ou seja, um ganho líquido de 16% em relação à operação sem reaproveitamento da energia térmica.

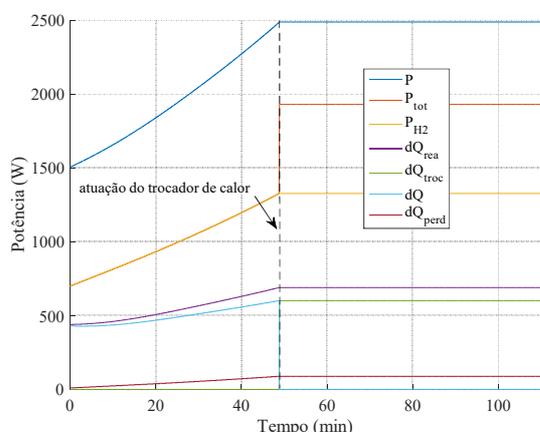


Figura 15. Potências envolvidas na operação do ELE com máximo reaproveitamento de calor

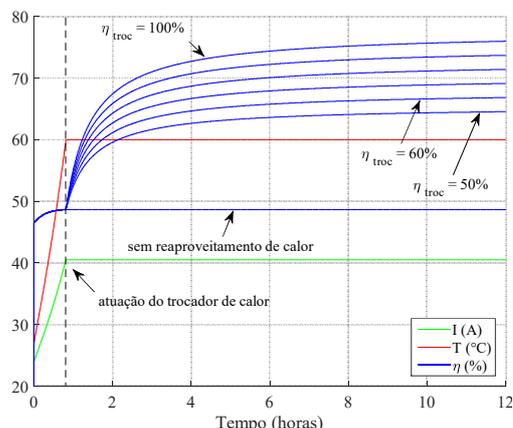


Figura 16. Operação do ELE com diferentes níveis de eficiência do reaproveitamento do calor

7 Conclusão

Este trabalho trata da avaliação do reaproveitamento de calor em um eletrolisador alcalino para aumento de sua eficiência. O ELE avaliado é um equipamento que compõe uma planta experimental de um AEH2 do laboratório do CEESP/UFMS.

O ELE foi modelado e alguns de seus parâmetros foram ajustados através de experimentos. Os resultados das simulações se mostraram condizentes com os dados levantados experimentalmente.

Foi verificado que o sistema de resfriamento do módulo ELE foi subdimensionado e não consegue remover todo o excesso de calor gerado na eletrólise.

O modelo desenvolvido permitiu estimar a geração de calor no ELE e verificou-se que se metade da energia térmica for reaproveitada, a sua eficiência total terá um ganho líquido de 16% (aumenta de 48,5% para 64,5%). No caso de um trocador de calor ideal, o nível de eficiência atingido seria de 78%.

Referências Bibliográficas

- Carnieletto, R. (2011). *Aproveitamento de energia vertida turbinável para produção de hidrogênio e geração distribuída*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.
- Gonzatti, F. et al. (2016). 'Experimental hydrogen plant with metal hydrides to store and generate electrical power'. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 17, No. 1.
- Green, D.W. & Perry, R.H. (2007). *Perry's chemical engineers' Handbook*. Ed. 8, New York: McGraw-Hill.
- International Energy Agency. (2014). *Key World Energy Statistics 2017*, Paris.
- International Energy Agency. (2015). *Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells*, Paris.
- Larminie, J. & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained*. Ed. 2, New York: John Wiley & Sons.
- MathWorks. (2018a). *Curve Fitting Toolbox*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html> (Acessado em 4 de Abril de 2018).
- MathWorks. (2018b). *Fit nonlinear regression model*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/stats/fitnlm.html> (Acessado em 4 de Abril de 2018).
- MathWorks. (2018c). *Response Optimization Tool*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/sldo/ref/responseoptimizationtool-app.html> (Acessado em 4 de Abril de 2018).
- McPhy Energy. (2015). HP Electrolyzer [Online]. Disponível em: <https://mcphe.com/en/> (Acessado em 4 de Abril de 2018).
- Meena, N. et al. (2014). 'Need and comparison of energy storage technologies: a review'. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 177–184.
- Miller, T. & Edmonds, M. (2013). 'Energy storage can enable wider deployment of distributed generation'. In *22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2013*. Stockholm.
- Parizzi, J.B. (2008). *Utilização avançada da capacidade excedente de sistemas de transmissão CCAT para produção de oxigênio e hidrogênio*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.
- Revankar, S. & Majumdar, P. (2014). *Fuel cells: principles, design and analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Ulleberg, O. (2003). 'Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach'. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 21–33.
- United Nations. (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. Framework Convention on Climate Change.
- Valverde-Isorna, L. et al. (2016). 'Modelling the performance of wind-hydrogen energy systems: case study the Hydrogen Office in Scotland/UK'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 1313–1332.
- Winterbone, D. & Turan, A. (2015). *Advanced thermodynamics for engineers*. Ed. 2, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Zakeri, B. & Syri, S. (2015). 'Electrical energy storage systems: a comparative life cycle cost analysis'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 569–596.