

3

Métodos Experimentais

3.1

Descrição da célula de combustível testada

Existem três principais componentes de uma célula de combustível: o processador de combustível que extrai hidrogênio do gás natural ou propano, a pilha da célula que converte hidrogênio em eletricidade e a unidade de potência que converte eletricidade produzida pela pilha em potência de alta qualidade que pode ser utilizada em casa.

O processador é formado por dois componentes: o reformador de combustível e a unidade de limpeza do monóxido de carbono. O reformador transforma o gás natural em um gás rico em hidrogênio chamado reformado. Em seguida, este reformado vai para a unidade de limpeza, onde o sistema reduz a quantidade de CO. Após deixar o reformador, ele entra na pilha, que é composta de várias células para produzir potência (kW). Posteriormente, o inversor transforma alta tensão DC em 120-240 volts AC. As dimensões médias desta unidade são 84" X 32" X 68", como vista na Fig. 9 a seguir.



Figura 9: Módulos de uma célula de combustível.

Os módulos da célula de combustível são:

1. Módulo de Processamento do Combustível → converte gás natural em hidrogênio.
2. Módulo de Geração de Potência → combina hidrogênio com ar para criar uma potência de corrente contínua (DC).
3. Módulo Eletrônico de Potência → converte a potência de corrente contínua em potência de corrente alternada para uso em aplicações residências ou comerciais.
4. Módulo de Estocagem de Energia → garante a continuidade de potência durante as mudanças do sistema.
5. Módulo de Gerenciamento Térmico → otimiza o desempenho do sistema e fornece calor para uso da célula.

Tabela 6: Informações Gerais

Desempenho	Características do produto	5C
	Taxa de Potência Contínua	5 kWe (9kWt)
	Potência de saída	2,5–5 kWe (3-9 kWt)
	Voltagem	120/240 V @ 60 Hz
	Qualidade da Potência	IEEE 519
	Emissões	
		SOx , 1ppm
		Ruído < 60 dBa @ 1metro
Condições de Operação	Instalação	Externa
	Instalação elétrica	Corrente em Paralelo
	Combustível	Gás Natural

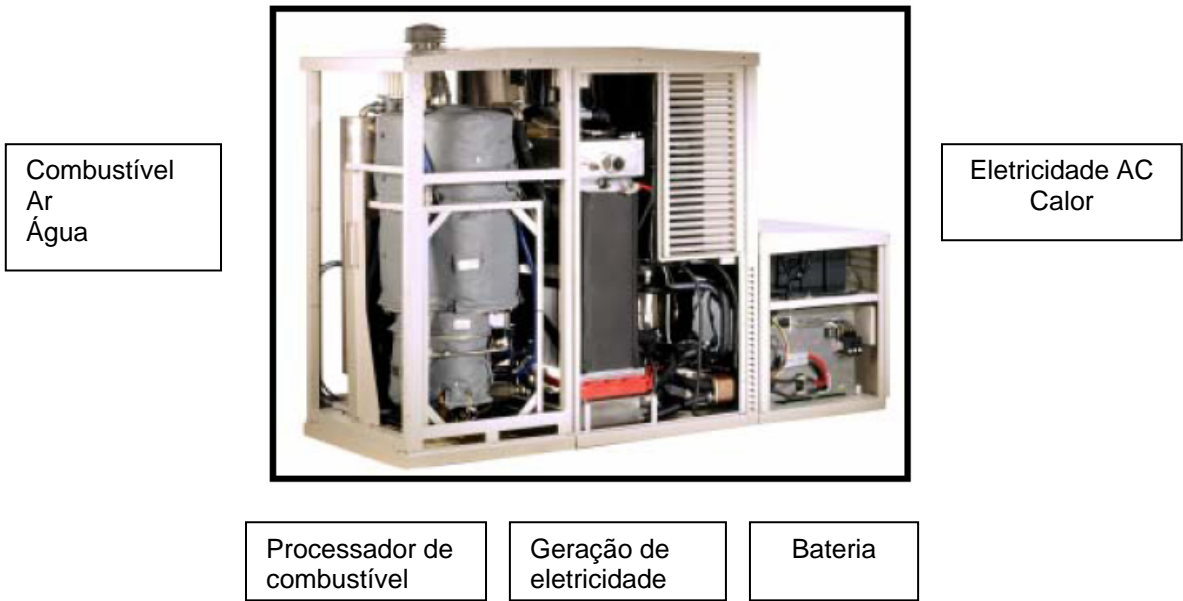


Figura 10: Sistema integrado.

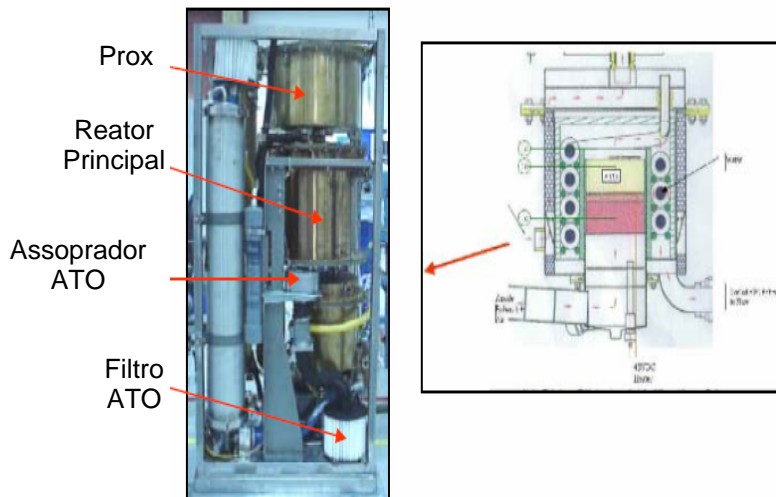


Figura 11: Processador de combustível.

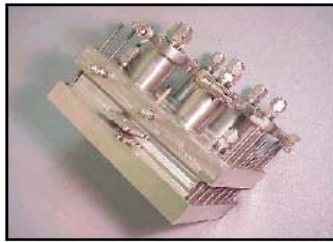


Figura 12: Geração de eletricidade – usa hidrogênio reformado para produzir eletricidade (corrente DC).



Figura 13: Bateria.

O inversor apresenta as seguintes funções:

- Converte a corrente que sai da pilha da DC para AC;
- Fornece eletricidade auxiliar;
- Fornece isolamento entre a pilha e a conexão AC;
- Fornece um sistema de controle de todas as estatísticas elétricas incluindo a tensão e a corrente da pilha.

3.2 Potencial da Cogeração

A célula de combustível instalada na PUC-Rio possui a capacidade de gerar calor para a cogeração. Este calor é produzido pela pilha (conjunto de 88 células de combustível) e pelo reformador de gás natural, durante a reforma. Quando um sistema para o aproveitamento desta energia térmica para cogeração não está instalado, um radiador rejeita calor para a atmosfera. Com a instalação de um sistema de cogeração para o aproveitamento da energia térmica, espera-se que a eficiência do sistema de célula de combustível (pilha e reformador) aumente sem que o sistema seja afetado.

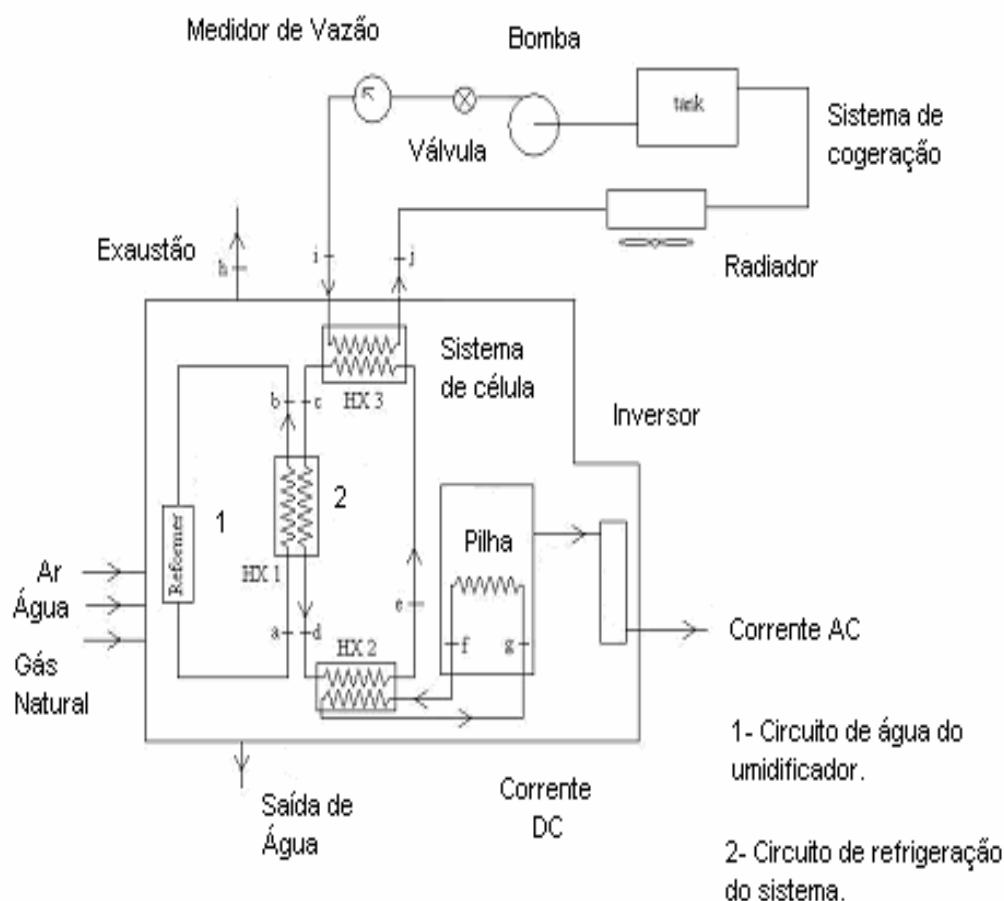


Figura 14: O esquema da cogeração na célula de combustível.

A Fig. 14 mostra um esquema básico da célula de combustível e dos trocadores de calor. A pilha rejeita calor que é aproveitado através da circulação de óleo térmico e rejeitado no trocador HX2. O calor nesse trocador de calor é

liberado para um circuito de propileno glicol e rejeitado no trocador HX3, onde se aproveita a energia para a cogeração. A água da cogeração, após ser aquecida, passa por um radiador com ventilador, de modo que possa haver uma dissipação da energia térmica, caso a água quente não possa ser utilizada. Esta passa para um tanque de armazenamento e a seguir, por uma bomba, que promove sua circulação. Um medidor de vazão é usado para controle. O calor proveniente da reforma do gás natural é liberado no trocador HX1, que contribui para a energia de cogeração. Todos os trocadores de calor são de corrente cruzada com fluidos misturados. A célula de combustível possui um relé de estado sólido, que é ligado quando está disponível a cogeração, assim pode ser ligada uma bomba, circulando a água. Também foi instalada uma chave contadora para que seja ligado o ventilador do radiador. Para o aproveitamento da energia da cogeração, construiu-se um sistema com uma bomba de 184 W, um medidor de vazão, um reservatório e dois medidores de temperatura tipo PT100. A vazão de água é regulada pela válvula, após a bomba. Um radiador automotivo foi instalado, para servir como sorvedouro de carga térmica. Assim, mediram-se as temperaturas de entrada e saída da água e a vazão de cogeração.

A célula de combustível é um conjunto formado pela pilha, onde estão 88 células, o reformador, onde se processa a produção de hidrogênio a partir do gás natural, e o inversor, que converte a corrente elétrica contínua, gerada pela célula em corrente alternada com 120 V.

Na produção de energia elétrica pela pilha, calor é gerado e recuperado através do trocador de calor HX2. Por esse trocador, circula óleo térmico. No reformador, com a quebra da molécula do gás natural para a produção de hidrogênio, calor também é gerado e recuperado no trocador HX1, que é um trocador de corrente cruzada com propileno glicol e água. As trocas de calor que ocorrem nos trocadores HX1 e HX2 são aproveitadas no trocador HX3, que é o trocador utilizado para o aquecimento de água na cogeração.

Para as medidas de capacidade da cogeração da célula, serão utilizados um circuito de água, um radiador de automóvel e uma bomba d'água. As temperaturas de entrada e saída da água no trocador HX3 serão medidas, bem como a vazão de água no hidrômetro. A vazão de água será regulada através de uma válvula de gaveta. O radiador funcionará como um sorvedouro de energia, representando o consumo de energia do usuário.



(a)

(b)

Figura 15: (a) Caixa d'água; (b) Instalação do hidrômetro.



(a)

(b)

Figura 16: (a) Bomba e (b) Entrada e saída da água da cogeração na célula de combustível.



Figura 17: O radiador como carga térmica.



Figura 18: O painel de disjuntores para a bomba d'água e para o ventilador do radiador.



Figura 19: O sistema de aquisição de dados.

O potencial de cogeração da célula pode ser estimado calculando o calor rejeitado pela pilha e pelo reformador, de acordo com os passos seguintes:

- Eficiência térmica da pilha (η_T), dada pela Eq. 24.
- Potência de saída DC.
- Energia química do hidrogênio (E_{H_2})

$$E_{H_2} = \frac{\dot{E}_{DC}}{\eta_T} \quad (32)$$

- Calor rejeitado para a atmosfera (Q_{rej}), Eq. 27.
- Vazão do gás natural (\dot{m}_{gas}).

- Poder calorífico inferior do gás (PCI).
- Energia química do gás (E_{gas}).

$$E_{gas} = \dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas} \quad (33)$$

- Porcentagem da energia química do gás usada na energia elétrica que sai da célula (η_G), dada pela Tab. 11.
- Porcentagem da energia química do gás rejeitada pela pilha em forma de calor (η_{pilha}).

$$\eta_{pilha} = \frac{Q_{rej}}{E_{gas}} \quad (34)$$

- Eficiência de conversão (η_{CE}).
- Percentual da energia química do gás perdida com a conversão DC/AC e auxiliares (η_{aux}).

$$\eta_{aux} = \frac{E_{DC}}{E_{gas}} \cdot (1 - \eta_{CE}) \quad (35)$$

- Percentagem da energia química do gás rejeitada pelo reformador como calor (η_{ref}).

$$\eta_{ref} = 1 - \eta_G - \eta_{pilha} - \eta_{aux} \quad (36)$$

- Porcentagem da energia química do gás que pode ser usada em cogeração (η_{cog}).

$$\eta_{cog} = \eta_{pilha} + \eta_{ref} \quad (37)$$

3.3 Simulação da cogeração

Nesta seção, será mostrada a simulação de cogeração da célula de combustível.

Como foi explicado anteriormente, a célula está instrumentada com sensores de medidas de temperatura e vazão de gás natural. Entretanto, não se conhece a composição, a vazão dos gases, a vazão do óleo térmico que circula na pilha, a vazão de propileno glicol no circuito de resfriamento da célula e nem a vazão de água dos diversos circuitos do reformador e das diversas etapas de reforma do gás natural. Então, baseando-se no balanço de energia com a equação da primeira lei da termodinâmica e nas equações de transferência de calor, e dados medidos durante a operação da célula de combustível, formou-se um sistema de equações para a simulação da cogeração. Nesta simulação, foram calculadas as vazões de água no reformador e na cogeração, de propileno glicol e óleo térmico no interior da pilha.

As equações de conservação de massa e energia e as equações de transferência de calor para trocadores de calor considerando-se a efetividade de cada um, podem ser escritas como:

Trocador HX 1:

$$\dot{m}_{wH}c_{p_a}(T_b - T_a) = \dot{m}_p c_{p_p}(T_c - T_d) \quad (38)$$

$$\varepsilon_{HX1} = \frac{\dot{m}_{wH}c_{p_a}(T_a - T_b)}{\dot{m}_p c_{p_p}(T_a - T_c)} \quad (39)$$

Trocador HX 2:

$$-\dot{Q}_{st} = \dot{m}_o c_{p_o}(T_g - T_f) \quad (40)$$

$$\dot{m}_p c_{p_p}(T_d - T_e) = \dot{m}_o c_{p_o}(T_g - T_f) \quad (41)$$

$$\varepsilon_{HX2} = \frac{\dot{m}_o c_{p_o}(T_f - T_g)}{\dot{m}_p c_{p_p}(T_f - T_d)} \quad (42)$$

Trocador HX 3:

$$\dot{m}_a c_{p_a}(T_i - T_j) = \dot{m}_p c_{p_p}(T_c - T_e) \quad (43)$$

$$\varepsilon_{HX3} = \frac{\dot{m}_a c_{p,a} (T_j - T_i)}{\dot{m}_p c_{p,p} (T_e - T_i)} \quad (44)$$

Nas equações acima, c_{pa} , c_{pp} e c_{po} , são os calores específicos da água, propileno glicol e do óleo térmico, respectivamente; \dot{m}_a , \dot{m}_p , \dot{m}_o e \dot{m}_{wH} são as vazões mássicas da água da cogeração, do propileno glicol, do óleo térmico e da água no umidificador, respectivamente; ε_{HX1} , ε_{HX2} e ε_{HX3} são as efetividades dos respectivos trocadores de calor e \dot{Q}_{st} é a parcela de calor liberada ao óleo térmico pela pilha.

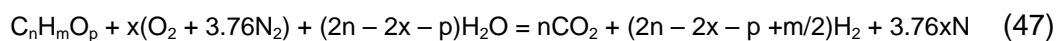
No Anexo II iremos apresentar os resultados do balanço de massa para o trocador de calor HX3, onde:

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{\dot{m}_q c_{p,q}}{\dot{m}_f c_{p,f}} \quad (45)$$

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{q,e} - T_{f,e}) \quad (46)$$

3.4 Conversão de combustível

Equação geral para conversão de combustível: Considerando-se a variação da conversão de combustível do reformador de vapor (SR) para a oxidação parcial (PO), utilizou-se uma equação geral publicada pela ANL (Laboratório Nacional de Argonne) que descreve essa conversão. A equação geral é:



onde x é a razão molar de oxigênio por combustível. A composição molar do gás e o número de moles de hidrogênio podem ser encontrados nos Anexos I e II, respectivamente.

3.5

Descrição das grandezas medidas e dos instrumentos

A célula tipo PEM de 5kW foi fabricada pela Plug Power. O modelo é totalmente instrumentado. Possui sensores de temperatura, pressão, tensão e corrente, sendo todos os dados medidos a cada minuto e armazenados em um computador.

Para o estudo em regime permanente, os valores médios de todas as grandezas, como a taxa de vazão volumétrica e a potência de saída, são medidas. A pilha da célula e a unidade de controle do reformador (SARC) fornecem informações através de uma variedade de sensores.

Foi utilizado um hidrômetro, para a medida de vazão de água, e dois PT 100 para as medidas de temperatura de entrada e saída de água da célula de combustível. Os dados de temperaturas foram lidos através de um multímetro HP, num programa independente do programa da célula de combustível.

3.6

Desempenho

A célula de combustível é uma tecnologia relativamente nova. Pouco se conhece sobre sua vida em operação e eficiência em aplicações residenciais. A eficiência oscila na faixa de 34-40%.

Para proteger sua operação, a célula possui alguns sistemas de proteção que a desligam automaticamente (ver Anexo III).

3.7

Incerteza de medição

As variáveis medidas nesta experiência foram V_{exit} , Stack DC Power, Average AC Power, FS2 Fuel Flow, H_2 Stoich Calc, vazão de água da cogeração e suas temperaturas de entrada e saída.

A incerteza absoluta de cada quantidade independentemente medida foi estimada como U_j . As medições são empregadas para calcular resultados, r , para este estudo. Com isso, iremos analisar como os erros nos x_i s propagam-se no cálculo de r a partir dos valores medidos.

Em geral, R pode ser expresso matematicamente como $r = r(X_1, X_2, \dots, X_j)$.

Podemos representar a análise de incerteza através da equação:

$$Ur = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} U_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_j} U_{x_j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (48)$$

onde,

$$U_{x_1} = (\sigma^2 + U_{x_1}^2)^{1/2} \quad (49)$$

sendo σ o desvio padrão e U_{x_1} a metade da incerteza da medição.

É comum no experimento encontrarmos alguns valores medidos que extrapolam a tendência dominante. Estes valores podem ser, de fato, medições erradas, como podem também representar certo fenômeno físico de interesse. Por este motivo, estes valores que fogem à tendência dominante não podem ser descartados sem recorrer a um critério consistente para sua eliminação.

Para aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores duvidosos, em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão para assim se eliminar os pontos duvidosos. Se diversos pontos extrapolarem o critério-limite estabelecido, é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado, ou que o processo sendo medido seja extremamente variável.

O critério de Chauvenet, então, fornece uma base consistente para tomar a decisão de excluir ou não um dado de um conjunto de valores medidos. Para sua aplicação, basta calcular a razão do desvio individual para o desvio padrão, ΔR , e comparar com um valor de referência, ΔR_0 . ΔR_0 depende do número de medidas, enquanto que ΔR é definida como:

$$\Delta R = (x_i - \bar{x}) / \sigma \quad (50)$$

O valor medido é rejeitado quando $\Delta R > \Delta R_0$.

- Com a Eq. 24 da eficiência térmica da pilha (η_T), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_T} = \eta_T \times \frac{U_{V_{exit}}}{V_{exit}} \quad (51)$$

- Com a Eq. 26 da energia química do hidrogênio (E_{H_2}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{E_{H_2}} = E_{H_2} \times \left[\left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{\eta_T}}{\eta_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (52)$$

- Com a Eq. 27 do calor rejeitado (Q_{rej}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{Q_{rej}} = Q_{rej} \times \left[\left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{\eta_T}}{\eta_T^2 \times \left(\frac{1}{\eta_T} - 1 \right)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (53)$$

- Com a Eq. 28 da eficiência do reformador (η_R), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_R} = \eta_R \times \left[\left(\frac{U_{Razão_{H_2}}}{Razão_{H_2}} \right)^2 + \left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{Vazão_{H_2}}}{Vazão_{H_2}} \right)^2 + \left(\frac{U_{V_{exit}}}{V_{exit}} \right)^2 + \left(\frac{U_{PCI}}{PCI} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (54)$$

- Com a Eq. 30 da eficiência térmica global da célula (η_G), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_G} = \eta_G \times \left[\left(\frac{U_{ACPower}}{ACPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{E_{gás}}}{E_{gás}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (55)$$

- Com a Eq. 33 da energia química do gás (E_{gas}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{E_{gas}} = \left[\left(\frac{U_{Vazão_{H_2}}}{Vazão_{H_2}} \right)^2 + \left(\frac{U_{PCI}}{PCI} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (56)$$

- Com a Eq. 34 da porcentagem da energia do gás rejeitada pela pilha (η_{pilha}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_{pilha}} = \left[\left(\frac{U_{Q_{rej}}}{Q_{rej}} \right)^2 + \left(\frac{U_{E_{gás}}}{E_{gás}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (57)$$

- Com a Eq. 35 do percentual de energia química do gás perdida com a conversão DC/AC e auxiliares (η_{aux}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_{aux}} = \left[\left(\frac{U_{DCPower}}{DCPower - ACPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{ACPower}}{DCPower - ACPower} \right)^2 + \left(\frac{U_{E_{gás}}}{E_{gás}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (58)$$

- Com a Eq. 36 da percentagem da energia química do gás rejeitada pelo reformador como calor (η_{ref}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$U_{\eta_{ref}} = \left[U_{\eta_G}^2 + U_{\eta_{pilha}}^2 + U_{\eta_{aux}}^2 \right]^{1/2} \quad (59)$$

- Com a Eq. 37 da percentagem da energia química do gás que pode ser usada em cogeração (η_{cog}), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$\eta_{cog} = \left[U_{\eta_{pilha}}^2 + U_{\eta_R}^2 \right]^{1/2} \quad (60)$$

- Com a Eq. 38 da quantidade de calor da cogeração (Q), obtivemos a equação de incerteza correspondente:

$$Q = \left[\left(c_{p_a} \times (T_s - T_e) \times U_{m_a} \right)^2 + \left(\dot{m}_a \times c_{p_a} \times U_{T_s} \right)^2 + \left(\dot{m}_a \times c_{p_a} \times U_{T_e} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (61)$$