

4

Redução de dados e análise da propagação das incertezas das medições

A determinação da incerteza de medição é importante porque as medidas obtidas são estimativas do resultado e é necessário saber o quanto este resultado aproxima-se do correto (Doiron e Stoup, 1997). Métodos têm sido desenvolvidos para determinar os limites a fim de que um resultado esteja o mais próximo possível do valor correto, sendo os referidos limites estabelecidos pela incerteza dos resultados.

Segundo Doiron e Stoup (1997), "o cálculo da incerteza de medição pode ser considerado como uma tentativa de definir, em concordância com regras padrão, os limites 'razoáveis' do resultado obtido".

A incerteza da medição é, geralmente, expressa como uma faixa de valores em torno do valor medido, e centrada simetricamente. Inclui todos os fatores que podem influenciar o resultado, tais como precisão e escala do instrumento, mudança de temperatura ambiente, distorção estrutural, velocidade e direção de aproximação do instrumento de medição e a força de medição, entre outros (Phillips, 1995).

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (IOS, 1995), "medição é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza"; "o resultado de uma medição é o valor atribuído a um mensurando, obtido por medição"; e "a expressão completa do resultado de uma medição inclui informações sobre a incerteza de medição".

No presente capítulo são apresentados os procedimentos para a redução dos dados experimentais, levando aos parâmetros relevantes para a análise do sistema,

delineados no capítulo anterior, junto com as incertezas das medições associadas a eles.

4.1.

Grupo Motor – Gerador e recuperação de calor dos gases de exaustão

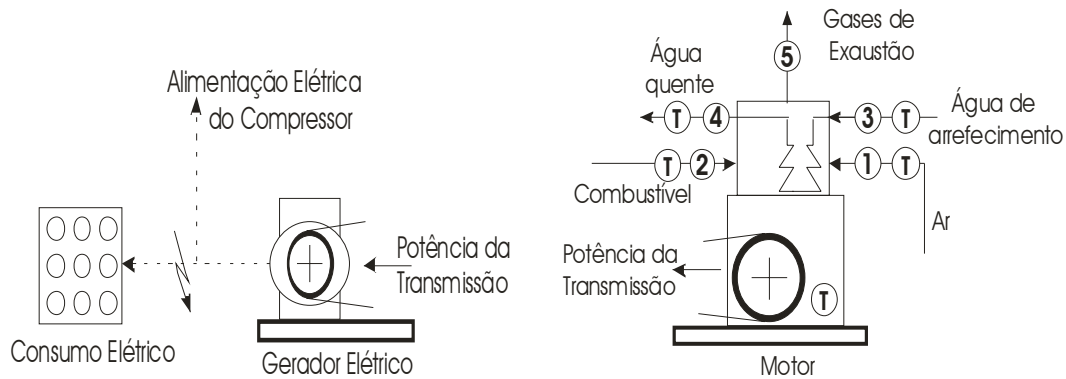


Figura 32 – Esquema de medição do conjunto motor – gerador

O conjunto Motor – Gerador é analisado através do balanço de energia:

$$\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_f H_f + \dot{m}_{wm} h_{w3} = P_{EG} + \dot{m}_{wm} h_{w4} + \dot{m}_g h_{g5} + \dot{Q}_{l,EG} \quad (4.1)$$

A energia consumida pelo sistema de cogeração e trigeração é calculada em função da vazão mássica de combustível e do poder calorífico inferior do mesmo, e da energia contida no ar que forma parte de mistura combustível, segundo a expressão (4.2) abaixo:

$$\dot{E}_{SG} = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} T_{ar} + \dot{m}_f H_f \quad (4.2)$$

O consumo que conta, para os resultados, é $\dot{m}_f H_f$.

O calor específico do ar, $c_{p,ar}$, é calculado usando a equação que se apresenta na figura 33, e a incerteza no cálculo da referida propriedade, $\delta c_{p,ar}$, foi avaliada, de acordo com a própria figura, em $\pm 0,0005 \text{ kJ/kg.K}$.

A vazão de ar é medida com o sistema de tanque e orifício (*Go-Power*) com incerteza de 5% da vazão medida.

A incerteza na medição da temperatura do ar, δT_{ar} , é de $\pm 0,2$ °C.

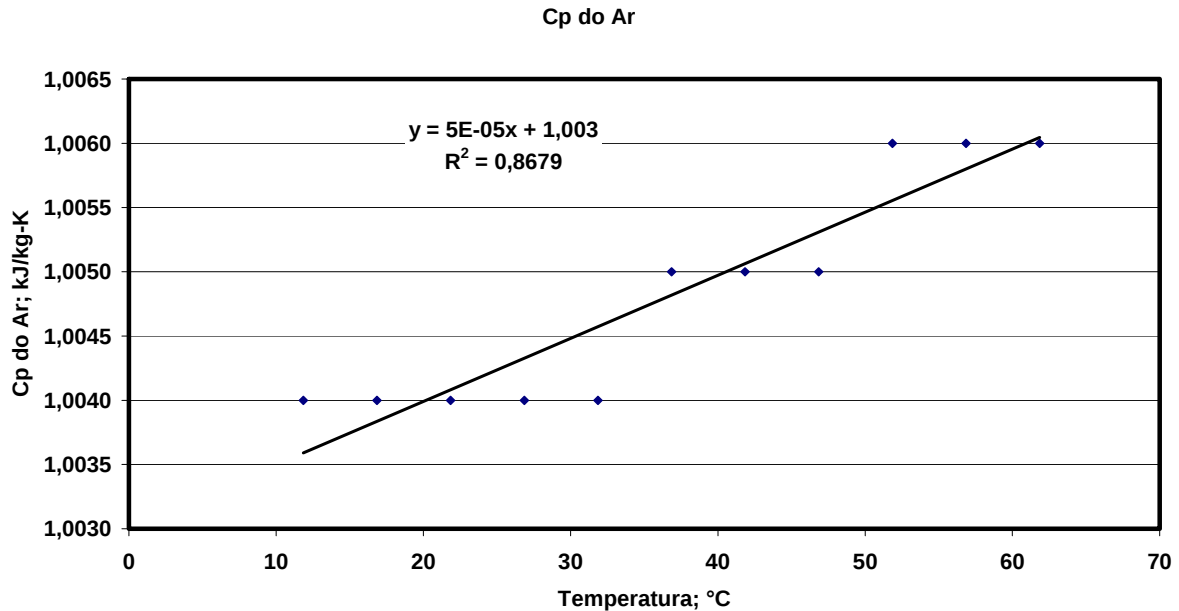


Figura 33 – Gráfico e ajuste de curva do calor específico a pressão constante do ar

Com base nos valores apresentados obtém-se a incerteza no cálculo da parcela de energia correspondente ao ar, segundo a expressão:

$$\delta \dot{E}_{ar} = \sqrt{\left(\dot{m}_{ar} c_{p,ar} \delta T_{ar}\right)^2 + \left(\dot{m}_{ar} T_{ar} \delta c_{p,ar}\right)^2 + \left(c_{p,ar} T_{ar} \delta \dot{m}_{ar}\right)^2} \quad (4.3)$$

situando-se o valor da referida incerteza na faixa de $\pm 0,025$ kW .

Já na parcela referida à energia do combustível, considera-se somente a incerteza referente à medição do combustível, o que é expresso pela equação (4.4), no caso do óleo Diesel puro, e por (4.5) no caso em que o motor opera consumindo, também, gás natural veicular.

$$\delta \dot{E}_f = H_{Diesel} \delta \dot{m}_{Diesel} \quad (4.4)$$

$$\delta \dot{E}_f = \sqrt{(H_{Diesel} \delta \dot{m}_{Diesel})^2 + (H_{GNV} \delta \dot{m}_{GNV})^2} \quad (4.5)$$

A incerteza na medição da vazão de óleo Diesel, $\delta \dot{m}_{Diesel}$, situa-se na faixa de $\pm 6,715 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ e a da vazão de GNV, $\delta \dot{m}_{GNV}$, na faixa de $\pm 4,215 \times 10^{-6} \text{ kW}$. Ambos os valores são fornecidos pelos fabricantes dos sensores usados na medição das respectivas grandezas. O valor médio da incerteza no cálculo da energia do combustível, $\delta \dot{E}_f$, ficou, portanto, na faixa de $\pm 8,53 \times 10^{-5} \text{ kW}$.

A parcela correspondente à potência elétrica produzida pelo grupo motor – gerador é calculada como se apresenta a seguir:

$$P_{GE} = V_{GE} I_{GE} \quad (4.6)$$

A incerteza na medição da voltagem, δV_{GE} , tem um valor de $\pm 0,5V$ e a da corrente, δI_{GE} , um valor de $\pm 0,5A$. Com esses valores é calculada a incerteza da potência elétrica segundo a expressão:

$$\delta^2 P_{GE} = (V_{GE} \delta I_{GE})^2 + (I_{GE} \delta V_{GE})^2 \quad (4.7)$$

obtendo-se um valor de incerteza para toda a faixa de potência testada de $\pm 110W$, que representa um valor máximo de $\pm 3,1\%$ e um valor mínimo de $\pm 1,5\%$ da potência gerada.

A parcela correspondente ao calor liberado pelo motor, equação (4.8), se divide em perdas para o ambiente, $\dot{Q}_{l,EG}$, e no calor recuperado através da água de arrefecimento, $\dot{Q}_{wm}$, sendo este último calculado pela equação (4.9).

$$\dot{Q}_{EG} = \dot{Q}_{l,EG} + \dot{Q}_{wm} \quad (4.8)$$

$$\dot{Q}_{wm} = \dot{m}_{wm} c_{p,wm} (T_{w4} - T_{w3}) \quad (4.9)$$

Para o cálculo do calor específico da água, assim como de outras propriedades que serão apresentadas posteriormente, assumiu-se que se trata de água pura à pressão atmosférica. Com base no anterior, usou-se o pacote REFPROP 7.0 do NIST, (Lemmon et al., 2002), gerando-se tabelas do tipo *Propriedade vs. Temperatura*, cujos valores posteriormente foram ajustados obtendo-se os gráficos e as respectivas equações apresentadas nas figuras 34 a 36.

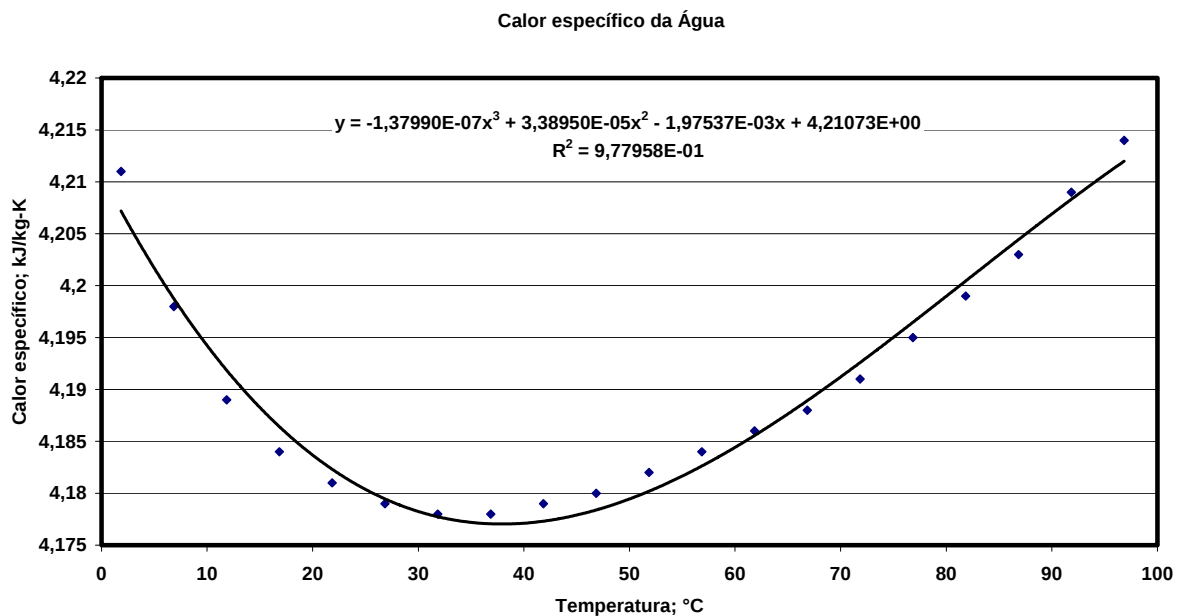


Figura 34 – Gráfico e ajuste de curva do calor específico a pressão constante da água

A incerteza do calor específico da água foi determinada em função da temperatura, segundo a equação (4.10), com o apoio da equação apresentada na figura 34, e calculada, segundo a equação apresentada na figura 35, para cada ponto testado, de forma independente.

$$\delta c_{p,w} = f(T_w; \delta T_w) \quad (4.10)$$

obtiveram-se valores da incerteza do calor específico da água entre $\pm 0,0001$ e $\pm 0,0006 \text{ kJ/kg.K}$.

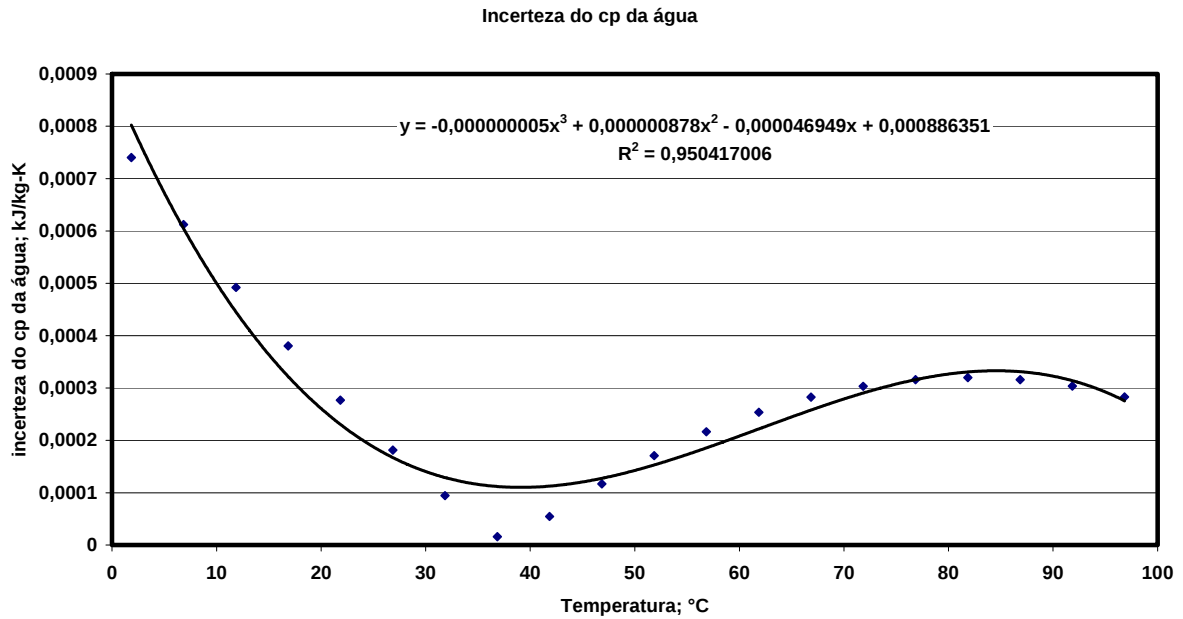


Figura 35 – Gráfico e ajuste de curva da incerteza do calor específico a pressão constante da água

A vazão de água no motor, $\dot{m}_{wm}$, e, por extensão, no sistema de recuperação de calor, foi calculada a partir da vazão volumétrica $\dot{V}_{wm}$, medida com um rotâmetro na entrada do motor, segundo a expressão:

$$\dot{m}_{wm} = \dot{V}_{wm} \rho_{wm(T_3)} \quad (4.11)$$

onde $\rho_{wm(T_3)}$ é a massa específica da água à temperatura de entrada no motor.

A incerteza da vazão mássica da água, nos diferentes dispositivos e subsistemas, é calculada pela expressão seguinte:

$$\delta \dot{m}_w = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_w}{\partial \dot{V}_w} \delta \dot{V}_w \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_w}{\partial \rho_w} \delta \rho_w \right)^2} \quad (4.12)$$

A incerteza da massa específica da água, $\delta \rho_w$, é determinada em função da incerteza da temperatura segundo a expressão:

$$\delta\rho_w = \frac{\partial\rho_w}{\partial T_w} \delta T_w \quad (4.13)$$

Com apoio da equação apresentada na figura 36, e com o valor da incerteza na medição da temperatura, δT_w , de $\pm 0,2$ °C, a incerteza da massa específica da água foi estipulada em $\pm 0,086$ kg/m³.

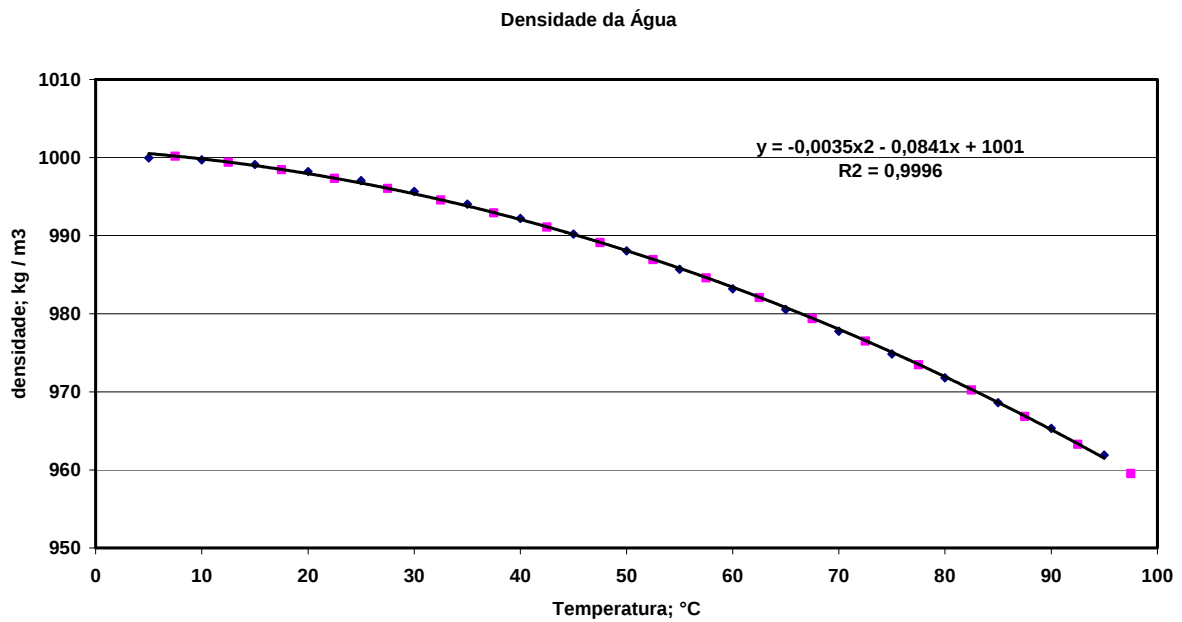


Figura 36 – Gráfico e ajuste de curva da massa específica da água

A partir desses valores, e segundo a equação (4.12), foram obtidos os seguintes valores da incerteza das vazões de água no evaporador da bomba de calor, no condensador da bomba de calor, e no motor e sistema de recuperação de calor, respectivamente:

$$\delta\dot{m}_{wEV} = \pm 0,00166 \text{ kg/s}$$

$$\delta\dot{m}_{wCD} = \pm 0,0136 \text{ kg/s}$$

$$\delta\dot{m}_{wEV} = \pm 0,00415 \text{ kg/s}$$

A incerteza da diferença de temperatura foi calculada de acordo com a expressão que segue:

$$\delta\Delta T_w = \sqrt{2\delta T_w} \quad (4.14)$$

ficando seu valor em $\pm 0,28 \text{ }^\circ\text{C}$.

A incerteza do calor de arrefecimento do motor foi calculada de acordo com a equação (4.15):

$$\delta\dot{Q}_{wm} = \sqrt{\left(\dot{m}_{wm} c_{p,wm} \delta\Delta T_{wm}\right)^2 + \left(\dot{m}_{wm} \Delta T_{wm} \delta c_{p,wm}\right)^2 + \left(c_{p,wm} \Delta T_{wm} \delta\dot{m}_{wm}\right)^2} \quad (4.15)$$

ficando seu valor médio em $\pm 0,33 \text{ kW}$ com valor máximo de $\pm 0,35 \text{ kW}$ e mínimo de $\pm 0,25 \text{ kW}$.

4.1.1.

Recuperação de calor dos gases de exaustão no economizador

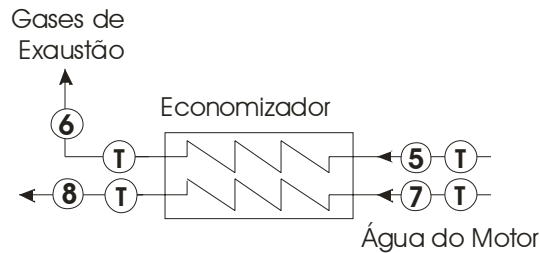


Figura 37 – Esquema de medição do economizador

O calor recuperado pela água, a partir dos gases de exaustão, pode ser calculado mediante o seguinte balanço de energia:

$$\dot{Q}_{wEC} = \dot{m}_{wEC} c_{p,wEC} (T_{w8} - T_{w7}) \quad (4.16)$$

Baseando-se no acima exposto e analogamente à equação (4.15), obteve-se um valor médio da incerteza do calor recuperado, $\delta\dot{Q}_{wEC}$, de $\pm 0,33 \text{ kW}$, com valores máximos de $\pm 0,45 \text{ kW}$ e mínimos de $\pm 0,24 \text{ kW}$.

4.1.2.

Dados medidos e reduzidos no subsistema Motor – Gerador

Para a análise do subsistema de geração de potência e recuperação de calor da camisa do motor e dos gases de exaustão foram coletados os seguintes dados:

1. Vazão volumétrica de água no sistema de recuperação de calor
2. Vazão mássica de ar
3. Vazão mássica de óleo Diesel
4. Vazão volumétrica de GNV
5. Temperatura de entrada da água no motor
6. Temperatura de saída da água do motor
7. Temperatura de saída da água do economizador
8. Voltagem do gerador
9. Corrente do gerador

e foram calculadas as seguintes grandezas:

1. Energia do combustível
2. Energia do ar
3. Calor de arrefecimento
4. Calor recuperado no economizador
5. Potência elétrica gerada

4.2.

Bomba de Calor

A aplicação de uma bomba de calor acionada eletricamente representa um diferencial do presente trabalho a respeito dos sistemas de cogeração e trigeração referenciados na bibliografia consultada. Dedicou-se, por este motivo, especial

atenção à instrumentação, medição e redução dos dados relacionados a este componente.

4.2.1. Compressor

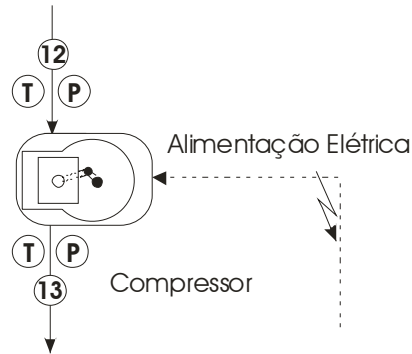


Figura 38 – Esquema de medição do compressor

A potência consumida pelo compressor da bomba de calor por compressão de vapor é calculada pela equação que segue:

$$P_{CP} = V_{CP} I_{CP} \cos(\varphi) \quad (4.17)$$

Com os valores da incerteza na medição da voltagem, δV_{GE} , e a da corrente, δI_{GE} , e estimando-se, segundo apresentado anteriormente, o valor do fator de potência, $\cos(\varphi)$, em 0,9, calcula-se a incerteza da potência elétrica analogamente à potência elétrica gerada pelo sistema:

$$\delta P_{CP} = \sqrt{(V_{CP} \cos(\varphi) \delta I_{CP})^2 + (I_{CP} \cos(\varphi) \delta V_{CP})^2} \quad (4.18)$$

obtendo-se um valor médio da incerteza para toda a faixa de potência testada de $\pm 98,0W$ que representa aproximadamente $\pm 5,0\%$.

Através do balanço de energia no refrigerante pode-se calcular a taxa de trabalho de compressão:

$$\dot{m}_r h_{r12} + \dot{W}_{CP} = \dot{m}_r h_{r13} \quad (4.19)$$

A figura 39 representa a dependência da incerteza no cálculo da entalpia específica do refrigerante das incertezas na medição da temperatura e pressão do refrigerante.

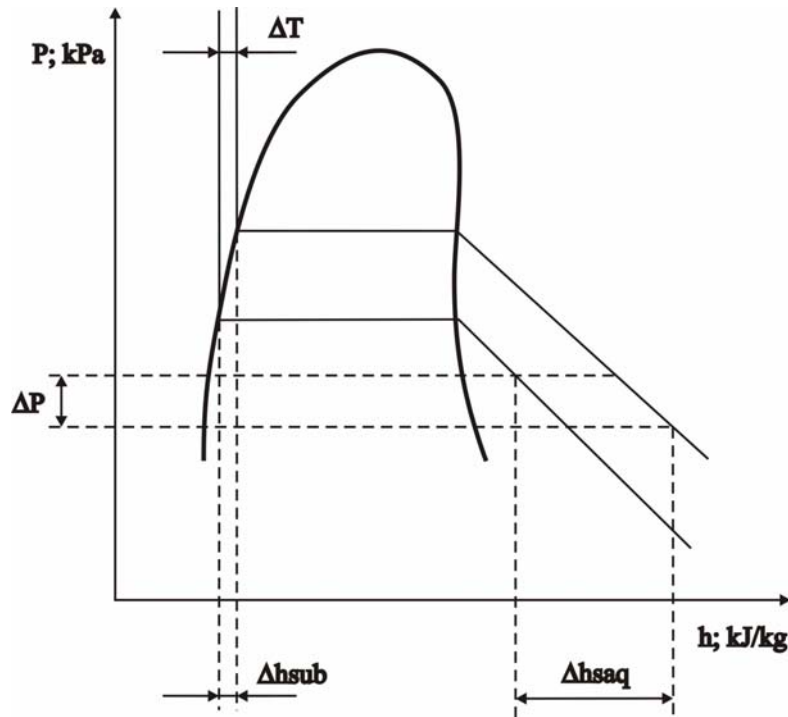


Figura 39 – Influência das incertezas da temperatura e da pressão sobre a incerteza no cálculo da entalpia do refrigerante

O valor da incerteza da entalpia específica, na região de líquido subresfriado e, conseqüentemente, na região de mistura, é principalmente influenciado pela temperatura do refrigerante. Já, na região de vapor superaquecido, aprecia-se a dependência das duas medições (pressão e temperatura do refrigerante).

Usando-se dos valores da incerteza na medição da pressão, δP_{ref} , de 0,2 psi e da temperatura, δT_{ref} , de 0,2 °C, obtiveram-se valores máximos da incerteza no cálculo da entalpia específica do refrigerante, δh_{ref} , de $\pm 0,45$ kJ/kg nas regiões de subresfriamento e mistura e de $\pm 0,2$ kJ/kg na região de superaquecimento.

De forma análoga, procedeu-se ao cálculo das incertezas da entropia do refrigerante, δs_{ref} . Foram obtidos valores máximos desta incerteza de $\pm 0,002 \text{ kJ/kg.K}$ nas regiões de subresfriamento e mistura. Já, na região de superaquecimento, obteve-se valores máximos de $\pm 0,001 \text{ kJ/kg.K}$.

Desta forma, a incerteza no cálculo da diferença de entalpia específica na compressão é calculada como:

$$\delta \Delta h = \sqrt{\delta^2 h_{r13} + \delta^2 h_{r12}} \quad (4.20)$$

obtendo-se valores na ordem de $\pm 0,28 \text{ kJ/kg}$.

Da mesma forma:

$$\delta \Delta s = \sqrt{\delta^2 s_{r13} + \delta^2 s_{r12}} \quad (4.21)$$

obtendo-se valores na ordem de $\pm 0,0016 \text{ kJ/kg.K}$.

4.2.2. Condensador

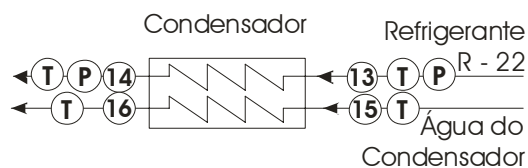


Figura 40 – Esquema de medição do condensador

De forma análoga à usada no processo de compressão, a incerteza no cálculo da diferença de entalpia específica na condensação é calculada como:

$$\delta \Delta h = \sqrt{\delta^2 h_{r14} + \delta^2 h_{r13}} \quad (4.22)$$

obtendo-se valores na ordem de $\pm 0,49 \text{ kJ/kg}$.

Da mesma forma:

$$\delta\Delta s = \sqrt{\delta^2 s_{r14} + \delta^2 s_{r13}} \quad (4.23)$$

obtendo-se valores na ordem de $\pm 0,002 \text{ kJ/kg.K}$.

A incerteza na medição da diferença de temperatura na água do condensador mostrou-se um ponto sensível para a determinação da incerteza no cálculo do calor de condensação e, conseqüentemente, do *COP* de aquecimento da bomba de calor. Essa grandeza também influencia o cálculo da incerteza da *ECR* do sistema de cogeração e trigeração.

O valor da referida incerteza foi reduzido para $\pm 0,1^\circ\text{C}$ mediante a calibração dos termopares de entrada e saída da água do condensador. Realizou-se, *a posteriori*, o ajuste das respectivas medições com a correspondente consideração deste ajuste nos cálculos envolvendo o condensador.

Do balanço de energia no condensador, no lado da água, obtém-se:

$$\dot{Q}_{CD} = \dot{m}_{wc} c_{p,wc} (T_{w16} - T_{w15}) \quad (4.24)$$

e a incerteza da medição do calor de condensação, $\delta\dot{Q}_{CD}$, é calculada de forma análoga à equação (4.15), considerando os valores já relacionados das incertezas do cálculo do calor específico da água e da vazão da água no condensador:

$$\delta\dot{Q}_{CD} = \sqrt{(\dot{m}_{wc} c_{p,wc} \delta\Delta T_{wc})^2 + (\dot{m}_{wc} \Delta T_{wc} \delta c_{p,wc})^2 + (c_{p,wc} \Delta T_{wc} \delta\dot{m}_{wc})^2} \quad (4.25)$$

obtendo-se valores médios de $\pm 0,35 \text{ kW}$.

4.2.3. Válvula termostática de expansão

O processo de expansão do refrigerante na válvula termostática de expansão é considerado adiabático e isentrópico, passando do estado de líquido subresfriado ao de mistura vapor - líquido. Por este motivo, a incerteza da entalpia específica do refrigerante só depende da temperatura (vide epígrafe 4.2.1).

Obtiveram-se valores da incerteza da entalpia, δh_{ref} , de $\pm 0,45 \text{ kJ/kg}$ e da incerteza da entropia, δs_{ref} , de $\pm 0,002 \text{ kJ/kg.K}$.

4.2.4. Evaporador

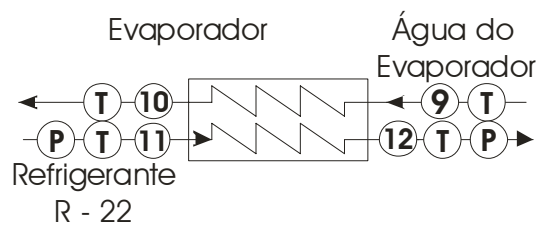


Figura 41 – Esquema de medição do evaporador

Analogamente à análise apresentada nas seções anteriores, a incerteza no cálculo da diferença de entalpia específica na evaporação é calculada como:

$$\delta \Delta h = \sqrt{\delta^2 h_{r11} + \delta^2 h_{r12}} \quad (4.26)$$

obtendo-se valores na ordem de $\pm 0,49 \text{ kJ/kg}$.

Da mesma forma:

$$\delta \Delta s = \sqrt{\delta^2 s_{r11} + \delta^2 s_{r12}} \quad (4.27)$$

obtendo-se valores na ordem de $\pm 0,0025 \text{ kJ/kg.K}$

Do balanço de energia no lado da água se obtém:

$$\dot{Q}_{EV} = \dot{m}_{we} c_{p,we} (T_{w9} - T_{w10}) \quad (4.28)$$

e a incerteza da medição do calor de evaporação, $\delta\dot{Q}_{EV}$, é calculada de forma análoga à equação (4.15), considerando os valores já relacionados das incertezas do cálculo do calor específico da água e da vazão da água no evaporador:

$$\delta\dot{Q}_{EV} = \sqrt{(\dot{m}_{we} c_{p,we} \delta\Delta T_{we})^2 + (\dot{m}_{we} \Delta T_{we} \delta c_{p,we})^2 + (c_{p,we} \Delta T_{we} \delta\dot{m}_{we})^2} \quad (4.29)$$

obtendo-se valores médios de $\pm 0,15 \text{ kW}$.

4.2.5. Vazão de refrigerante

A vazão de refrigerante é calculada como a média entre as vazões calculadas, mediante o balanço de energia entre o refrigerante e a água, no evaporador e no condensador.

A incerteza deste cálculo pode ser expressa segundo se apresenta na equação que segue:

$$\delta\overline{\dot{m}_{ref}} = \sqrt{(0,5\delta\dot{m}_{ref,EV})^2 + (0,5\delta\dot{m}_{ref,CD})^2} \quad (4.30)$$

e as incertezas no cálculo da vazão em cada um dos componentes são calculadas a partir das equações (4.31) e (4.32):

$$\delta\dot{m}_{ref,EV} = \frac{\delta\dot{Q}_{EV}}{\Delta h_{r,EV}} \quad (4.31)$$

$$\delta \dot{m}_{ref,CD} = \frac{\delta \dot{Q}_{CD}}{\Delta h_{r,CD}} \quad (4.32)$$

Acharam-se resultados médios da incerteza no cálculo da vazão mássica de refrigerante no evaporador, $\delta \dot{m}_{ref,EV}$, de $\pm 0,00085 \text{ kg/s}$, no condensador, $\delta \dot{m}_{ref,CD}$, de $\pm 0,00254 \text{ kg/s}$ e da média entre esses dois valores, $\overline{\delta \dot{m}_{ref}}$, de $\pm 0,00134 \text{ kg/s}$. Esse valor da incerteza média equivale a $\pm 5,3\%$ da vazão média.

4.2.6.

Dados medidos e reduzidos na bomba de calor

Para a análise da bomba de calor por compressão de vapor foram coletados os seguintes dados:

1. Vazão volumétrica de água no evaporador
2. Vazão volumétrica de água no condensador
3. Temperatura de entrada da água no evaporador
4. Temperatura de saída da água do evaporador
5. Temperatura de entrada do refrigerante no evaporador
6. Temperatura de saída do refrigerante do evaporador
7. Pressão de entrada do refrigerante no evaporador
8. Pressão de saída do refrigerante do evaporador
9. Temperatura de entrada da água no condensador
10. Temperatura de saída da água do condensador
11. Temperatura de entrada do refrigerante no condensador
12. Temperatura de saída do refrigerante do condensador
13. Pressão de entrada do refrigerante no condensador
14. Pressão de saída do refrigerante do condensador
15. Voltagem do compressor
16. Corrente do compressor

e calcularam-se as seguintes grandezas:

1. Potência consumida pelo compressor
2. Calor de evaporação
3. Calor de condensação
4. Vazão de refrigerante

4.3.

Eficiência dos componentes e do sistema

A incerteza das medições afeta os cálculos das variáveis de desempenho dos componentes e subsistemas (i.e., calor produzido ou recuperado, potência gerada, capacidade frigorífica, dentre outros). É necessário, portanto, saber como essas incertezas se propagam no cálculo dos parâmetros de eficiência dos referidos componentes e subsistemas, e do sistema como um todo.

4.3.1.

Eficiências da bomba de calor

4.3.1.1.

Coeficientes de desempenho (*COP*)

A eficiência energética da bomba de calor é expressa através do coeficiente de desempenho, *COP*, tanto para a refrigeração quanto para o aquecimento. O *COP* de refrigeração, como já mostrado no capítulo 3 do presente trabalho, calcula-se segundo a expressão:

$$COP_{ref} = \frac{\dot{Q}_{EV}}{\dot{W}_{CP}} \quad (4.33)$$

donde a incerteza no seu cálculo é expressa como a seguir:

$$\delta COP_{ref} = \sqrt{\left(\frac{1}{\dot{W}_{CP}} \delta \dot{Q}_{EV} \right)^2 + \left(\frac{\dot{Q}_{EV}}{\dot{W}_{CP}^2} \delta \dot{W}_{CP} \right)^2} \quad (4.34)$$

tendo-se obtido valores médios dessa incerteza entre $\pm 0,10$ o que representa $\pm 3,06$ % do valor médio calculado.

O COP de aquecimento, como já mostrado no capítulo 3 do presente trabalho, calcula-se segundo a expressão:

$$COP_{aqc} = \frac{\dot{Q}_{CD}}{\dot{W}_{CP}} \quad (4.35)$$

daí que a incerteza no seu cálculo seja expressa como segue na equação :

$$\delta COP_{aqc} = \sqrt{\left(\frac{1}{\dot{W}_{CP}} \delta \dot{Q}_{CD} \right)^2 + \left(\frac{\dot{Q}_{CD}}{\dot{W}_{CP}^2} \delta \dot{W}_{CP} \right)^2} \quad (4.36)$$

tendo-se obtido valores médios dessa incerteza entre $\pm 0,19$ o que representa $\pm 4,9 \%$ do valor médio calculado.

4.3.1.2. Eficiência exergética (2ª lei)

A eficiência exergética da bomba de calor, operando num sistema de trigeração, pode ser expressa como:

$$\eta_{II,HP} = \frac{\dot{m}_{we} (e_{x,wIN} - e_{x,wOUT}) + \dot{m}_{wREC} (e_{x,wOUT} - e_{x,wIN})}{P_{CP}} \quad (4.37)$$

Desta forma, a incerteza no cálculo desse valor pode ser, por sua vez, calculada através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \delta^2 \eta_{II,HP} = & \left(\frac{\Delta e_{x,we}}{P_{CP}} \delta \dot{m}_{we} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_{we}}{P_{CP}} \delta \Delta e_{x,we} \right)^2 + \left(\frac{\Delta e_{x,wREC}}{P_{CP}} \delta \dot{m}_{wREC} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\dot{m}_{wREC}}{P_{CP}} \delta \Delta e_{x,REC} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_{we} \Delta e_{x,we} + \dot{m}_{wREC} \Delta e_{x,we}}{P_{CP}^2} \delta P_{CP} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.38)$$

A incerteza da entalpia e entropia específicas da água foi determinada mediante a utilização das equações apresentadas nas figuras 42 e 43. Isto se

realizou de forma análoga à utilizada para cálculo da incerteza das propriedades termofísicas apresentadas anteriormente (i.e., calor específico a pressão constante e massa específica).

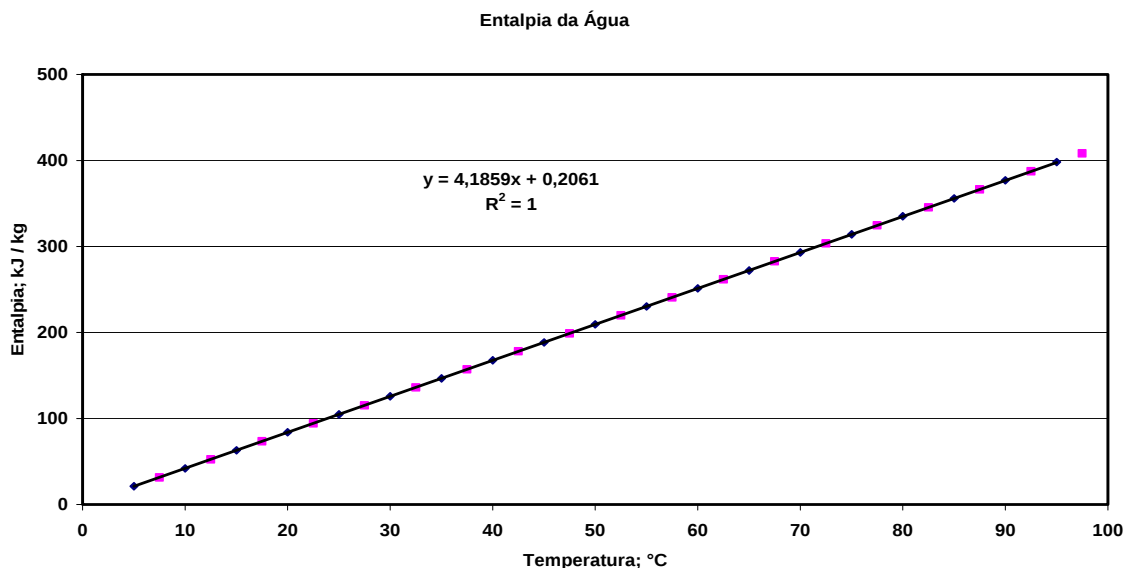


Figura 42 – Gráfico e ajuste de curva da entalpia específica da água

A incerteza no cálculo da entalpia da água foi determinada como encontrando-se na faixa de $\pm 0,84 \text{ kJ/kg}$, enquanto a incerteza da entropia encontra-se na faixa de $\pm 0,0026 \text{ kJ/kg.K}$

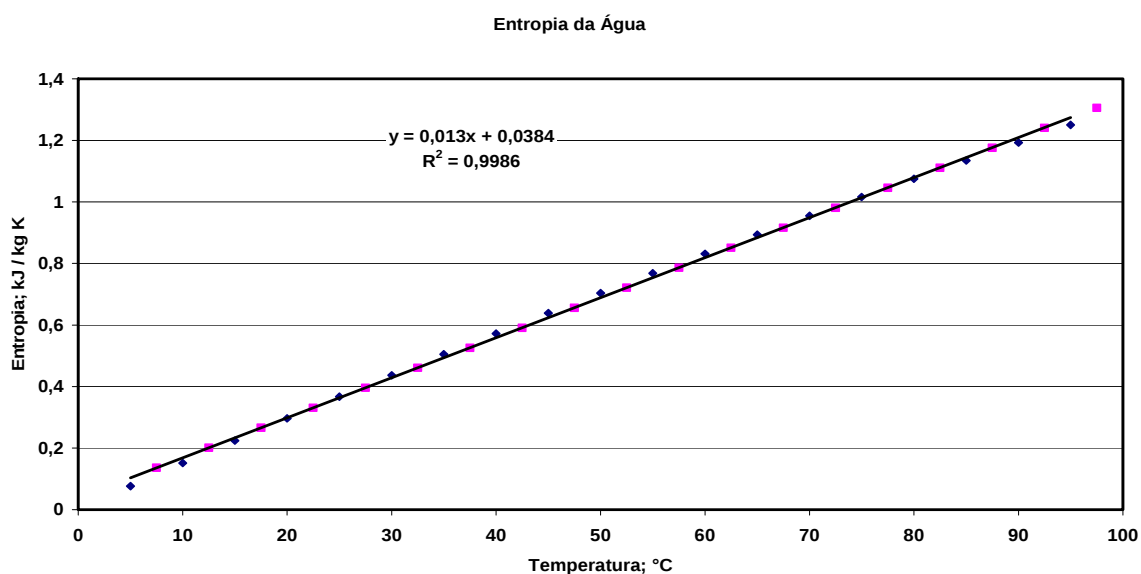


Figura 43 – Gráfico e ajuste de curva da entropia específica da água

A incerteza da exergia da água foi calculada em função da temperatura do meio, e é representada no gráfico da figura 44.

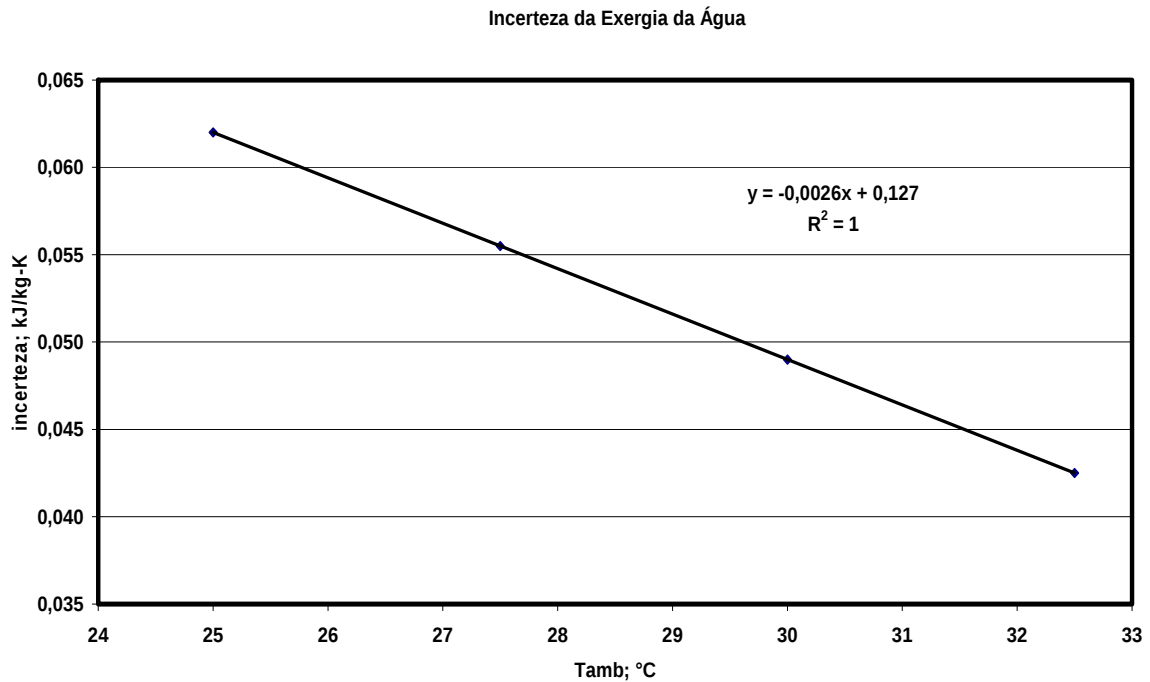


Figura 44 – Gráfico e ajuste de curva da incerteza da exergia da água

4.3.2. Eficiência do sistema de cogeração

4.3.2.1. Eficiência Energética (1ª lei)

A eficiência energética do sistema de cogeração pode ser calculada como:

$$ECR_{cogen} = \frac{(\dot{m}_{wm} \dot{q}_{CD} + \dot{Q}_{wm} + \dot{Q}_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{\dot{m}_f H_f} \quad (4.39)$$

e a incerteza desta expressão apresenta-se como segue:

$$\begin{aligned} \delta^2 ECR_{cogen} = & \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{m}_{wm} \dot{q}_{CD} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{Q}_{wm} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{Q}_{EC} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta (P_{GE} - P_{CP}) \right)^2 \\ & + \left(\frac{(\dot{m}_{wm} \dot{q}_{CD} + \dot{Q}_{wm} + \dot{Q}_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{(\dot{m}_f H_f)^2} \delta (\dot{m}_f H_f) \right)^2 \end{aligned} \quad (4.40)$$

Têm-se, portanto, valores médios de δECR_{cogen} de $\pm 0,05$, o que representa $\pm 5,5\%$ do valor médio.

4.3.2.2.

Eficiência exergética (2ª lei)

A eficiência exergética do sistema de cogeração pode ser calculada como:

$$\eta_{II, cogen} = \frac{(\Delta e_{x,wm}|_{CD} + \Delta e_{x,wm}|_{EG} + \Delta e_{x,wm}|_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{\dot{m}_f H_f} \quad (4.41)$$

e a incerteza desta expressão apresenta-se como segue:

$$\begin{aligned} \delta^2 \eta_{II, cogen} = & \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x,we}|_{EV} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x,wm}|_{CD} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x,wm}|_{EG} \right)^2 \\ & + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x,wm}|_{EC} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta (P_{GE} - P_{CP}) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\Delta e_{x,we}|_{EV} + (\Delta e_{x,wm}|_{CD} + \Delta e_{x,wm}|_{EG} + \Delta e_{x,wm}|_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{(\dot{m}_f H_f)^2} \delta (\dot{m}_f H_f) \right)^2 \end{aligned} \quad (4.42)$$

adotando valores médios de $\pm 0,0014$, o que representa $\pm 1,11\%$ do valor médio.

4.3.3.**Eficiência do sistema de trigeração****4.3.3.1.****Eficiência Energética (1ª lei)**

A eficiência energética do sistema de trigeração pode ser calculada como:

$$ECR_{trigen} = \frac{\dot{Q}_{EV} + (\dot{m}_{wm}\dot{q}_{CD} + \dot{Q}_{wm} + \dot{Q}_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{\dot{m}_f H_f} \quad (4.43)$$

e a incerteza desta expressão apresenta-se como segue:

$$\begin{aligned} \delta^2 ECR_{trigen} = & \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{Q}_{EV} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{m}_{wm} \dot{q}_{CD} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{Q}_{wm} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \dot{Q}_{EC} \right)^2 \\ & + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta (P_{GE} - P_{CP}) \right)^2 + \left(\frac{\dot{Q}_{EV} + (\dot{m}_{wm}\dot{q}_{CD} + \dot{Q}_{wm} + \dot{Q}_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{(\dot{m}_f H_f)^2} \delta (\dot{m}_f H_f) \right)^2 \end{aligned} \quad (4.44)$$

Têm-se, portanto, valores médios de δECR_{cogen} de $\pm 0,06$, o que representa $\pm 7,5\%$ do valor médio.

4.3.3.2.**Eficiência exergética (2ª lei)**

A eficiência exergética do sistema de trigeração pode ser calculada como:

$$\eta_{II, trigen} = \frac{\Delta e_{x, we}|_{EV} + (\Delta e_{x, wm}|_{CD} + \Delta e_{x, wm}|_{EG} + \Delta e_{x, wm}|_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{\dot{m}_f H_f} \quad (4.45)$$

e a incerteza desta expressão apresenta-se como segue:

$$\begin{aligned}
\delta^2 \eta_{II, trigen} = & \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x, we} \Big|_{EV} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x, wm} \Big|_{CD} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x, wm} \Big|_{EG} \right)^2 \\
& + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta \Delta e_{x, wm} \Big|_{EC} \right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{m}_f H_f} \delta (P_{GE} - P_{CP}) \right)^2 \\
& + \left(\frac{\Delta e_{x, we} \Big|_{EV} + (\Delta e_{x, wm} \Big|_{CD} + \Delta e_{x, wm} \Big|_{EG} + \Delta e_{x, wm} \Big|_{EC}) + (P_{GE} - P_{CP})}{(\dot{m}_f H_f)^2} \delta (\dot{m}_f H_f) \right)^2
\end{aligned}
\tag{4.46}$$

adotando valores médios de $\pm 0,0014$, o que representa $\pm 1,11\%$ do valor médio.