

4 Metodologia de teste

4.1 Análise da Viabilidade Econômica

Como base para a primeira etapa do trabalho foi elaborada uma Análise da Viabilidade Econômica do sistema de cogeração. Inicialmente foram coletados dados relevantes para o estudo através dos manuais da microturbina [27] e da unidade recuperadora de calor (URC) [12], assim como os dados estimados para a principal aplicação da cogeração, água quente para consumo nos chuveiros do Ginásio da PUC-Rio.

Para a elaboração da análise de viabilidade econômica foram realizados procedimentos, onde determinaram-se os seguintes parâmetros e dados:

- a) Números de horas de operação da microturbina;
- b) Valores das tarifas para consumo de energia elétrica e de gás natural em vigor, de acordo com as normas de contrato;
- c) Consumo de gás natural;
- d) Consumo específico;
- e) Custo da energia gerada pela microturbina;
- f) Taxa de recuperação de calor dos gases de exaustão da microturbina;
- g) Volume total disponível de água quente;
- h) Energia térmica total durante o período;
- i) Potência elétrica nominal dos chuveiros;
- j) Quantidade de banhos por turno (atividade);
- k) Tempo médio de duração de um banho;
- l) Consumo de energia elétrica por banho;
- m) Energia total consumida pelos chuveiros nos horários fora de ponta (FHP) e de ponta (HP);
- n) Custo da energia elétrica pela concessionária para os chuveiros nos diferentes horários;
- o) Custo da energia pela concessionária no horário de ponta (HP) em relação à energia elétrica gerada pela microturbina no período;

- p) Custo da energia pela concessionária nos horário fora de ponta (FHP) e de ponta (HP) em relação à energia térmica gerada pela microturbina no período;
- q) Verificação da economia gerada através da diferença do custo de geração da microturbina com os demais custos referentes às tarifas da concessionária.

Os resultados preliminares desta análise estão apresentados no Apêndice 1.

4.2 Análise de desempenho do sistema de cogeração

Para a análise do desempenho do sistema de cogeração em relação à produção de calor e energia elétrica, à qualidade da energia elétrica e à estimativa da emissão de poluentes no ar tomou-se como base o método elaborado em [6, 13].

4.2.1 Análise de desempenho da produção de energia elétrica

Quando se exporta energia elétrica paralela e simultaneamente para uma rede pública através de um gerador se torna importante a análise desta operação em relação ao seu comportamento, onde exige-se que a sua tensão elétrica e frequência estejam nos limites de alinhamento com a rede. Para realizar este processo a unidade geradora deve detectar a tensão e frequência da rede que garantirá um sincronismo adequado antes da conexão real da rede ocorrer [5].

Torna-se também necessário o estudo, em relação à geração de energia elétrica, dos efeitos da frequência elétrica, do fator de potência e da distorção harmônica total, distorção criada pela operação de cargas não-lineares. Mas, para o atual trabalho, esta análise se limitará apenas nos testes para o desempenho da produção de energia elétrica destacando o comportamento de sua tensão elétrica, frequência elétrica, assim como a eficiência elétrica e a partida a frio da microturbina.

4.2.1.1 Desempenho da produção de energia elétrica

A unidade da microturbina a gás natural produz uma potência com uma tensão nominal de 480 volts (corrente alternada – CA). De acordo com [6, 13], no fornecimento de energia elétrica para as indústrias é aceitável uma variação de $\pm 10\%$ da tensão padrão sem causar significantes distúrbios para o funcionamento dos equipamentos.

Para a análise da geração de energia elétrica foi desenvolvida uma metodologia, onde através do funcionamento da microturbina em diferentes cargas (potências) foi possível verificar o comportamento dos fenômenos pertinentes ao sistema de geração de energia. Os testes foram realizados com as seguintes condições de cargas:

- a) Ensaio com carga de 100% da capacidade total da microturbina (28 kW);
- b) Ensaio com carga de 75% da capacidade total (21 kW);
- c) Ensaio com carga de 50% da capacidade total (14 kW);
- d) Ensaio com carga de 25% da capacidade total (7 kW);

De acordo com [6, 28], os testes para cada condição de carga devem ser realizados em períodos de tempos contínuos dos quais a máxima variabilidade nos parâmetros operacionais não poderá exceder os limites especificados conforme Tabela 14. O intervalo de tempo mínimo foi especificado em 5 minutos para cada tomada de dados durante um intervalo total de 20 minutos. Para cada teste estipulou-se um intervalo mínimo de 15 minutos para a estabilização do sistema.

Na Tabela 14 estão apresentados, de acordo com [6, 28], as especificações das variações máximas permissíveis para a potência de saída, vazão do combustível, pressão e temperatura ambiente para cada condição de carga.

Tabela 14 – Limites de aceitação para os parâmetros operacionais

Parâmetro	Variação máxima
Potência de saída:	$\pm 2\%$
Vazão do combustível:	$\pm 2\%$
Pressão ambiente:	$\pm 0,5\%$
Temperatura ambiente:	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$

Para a verificação da variabilidade dos parâmetros operacionais foi utilizada a seguinte equação [6, 28]:

$$Var_{max} = \frac{V_{m_{teste}} - V_{ind_{teste}}}{V_{m_{teste}}} 100 \quad \text{Eq. (54)}$$

Onde:

Var_{max} : valor máximo da variabilidade do parâmetro operacional;

$V_{m_{teste}}$: valor médio do teste;

$V_{ind_{teste}}$: valor individual de cada amostra no teste.

4.2.1.2 Produção de potência elétrica

A produção da potência elétrica foi calculada através da média aritmética das leituras dos testes para a potência no intervalo de 5 minutos em um período total de 20 minutos de acordo com a norma citada no tópico anterior e conforme a seguinte equação:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad \text{Eq. (55)}$$

Onde:

P : potência elétrica média (W);

P_i : potência elétrica para cada medição ao longo do teste (W);

N : número total de medições do teste.

4.2.1.3 Produção de calor de entrada “heat input” (HI)

A produção da taxa de calor para a geração de potência elétrica foi determinada através da média aritmética da vazão do combustível (gás natural) calculada através das medições feitas no intervalo de 5 minutos durante 20 minutos e com o poder calorífico inferior (PCI) do gás natural, fornecido pela concessionária local, conforme a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{form} = \dot{V}_{GN} PCI \quad \text{Eq. (56)}$$

Onde:

\dot{Q}_{form} : taxa de calor fornecido ao sistema de geração (W);

\dot{V}_{GN} : vazão do combustível – gás natural (m^3/s);

PCI : poder calorífico inferior do combustível (kJ/Nm^3).

Pelo fato do PCI do gás natural ser calculado sob condições normais (padrão) de temperatura e pressão se torna necessário a correção da vazão do gás natural local para a condição padrão de acordo com a equação a seguir:

$$\dot{V}_{pd} = \dot{V}_{GN} \frac{T_{pd}}{T_{GN}} \frac{P_{GN}}{P_{pd}} Z \quad \text{Eq. (57)}$$

Onde:

\dot{V}_{pd} : vazão padrão (Normal) do gás natural (Nm^3/s);

\dot{V}_{GN} : vazão medida do gás natural (m^3/s);

T_{pd} : temperatura padrão, Condição ISO, (K);

T_{GN} : temperatura do gás natural (K);

p_{pd} : pressão absoluta padrão, Condição ISO, (Pa);

p_{GN} : pressão absoluta do gás natural (Pa);

Z: fator de compressibilidade do gás natural.

4.2.1.4 Eficiência elétrica

A eficiência elétrica, η_{el} , do sistema de geração de potência elétrica (microturbina) foi determinada através da produção média da saída de potência elétrica P_m e da taxa total de calor fornecido ao mesmo sistema. Através da equação abaixo foi determinada a eficiência para cada condição de carga na microturbina.

$$\eta_{el} = \frac{P_m}{\dot{Q}_{form}} \quad \text{Eq. (58)}$$

Onde:

η_{el} : eficiência elétrica da microturbina;

P_m : potência de saída elétrica média da microturbina (W);

\dot{Q}_{form} : taxa total de calor fornecido ao sistema de geração (W).

4.2.1.5 Desempenho da qualidade da energia elétrica

A análise da qualidade da energia elétrica se faz necessária principalmente para verificar o comportamento dos parâmetros da energia elétrica gerada e

distribuída, de forma que estes não venham a interferir e/ou não tragam algum dano a qualquer componente que dela se utilize.

De acordo com [28], recomenda-se uma avaliação do desempenho na produção de energia elétrica da microturbina, onde com base nos dados disponíveis dos testes da cogeração no Ginásio da PUC-Rio, foram analisados os seguintes parâmetros:

- a) Frequência elétrica de saída;
- b) Tensão de saída.

A análise foi realizada com as diferentes condições de carga para a microturbina.

4.2.1.5.1 Frequência elétrica de saída

A análise da frequência elétrica da energia local gerada e exportada para a rede pública, que opera com uma frequência de 60 Hz em corrente alternada (CA), padrão nacional (Brasil), teve como objeto de estudo conforme referenciado em [6] a determinação dos valores da frequência máxima, mínima e média durante os testes, juntamente com o desvio padrão utilizando-se as seguintes equações abaixo:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{N} \quad \text{Eq. (59)}$$

Onde:

F : frequência elétrica média (Hz);

F_i : frequência elétrica para cada medição ao longo do teste (Hz);

N : número total de medições do teste.

O desvio padrão é uma medida que relaciona a dispersão dos valores da frequência medida (F_i) em relação ao valor da frequência média (F) e é determinado pela seguinte equação:

$$F_{dp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F - F_i)^2}{N - 1}} \quad \text{Eq. (60)}$$

Onde:

F_{dp} : desvio padrão da frequência.

Ainda de acordo com [6] estipulou-se para uma prévia avaliação da tolerância da frequência, o valor de $\pm 1\%$ do valor nominal ($\pm 0,6$ Hz).

4.2.1.5.2 Tensão elétrica de saída

Conforme especificado no Anexo 1 a microturbina tem como faixa de operação de tensão, em suas 3 fases, valores entre 360 – 528 VCA. Segundo referenciado em [6, 13], permite-se à tensão uma tolerância de $\pm 10\%$ da tensão nominal sem causar danos significantes na operação na maioria dos equipamentos. Divergências fora desta faixa podem ser quantificadas como elevações ou diminuições abruptas da tensão. De acordo com [6], os resultados do teste, em geral, devem mostrar:

- Número total de perturbações na tensão que excederem a faixa de $\pm 10\%$;
- Tensão máxima, mínima, média e desvio padrão das tensões que excederem $\pm 10\%$;
- Duração mínima e máxima de incidentes excedendo $\pm 10\%$.

De forma semelhante à análise da frequência elétrica, para a determinação dos valores da tensão máxima, mínima e média, juntamente com o desvio padrão ao longo dos testes utilizou-se as seguintes equações:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad \text{Eq. (61)}$$

Onde:

V : tensão elétrica média (V);

V_i : tensão elétrica para cada medição ao longo do teste (Hz);

N : número total de medições do teste.

Para o desvio padrão da tensão utilizou-se:

$$V_{dp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V - V_i)^2}{N - 1}} \quad \text{Eq. (62)}$$

Onde:

V_{dp} : desvio padrão da tensão.

4.2.1.6 Taxa de calor recuperado

A análise da taxa do calor recuperado (potência térmica) será função da temperatura de entrada do fluido de trabalho (água) e da demanda associada ao

sistema de cogeração. As medições das temperaturas da água de circulação foram tomadas a montante e a jusante da unidade recuperadora de calor (URC), das quais serão totalmente dependentes da condição do sistema de cogeração, principalmente da potência elétrica da microturbina. De forma semelhante à medição da temperatura, a medida para a vazão da água foi tomada a montante da unidade recuperadora. Portanto de acordo com a seguinte equação obtém-se a média da taxa de recuperação de calor para o sistema levando-se em consideração os mesmos procedimentos anteriores em relação ao tempo de duração das tomadas de dados:

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{V}_{ag} \rho_{ag} c_{p_ag} (T_{ag_s} - T_{ag_e}) \quad \text{Eq. (63)}$$

Onde:

\dot{Q}_{rec} : taxa média do calor recuperado no sistema de cogeração (W);

\dot{V}_{ag} : vazão da água que circula pelo sistema (m³/s);

ρ_{ag} : massa específica da água calculada pela equação obtida pelo ajuste de curva do software Excel®, Apêndice 5, com a temperatura média das temperaturas de entrada e saída da água - $(T_{ag_s} + T_{ag_e})/2$ - (kg/m³);

c_{p_ag} : calor específico à pressão constante da água calculada pela equação obtida pelo ajuste de curva do software Excel®, Apêndice 5, com a temperatura média das temperaturas de entrada e saída da água - $(T_{ag_s} + T_{ag_e})/2$ - (kJ/kg K);

T_{ag_e} : temperatura de entrada da água na URC (°C);

T_{ag_s} : temperatura de saída da água na URC (°C).

4.2.1.7 Eficiência térmica

A eficiência térmica, η_{term} , do sistema de cogeração foi determinada através da taxa média do calor recuperado, \dot{Q}_{rec} , e da taxa total de calor fornecido ao mesmo sistema. Através da equação abaixo foi determinada a eficiência térmica para cada condição de carga na microturbina.

$$\eta_{term} = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\dot{Q}_{fom}} \quad \text{Eq. (64)}$$

Onde:

η_{term} : eficiência térmica do sistema de cogeração;

\dot{Q}_{rec} : taxa média do calor recuperado no sistema de cogeração (W);

\dot{Q}_{form} : taxa total de calor fornecido ao sistema de cogeração (W).

4.2.1.8 Taxa de calor disponível da microturbina

A análise da taxa do calor disponível pela microturbina (potência térmica) será função da temperatura de entrada dos produtos dos gases de exaustão na unidade recuperadora de calor (URC), da temperatura do meio onde os gases são liberados e da potência elétrica fornecida pela microturbina.

A medição da temperatura dos gases de exaustão foi tomada a montante da unidade recuperadora de calor, enquanto que para a tomada da temperatura ambiente utilizou-se os mesmos sensores para os gases, fazendo a leitura antes e depois de cada operação com a microturbina. O fluxo de massa do gás natural, \dot{m}_{GN} , foi determinado através da vazão do gás natural e de sua massa específica, ρ_{GN} , calculada considerando o gás natural como um gás perfeito.

$$\dot{m}_{GN} = \dot{V}_{GN} \rho_{GN} \quad \text{Eq. (65)}$$

$$\rho_{GN} = \frac{P_{GN}}{R_{GN} T_{GN}} \quad \text{Eq. (66)}$$

Onde:

R_{GN} : constante do gás natural (kJ/kg K);

T_{GN} : temperatura do gás natural (K).

Para o fluxo de massa do ar para mistura na combustão, \dot{m}_{AR} , utilizou-se os valores coletados pelo próprio software da microturbina, obtendo-se então o fluxo de massa dos gases, \dot{m}_g .

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{GN} + \dot{m}_{AR} \quad \text{Eq. (67)}$$

Portanto, de acordo com a seguinte equação obtém-se a média da taxa de calor disponível de calor para o sistema levando-se em consideração os mesmos procedimentos anteriores em relação ao tempo de duração das tomadas de dados:

$$\dot{Q}_{disp} = \dot{m}_g c_{p-g} (T_{g-e} - T_{amb}) \quad \text{Eq. (68)}$$

Onde:

\dot{Q}_{disp} : taxa média do calor disponível na microturbina (W);

c_{p_g} : calor específico à pressão constante dos gases calculada pela equação empírica [15], Anexo 3, com a temperatura média das temperaturas de entrada dos gases de exaustão na URC e ambiente - $(T_{g_e} + T_{amb})/2$ - (kJ/kg K);

T_{g_e} : temperatura de entrada dos gases na URC (°C);

T_{amb} : temperatura ambiente (°C).

4.2.1.9

Taxa de calor utilizado na URC

A análise da taxa do calor utilizado, taxa de calor absorvida da potência térmica disponível na microturbina, será função das temperaturas de entrada e saída dos gases de exaustão na URC.

As medições das temperaturas dos gases de exaustão foram tomadas a montante e a jusante da URC. Portanto, com um procedimento similar à seção anterior a taxa é determinada como:

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m}_g c_{p_g} (T_{g_e} - T_{g_s}) \quad \text{Eq. (69)}$$

Onde:

\dot{Q}_{util} : taxa média do calor utilizado na URC (W);

c_{p_g} : calor específico à pressão constante dos gases calculada pela equação empírica, Anexo 3, com a temperatura média das temperaturas de entrada e saída dos gases de exaustão na URC - $(T_{g_e} + T_{g_s})/2$ - (kJ/kg K);

T_{g_e} : temperatura de entrada dos gases na URC (°C);

T_{g_s} : temperatura de saída dos gases na URC (°C);

4.3

Taxa de emissão de gases

O teste de emissões de gases teve como objetivo a determinação da taxa de emissão de poluentes (CO, NO_x, THC e CO₂). Este teste será realizado também de forma simultânea aos demais testes mencionados e, portanto, com os mesmos critérios adotados na tomada de dados.

Para cada condição de carga avaliou-se a emissão de gases gerada durante a cogeração. As medições foram realizadas nos gases de exaustão da microturbina a jusante da unidade recuperadora de calor através de um analisador de gás, marca testo, onde posicionou-se uma sonda específica para tal medição.

A taxa de emissão média medida durante cada condição de carga foi relacionada em unidade de partes por milhão por volume seco (*ppmvd*) para o CH₄, CO, NO_x e THCs, e em porcentagem do fluxo de massa do CO₂ e O₂ em kg/h e da quantidade da massa dos mesmos pela energia produzida por hora, kg/kWh.

De acordo com [28, 29], se torna conveniente as emissões de saída serem corrigidas para um valor padrão de O₂, portanto, para o caso das turbinas freqüentemente usa-se correções a 15% de O₂ nas concentrações de CO, NO_x e THC em *ppmvd* (partes por milhão por volume seco) através da seguinte equação:

$$ppmvd_{Ex} = ppmvd \left[\frac{(20,9 - 15)}{(20,9 - O_{2_Ex})} \right] \quad \text{Eq. (70)}$$

Onde:

ppmvd_{Ex}: valor médio de cada poluente corrigido a 15% de O₂;

ppmvd: média das medidas para cada poluente;

O_{2_Ex}: média das medidas para a concentração de O₂.

4.4

Balanco da combustão

O balanço da combustão foi calculado de acordo com os conceitos elucidados no capítulo 2 referentes ao processo de combustão que junto com a análise da composição molar do gás natural fornecida pela concessionária local, CEG, e com a análise local dos gases de exaustão obteve-se o combustível equivalente, a razão ar/combustível e o excesso de ar durante o processo na microturbina durante os testes da cogeração. Através de dados do balanço da combustão obteve-se também o fluxo de massa do ar utilizado durante o processo da combustão.

4.5

Determinação do PCI do gás natural

Sabendo-se a composição molar do gás natural e também o PCI tabelado para cada um dos componentes foi possível determinar o *PCI* do combustível conforme citado por [13] com a seguinte equação:

$$PCI = \sum m_{ci} PCI_i \quad \text{Eq. (71)}$$

Onde:

m_{ci} : valor da composição mássica de cada componente do gás natural;

PCI_i : valor do PCI de cada componente do gás natural;

4.6 Análise da Unidade recuperadora de calor

A Unidade recuperadora de calor (*URC*), também conhecida como trocador de calor, teve como principal análise o estudo do seu comportamento em relação à termodinâmica e à transferência de calor envolvidos no sistema de cogeração e, que através dos testes experimentais foram observados e determinados parâmetros que puderam auxiliar na comparação de alguns dados do fabricante, tabelados ou obtidos por software, assim como para uma simulação numérica da cogeração.

4.6.1 Determinação da efetividade da URC

A efetividade da URC foi determinada pelo método ε -*NUT* com as Eqs. (41) e (42) através das medidas das propriedades tanto dos gases de exaustão quanto da água que circulam dentro da URC, ou seja, as suas temperaturas de entrada, saída e de seus calores específicos juntamente com a medida da vazão da água durante a cogeração.

Para a análise da efetividade da URC foram propostos 2 modelos, no primeiro foi considerado como ar os gases de exaustão da microturbina, enquanto para o segundo foram considerados os gases determinados pelo analisador de gases. Para o cálculo do calor específico à pressão constante foram utilizadas as equações empíricas tabeladas conforme mostrado no Anexo 3.

4.6.2 Razão ar-combustível (AC) da microturbina

Através do cálculo do fluxo de massa dos gases de exaustão, modelados como ar, e de posse do fluxo de massa do combustível determinou-se razão ar-

combustível (*AC*) no processo de combustão na microturbina. A relação ar-combustível determinada pelo método empírico aqui elucidado e a obtida pelo software específico da microturbina serão confrontadas e analisadas junto com a relação *AC* calculada referente ao método que fora utilizado o analisador de gases, *seção 4.4 – Balanço da combustão*.

4.6.3

Rampa de aquecimento do sistema de cogeração

Durante a cogeração, o processo de aquecimento da água para posterior armazenamento foi monitorado a fim de observar e analisar o comportamento do sistema de forma a obter uma curva representada pelas medidas das temperaturas de entrada e saída da água na URC. A cogeração foi testada em diferentes cargas conforme já mencionado nas seções anteriores, ou seja, 25, 50, 75 e 100% da carga total da potência elétrica de saída da microturbina que é de 28 kW. A duração do teste será determinada de acordo com o tempo necessário para a água de circulação do sistema, que está a temperatura ambiente, atingir a temperatura máxima de projeto, 85°C, ou caso não atinja, com o tempo total de funcionamento da cogeração, que é de 3 horas. As leituras das medidas das temperaturas foram realizadas no intervalo de 5 minutos.

4.7

Análise de incertezas

Tomou-se como referência para a análise deste trabalho a metodologia desenvolvida por Assunção [13, 30] no seu estudo de avaliação metrológica fundamentada no “Guia Para Expressão da Incerteza de Medição” [31], que através deste embasamento, se estima e combina as contribuições sistemáticas e aleatórias de cada fonte de incerteza.

Segundo Assunção [13], se faz necessário tratar separadamente cada fonte de incerteza para saber a sua contribuição na estimativa da incerteza total de uma medição. No caso das contribuições de incertezas expressas como um desvio padrão divide-se a mesma pelo seu respectivo divisor correspondente à distribuição de probabilidade estatística atribuída. Na Tabela 15 [13] encontra-se os divisores para as principais distribuições.

Tabela 15 – Divisores para distribuição de probabilidade (95,45% de nível de confiança)

DISTRIBUIÇÃO	DIVISOR
Normal (Certificado de Calibração)	2
Retangular	$\sqrt{3}$
Triangular	$\sqrt{6}$

De acordo com a metodologia descrita anteriormente, para os testes de carga parcial e em regime permanente foram realizadas quatro amostragens ($N = 4$). Adotaram-se, de acordo como o nível de confiabilidade de 95,45%, os fatores de abrangência, $k = 2$, para a incerteza de medição U_x (incerteza expandida) geral e $k_{95,45\%} = 3,31$ para a incerteza expandida U_x das componentes de incertezas de acordo com o número efetivo de graus de liberdade, ν , conforme mostrado na Tabela no Anexo 5 com os valores de *t-student* [13].

Nas equações a seguir u_m refere-se à incerteza do instrumento de medição e s_x ao desvio padrão da grandeza medida (x).

4.7.1 Incerteza na Potência Elétrica (U_P)

Mediante os dados coletados da potência elétrica determinou-se a incerteza total através da incerteza combinada pela incerteza padrão, calculada pelo desvio padrão, com a incerteza do instrumento de medição. A incerteza expandida, U_P , foi determinada através da multiplicação pelo fator de abrangência mencionada anteriormente para um número efetivo de graus de liberdade (*t-student*), $\nu = 3$, $k_{95,45\%} = 3,31$.

$$s_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (P - P_i)^2}{(N - 1)}} \quad \text{Eq. (72)}$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad \text{Eq. (73)}$$

$$u_P = \sqrt{(s_P^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (74)}$$

$$U_P = 3,31 \cdot u_P \quad \text{Eq. (75)}$$

4.7.2 Incerteza na Energia do combustível (U_{Qform})

A incerteza da energia fornecida pelo combustível, pode ser calculada de acordo com as Eqs. (56) e (57) mediante a propagação das incertezas da vazão padrão do combustível (gás natural), $U_{\dot{V}std}$, e do PCI do gás natural, U_{PCI} :

$$s_{\dot{V}GN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\dot{V}_{GN} - \dot{V}_{GNi})^2}{(N-1)}} \quad \text{Eq. (76)}$$

$$u_{\dot{V}GN} = \sqrt{(s_{\dot{V}GN}^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (77)}$$

$$U_{\dot{V}GN} = 3,31 \cdot u_{\dot{V}GN} \quad \text{Eq. (78)}$$

$$s_{TGN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (T_{GN} - T_{GNi})^2}{(N-1)}} \quad \text{Eq. (79)}$$

$$u_{TGN} = \sqrt{(s_{TGN}^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (80)}$$

$$U_{TGN} = 3,31 u_{TGN} \quad \text{Eq. (81)}$$

$$s_{pGN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (p_{GN} - p_{GNi})^2}{(N-1)}} \quad \text{Eq. (82)}$$

$$u_{pGN} = \sqrt{(s_{pGN}^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (83)}$$

$$U_{pGN} = 3,31 u_{pGN} \quad \text{Eq. (84)}$$

$$u_{\dot{V}pd} = \dot{V}_{pd} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{V}GN}}{\dot{V}_{GN}}\right)^2 + \left(\frac{u_{TGN}}{T_{GN}}\right)^2 + \left(\frac{u_{pGN}}{p_{GN}}\right)^2} \quad \text{Eq. (85)}$$

$$u_{\dot{Q}form} = \dot{Q}_{form} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{V}pd}}{\dot{V}_{pd}}\right)^2 + \left(\frac{u_{PCI}}{PCI}\right)^2} \quad \text{Eq. (86)}$$

$$U_{\dot{Q}form} = 2 u_{\dot{Q}form} \quad \text{Eq. (87)}$$

$$u_{GN} = \frac{U_{GN}}{2} \quad \text{Eq. (88)}$$

$$u_{PCI} = \frac{U_{PCI}}{2} \quad \text{Eq. (89)}$$

4.7.3 Incerteza no PCI do GN (U_{PCI})

De acordo com a Eq.(71) para a determinação do PCI, propagou-se cada incerteza conforme descrito a seguir:

$$u_{PCI} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N PCI_i \cdot u_{m_{ci}} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N m_{ci} \cdot u_{PCI_i} \right)^2} \quad \text{Eq. (90)}$$

$$u_{m_{ci}} = \frac{U_{m_{ci}}}{2} \quad \text{Eq. (91)}$$

$$u_{PCI_i} = \frac{U_{PCI_i}}{2} \quad \text{Eq. (92)}$$

$$U_{PCI} = 2 u_{PCI} \quad \text{Eq. (93)}$$

4.7.4 Incerteza na eficiência elétrica ($U_{\eta_{el}}$)

De acordo com a Eq. (58) determinou-se a incerteza da eficiência elétrica conforme as equações abaixo:

$$u_{\eta_{el}} = \eta_{el} \sqrt{\left(\frac{u_P}{P} \right)^2 + \left(\frac{u_{\dot{Q}_{form}}}{\dot{Q}_{form}} \right)^2} \quad \text{Eq. (94)}$$

$$U_{\eta_{el}} = 2 \cdot u_{\eta_{el}} \quad \text{Eq. (95)}$$

$$u_P = \frac{U_P}{2} \quad \text{Eq. (96)}$$

4.7.5 Incerteza na frequência elétrica (U_F)

De acordo com o desvio padrão da frequência elétrica, já mencionada anteriormente neste capítulo, Eq. (60), para avaliar os valores da frequência máxima, mínima e média durante os testes, determinou-se também a incerteza da frequência elétrica conforme as equações abaixo:

$$s_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F - F_i)^2}{N - 1}} \quad \text{Eq. (60)}$$

$$u_F = \sqrt{(s_F^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (97)}$$

$$U_F = 3,31u_F \quad \text{Eq. (98)}$$

4.7.6 Incerteza na tensão elétrica (U_V)

Agora utilizando o desvio padrão da tensão elétrica, também já mencionada anteriormente neste capítulo, Eq. (62), para avaliar os valores da tensão máxima, mínima e média durante os testes, determinou-se a incerteza da tensão elétrica conforme as equações abaixo:

$$s_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V - V_i)^2}{N - 1}} \quad \text{Eq. (62)}$$

$$u_V = \sqrt{(s_V^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (99)}$$

$$U_V = 3,31u_V \quad \text{Eq. (100)}$$

4.7.7 Incerteza na taxa de recuperação de calor ($U_{Q_{rec}}$)

Calculou-se a incerteza da taxa de recuperação de calor, de acordo com a Eq. (63), propagando-se as incertezas da vazão da água de circulação, $U_{\dot{V}_{ag}}$, da variação das temperaturas de entrada e de saída da água na URC, $U_{\Delta T_{ag}}$, da massa específica da água, $U_{\rho_{ag}}$, e do calor específico da água, $U_{c_{p-ag}}$, as incertezas da massa específica e do calor específico da água estão demonstradas no Apêndice 5. Portanto a determinação da incerteza total da taxa de recuperação de calor tem o seguinte desenvolvimento:

$$\dot{V}_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \dot{V}_{ag_i}}{N} \quad \text{Eq. (101)}$$

$$s_{\dot{V}_{ag}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\dot{V}_{ag} - \dot{V}_{agi})^2}{(N-1)}} \quad \text{Eq. (102)}$$

$$u_{\dot{V}_{ag}} = \sqrt{(s_{\dot{V}_{ag}}^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (103)}$$

$$U_{\dot{V}_{ag}} = 3,31 u_{\dot{V}_{ag}} \quad \text{Eq. (104)}$$

$$s_{\Delta T_{ag}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\Delta T_{ag} - \Delta T_{agi})^2}{(N-1)}} \quad \text{Eq. (105)}$$

$$u_{\Delta T_{ag}} = \sqrt{(s_{\Delta T_{ag}}^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (106)}$$

$$U_{\Delta T_{ag}} = 3,31 u_{\Delta T_{ag}} \quad \text{Eq. (107)}$$

$$u_{\rho_{ag}(T)} = \frac{\delta \rho_{ag}}{\rho_{ag}} = \frac{1}{\rho_{ag}} \frac{d \rho_{ag}}{dT} (\pm \delta T) \quad \text{Eq. (108)}$$

$$u_{c_{p-ag}(T)} = \frac{\delta c_{p-ag}}{c_{p-ag}} = \frac{1}{c_{p-ag}} \frac{dc_{p-ag}}{dT} (\pm \delta T) \quad \text{Eq. (109)}$$

Então tem-se a incerteza total $u_{\dot{Q}_{rec}}$:

$$u_{\dot{Q}_{rec}} = \dot{Q}_{rec} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{V}_{ag}}}{\dot{V}_{ag}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{ag}}}{\rho_{ag}}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_{p-ag}}}{c_{p-ag}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T_{ag}}}{\Delta T_{ag}}\right)^2} \quad \text{Eq. (110)}$$

$$U_{\dot{Q}_{rec}} = 2 \cdot u_{\dot{Q}_{rec}} \quad \text{Eq. (111)}$$

$$u_{\dot{V}_{ag}} = \frac{U_{\dot{V}_{ag}}}{2} \quad \text{Eq. (112)}$$

$$u_{\Delta T_{ag}} = \frac{U_{\Delta T_{ag}}}{2} \quad \text{Eq. (113)}$$

4.7.8

Incerteza na eficiência térmica ($U_{\eta_{term}}$)

De acordo com a Eq. (50) determinou-se a incerteza da eficiência térmica conforme as equações abaixo:

$$u_{\eta_{term}} = \eta_{term} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{Q}_{rec}}}{\dot{Q}_{rec}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\dot{Q}_{form}}}{\dot{Q}_{form}}\right)^2} \quad \text{Eq. (114)}$$

$$U_{\eta_{term}} = 2 \cdot u_{\eta_{term}} \quad \text{Eq. (115)}$$

4.7.9

Incerteza na taxa de calor disponível da microturbina (U_{Qdisp})

Pela taxa de calor disponível, Eq. (68), determinou-se a sua incerteza propagando-se as incertezas do fluxo de massa dos gases de exaustão, $U_{\dot{m}_g}$, da variação da temperatura de entrada dos gases na URC com a temperatura do meio ambiente, $U_{\Delta T_{g-amb}}$ e do calor específico dos gases, $U_{c_{p-g}}$. Consideraram-se os gases de exaustão como ar, as incertezas da massa específica e do calor específico para o ar estão demonstradas no Apêndice 4. Logo tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$u_{\rho_{GN}} = \rho_{GN} \sqrt{\left(\frac{u_{p_{GN}}}{p_{GN}}\right)^2 + \left(\frac{u_{M_{GN}}}{M_{GN}}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_{GN}}}{T_{GN}}\right)^2} \quad \text{Eq. (116)}$$

$$u_{T_{GN}} = \frac{U_{T_{GN}}}{2} \quad \text{Eq. (117)}$$

$$u_{\dot{m}_{GN}} = \dot{m}_{GN} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{V}_{GN}}}{\dot{V}_{GN}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{GN}}}{\rho_{GN}}\right)^2} \quad \text{Eq. (118)}$$

$$u_{\dot{m}_g} = \dot{m}_g \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}_{GN}}}{\dot{m}_{GN}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\dot{m}_{AR}}}{\dot{m}_{AR}}\right)^2} \quad \text{Eq. (119)}$$

$$u_{c_{p-g}(T)} = \frac{\delta c_{p-g}}{c_{p-g}} = \frac{1}{c_{p-g}} \frac{dc_{p-g}}{dT} (\pm \delta T) \quad \text{Eq. (120)}$$

$$s_{\Delta T_{g-amb}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\Delta T_{g-amb} - \Delta T_{g-ambi})^2}{(N-1)}} \quad \text{Eq. (121)}$$

$$u_{\Delta T_{g-amb}} = \sqrt{(s_{\Delta T_{g-amb}}^2 + u_m^2)} \quad \text{Eq. (122)}$$

$$U_{\Delta T_{g-amb}} = 3,31 u_{\Delta T_{g-amb}} \quad \text{Eq. (123)}$$

$$u_{\Delta T_{g-amb}} = \frac{U_{\Delta T_{g-amb}}}{2} \quad \text{Eq. (124)}$$

$$u_{\dot{Q}_{disp}} = \dot{Q}_{disp} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}_g}}{\dot{m}_g}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_{p-g}}}{c_{p-g}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T_{g-amb}}}{\Delta T_{g-amb}}\right)^2} \quad \text{Eq. (125)}$$

$$U_{\dot{Q}_{disp}} = 2u_{\dot{Q}_{disp}} \quad \text{Eq. (126)}$$

4.7.10

Incerteza na taxa de calor utilizado na URC ($U_{\dot{Q}_{util}}$)

Determinou-se a incerteza da taxa de calor utilizado na URC através Eq. (69). As componentes de incertezas foram propagadas de forma similar às equações descritas na seção anterior, 4.7.9, diferenciando somente na utilização da temperatura de saída dos gases na URC, T_{g-s} , e conseqüentemente a sua incerteza, $U_{T_{g-s}}$, portanto obtém-se:

$$u_{\dot{Q}_{util}} = \dot{Q}_{util} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}_g}}{\dot{m}_g}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_{p-g}}}{c_{p-g}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T_g}}{\Delta T_g}\right)^2} \quad \text{Eq. (127)}$$

$$U_{\dot{Q}_{util}} = 2u_{\dot{Q}_{util}} \quad \text{Eq. (128)}$$

4.7.11

Incerteza da efetividade da URC (U_{ε})

A propagação da incerteza da efetividade baseou-se na Eq. (42) de acordo com o seguinte desenvolvimento:

$$u_{\dot{m}_{ag}} = \dot{m}_{ag} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{V}_{ag}}}{\dot{V}_{ag}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{ag}}}{\rho_{ag}}\right)^2} \quad \text{Eq. (129)}$$

$$u_{C_{max}} = C_{max} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}_{ag}}}{\dot{m}_{ag}}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_{p-ag}}}{c_{p-ag}}\right)^2} \quad \text{Eq. (130)}$$

$$u_{C_{min}} = C_{min} \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}_g}}{\dot{m}_g}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_{p-g}}}{c_{p-g}}\right)^2} \quad \text{Eq. (131)}$$

$$u_{\mathcal{E}} = \mathcal{E} \left[\left(\frac{u_{C_{max}}}{C_{max}} \right)^2 + \left(\frac{u_{C_{min}}}{C_{min}} \right)^2 + \left(\frac{u_{T_{g-e}}}{T_{g-e} - T_{ag-e}} \right)^2 + \left(\frac{u_{T_{ag-s}}}{T_{ag-s} - T_{ag-e}} \right)^2 + \left(\frac{1}{T_{g-e} - T_{ag-e}} - \frac{1}{T_{ag-s} - T_{ag-e}} \right)^2 u_{T_{ag-e}}^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (132)}$$

$$U_{\mathcal{E}} = 2u_{\mathcal{E}} \quad \text{Eq. (133)}$$

Para a propagação da incerteza da efetividade baseada na Eq. (41) tem-se:

$$u_{\mathcal{E}} = \mathcal{E} \left[\left(\frac{u_{T_{ag-e}}}{T_{g-e} - T_{ag-e}} \right)^2 + \left(\frac{u_{T_{g-s}}}{T_{g-e} - T_{g-s}} \right)^2 + \left(\frac{1}{T_{g-e} - T_{g-s}} - \frac{1}{T_{g-e} - T_{ag-e}} \right)^2 u_{T_{g-e}}^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (134)}$$

$$U_{\mathcal{E}} = 2u_{\mathcal{E}} \quad \text{Eq. (135)}$$

A seguir uma tabela com um resumo das incertezas dos instrumentos descritos neste capítulo.

Tabela 16 – Tabela de incertezas dos instrumentos

Parâmetro	Unid.	Sensor	Incerteza
Potência elétrica	kW	Sensor (microt.) Potência	± 3,7% (FE – 28 kW)
Tensão elétrica	V	Sensor (microt.) Tensão	± 1,3% (FE – 528V)
Frequência elétrica	Hz	Sensor (microt.) Frequência	± 0,05% (valor medido - vm)
Vazão	m ³ /s	Turbina SVTG	± 1,1%
Vazão	lpm	Turbina SVTL	± 1,0%
Volume	m ³	Hidrômetro	± 2,0%
Tempo	s	Cronômetro	± 0,20
Velocidade	m/s	Sonda (Pitot)	± 5,0%
Diâmetro	mm	Paquímetro	± 0,05
Temperatura	°C	Termorresistência	± 0,3
Temperatura	°C	Termistor	± 1,0
Temperatura	° C	Termopar (Multímetro)	± 1%
Pressão	Pa	Transdutor Piezo resistivo	± 0,0023 Mpa
Fluxo de massa	lbph	Sensor (microt.) Fluxo de massa ar	± 2%

Tabela 16 – Tabela de incertezas dos instrumentos (continuação)

Parâmetro	Unid.	Sensor	Incerteza
Fluxo de massa	lbph	<i>Sensor (microt.) Fluxo de massa ar</i>	± 2%
Emissão - O ₂	%	<i>Sonda</i>	±0,8% de (FE) (0...+25% Vol. % O ₂)
Emissão - CO	ppm	<i>Sonda</i>	±10 ppm CO (0...+99 ppm CO)
Emissão – CO (H ₂ compensado)	ppm	<i>Sonda</i>	±5,0% de mv (+100...+2000 ppm CO)
Emissão – CO _{baixo}	ppm	<i>Sonda</i>	±2 ppm CO (0...+39.9 ppm CO)
Emissão - CO ₂	%	<i>Sonda</i>	Calculado do O ₂
Emissão - NO _x	ppm	<i>Sonda</i>	±5 ppm NO (0...+99 ppm NO)
Emissão - NO _{Baixo}	ppm	<i>Sonda</i>	±2 ppm NO (0...+39.9 ppm NO)
Emissão - NO ₂	ppm	<i>Sonda</i>	±5 ppm NO ₂ (0...+99.9 ppm NO ₂)
Emissão - THC	ppm	<i>Sonda</i>	< 400 ppm (100...4000 ppm) < 10% do vm (> 4000 ppm)