

2

Fundamentos Teóricos

2.1

Termodinâmica de Microturbinas

A operação básica de uma microturbina a gás é similar a do ciclo de potência a vapor, porém o fluido de trabalho utilizado é o ar. O ar atmosférico é aspirado, comprimido no compressor e encaminhado, a alta pressão, para uma câmara de combustão. Neste componente o ar é misturado com o combustível pulverizado e é provocada a ignição. Deste modo obtém-se um gás a alta pressão e temperatura que é enviado a uma turbina onde ocorre a expansão dos gases até a pressão de exaustão.

2.1.1

O Ciclo Ideal da Microturbina a Gás

O ciclo Brayton é o ciclo ideal para microturbina a gás. O compressor e a turbina no ciclo ideal são adiabáticos e reversíveis, conforme a figura abaixo:

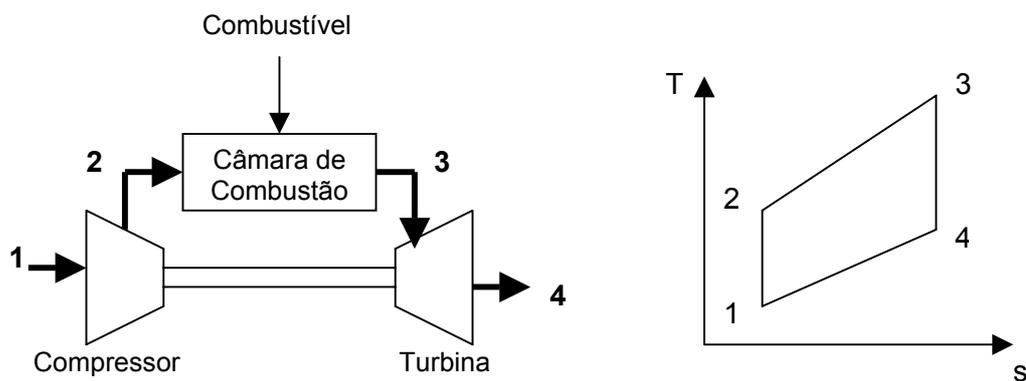


Figura 5: Ciclo Brayton Simples

Para sua análise, aplica-se a equação da energia (1ª Lei da Termodinâmica), para cada uma das transformações integrantes do processo, e

utilizando a definição de eficiência térmica (η_t), através da seguinte equação em função da temperatura absoluta:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (1)$$

Pode-se notar, através da figura 5, que os processos de transferência de calor não são isotérmicos reversíveis, o que nos mostra que a eficiência térmica do ciclo Brayton é menor do que a eficiência térmica do ciclo de Carnot, tomando como referência.

2.1.2

Microturbina a Gás Operando em Ciclo Aberto

A microturbina a gás opera na maioria dos casos, segundo um ciclo aberto porque o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico completo. Entretanto, para analisar as microturbinas, é vantajoso conhecer ciclos fechados que se aproximam muito dos ciclos abertos. Um destes ciclos fechados é denominado ciclo-padrão a ar e é baseado nas seguintes hipóteses:

- O fluido de trabalho é uma massa fixa de ar e este ar pode ser sempre modelado como um gás perfeito. Assim, não há processo de alimentação nem o de descarga.
- O processo de combustão é substituído por um processo de transferência de calor de uma fonte externa.
- O ciclo é completado pela transferência de calor ao meio envolvente (em contraste com o processo de exaustão e admissão numa turbina real).
- Todos os processos são internamente reversíveis.
- Usualmente é feita a hipótese adicional de que o ar apresenta calor específico constante.

O principal mérito do ciclo-padrão a ar consiste em nos permitir examinar qualitativamente a influência de várias variáveis no desempenho do ciclo. Os resultados obtidos no ciclo-padrão a ar, tais como o rendimento e a pressão média efetiva diferirão consideravelmente daqueles relativos a microturbina real. A ênfase, portanto, na nossa consideração do ciclo-padrão a ar está principalmente na análise dos aspectos qualitativos.

Através de uma análise termodinâmica, é possível determinar o estado termodinâmico do ar ou dos gases de combustão em cada ponto do ciclo, como se pode visualizar na figura abaixo.

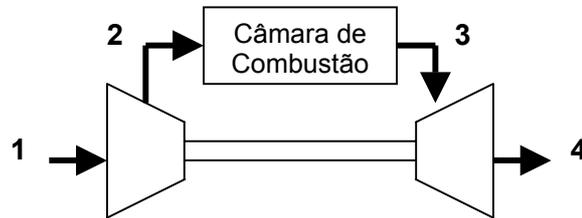


Figura 6: Estado termodinâmico do ar e dos gases de combustão em cada ponto do ciclo aberto da microturbina a gás

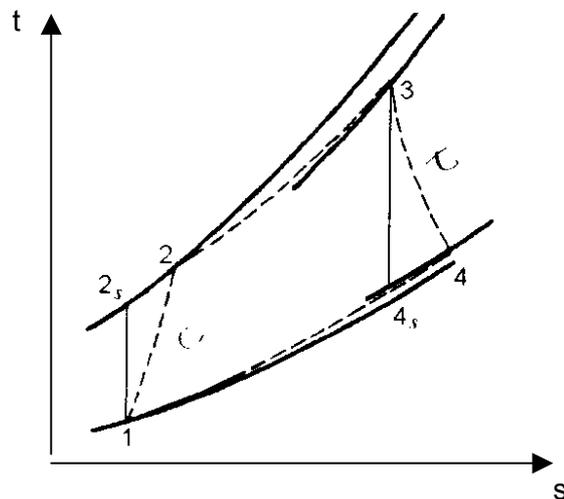


Figura 7: Diagrama temperatura-entropia do ciclo aberto

Portanto, através da análise do gráfico da figura 7, podem-se apresentar os seguintes processos para o ciclo aberto:

- 1-2 : Compressão adiabática irreversível do ar atmosférico: Compressor;
- 2-3 : Adição de calor pela queima de combustível: Câmara de Combustão: a partir do ponto 3 o fluido de trabalho passa a ser uma mistura de gases constituída pelos produtos da combustão;
- 3-4 : Expansão adiabática irreversível dos gases: Turbina

2.1.3

O Ciclo da Microturbina a Gás com Regenerador

O rendimento do ciclo da microturbina a gás pode ser melhorado pela introdução de um regenerador, pois neste caso, os gases de exaustão são usados para aquecer o ar comprimido de entrada na câmara de combustão, reduzindo assim, a quantidade de combustível que é requerida para alcançar a temperatura especificada. O esquemático abaixo mostra o diagrama temperatura-entropia para definição da eficiência do regenerador.

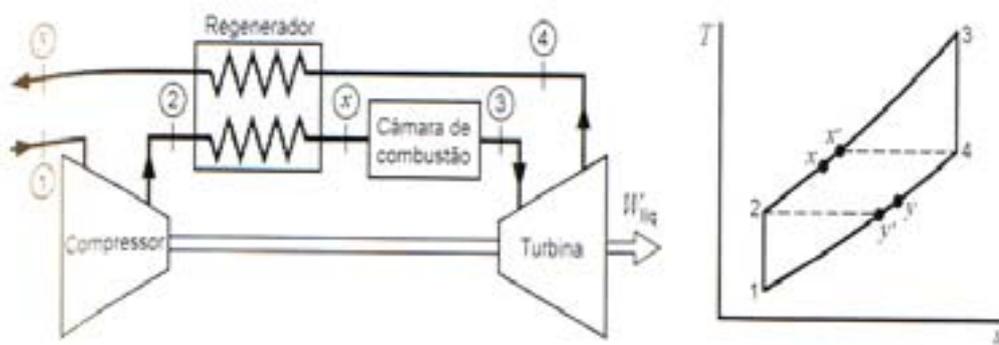


Figura 8: Diagrama temperatura-entropia para a definição de eficiência do regenerador

A análise termodinâmica, em considerações das 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, permite escrever as equações da eficiência do processo de regeneração em função das entalpias ou alternativamente das temperaturas de entrada e saída do fluido de trabalho.

$$\eta_{reg} = \frac{h_x - h_2}{h_{x'} - h_2} \quad (2)$$

$$\eta_{reg} = \frac{T_x - T_2}{T_{x'} - T_2} \quad (3)$$

2.2

Expressão das Incertezas de Medição

Para estimar adequadamente a correção e as incertezas envolvidas em uma operação de medição é necessário caracterizar perfeitamente o processo de medição. Devem ser considerados, além do próprio sistema de medição e seus eventuais acessórios, os procedimentos segundo o qual as medições são efetuadas e os dados tratados; a definição do mensurando; os princípios de medição envolvidos; a ação das grandezas de influência sobre o sistema de medição ou sobre o mensurando e a ação do operador, para citar os mais importantes. Cada um desses elementos acrescenta um componente de incerteza associado ao resultado da medição que devem ser convenientemente considerados e combinados para que se obtenha uma estimativa realista da incerteza associada ao processo de medição.

A avaliação das incertezas das diversas variáveis de medição dos instrumentos constantes da bancada de teste e as respectivas propagações dessas incertezas exige conceitos teóricos específicos.

Este capítulo apresenta uma metodologia fundamentada no “Guia Para Expressão da Incerteza de Medição” [ISO-GUM, 1998], com base no qual são estimadas e combinadas as contribuições sistemáticas e aleatórias de cada fonte de incerteza.

Na prática, a incerteza no resultado pode aumentar em função dos vários componentes que lhe são associados. Dentre alguns fatores, destacam-se: definição incompleta, amostragem, condições ambientais, incerteza de pesos e equipamentos volumétricos, valores de referência, aproximações e hipóteses incorporadas no procedimento e método de medição.

2.2.1

Componentes da Incerteza

Segundo o “ISO GUM”, na estimativa da incerteza total é necessário tratar separadamente cada fonte de incerteza para se saber a sua contribuição. Cada uma das contribuições separadas de incerteza é referida como um Componente de Incerteza. Quando expressa como um desvio padrão, um componente da incerteza é conhecido como incerteza padrão, u ; para isto,

divide-se o valor de cada contribuição de incerteza pelo seu respectivo divisor, correspondente à distribuição de probabilidade estatística atribuída. Os divisores para as principais distribuições se encontram listados na tabela abaixo.

Tabela 2: Divisores para distribuição de probabilidade (nível de 95,45 % de confiança)

Distribuição	Divisor
Normal (Certificado de calibração)	2
Retangular	$\sqrt{3}$
Triangular	$\sqrt{6}$

Se existe correlação entre alguns componentes, então devemos calcular a covariância. No entanto, freqüentemente é possível avaliar o efeito combinado de vários componentes. Para o resultado de uma medição, a incerteza total, incerteza padrão combinada, u_c , é uma estimativa do desvio padrão combinado igual à raiz quadrada positiva da variância total obtida pela combinação de todos os componentes de incerteza, avaliados, usando a lei da propagação de incerteza.

Para muitos propósitos, uma incerteza expandida, U , poderia ser usada. A incerteza expandida provém do intervalo dentro do qual o valor do mensurando acredita-se estar com um nível particular de confiança. A incerteza expandida é obtida, pela multiplicação da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência k . A escolha do fator de abrangência é baseada no nível de confiança desejado. Para um nível de aproximadamente 95,45 %, k é 2.

Tabela 3: Nível de confiança e fator de abrangência

Nível de Confiança	Fator de Abrangência (k)
68,27	1,000
90,00	1,645
95,00	1,960
95,45	2,000
99,00	2,576
99,73	3,000

2.2.2

Incertezas tipo A e tipo B

A classificação dos tipos de incerteza A e B deve-se à necessidade de indicar dois diferentes caminhos para avaliação das incertezas, sendo que ambos são baseados em distribuições de probabilidade e as incertezas resultantes são quantificadas através do desvio padrão.

2.2.2.1

Avaliação da Incerteza tipo A

Método de avaliação da incerteza pela análise estatística de série de observações. Em metrologia, pode-se afirmar que, a melhor estimativa de uma grandeza que varia aleatoriamente, é a média aritmética das n medidas efetuadas e calculada por:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4)$$

Os valores x_i diferem entre si por causa de efeitos aleatórios que ocorrem durante as medições.

A variância estimada $s^2(x_i)$ ou o desvio padrão estimado $s(x_i)$ caracterizam a variabilidade dos valores medidos x_i , isto é, a dispersão dos mesmos em torno do valor médio. A expressão da variância é dada por:

$$s^2(x_i) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (5)$$

A melhor estimativa da variância da média $\sigma^2(\bar{x})$, da grandeza a medir, é a variância experimental da média cuja expressão é:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (6)$$

O desvio padrão experimental da média serve para qualificar quanto o valor médio \bar{x} representa a grandeza a ser medida X . Esta estimativa é tanto melhor quanto maior for o número de repetições efetuadas na medição.

2.2.2.2

Avaliação da Incerteza tipo B

Método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de série de observações. Incertezas deste tipo são determinadas a partir de informações acessórias e externas ao processo de medição. Estas informações podem ser obtidas de resultados de medições similares anteriores, experiência ou conhecimento do comportamento do instrumento, dados do fabricante, dados fornecidos por certificados de calibração, referências de manuais de instrução, etc.

Na avaliação dos componentes deste tipo de incerteza é necessário considerar e incluir pelo menos os originados pelas seguintes fontes:

- a) a incerteza associada ao padrão de referência e qualquer instabilidade em seu valor ou indicação (padrão sujeito a "drift" ou com instabilidade temporal);
- b) a incerteza associada ao equipamento de medida ou calibração, como por exemplo, envelhecimento de conectores, etc., e qualquer instabilidade em seu valor ou indicação (equipamento sujeito a "drift");
- c) a incerteza associada ao equipamento (mensurando) a ser medido ou calibrado, por exemplo, o valor de uma divisão, qualquer instabilidade durante a calibração, etc;
- d) a incerteza associada ao procedimento de calibração (medição);
- e) a incerteza associada ao efeito das condições ambiente em um ou mais dos itens acima.

Notas: 1) Sempre que possível os erros conhecidos (sistemáticos) devem ser corrigidos para minimizar a incerteza final.

2) Sempre deve ser feita uma análise criteriosa ao adicionar as incertezas do Tipo B para que não haja repetição, isto é, que se considere mais de uma vez uma dada fonte de incerteza.

3) Outro ponto a ser considerado é o nível de confiança que é associado a uma dada incerteza que vá participar na composição da incerteza final.

2.2.3

Incerteza Padrão (u)

Nos casos mais complexos, onde as características de mais de uma fonte de incerteza devem ser combinadas para estimar a incerteza expandida do processo de medição, é conveniente definir a denominada incerteza padrão:

A incerteza padrão de uma fonte de incerteza é definida como a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão.

A estimativa da incerteza padrão associada a uma fonte de incerteza pode ser efetuada através de procedimentos estatísticos ou por outros meios.

Há várias situações onde o desvio padrão experimental associado a uma fonte de incerteza pode ser estimado a partir de valores de observações repetitivas do mensurando. A incerteza padrão coincide então com o valor estimado do desvio padrão.

Segundo o "ISO-GUM", a nomenclatura adotada denomina os procedimentos estatísticos como "tipo A". Para estimar o desvio padrão experimental seja x uma variável aleatória. Sejam x_i (Para $i = 1, 2, \dots, n$) n valores independentemente obtidos para a variável q . Sua média pode ser estimada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

O desvio padrão experimental da variável x , representado por "s", é estimado por:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

Deve ser lembrado que para a estimativa de $s(x)$, ser boa é necessário envolver um número suficientemente grande de observações independentes (é recomendável pelo menos $n > 10$).

Quando é utilizado o valor médio das indicações, obtido a partir da média de um conjunto de "n" indicações de x , o desvio padrão experimental da média de x é estimado por:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

A incerteza padrão a ser associada a esta variável aleatória depende do procedimento de cálculo utilizado. Se apenas um valor de q é considerado, a incerteza padrão é dada por:

$$u(x) = s(x)$$

Se a média de "n" valores de x é considerada, a incerteza padrão deve ser estimada por:

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

2.2.4

Incerteza Padrão Combinada (u_c)

Para que a estimativa da incerteza padrão combinada seja efetuada convenientemente, algumas propriedades das variáveis aleatórias devem ser consideradas. Se as várias fontes de incerteza agem como variáveis aleatórias independentes, a incerteza combinada não pode ser obtida pela simples soma algébrica de cada incerteza padrão.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculadas, isto é, não há nenhuma relação entre o crescimento de uma e o crescimento (ou decréscimo) da outra. Do ponto de vista estatístico, estas variáveis são ditas não correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é zero. É a situação mais comumente presente entre as fontes de erro em medições diretas.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente dependentes se suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra de forma proporcional à primeira. Do ponto de vista estatístico, estas variáveis são ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é unitário e positivo (+1). Há ainda o caso em que o crescimento da primeira está nitidamente atrelado ao decréscimo proporcional da segunda. Neste caso estas variáveis são ainda ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é também unitário, porém negativo (-1). Duas variáveis aleatórias podem apresentar dependência estatística parcial, isto é, nem são totalmente dependentes nem totalmente independentes. Nestes casos, o coeficiente de correlação entre estas variáveis pode assumir qualquer valor não inteiro entre -1 e +1.

O procedimento descrito a seguir é chamado de “Propagação da Incerteza de Medição”, que na verdade pode ser interpretado como a propagação do desvio padrão de uma variável w a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes, x e y . Considerando w uma função das variáveis estatisticamente independentes x e y , pode-se escrever:

$$u^2 = (c_x u_x)^2 + (c_y u_y)^2 \quad (10)$$

$$c_x = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (11)$$

$$c_y = \frac{\partial w}{\partial y} \quad (12)$$

Onde u_x e u_y são as incertezas padrão, previamente estimadas das grandezas x e y e, c_x e c_y são os coeficientes de sensibilidade.

Desta forma, pode-se estimar a incerteza de w pelo conhecimento apenas das variáveis x e y e de suas incertezas, com apenas uma medição.

Para modelos envolvendo somente soma e diferença, exemplo: $w = x + y + \dots$, a incerteza padrão combinada $u_c(w)$ é dada por:

$$[u_c(w)]^2 = [u_c(x)]^2 + [u_c(y)]^2 \quad (13)$$

Para modelos envolvendo somente um produto ou quociente, exemplo:

$w = xy\dots$ ou $w = \frac{x}{y}$, a incerteza padrão combinada $u_c(w)$ é dada por:

$$\left[\frac{u_c(w)}{w} \right]^2 = \left[\frac{u_c(x)}{x} \right]^2 + \left[\frac{u_c(y)}{y} \right]^2 + \dots \quad (14)$$

A estimativa da incerteza padrão combinada para o caso geral onde as grandezas de entrada se relacionam através de uma expressão matemática qualquer pode ser efetuada através da aplicação de uma expressão genérica. Sua demonstração matemática é baseada na expressão em termos de série de Taylor e não será tratada neste texto. Seja, por exemplo, uma grandeza W calculada em função de diversas grandezas de entrada relacionadas por:

$$W = f(a, b, c, \dots)$$

A incerteza padrão combinada da grandeza W pode ser estimada por:

$$[u_c(W)]^2 = \left[\frac{\partial W}{\partial a} u_c(a) \right]^2 + \left[\frac{\partial W}{\partial b} u_c(b) \right]^2 + \left[\frac{\partial W}{\partial c} u_c(c) \right]^2 + \dots \quad (15)$$

2.2.5

Número de Graus de Liberdade Efetivo

Quando as incertezas padrão de várias fontes de incertezas são consideradas para estimar a incerteza padrão combinada, o número de graus de liberdade resultante da incerteza combinada deve ser estimado a partir de informações de cada fonte de incerteza. A melhor maneira de combinar os diversos componentes de incerteza é através da tabulação das incertezas padronizadas de cada tipo, utilizando o conceito de número de graus de liberdade efetivo para determinar o coeficiente de abrangência que corresponde a uma confiança estatística.

O "ISO-GUM" denomina por número de graus de liberdade efetivos (ν_{ef}) o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada. Recomenda a utilização da equação de Welch-Satterthwaite para estimar o número de graus de liberdade efetivos:

$$\frac{u_c^4}{\nu_{ef}} = \frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2} + \dots + \frac{u_p^4}{\nu_p} \quad (16)$$

onde:

u_c é a incerteza padrão combinada;

u_1, u_2, \dots, u_p são as incertezas padrão de cada uma das "p" fontes de incerteza;

$\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_p$ são os números de graus de liberdade de cada uma das "p" fontes de incerteza;

ν_{ef} é o número de graus de liberdade efetivo associado à incerteza padrão combinada.

2.2.6

Incerteza expandida (U)

A incerteza padrão combinada corresponde ao desvio padrão resultante da ação combinada das várias fontes de incerteza consideradas. A incerteza expandida é calculada multiplicando-se a incerteza padrão combinada pelo fator

de abrangência k . Para sua determinação é necessário o conhecimento do número efetivo de graus de liberdade.

Em aplicações nas áreas da engenharia é comum trabalhar com níveis de confiança de 95%. Para atingir este nível de confiança, a incerteza padrão combinada que corresponde a um desvio padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de Student. No "ISO-GUM", este coeficiente é denominado de fator de abrangência, comumente representado pelo símbolo " k_{95} " quando o nível de confiança 95% é usado.

A denominada incerteza expandida $U_{95\%}$ corresponde à faixa de valores que enquadra a incerteza com nível de confiança de aproximadamente 95%. É estimada por:

$$U_{95\%} = k_{95\%} * u_c \quad (17)$$

onde:

u_c é a incerteza padrão combinada;

$k_{95\%}$ é o fator de abrangência para o nível de confiança de 95%

$U_{95\%}$ representa a incerteza expandida para o nível de confiança 95%

Nota: Na prática é comum representar a incerteza expandida pelo símbolo U e subentendendo-se que o nível de confiança é sempre 95%.

Tabela 4: Valores de t-student para diferentes níveis de confiabilidade

$\nu = n_i - 1$ (Graus de Liberdade)	Níveis de Confiabilidade		
	68,27 %	95,45 %	99,73 %
1	1,84	13,97	235,80
2	1,32	4,53	19,21
3	1,20	3,31	9,22
4	1,14	2,87	6,62
5	1,11	2,65	5,51
6	1,09	2,52	4,90
7	1,08	2,43	4,53
8	1,07	2,37	4,28
9	1,06	2,32	4,09
10	1,05	2,28	3,96
15	1,03	2,18	3,59
20	1,03	2,13	3,42
25	1,02	2,11	3,33

Tabela 4: Valores de t-student para diferentes níveis de confiabilidade (continuação)

$\nu = n_i - 1$ (Graus de Liberdade)	Níveis de Confiabilidade		
	68,27 %	95,45 %	99,73 %
30	1,02	2,09	3,27
40	1,01	2,06	3,20
50	1,01	2,05	3,16
∞	1,00	2,00	3,00

2.2.7

Roteiro de Cálculo

1 - Estabelecer a expressão matemática que melhor represente o processo de medição

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

2- Identificar a correção a ser aplicada ao resultado da medição nas condições da medição;

3- Verificar a existência de erros sistemáticos não corrigidos e a incerteza associada a erros sistemáticos corrigidos;

4-Verificar a existência de informações da fonte de erros obtidos em manuais ou experiência anterior;

5- Calcular as incertezas do Tipo B presentes no processo de medição;

6- Avaliar, a partir de conhecimentos anteriores, se as condições ambientes ou dados de cálculos introduzem algum erro sistemático ou incerteza adicional;

7- Se o componente aleatório da medição for significativo, executar um número maior de medição e calcular o valor médio e o desvio padrão;

8- Combinar as incertezas;

9- Calcular o grau de liberdade efetivo;

10- Determinar o coeficiente de abrangência;

Nota: Toda vez que o grau de liberdade efetivo for > 50 pode-se adotar $k = 2,0$.

2.3

Desenvolvimento Metodológico

Segundo a EPA [GHG-SRI-QAP-27, 2002], para desenvolver o estudo do consumo de energia e dos índices de desempenho energético em microturbinas a gás, apresenta-se a seguir o cálculo dos parâmetros e a definição das variáveis deste equipamento, com seus erros máximos esperados, onde se busca considerar o efeito de variações nas condições ambientes (temperatura, pressão e umidade relativa), em relação às condições de referência, tabela 1.

Parâmetros de desempenho de maior interesse incluem produção e qualidade de energia elétrica, eficiência de conversão de energia térmica para elétrica, eficiência de recuperação, disponibilidade operacional, exigência de manutenção e desempenho econômico. Os testes de aproximação têm enfoque em avaliar esses parâmetros de desempenho de interesse significativo para futuros clientes do sistema de microturbina.

Tabela 5: Variáveis com seus valores esperados [GHG-SRI-QAP-27, 2002]

Variáveis	Valor	Incerteza (%)
Vazão de Combustível	12,8 scfm	1,0
PCI	950 Btu/scf	0,2
Entrada de Calor (HI)	730.000 Btu/h	1,02
Produção de Energia	60 kW	1,5
Produção de Energia	205.000 Btu/h	1,5
Eficiência Elétrica	28,1 %	1,81
Calor Recuperado	350.000	2,5
Eficiência Térmica	47,9 %	2,24
Recuperação de Energia Total	555. 000 Btu/h	1,38
Eficiência Comb. Turbina	75,9 %	2,04

Nota: As incertezas percentuais reportadas estão fidedignas aos valores indicados na referência GHG-SRI-QAP-27, 2002.

Na avaliação do desempenho da microturbina foram considerados os seguintes parâmetros:

- Desempenho da Produção de Calor e Energia
- Desempenho da Qualidade da Energia Elétrica
- Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar

- Estimativa da Emissão de NO_x

Os parâmetros listados acima representam o desempenho global do sistema de produção de calor e energia produzidos pelo sistema do microturbina.

Será instalado um medidor para medir a energia elétrica gerada pela microturbina. O combustível da microturbina será o gás natural e será instalado um medidor que monitora a vazão de gás natural, um analisador de gás, também será instalado para verificar a composição de gás.

2.3.1

Desempenho da Produção de Calor e Energia

O desempenho de produção de energia é uma característica operacional que é de grande interesse aos compradores, operadores, e usuários de sistemas geradores de eletricidade.

A produção de energia e eficiência elétrica das microturbinas depende das condições do ar de entrada. Para apresentar coerentemente os dados de desempenho, resultantes de testes de microturbinas a gás operando sob quaisquer condições, tais resultados devem ser normalizados para as condições de referência. Por isto, a maioria das especificações de desempenho de microturbinas são declaradas para as condições de referência, tabela 1. Para verificar o desempenho em outras condições, os fabricantes utilizam freqüentemente uma série de curvas de desempenho, que mostram o perfil da produção de energia e eficiência da microturbina a diferentes condições ambientais. Assim, a verificação independente da produção de energia e eficiência é recomendada para a determinação do desempenho a condições de trabalho.

O desempenho de produção de energia representa uma classe de sistemas de microturbina com características operacionais, que são de grande interesse dos compradores, operadores e usuários destes sistemas. Parâmetros que serão caracterizados na unidade de teste.

- Saída de energia elétrica para carga selecionada;
- Eficiência elétrica;
- Desempenho do calor recuperado;
- Eficiência da energia térmica;
- Eficiência do sistema;

- Perdas de energias parasitárias para o compressor de gás.

O período de teste de cada carga será de 30 minutos, espera-se que com esse tempo possa diminuir a incerteza das mudanças nas condições de operação.

2.3.1.1

Determinação da Produção de Calor e Energia

As microturbinas são equipadas com um medidor elétrico que mede a energia gerada. As medições de produção de energia elétrica permitem determinação de perdas de cargas nos transformadores de voltagem externa, que não são incluídos freqüentemente na produção de energia do sistema de controle do fabricante. A produção de energia pode ser anotada continuamente, pode ser calculada a média ou pode ser integrado sobre a duração do período monitorando.

Segundo a ASME [PTC22, 1997], para se determinar esta produção, devemos efetuar uma medição direta da produção de energia elétrica (kW), da vazão de combustível e da quantidade de energia do combustível. A eficiência de conversão da Energia eletricidade é determinada dividindo a produção de energia elétrica pela energia de combustível introduzida. A medição da vazão de gás natural pode ser feita através de um medidor mássico ou volumétrico e a determinação da quantidade de energia de entrada fornecida pelo combustível pode ser obtida através da análise em laboratório para determinar o PCI do combustível ou através de cálculos partindo dos PCI de cada componente do gás.

Tabela 6: Limites máximos para variações dos parâmetros [PTC-22, 1997]

Variáveis	Varição Máxima
Temperatura Ambiente	± 2 K
Pressão Atmosférica	$\pm 0,5$ %
Vazão de Gás	± 2 %
Fator de Potência	± 2 %
Geração de Energia	± 2 %

2.3.1.2

Produção Média de Energia Elétrica

A produção média de energia elétrica (P), em kW, é a leitura instantânea do sensor a cada minuto (P_i), totalizando um número de leituras (n).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (18)$$

Assim temos o desvio padrão (u_{P_i}), a incerteza do medidor (u_m) e a incerteza da produção média de energia elétrica (U_P).

$$u_{P_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P - P_i)^2}{(n-1)}} \quad (19)$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad (20)$$

$$u_P = (u_{P_i}^2 + u_m^2)^{1/2} \quad (21)$$

$$U_P = 2,09 * u_P \quad (22)$$

2.3.1.3

Quantidade de Energia Média de Entrada

O consumo específico de calor (Q), também é frequentemente adotado como indicador dimensional de desempenho de microturbinas a gás. É determinado medindo-se a quantidade de gás consumido (V), em kg/s, e o poder calorífico inferior, em kJ/kg.

$$Q = V * PCI \quad (23)$$

$Q = f(V, PCI)$, temos:

$$u_Q^2 = \left(\frac{\partial Q}{\partial V} * u_V \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial PCI} * u_{PCI} \right)^2 \quad (24)$$

Coefficientes de Sensibilidade:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = PCI \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial PCI} = V \quad (26)$$

Substituindo as eq. (25) e (26), na eq. (24), e dividindo todos os termos por Q, temos:

$$\frac{u_Q^2}{Q} = \left(\frac{PCI * u_V}{V * PCI} \right)^2 + \left(\frac{V * u_{PCI}}{V * PCI} \right)^2$$

Logo, a incerteza padrão é dada por:

$$u_Q = \left[\left(\frac{u_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{u_{PCI}}{PCI} \right)^2 \right]^{1/2} * Q \quad (27)$$

$$U_Q = 2 * u_Q \quad (28)$$

$$u_{PCI} = \frac{U_{PCI}}{2} \quad (29)$$

$$u_V = \frac{U_V}{2} \quad (30)$$

Agora vamos calcular o desvio padrão (u_{V_i}) e a incerteza da medição de gás natural (U_V).

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (31)$$

$$u_{V_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V - V_i)^2}{(n-1)}} \quad (32)$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad (33)$$

$$u_V = (u_{V_i}^2 + u_m^2)^{1/2} \quad (34)$$

$$U_V = 2,09 * u_V \quad (35)$$

Para assegurar o desempenho dessa tecnologia, em diferentes regiões geográficas usa-se um fator de correção para as condições de referência, conforme tabela 1.

2.3.1.4

Eficiência Elétrica

O conceito de desempenho ou eficiência de um sistema ou equipamento, relacionando o efeito útil desejado com o consumo requerido para sua obtenção está convencionalmente associado à Primeira Lei da Termodinâmica ou Lei da Conservação da Energia. Esta conceitualização de desempenho termodinâmico, embora possua limitações e deva paulatinamente dar lugar a formulações mais elaboradas, como a eficiência energética, é largamente utilizada e fornece um parâmetro comparativo de enorme utilidade [Szargut, 1990]. De fato, este conceito de eficiência decorre de uma adimensionalização do clássico consumo específico, que nos tempos de Watt se avaliava em termos de combustível, como “bushell de carvão por HP durante uma hora” [Kolin, 1971] e mais modernamente em termos de calor “heat rate” em kJ/Wh.

Medidas simultâneas de produção de energia elétrica, taxa de recuperação de calor, taxa do uso de calor, consumo de combustível, condições meteorológicas ambientes serão executadas durante o teste de emissão de cada carga para a determinação da eficiência de produção de energia elétrica. Os dados serão medidos em tempos sincronizados para computar a eficiência elétrica conforme sugerido na PTC-22, 1997.

A PTC-22 recomenda a coleta de dados em intervalos de tempo de 4 a 30 minutos [PTC. Seção 3.4.4 e 4.12.3] para computar a eficiência elétrica. Esta restrição minimiza a incerteza para determinação da eficiência elétrica devido a mudanças de condições operacionais, por exemplo, velocidade da turbina. Dentro deste espaço de tempo, PTC-22 especificam limites máximos permissíveis em produção de energia, fator de potência, vazão de combustível ou condições ambientes que excedam os níveis.

A eficiência elétrica (η) será calculada em função da produção média de energia (P), em kW e da quantidade de energia média de entrada (Q), em kW, [ASME PTC-22, 1997]:

$$\eta = \frac{3412,14 * P}{Q} \quad (36)$$

onde:

3412,14 \Rightarrow Converter kW em Btu/h

$\eta = f(P, Q)$, temos:

$$u_{\eta}^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial P} * u_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} * u_Q \right)^2 \quad (37)$$

Coefficientes de Sensibilidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P} = \frac{3412,14}{Q} \quad (38)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial Q} = -\frac{3412,14 * P}{Q^2} \quad (39)$$

Substituindo as equações 38 e 39, na equação 37, e dividindo todos os termos por η , temos:

$$\frac{u_{\eta}^2}{\eta^2} = \left(\frac{Q}{3412,14 * P} * \frac{3412,14 * u_P}{Q} \right)^2 + \left(\frac{Q}{3412,14 * P} * \frac{3412,14 * P * u_Q}{Q^2} \right)^2$$

Logo, a incerteza padrão é dada por:

$$u_{\eta} = \left[\left(\frac{u_P}{P} \right)^2 + \left(\frac{u_Q}{Q} \right)^2 \right]^{1/2} * \eta \quad (40)$$

$$u_P = \frac{U_P}{2} \quad (41)$$

$$U_{\eta} = 2 * u_{\eta} \quad (42)$$

O medidor de vazão será instalado na entrada da microturbina e será programada para monitorar continuamente e registrar uma leitura por minuto.

Os cálculos acima refletem a eficiência da produção de energia nas condições locais (temperatura, pressão e umidade relativa durante os testes). Para avaliar o desempenho desta tecnologia em regiões geográficas diferentes, devemos usar as correções como sugerido pela norma internacional ISO 2314, 1973 e conforme, tabela 1.

2.3.1.5

Medição da Eficiência Térmica e Troca de Calor

É usado para medir a vazão do fluido que circula no trocador de calor e as temperaturas de suprimento e retorno. O desempenho do calor recuperado (K) é função da temperatura do fluido de retorno e da demanda do calor global associado ao sistema.

$$K = v * \rho * c * \Delta t \quad (43)$$

onde:

$\rho \Rightarrow$ Densidade do fluido

$v \Rightarrow$ Volume do fluido durante 1 minuto

$c \Rightarrow$ Calor específico do líquido

$$K = f(v, \rho, c, \Delta t)$$

$$u_K^2 = \left[\frac{\partial K}{\partial v} * u_v \right]^2 + \left[\frac{\partial K}{\partial \rho} * u(\rho) \right]^2 + \left[\frac{\partial K}{\partial c} * u_c \right]^2 + \left[\frac{\partial K}{\partial \Delta t} * u(\Delta t) \right]^2 \quad (44)$$

Coefficientes de Sensibilidade:

$$\frac{\partial K}{\partial v} = \rho * c * \Delta t \quad (45)$$

$$\frac{\partial K}{\partial c} = v * \rho * \Delta t \quad (46)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \rho} = v * c * \Delta t \quad (47)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \Delta t} = v * \rho * c \quad (48)$$

Logo a incerteza padrão:

$$u_K^2 = \left[\left(\frac{u_v}{v} \right)^2 + \left(\frac{u_\rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{u_c}{c} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} * K \quad (49)$$

$$U_K = 2 * u_K \quad (50)$$

$$u_v = \frac{U_v}{2} \quad (51)$$

$$u_\rho = \frac{U_\rho}{2} \quad (52)$$

$$u_c = \frac{U_c}{2} \quad (53)$$

$$u_{\Delta T} = \frac{U_{\Delta T}}{2} \quad (54)$$

2.3.1.6

Eficiência Térmica

A eficiência térmica (η_T) da microturbina a gás, também conhecida como rendimento térmico, é definida como sendo:

$$\eta_T = 60 * \left(\frac{K}{Q} \right) \quad (55)$$

$$\eta_T = f(K, Q)$$

$$u_{\eta_T}^2 = \left[\frac{\partial \eta_T}{\partial K} * u_K \right]^2 + \left[\frac{\partial \eta_T}{\partial Q} * u_Q \right]^2 \quad (56)$$

Coefficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial \eta_T}{\partial K} = \frac{60}{Q} \quad (57)$$

$$\frac{\partial \eta_T}{\partial Q} = -\frac{60 * K}{Q^2} \quad (58)$$

Logo a incerteza padrão é dada por:

$$u_{\eta_T}^2 = \left[\left(\frac{u_K}{K} \right)^2 + \left(\frac{u_Q}{Q} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (59)$$

$$U_{\eta_T} = 2 * u_{\eta_T} \quad (60)$$

2.3.2

Desempenho da Qualidade da Energia Elétrica

Atualmente, a "medição" da qualidade da energia elétrica tem sido determinada, fundamentalmente, pela sensibilidade e desempenho dos equipamentos do consumidor final. Em qualquer ponto de um sistema elétrico ideal, as tensões deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, com amplitude e frequência constantes.

Os dados da qualidade da energia são usados para informar o número e magnitude de incidentes que não se encontram ou excedem um padrão de qualidade. Tais padrões são desenvolvidos pelo Instituto de Padrões Nacional Americano (ANSI) e pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Especificamente, foram adotadas as práticas recomendadas pela IEEE e exigências para controle em sistemas de energia elétrica para verificar voltagem e corrente total de distorção de harmônico (THD). Quando um gerador elétrico é conectado em paralelo, opera simultaneamente com a rede elétrica, existem vários fatores a serem verificados.

A voltagem e frequência geradas pelo sistema devem ser alinhadas com a rede elétrica. A microturbina realiza isso convertendo a produção de energia de baixa para alta frequência.

Os efeitos do gerador de frequência elétrica, fator de potência, e distorção de harmônicos total, são parâmetros de qualidade de energia e são determinados durante o período de verificação do medidor de energia, logo, não podem ser analisados independentes da rede elétrica. A qualidade de energia entregue representa um agregado de perturbações.

2.3.2.1

Frequência Elétrica Média

A eletricidade gerada tem frequência aproximada de 60 Hz. O medidor de energia mede continuamente a frequência elétrica no painel de distribuição do gerador e deverá ser registrada a média de cada minuto ao longo de todo o período de teste.

A frequência elétrica média (F), em hertz, será a média de todos os valores registrados no período de teste, e (F_i) a média da frequência por minuto, totalizando um número de leituras (n).

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \quad (61)$$

Assim temos o desvio padrão (u_{F_i}), a incerteza do medidor (u_m) e a incerteza da frequência média (U_F).

$$u_{F_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F - F_i)^2}{(n-1)}} \quad (62)$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad (63)$$

$$u_F = (u_{F_i}^2 + u_m^2)^{1/2} \quad (64)$$

$$U_F = 2,09 * u_F \quad (65)$$

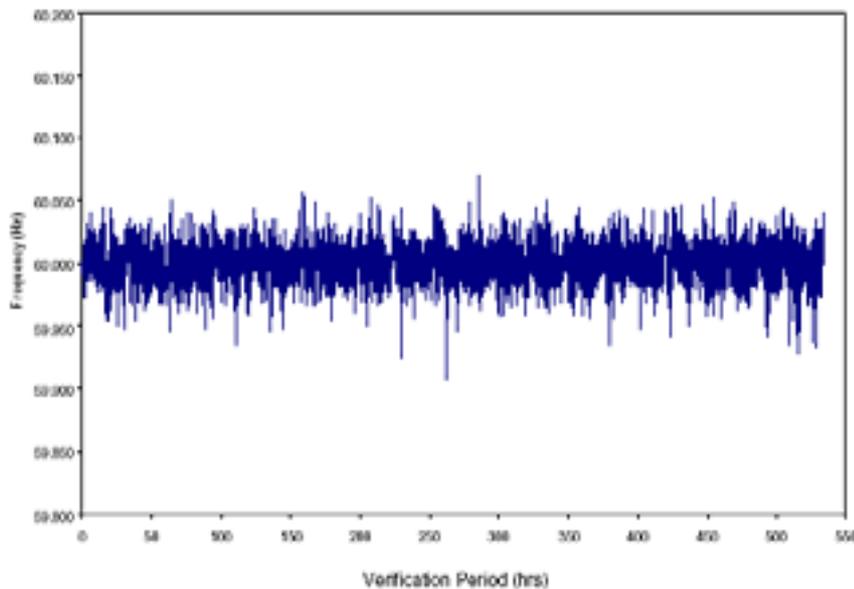


Figura 9: Exemplo da frequência elétrica em função do tempo
[SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]

Tabela 7: Exemplo de valores da frequência elétrica [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]

	Frequência (Hz)
Frequência Média	60,000
Frequência Mínima	59,908
Frequência Máxima	60,070
Desvio Padrão	0,014

2.3.2.2

Tensão Elétrica

Tradicionalmente, a produção de tensão elétrica pode variar dentro de $\pm 10\%$ da tensão padrão sem causar perturbações significativas para operação da maioria dos equipamentos. O medidor medirá a tensão elétrica continuamente para cada fase, fará o registro da tensão elétrica (T_i) a cada minuto e calculará a tensão elétrica média (T), em Volts, para cada fase ao longo do período de teste.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (66)$$

Assim temos o desvio padrão (u_{T_i}), a incerteza do medidor e a incerteza da tensão média (U_T).

$$u_{T_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T - T_i)^2}{(n-1)}} \quad (67)$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad (68)$$

$$u_T = (u_{T_i}^2 + u_m^2)^{1/2} \quad (69)$$

$$U_T = 2,09 * u_T \quad (70)$$

2.3.2.3

Corrente Elétrica

Como a tensão elétrica, o medidor medirá a corrente elétrica continuamente para cada fase. Será registrada a corrente elétrica (I_i) a cada minuto e calculada a corrente elétrica média (I), em amperes, para cada fase ao longo do período de teste.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (71)$$

Assim temos o desvio padrão (u_{I_i}), a incerteza do medidor (u_m) e a incerteza da corrente elétrica média de energia (U_I).

$$u_{I_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I - I_i)^2}{(n-1)}} \quad (72)$$

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

$$u_I = (u_{I_i}^2 + u_m^2)^{1/2} \quad (74)$$

$$U_I = 2,09 * u_I \quad (75)$$

2.3.2.4

Tensão e Corrente Elétrica Total de Distorção de Harmônicos (THD)

Distorção total de harmônicos é o resultado da operação de cargas não lineares. A distorção de harmônicos pode danificar muitos tipos de equipamentos industriais e comerciais. A tensão de distorção de harmônicos e qualquer divergência da tensão AC na forma de onda senoidal.

A corrente elétrica THD é qualquer distorção da forma de onda senoidal, e pode ser quantificado pela análise de Fourier. Fourier mostrou que qualquer forma de onda pode ser analisada como a soma de uma onda senoidal com diferentes frequências.

Baseado nas recomendações do padrão IEEE-519, 1992, os fabricantes de microturbinas especificaram um valor de tensão THD máxima de 5,0 % e os

limites da corrente THD variando de 5,0 % até 20,0 %, dependendo do tamanho do gerador, do teste e da demanda.

Tabela 8: Exemplo de valores da corrente e tensão elétrica
[SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]

	Corrente THD (%)	Tensão THD (%)
Média	3,37	0,94
Mínimo	2,84	0,64
Máximo	4,92	4,76
Desvio Padrão	0,25	0,19

2.3.2.5

Fator de Potência

O fator de potência é a relação de fase de corrente e tensão AC do sistema de distribuição elétrica. Acima das condições ideais, a corrente e a tensão elétrica estão em fase.

Baixo fator de potência fornece uma corrente elétrica mais pesada nas linhas de distribuição de energia para um determinado número real de kW.

Equipamentos de capacidade maior requerem baixos fatores de potência também podendo gerar problemas com THD, ressonância, e outros parâmetros de qualidade.

O medidor medirá o fator de potência comum continuamente em cada fase do gerador, os resultados serão registrados a cada minuto.

2.3.3

Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar

2.3.3.1

Determinação da Taxa de Emissão de Gases

O teste de emissões de gases será realizado para determinar a taxa de emissão de poluentes (CO, NO_x, THC, CH₄ e CO₂). As medições de emissão de

gases serão feitas ao mesmo tempo em que a geração de energia elétrica, em períodos controlados.

Para avaliação da emissão de gases serão testados quatro pontos dentro do range normal da microturbina, incluindo a carga mínima e máxima. Como discutido anteriormente, as cargas selecionadas serão 25 %, 50 %, 75 % e 100 % da capacidade de carga total (60 kW). A turbina alcança a estabilidade de 15 a 30 minutos. Antes de começar os testes serão efetuadas três medições em cada ponto para determinar a repetitividade, com intervalos de 30 minutos. A média das três medições será o informado.

Mudanças de potência entre sucessivas mudanças de cargas acontecerão relativamente rápidas e o sistema se estabilizará em aproximadamente 5 minutos para cada ponto antes de começar a registrar os dados.

Os procedimentos de amostragem e os instrumentos analíticos usados durante estes testes serão iguais aos usados durante os testes de verificação oficiais.

A média dos valores lidos da taxa de emissão durante o teste de cada carga será informada em unidades de parte por milhão de volume seco (ppmvd) para CH₄, CO, NO_x e THC_S, percentual de CO₂ e O₂.

Os valores serão registrados usando a média do minuto ao longo de cada teste e calculados através da média de todo o período de teste.

Concentração de CO, NO_x e THC serão informadas em ppmvd corrigido a 15% O₂, usando a equação [GHD-SRI-GD-03,2002], a seguir:

$$ppmvd @15\%O_2 = ppmvd * [(20,9 - 15,0)/(20,9 - O_2)] \quad (76)$$

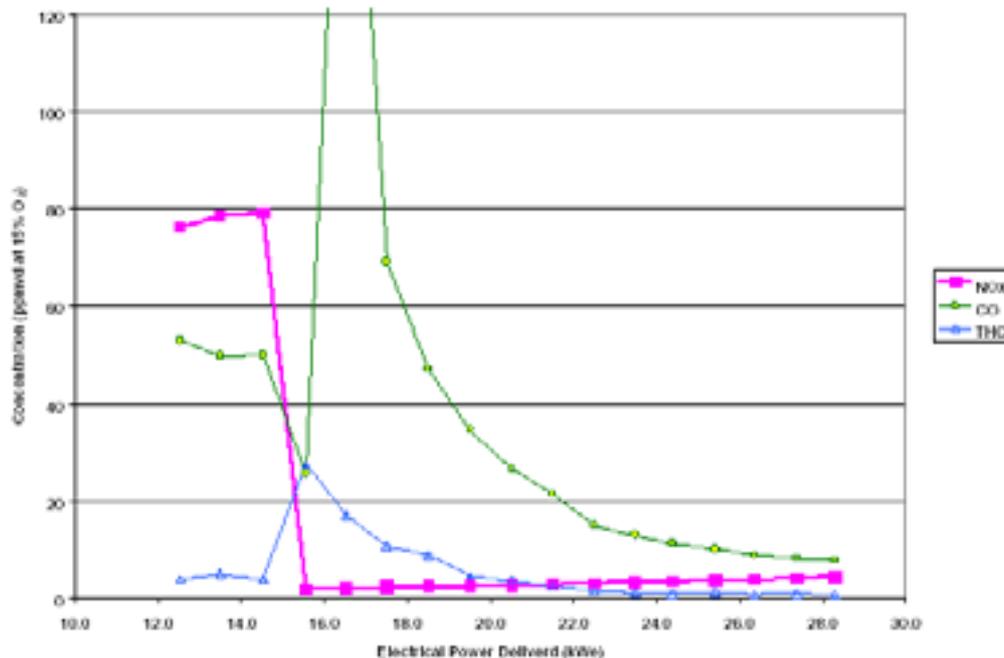


Figura 10: Exemplo de emissões em microturbinas para varias potência
[SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]

O teste dos instrumentos para CH_4 , CO , CO_2 , NO_x , O_2 e THC_s mostram os resultados de concentração dos gases de exaustão em unidades de percentual de CO_2 e O_2 e ppmvd corrigido pra 15% de O_2 para CH_4 , CO , NO_x e THC_s . Os resultados THC e CH_4 são em ppmv em base molhada, porém são corrigidos para ppmvd baseado em medições de gás úmido.

2.3.3.2

Estimativa de Emissão de NO_x

A medição do desempenho de emissões do sistema de microturbina é crítica à determinação do impacto ambiental. As principais emissões de microturbinas a gás consideradas poluentes são: óxidos de nitrogênio (NO e NO_2 , expressos com NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (THC , usualmente expresso em equivalente de metano) e óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3). Hidrocarbonetos não queimados são provenientes de compostos orgânicos voláteis (VOC) os quais contribuem para a formação de uma camada de ozônio troposférico, e compostos tais como metano e etano que não contribuem para a formação desta. SO_2 e THC são considerados

negligenciáveis quando se queima gás natural, sendo assim somente NO_x e possíveis CO serão as únicas emissões significantes quando o combustível da microturbina é o gás natural.

Os óxidos de nitrogênio são produzidos pela oxidação do nitrogênio atmosférico nas altas temperaturas da chama. O processo de formação é endotérmico e se processa de modo mais rápido em temperaturas acima de 1800K [Lefebvre, 1983]. Assim ao contrário do CO e do THC, a quantidade de óxidos aumenta somente nas regiões centrais da chama em um combustor.

2.4

Combustão

A combustão é o processo de reações químicas que se produzem durante a oxidação completa ou parcial do carbono, do hidrogênio e do enxofre contidos em um combustível. Portanto, para haver combustão são necessários três componentes: calor, oxigênio e combustível.

O calor necessário para iniciar a combustão pode ser fornecido por uma chama-piloto ou uma centelha de ignição. Iniciada a combustão, o próprio calor que ela produz sustenta a continuação do processo.

A assume-se o ar padrão, composto de 21 % de O_2 e 79 % de N_2 (em base volumétrica), desprezando-se a quantidade de vapor d'água presente no ar atmosférico. Esta é uma hipótese usual no cálculo de reações químicas, e será útil no desenvolvimento das equações de combustão, no caso de não ser realizado uma análise experimental dos produtos de combustão, que propicia um método bem simples para calcular a quantidade de ar realmente fornecida ao processo de combustão [Van Wylen, 1995].

Os produtos da combustão em uma microturbina a gás são formados pelos seguintes componentes: O_2 , H_2O , CO_2 e N_2 .

2.4.1

Combustão Completa

É a reação de combustão em que todos os elementos oxidáveis constituintes do combustível se combinam com o oxigênio, particularmente o

carbono (C) e o hidrogênio (H), que se convertem integralmente em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) independentemente da existência de excesso de oxigênio (O_2) para a reação.

2.4.2

Combustão Incompleta ou Parcial

Nesta reação aparecem produtos intermediários da combustão, especialmente o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2), resultado da oxidação incompleta dos elementos do combustível. Ela pode ser induzida pela limitação na quantidade de oxigênio oferecido para a reação, pelo resfriamento ou sopragem da chama.

2.4.3

Combustão Real

É a reação que ocorre na prática, nos equipamentos combustores, com maior ou menor excesso de ar e com a presença de alguma quantidade mínima de produtos intermediários da combustão.

2.4.4

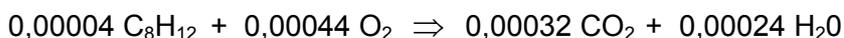
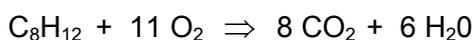
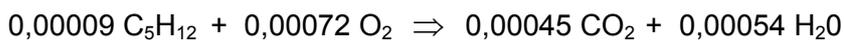
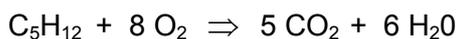
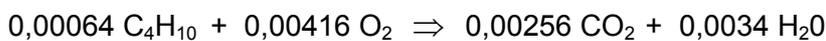
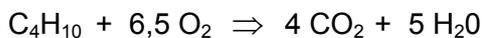
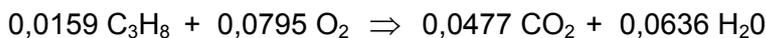
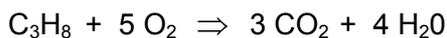
Balances da Combustão

Para que combustão de uma mistura ar gás se desenvolva de forma satisfatória e estável, algumas condições devem ser respeitadas: a mistura do combustível e do ar (oxigênio), a taxa de mistura incluída nos limites de inflamabilidade, um ponto da mistura levado a uma temperatura superior a temperatura de inflamabilidade para seu início, o suprimento da mistura deve permanecer dentro das condições básicas e os produtos de combustão devem ser escoados. Nestas condições a combustão proporciona a elevação de temperatura da massa de gases e a realização do trabalho desejado. A análise

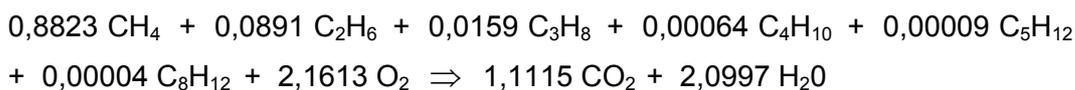
das condições do processo de combustão e do trabalho realizado se faz através do Balanço de Massa e do Balanço Térmico [Van Wylen, 1995]. Sendo assim expresso pela seguinte equação:

$$Q = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i \quad (77)$$

A combustão do gás natural é uma reação química muito rápida, na qual o oxigênio presente no ar combina-se com o hidrogênio e o carbono contidos no gás, produzindo gás carbônico e água, além de calor. A reação de combustão do gás natural pode ser representada pelas seguintes equações:



Reação de Combustão do Gás Natural



$$\sum_R n_i \bar{h}_i = 0,8823 (\bar{h}^o f)_{\text{CH}_4} + 0,0891 (\bar{h}^o f)_{\text{C}_2\text{H}_6} + 0,0159 (\bar{h}^o f)_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,00064 (\bar{h}^o f)_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + 0,00009 (\bar{h}^o f)_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + 0,00004 (\bar{h}^o f)_{\text{C}_8\text{H}_{12}}$$

$$\sum_R n_i \bar{h}_i = 0,8823 (-17,76) + 0,0891 (-20,15) + 0,0159 (-24,94) + 0,00064 (-30,23) + 0,00009 (-35,11) + 0,00004 (-53,61)$$

$$\sum_R n_i \bar{h}_i = -19,80 \text{ kcal/kg.mol}$$

$$\sum_P n_e \bar{h}_e = 1,1115 (\bar{h}^o f)_{CO_2} + 2,0997 (\bar{h}^o f)_{H_2O}$$

$$\sum_P n_e \bar{h}_e = 1,1115 (-94,14) + 2,0997 (-68,38)$$

$$\sum_P n_e \bar{h}_e = -248,21 \text{ kcal/kg.mol}$$

$$Q = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i = -248,21 - (-19,80) = -228,41 \text{ kcal/kg.mol}$$

O calor gerado na combustão é chamado de calor de combustão. Para um determinado gás, quanto maior o consumo, maior a quantidade de calor gerada.

O calor gerado na combustão de um gás também é proporcional ao seu poder calorífico, que mostra quanto calor ele produz por quantidade (volume) de gás. Com este valor, é possível determinar a quantidade de calor produzida para um certo volume de gás queimado.

2.5

Poder Calorífico

É a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de uma substância combustível, estando este nas CNTP. Devido à formação de água (H₂O) nos produtos da combustão foram definidos dois valores de poder calorífico para as substâncias combustíveis.

Poder Calorífico Superior (PCS) – é a energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume de gás, levando-se em conta o

vapor de água condensado junto com os produtos da combustão, ou seja, quando se considera o calor latente de vaporização da água (H₂O);

Poder Calorífico Inferior (PCI) – é a energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume de gás, sem levar em conta o vapor de água condensado junto com os produtos da combustão, ou seja, quando se considera o calor latente de vaporização da água (H₂O);

A diferença entre o PCS e o PCI está na quantidade de calor latente que o vapor d'água nos produtos combustão possui, que foi fornecida pelo combustível e que não será aproveitada.

2.5.1

Mistura de Gases Perfeitos

Em uma mistura gasosa, a fração molar x_i do componente i , é definida:

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (78)$$

onde: n_i representa o número de moles do componente i
 n o número total de moles na mistura.

De maneira semelhante, para uma mistura gasosa, a fração em massa mf_i , é definida como:

$$mf_i = \frac{m_i}{m} \quad (79)$$

onde: m_i é a massa do componente i
 m a massa total da mistura.

2.5.2

Cálculo da Incerteza do PCI

Com base nos valores máximos e mínimos do poder calorífico inferior (PCI_i) de cada componente do gás natural, conforme tabela abaixo, a incerteza do PCI do gás natural foi calculada, usando um valor médio e considerando uma incerteza do tipo B.

Tabela 9: Valores máximo e mínimo do PCI_i , em kJ/mol [NIST, 2004]

	Máximo	Mínimo	Média
CO ₂	-393,38	-393,64	-393,51
CH ₄	-72,30	-75,16	-73,73
C ₂ H ₆	-85,16	-83,50	-84,33
C ₃ H ₈	-103,21	-105,20	-104,21
iC ₄ H ₁₀	-133,57	-136,14	-134,86
nC ₄ H ₁₀	-124,93	-127,77	-126,35
nC ₅ H ₁₂	-145,73	-148,10	-146,92
iC ₅ H ₁₂	-153,11	-155,34	-154,23
C ₈ H ₁₈	222,80	-225,40	-224,10
H ₂ O	-241,786	-241,866	-241,83

A composição típica do gás natural foi fornecida pela CEG - Cia Distribuidora de Gás do Rio de Janeiro.

O poder calorífico inferior (PCI) da mistura pode ser calculado através da composição (x_i) e do poder calorífico inferior de cada componente (PCI_i), segundo a equação a seguir [Van Wylen, 1995]:

$$PCI = \sum x_i PCI_i \quad (80)$$

Logo a incerteza do PCI pode ser calculada propagando cada incerteza, conforme [ISO-GUM, 1998]:

$$u_{PCI} = \left[\sum (PCI_i * u_{x_i})^2 + \sum (x_i * u_{PCI_i})^2 \right]^{1/2} \quad (81)$$

$$u_{x_i} = \frac{U_{x_i}}{\sqrt{3}} \quad (82)$$

$$u_{PCI_i} = \frac{U_{PCI_i}}{\sqrt{3}} \quad (83)$$

$$U_{PCI} = 2 * u_{PCI_i} \quad (84)$$

Desenvolvimento:

$$u_{PCI}^2 = [PCI * u_x]_{CO_2}^2 + [x * u_{PCI}]_{CO_2}^2 + [PCI * u_x]_{CH_4}^2 + [x * u_{PCI}]_{CH_4}^2 + [PCI * u_x]_{C_2H_6}^2 + [x * u_{PCI}]_{C_2H_6}^2 +$$

$$[PCI * u_x]_{C_3H_8}^2 + [x * u_{PCI}]_{C_3H_8}^2 + [PCI * u_x]_{iC_4H_{10}}^2 + [x * u_{PCI}]_{iC_4H_{10}}^2 + [PCI * u_x]_{nC_4H_{10}}^2 + [x * u_{PCI}]_{nC_4H_{10}}^2 +$$

$$[PCI * u_x]_{C_8H_{18}}^2 + [x * u_{PCI}]_{C_8H_{18}}^2 + [PCI * u_x]_{iC_5H_{12}}^2 + [x * u_{PCI}]_{iC_5H_{12}}^2 + [PCI * u_x]_{nC_5H_{12}}^2 + [x * u_{PCI}]_{nC_5H_{12}}^2$$

A tabela a seguir mostra os valores do PCI com as respectivas incertezas dos componentes do gás natural típico do Rio de Janeiro.

Tabela 10: Incerteza do PCI dos componentes do gás natural [NIST, 2004]

	Composição (%)	PCI (kJ/mol)	
		PCI _i	U _{PCI,i}
CO ₂	0,472	-393,51	± 0,13
CH ₄	88,232	-73,73	± 1,43
C ₂ H ₆	8,904	-84,33	± 0,83
C ₃ H ₈	1,591	-104,21	± 1,00
iC ₄ H ₁₀	0,064	-134,86	± 1,29
nC ₄ H ₁₀	0,0891	-126,35	± 1,42
nC ₅ H ₁₂	0,0091	-146,92	± 1,19
iC ₅ H ₁₂	0,0076	-154,23	± 1,12
C ₈ H ₁₈	0,0038	-224,10	± 1,30
H ₂ O	-	-241,83	± 0,04
PCI		-76,31	± 1,65

Logo, o poder calorífico do gás natural é $-76,31 \pm 1,65$ kJ/mol ou $\pm 2,16$ %, bem maior que o valor de projeto, conforme mostrado na tabela 5. Provavelmente, se quisermos reduzir a incerteza, uma medida direta do poder calorífico inferior deve ser feita, através de um calorímetro. Isso reduziria o seu valor para aproximadamente $\pm 0,5$ %.