

Cogeração com microturbina para produção de energia elétrica e água quente

J.V.Araujo, P.M.Senra, LIGHT

A.F. Orlando, M.M. Huamani, E.F.Ramos, L.G. Do Val, LAME, PUC-RIO.

Resumo- Um sistema de cogeração com uma microturbina fornecendo potência elétrica e energia térmica através dos gases de exaustão que aquecem água para o ginásio esportivo da PUC-Rio é apresentado. O sistema está configurado por uma microturbina, uma caldeira de recuperação, um reservatório térmico (boiler) e uma caixa para alimentação de água fria. Resultados obtidos de testes de curta duração, através de uma metodologia desenvolvida, para a avaliação do desempenho do sistema de cogeração na produção de energia elétrica e térmica, são apresentados. Os testes foram realizados para potências elétricas de 100, 75, 50 e 25 % da carga máxima da microturbina. Em adição, testes para avaliação do desempenho ao longo do tempo em função das variações da carga e das condições ambientais foram estudados. Além disso, através de uma metodologia desenvolvida, mostram-se os resultados nos cálculos de incerteza dos parâmetros analisados.

Palavras-chave- Cogeração; Desempenho; Geração Descentralizada; Incertezas ; Microturbina.

I. INTRODUÇÃO

As formas de fornecimento de energia à sociedade não são sustentáveis, motivo pelo qual, existe, no mundo atual, uma tendência a se projetar sistemas energéticos cada vez mais eficientes que aproveitem ao máximo a fonte energética primária utilizada [1]. Nesse sentido, um conceito que está sendo cada vez mais presente no mundo atual é a geração de energia de forma descentralizada, comumente conhecida como *geração descentralizada ou distribuída de energia (GD)*; refere-se, esta, ao uso de qualquer tecnologia de conversão de energia próximo ao local de consumo. Dentre as tecnologias mais recentes e que estão sendo mais promovidas, destacam-se, principalmente, as microturbinas a gás (MTG).

As MTG são pequenos geradores de eletricidade que queimam combustível gasoso para originar altas rotações ao eixo de um gerador elétrico [3, 4]. O princípio de funcionamento é o mesmo do que as turbinas a gás industriais de circuito aberto de eixo simples, porém com várias características típicas, tais como: rotação variável, gerador de alta frequência (G), mancais a ar, recuperadores de calor (RC) e eletrônica de potência.

As velocidades de rotação da microturbina são elevadas (rotação nominal máxima de 96000 RPM), motivo pelo qual, numa central convencional requerer-se-ia o uso de uma caixa de redução para ligação com o gerador. Nesse sentido, uma das principais características, que diferenciam as MTG das turbinas a gás industriais, é que o seu gerador de alta rotação está acoplado com um sistema eletrônico digital de potência que lhe permite produzir potência elétrica de alta qualidade e de acordo às condições requeridas pelo cliente [5]; como o gerador está acoplado diretamente a MTG, é produzida uma

tensão com uma elevada frequência (1600 Hz nominais), que tem que ser reduzida por meio de um sistema de retificação/inversão a fim de permitir a ligação à rede elétrica, como esquematizado na Fig. 1. Além disso, o sistema eletrônico de potência lhe permite ter um controle sobre a forma dos regimes de operação, dentre os quais, destacam-se [4, 5]: (i) Operação em paralelo com a rede elétrica (Grid Connect), (ii) Operação isolada da rede elétrica (Stand Alone), (iii) Operação em modo duplo (Dual Mode).

Como mencionado anteriormente, as MTG são apropriadas à GD, pois possuem uma série de características que as diferenciam dos demais sistemas, como: flexibilidade nos métodos de conexão com a rede elétrica da concessionária local, fácil adaptabilidade às características da rede elétrica, habilidade de operação com várias unidades de modo a suprir cargas elétricas mais elevadas, habilidade de fornecer potência estável e confiável a um nível baixo de emissões, por exemplo, NOx.

Além do mais, considerando que o objetivo do governo brasileiro é aumentar o uso do Gás Natural (GN) de 3% para 12% em 2010, mediante o Gasoduto Bolívia-Brasil, então existirá a possibilidade de implementação destes equipamentos em diversas localidades [1].

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho elétrico e térmico das MTG quando associada a uma caldeira de recuperação para ser utilizada num sistema de cogeração. Além disso, serão mostrados os resultados dos cálculos de incerteza dos parâmetros analisados.

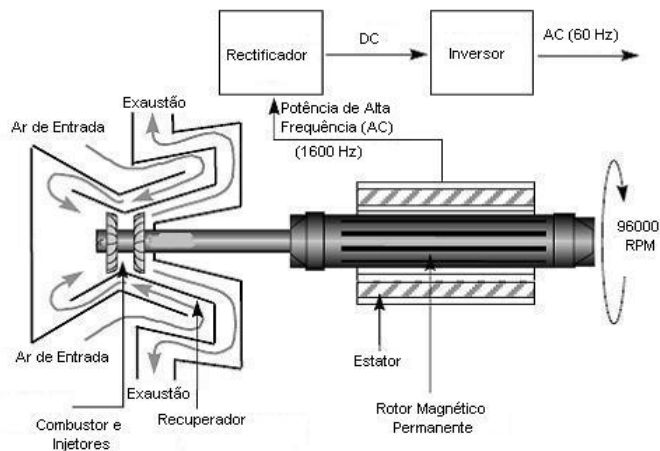


Figura 1. Esquema de funcionamento do sistema eletrônico de potência da MTG.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Uma das principais características das MTG, é a fácil adaptação a pequenos sistemas de cogeração no setor comercial (hotéis, pequenos hospitais, centros de esporte e centros residenciais) [4, 7], além disso, podem ser utilizadas para aquecimento, refrigeração por absorção, desumidificação e secagem de produtos; mas, também, podem ser utilizadas em pequenas indústrias, especialmente onde o suprimento energético contínuo é necessário.

A cogeração, conforme esquematizado na Fig. 2, é um processo térmico na qual através da queima de um combustível existe uma produção combinada de calor e potência (ou energia mecânica), qualquer que seja o ciclo termodinâmico empregado [1].

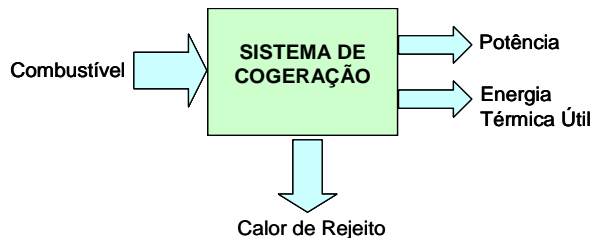


Figura 2. Esquema de um Sistema de Cogeração.

A microturbina selecionada para o presente estudo é uma Microturbina Capstone C30 (Recuperated) LPNG a GN, que opera em paralelo à rede elétrica da concessionária local (Grid Connect Mode), fornecendo uma potência constante conhecida como *carga de base*. A energia térmica dos gases de exaustão da MTG é aproveitada numa Caldeira de Recuperação (CR) modelo ITC1, da CONUAR, através do aquecimento da água; posteriormente a água quente é levada, através de uma bomba, para um Reservatório Térmico ou Boiler (B) de 1000 litros de capacidade, para finalmente ser utilizada nos chuveiros do ginásio esportivo da PUC-Rio.



Figura 3 : Microturbina (30 kW) e caldeira de recuperação



Figura 4 : Reservatório térmico e caixa de água fria

Com o objetivo de realizar as medições dos parâmetros a serem analisados na planta de cogeração, foram instalados diversos medidores de pressão (P), temperatura (T) e vazão (V); os dados fornecidos por estes medidores foram monitorados por um sistema de aquisição de dados Agilent 34907A. A Fig. 5 mostra o esquema do sistema de cogeração da MTG proposta, assim como a localização dos medidores instalados. Conforme mencionado em [8], cabe destacar que a MTG conta com sensores internos para a medição dos seus parâmetros respectivos, que foram obtidos através do software de aquisição de dados fornecido pela Capstone (CRMS).

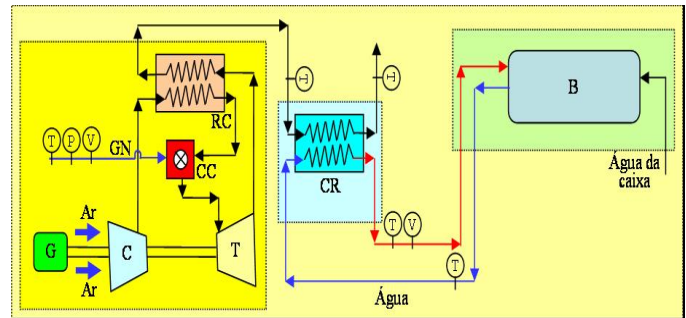


Figura 5. Diagrama esquemático do Sistema de Cogeração.

A água do sistema é aquecida até 85 °C e armazenada num reservatório. Chegando aos chuveiros, ela é misturada com água a temperatura ambiente, resultando numa temperatura em torno de 40 °C. Quando a temperatura indicada é atingida, um controlador aciona um dispositivo de fechamento de um *dampner* que se encontra na caldeira de recuperação; os gases quentes são então direcionados diretamente para o meio ambiente. Na Tabela 1, são especificadas as características da Microturbina Capstone C30 LPNG, caldeira de recuperação e reservatório térmico.



Figura 6 : Detalhes da instalação dos chuveiros.

TABELA 1
CARACTERÍSTICAS DA MICROTURBINA, CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO E RESERVATÓRIO TÉRMICO DA PLANTA DE COGERAÇÃO DA PUC-RIO.

MICROTURBINA CAPSTONE C30 RECUPERATED (LPNG)	
Dimensões	Largura: 762 mm
	Profundidade: 1516 mm
	Altura: 1943 mm
Peso	405 kg
Potência	28,0 (+0/-1) kW
η_T	25,0 (+0/-2) %
Heat Input	404000 kJ /hr
Hate Rate	14400 kJ / kWh
T _{EXAUSTÃO}	275°C
E _{EXAUSTÃO}	327000 kJ / hr
V _{GASES EXAUSTÃO}	0,31 kg / s
CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ITC1	
Dimensões	Largura: 800 mm
	Profundidade: 1025 mm
	Altura: 1745 mm
P _{BOMBA}	1,5 kW
Tensão Alimentação	3 x 220V – 60 Hz
T _{MAX H2O}	95 °C
Fluido de Trabalho	Água
RESERVATÓRIO TÉRMICO (BOILER)	
Dimensões	Diâmetro: 675 mm
	Profundidade: 3460 mm
Capacidade	1000 l
Tensão de Alimentação	220 V - Bifásico
Revestimento Externo	Poliuretano Expandido (50 mm)
Corpo Inteiro	Aço Inoxidável AISI 304
Tubulações	Aço Inoxidável
Apoio Elétrico (Resistência)	5000 W

II. METODOLOGIA

O fato da MTG ser de uma filosofia inovadora, assim como com qualquer outra nova tendência, o seu desempenho técnico ou viabilidade são pouco conhecidos. Assim, uma atividade

de muito interesse é o acompanhamento de seu desempenho, avaliando suas perdas e o seu comportamento ao longo da operação, para utilizar, da melhor forma possível, os recursos disponíveis, sejam em equipamentos, em energia dos combustíveis utilizados ou para comparações com os dados fornecidos pelos fabricantes [9].

Por tanto, nesta parte são apresentadas as metodologias para a realização dos testes (parte elétrica e térmica), assim como para o cálculo das incertezas de medições e cálculos realizados.

A. Análise Elétrica e Térmica

No que se refere aos testes de curta duração, para a verificação do desempenho deste sistema, são analisados os seguintes parâmetros [2, 9, 10]:

Desempenho na Produção de Calor e Potência

- Potência Elétrica de Saída e Recuperação de Calor do Sistema para cargas total e parcial.
- Eficiências Elétrica, Térmica e Total do Sistema para cargas total e parcial.

Qualidade da Potência

- Freqüência Elétrica de Saída.
- Tensão de Saída.

Desempenho Operacional

- Tempo de partida em frio.

Cálculo da incerteza

- Cálculo da incerteza (para 100% da carga).

O desempenho na produção de energia é uma característica operativa que tem muita importância, não somente para o consumidor, mas também para os compradores e operadores de sistemas geradores de energia. Neste ponto, para o sistema todo, foram adotadas as seguintes equações [2, 10, 11]:

$$\eta = \frac{P_o}{HI} \quad (1)$$

Onde P_o é a potência elétrica média, calculada por (2) e HI energia térmica média de entrada ao sistema, baseado no PCI do GN, calculada com (3).

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} P_{oi}}{N} \quad (2)$$

Onde P_{oi} é a potência elétrica em cada medição ao longo do teste e N número total de medições ao longo do teste.

$$HI = F_m \cdot PCI \quad (3)$$

Onde F_m é a vazão média do GN, calculada com (4).

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} Fm_i}{N} \quad (4)$$

Onde Fm é a vazão do GN em cada medição ao longo do teste.

$$Q_{H2O} = V_{H2O} \cdot \rho_{H2O} \cdot C_{p_{H2O}} \cdot (T_{OUT} - T_{IN}) \quad (5)$$

Onde Q_{H2O} é a taxa de calor recuperada, V_{H2O} é a vazão da água, ρ_{H2O} é a massa específica da água e $C_{p_{H2O}}$ é o calor específico da água, ambos avaliados na temperatura

média $(T_{OUT} + T_{IN})/2$; T_{IN} é a temperatura da água na entrada da CR e T_{OUT} é a temperatura da água na saída da CR.

$$\eta_T = \frac{Q_{H2O}}{HI} \quad (6)$$

$$\eta_{TOTAL} = \eta + \eta_T \quad (7)$$

Onde η_T é a eficiência térmica e η_{TOTAL} é a eficiência total do sistema.

A qualidade da potência é outra característica de muita importância, já que, como a MTG opera em paralelo à rede elétrica, é necessário saber a sua capacidade para se alinhar com as características da rede. Foram utilizadas as seguintes equações [2, 3, 10, 11]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} F_i}{N} \quad (8)$$

$$s_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (F - F_i)^2}{(N-1)}} \quad (9)$$

Onde F é a frequência média, F_i é a frequência de cada medição ao longo do teste e s_F é o desvio padrão.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} V_i}{N} \quad (10)$$

$$s_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (V - V_i)^2}{(N-1)}} \quad (11)$$

Onde V é a tensão média de saída, V_i é a tensão de cada medição ao longo do teste, e s_V é o desvio padrão.

Além disso, são determinados, também, os valores da frequência e tensão máximos e mínimos.

O desempenho operacional é avaliado através do tempo de partida em frio ou, comumente conhecido como tempo de arranque; este é o tempo requerido, pela microturbina, para alcançar a potência máxima que ela pode fornecer.

Para os testes de curta duração, cabe destacar que a planta de cogeração foi testada para quatro cargas diferentes dentro da sua faixa normal de operação; as quais incluem, além da carga máxima nominal (100%) valores de carga que são de 75, 50 e 25% da sua máxima potência. Os testes tiveram uma duração de 20 minutos e o tempo entre cada medição foi de 5 minutos, conseguindo-se com isto realizar 4 medições para cada carga.

Para uma correta caracterização dos parâmetros, cada teste deve ser feito com uma máxima variabilidade dos seguintes parâmetros operacionais, tal que não excedam alguns limites estabelecidos: potência, vazão de GN, pressão e temperatura ambientes ao sistema [2, 3, 10]; os quais são mostrados na Tabela 2.

Para a avaliação nos testes de longa duração, desenvolveram-se vários testes em diversos dias, basicamente no horário de ponta, isto basicamente devido a que em esse horário é que se obtém as maiores economias com o funcionamento do sistema. Estes testes consistiam em determinar o tempo de aquecimento da água, para uma dada potência da microturbina, até atingir os 85 °C. Durante o desenvolvimento de cada teste, também, realizaram-se as medições dos parâmetros do sistema. Cabe destacar que, embora nos testes com cargas controladas seja necessária a máxima variabilidade de alguns parâmetros operacionais, para os testes de longa duração, tal restrição não existe.

TABELA 2
VARIAÇÃO PERMITIDA DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.

PARÂMETRO	VARIAÇÃO. MÁXIMA ^a
P_o	$\pm 2 \%$
F_m	$\pm 2 \%$
P_{ATM}	$\pm 0.5 \%$
T_{ATM}	$\pm 2.2^\circ\text{C}$

O cálculo da variação máxima permitida, para cada parâmetro, é feito como a razão entre a subtração do valor médio do teste e o valor em cada medição ao valor médio do teste.

B. Análise das Incertezas

Baseados na referência [9, 12, 13], é apresentada uma metodologia para o cálculo das incertezas nos resultados dos testes de curta duração realizados no sistema de cogeração da microturbina Capstone C30. Cabe destacar que para um número de $N=4$ medições, a incerteza expandida de medição U_X foi estimada com um nível de confiabilidade de 95,45% ($t\text{-student} = 3,31$).

Nas seguintes equações, u_m é a incerteza padronizada do instrumento de medição e s_X é o desvio padrão da grandeza medida (s_X).

• Incerteza na Potência Elétrica (U_p)

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (P_o - P_{oi})^2}{(N-1)}} \quad (12)$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad (13)$$

$$u_p = \sqrt{(s_p^2 + u_m^2)} \quad (14)$$

$$U_p = 3,31 \cdot u_p \quad (15)$$

• Incerteza na Energia do combustível (U_{HI})

A incerteza da energia fornecida pelo combustível, pode ser calculada mediante a propagação das incertezas da vazão do GN (U_{Fm}) e do PCI do Gás Natural (U_{PCI}), assim:

$$s_{Fm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (Fm - Fm_i)^2}{(N-1)}} \quad (16)$$

$$u_{Fm} = \sqrt{(s_{Fm}^2 + u_m^2)} \quad (17)$$

$$U_{Fm} = 3,31 \cdot u_{Fm} \quad (18)$$

$$u_{HI} = HI \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{Fm}}{Fm}\right)^2 + \left(\frac{u_{PCI}}{PCI}\right)^2} \quad (19)$$

$$U_{HI} = 2 \cdot u_{HI} \quad (20)$$

$$u_{Fm} = \frac{U_{Fm}}{2} \quad (21)$$

$$u_{PCI} = \frac{U_{PCI}}{2} \quad (22)$$

• **Incerteza na Eficiência Elétrica (U_η)**

$$u_\eta = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{u_p}{Po}\right)^2 + \left(\frac{u_{HI}}{HI}\right)^2} \quad (23)$$

$$U_\eta = 2 \cdot u_\eta \quad (24)$$

$$u_p = \frac{U_p}{2} \quad (25)$$

• **Incerteza na Taxa de Recuperação de Calor (U_{QH2O})**

Para o cálculo da incerteza da taxa de recuperação de calor, propaga-se as incertezas da vazão de água ($U_{V_{H2O}}$), variação de temperaturas de entrada e saída da água na caldeira ($U_{\Delta T_{H2O}}$), para o qual considera-se $\Delta T_{H2O} = T_{OUT} - T_{IN}$, massa específica ($U_{\rho_{H2O}}$) e Calor Específico da água ($U_{Cp_{H2O}}$) [9], assim:

$$V_{H2O} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} V_{H2O_i}}{N} \quad (26)$$

$$s_{V_{H2O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (V_{H2O} - V_{H2O_i})^2}{(N-1)}} \quad (27)$$

$$u_{V_{H2O}} = \sqrt{(s_{V_{H2O}}^2 + u_m^2)} \quad (28)$$

$$U_{V_{H2O}} = 3,31 \cdot u_{V_{H2O}} \quad (29)$$

$$s_{\Delta T_{H2O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\Delta T_{H2O} - \Delta T_{H2O_i})^2}{(N-1)}} \quad (30)$$

$$u_{\Delta T_{H2O}} = \sqrt{(s_{\Delta T_{H2O}}^2 + u_m^2)} \quad (31)$$

$$U_{\Delta T_{H2O}} = 3,31 \cdot u_{\Delta T_{H2O}} \quad (32)$$

$$u_{Q_{H2O}} = Q_{H2O} \cdot \left(\left(\frac{u_{V_{H2O}}}{V_{H2O}} \right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{H2O}}}{\rho_{H2O}} \right)^2 + \left(\frac{u_{Cp_{H2O}}}{Cp_{H2O}} \right)^2 \dots \right. \\ \left. \dots + \left(\frac{u_{\Delta T_{H2O}}}{\Delta T_{H2O}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (33)$$

$$U_{Q_{H2O}} = 2 \cdot u_{Q_{H2O}} \quad (34)$$

$$u_{V_{H2O}} = \frac{U_{V_{H2O}}}{2} \quad (35)$$

$$u_{\Delta T_{H2O}} = \frac{U_{\Delta T_{H2O}}}{2} \quad (36)$$

• **Incerteza do PCI do GN (U_{PCI})**

$$u_{PCI} = \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^N PCI_i \cdot u_{x_i} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N x_i \cdot u_{PCI_i} \right)^2 \right)} \quad (37)$$

$$u_{x_i} = \frac{U_{x_i}}{2} \quad (38)$$

$$u_{PCI_i} = \frac{U_{PCI_i}}{2} \quad (39)$$

$$U_{PCI} = 2 \cdot u_{PCI} \quad (40)$$

• **Incerteza na Frequência Elétrica (U_F)**

$$u_F = \sqrt{(s_F^2 + u_m^2)} \quad (41)$$

$$U_F = 3,31 \cdot u_F \quad (42)$$

• **Incerteza na Tensão Elétrica (U_V)**

$$u_V = \sqrt{(s_V^2 + u_m^2)} \quad (43)$$

$$U_V = 3,31 \cdot u_V \quad (44)$$

III. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A. Resultados

Na Tabela 3 são mostradas as características do GN, para os dias do teste, e que foram fornecidos pela CEG. Cabe destacar que para os testes de longa duração os valores apresentados correspondem ao valor médio para os dias em que se realizaram os testes.

Na Tabela 4, são apresentadas as variações dos parâmetros operacionais durante o desenvolvimento dos testes de curta duração no sistema de cogeração da PUC-Rio, quando houve um consumo de água quente de cerca de 0,65 m³/h.

A Frequência e Tensão Elétricas foram monitoradas continuamente durante o desenvolvimento dos testes de curta duração; na Tabela 5, mostram-se os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão da Frequência e Tensão Elétrica durante o período do teste.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios do desempenho na produção de potência e energia térmica da planta de cogeração da PUC-Rio, durante o desenvolvimento do teste de curta duração.

TABELA 3
CARACTERÍSTICAS MÉDIAS DO GN FORNECIDO PELA CEG.

COMPOSIÇÃO	T. CURTA DURAÇÃO (%)	T. LONGA DURAÇÃO (%)
CO ₂	0,2892	0,3060
C ₂ H ₆	4,4974	4,3911
N ₂	0,7773	0,7355
CH ₄	93,5846	93,7697
C ₃ H ₈	0,7733	0,7295
IC ₄	0,0223	0,0191
NC ₄	0,0399	0,0344
IC ₅	0,0057	0,0049
NC ₅	0,0061	0,0053
>C ₆	0,0044	0,0044
PCS (kJ/Nm ³)	38475	38421
PCI (kJ/Nm ³)	34714	34664
ρ (kg/Nm ³)	0,7124	0,7111

TABELA 4
VARIAÇÃO MÉDIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS.

COND.	P _o	V _{GN}	P _{AMB}	T _{AMB}
100%	0,07	0,49	0,04	0,12
75%	0,15	0,19	0,04	0,49
50%	0,92	0,50	0,05	0,80
25%	1,24	1,39	0,04	0,60

TABELA 5
VALORES MÉDIOS, MÁXIMOS, MÍNIMOS E DESVIO PADRÃO (σ) DA FREQUÊNCIA E TENSÃO ELÉTRICA DURANTE O DESENVOLVIMENTO DO TESTE DE CURTA DURAÇÃO.

COND.	VALOR	f (Hz)	V _A (V)	V _B (V)	V _C (V)
100%	Média	60	262	261	263
	Máximo	60	263	262	264
	Mínimo	60	262	260	262
	σ	0,0	0,5	0,96	0,96
75%	Média	60	260	258,5	261
	Máximo	60	260	259	261
	Mínimo	60	260	258	261
	σ	0,0	0,0	0,58	0,0
50%	Média	60	257	254,75	258,25
	Máximo	60	257	255	259
	Mínimo	60	257	254	258
	σ	0,0	0,0	0,5	0,5
25%	Média	60	253	250,25	253,75
	Máximo	60	254	251	255
	Mínimo	60	251	248	252
	σ	0,0	1,4	1,5	1,3

TABELA 6
DESEMPENHO NA PRODUÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA TÉRMICA DO TESTE DE CURTA DURAÇÃO.

COND.	HI (kW)	P _o (kW)	η (%)	Q _{H2O} (kW)	η _T (%)	η _{TOTAL} (%)
100%	152,9	25,0	16,4	43,9	28,7	45,1
75%	127,9	21,0	16,4	38,7	30,3	46,7
50%	86,8	13,8	15,9	29,2	33,6	49,5
25%	48,0	7,0	14,6	21,9	45,6	60,2

Nas Fig. 7 e 8 são mostradas as variações da frequência e tensão (Fase A) durante o desenvolvimento dos testes de curta duração do sistema.

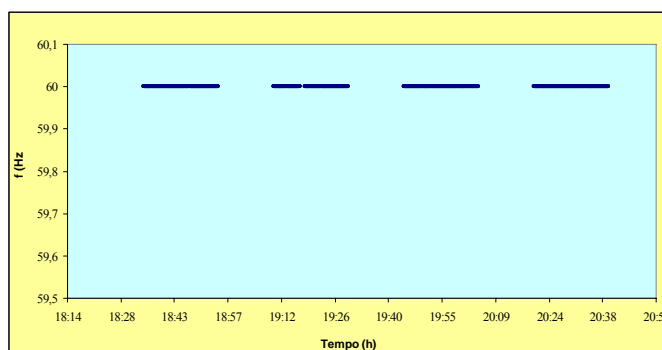


Figura 7. Variação da Frequência durante o desenvolvimento do teste de curta duração.

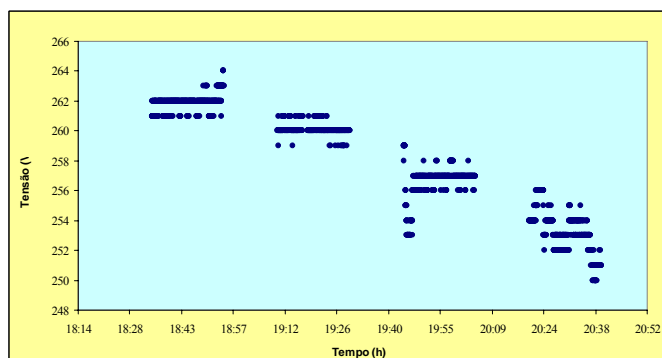


Figura 8. Variação da Tensão durante o desenvolvimento do teste de curta duração.

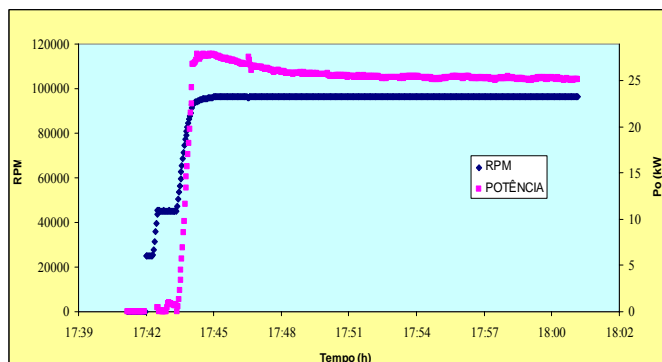


Figura 9. Variação das RPM e Potência durante a partida da microturbina.

Na Figura 9, é mostrada a variação das RPM e da potência da MTG durante a partida no teste de curta duração.

TABELA 7
DESEMPENHO NA PRODUÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA
TÉRMICA DOS TESTES DE LONGA DURAÇÃO.

PARÂM.	TESTES					
	1	2	3	4	5	6
CARGA (%)	100	75	50	25	75	100
P ₀ (kW)	24,8	21,0	14,0	7,0	20,7	25,8
η (%)	16,7	16,5	16,3	14,4	15,9	16,7
Q _{H2O} (kW)	49,2	31,2	29,6	23,6	35,3	38,9
HI (kW)	149,0	127,4	86,1	48,6	130,4	154,4
η _T (%)	33,1	24,5	34,5	48,5	27,0	25,1
η _{TOTAL} (%)	49,7	41,0	50,8	62,9	42,9	41,8

Na Tabela 8, são apresentados os valores das incertezas, para a condição de máxima potência (100 %), nas medições realizadas no dia do teste de curta duração na planta de cogeração da PUC-Rio, assim como as incertezas dos instrumentos utilizados na medição dos parâmetros.

TABELA 8
VALORES DE INCERTEZAS NO TESTE DE CURTA DURAÇÃO.

PARÂM.	UNID.	INCERT. INST.	INCERT. PARÂM.
V _A	V	± 6,9	± 11,5
V _B	V	± 6,9	± 11,8
V _C	V	± 6,9	± 11,8
I _A	A	± 1,1	± 2,5
I _B	A	± 1,1	± 1,8
I _C	A	± 1,1	± 1,8
f	Hz	± 0,03	± 0,05
P _O	kW	± 1,0	± 1,7
η	%	--	± 1,6
HI	kW	--	± 11,8
V _{GN}	m ³ /h	± 0,10	± 0,27
P _{GN}	kPa	± 2,3	± 4,2
T _{GN} , ΔT _{H2O}	°C	± 0,6	± 1,0
PCI _{GN}	kJN/m ³	--	± 680
η _T	%	--	± 5,0
V _{H2O}	m ³ /h	± 0,18	± 0,32
Q _{H2O}	kW	--	± 6,8

Na Tabela 7 são mostrados os valores médios do desempenho na produção de potência e energia térmica da planta de cogeração da PUC-Rio, durante o desenvolvimento dos testes de longa duração.

B. Conclusões

Como referenciado em [2, 3, 10], a tensão elétrica pode ter uma tolerância de ±10 % da tensão nominal, isto para não causar danos significativos na operação da maioria de equipamentos. No referente à frequência elétrica, a sua máxima variação indicada é de ±1 % do valor nominal para não causar problemas de sobreaquecimento e conseqüentemente queima de motores; com isto a faixa de variação da tensão e frequência elétricas (para o caso brasileiro) é de:

$$228,6 \text{ V} \leq V \leq 279,4 \text{ V}$$

$$59,4 \text{ Hz} \leq f \leq 60,6 \text{ Hz}$$

Como se pode observar na Tabela 5, os valores da frequência e tensão, durante o desenvolvimento do teste de curta duração, encontram-se dentro da faixa permitida de variação. Com isto pode-se afirmar que o sistema consegue manter uma continua sincronização com a rede elétrica (em tensão e principalmente em frequência). Isto pode ser observado graficamente nas Fig. 7, 8 e 9

Na Tabela 6, pode-se observar, que o valor da potência elétrica, para uma carga total (100%) é de 25,0 kW aproximadamente (correspondendo uma eficiência elétrica (η) de 16,4%). Pode também se observar que a eficiência elétrica para as diferentes cargas de operação da planta varia desde um mínimo de 14,6 até um máximo de 16,4 %, bem abaixo do que é indicado pelo fabricante.

Também na Tabela 6, para um consumo de água quente de aproximadamente 0,65 m³/h, como mencionado anteriormente, a eficiência térmica calculada do sistema aumenta desde um mínimo de 28,7% (correspondendo uma eficiência total de 45,1%) até uma eficiência térmica máxima de 45,6%.

O aproveitamento da energia química do gás natural alcançou um valor máximo de 62,9 % de seu poder calorífico inferior.

O tempo de partida da microturbina é de aproximadamente 5 minutos, como pode ser observado na Fig. 6.

Conforme mostrado na Tabela 8, através do desenvolvimento deste teste, observa-se que o valor da incerteza na potência elétrica é de ± 1,7 kW. Sendo que este valor depende basicamente da repetitividade e da incerteza do medidor, e como observado na Tabela 5, o fator repetitividade (desvio padrão) influencia pouco neste cálculo; pode-se dizer, então, que o valor elevado depende basicamente da incerteza do medidor (sensor interno à microturbina Capstone) cujo valor é de ± 1,0 kW. Esta afirmação pode também ser válida para as medições na corrente e sobretudo para a tensão elétrica, na qual as incertezas dos medidores (sensores internos à microturbina Capstone) são de ± 1,1 A e ± 6,9 V, respectivamente.

Também, conforme mostrado na Tabela 8, o valor da incerteza para a frequência é de ± 0,05 Hz, isto basicamente devido ao valor da incerteza do medidor (sensor interno da microturbina Capstone).

O valor da incerteza do PCI do GN calculada foi de aproximadamente $\pm 680 \text{ kJ/Nm}^3$. Conforme mencionado em [2, 9, 10], este valor foi o fator que passou a influenciar negativamente no cálculo de outros parâmetros que dependiam diretamente do PCI, como por exemplo, a eficiência térmica (η_T) e o calor ganho pela água (Q_{H_2O}), cujas incertezas são $\pm 5,0 \%$ e $\pm 6,8 \text{ kW}$, respectivamente. Como uma solução para a diminuição dessa incerteza, dever-se-ia efetuar uma medida direta, através de um calorímetro.

IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à LIGHT por ter financiado este projeto, o que permitiu o teste da microturbina e do sistema de cogeração.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Huamani, M.M., Geração de Perfis Elétrico e Térmico para Otimização de um Sistema de Cogeração, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2005.
- [2] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Combined Heat and Power at a Commercial Supermarket – Capstone 60 kW Microturbine CHP System, 2002.
- [3] Technology Characterization: Microturbines, Environment Protection Agency (EPA), 2002
- [4] Batista, E.E., Análise Técnico – Econômica e Experimental de Microturbinas a Gás Operando com Gás Natural e Óleo Diesel, Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Itajubá, 2002
- [5] Capstone Turbine Corporation, Technical Reference, System Operation, 511715-002, Março 2001.
- [6] Ho, J.C., Chua, K.J., & Chou, S.K., Performance study of a microturbina system for cogeneration application, Renewable Energy, Vol. 29, pp. 1121 – 1133, 2004
- [7] Capstone Turbine Corporation, Technical Reference, Installation & Start-Up, 511783-002, Março 2001.
- [8] Capstone Turbine Corporation, Rev. G, Technical Reference, Capstone Model C30 Electrical, Abril, 2004.
- [9] Assunção, A. S., Procedimento experimental para avaliação metrológica do desempenho de uma microturbina utilizada para geração de energia elétrica, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2004
- [10] Environmental Protection Agency (EPA) US, Greenhouse Gas (GHG) Verification Guidelines Series – Natural Gas-Fired Microturbine Electrical Generators, 2002.
- [11] ASME-PTC-22, Performance Test Code for Gas Turbines, American Society for Mechanical Engineers, PTC-22 code, 1997
- [12] Mendes, A. & Rosário, P. P., Metrologia & Incerteza de Medição, 2005.
- [13] ISO GUM, Guia para a expressão da Incerteza de Medição, INMETRO, 1995.