

5

Resultados

5.1

Desempenho na produção de energia elétrica e térmica do sistema de cogeração em carga máxima

O objetivo principal deste capítulo é a realização de testes para a verificação do desempenho na produção de energia elétrica e térmica do sistema de cogeração, composto de uma microturbina C30 LPNG associado com uma caldeira de recuperação de gases quentes. Para isto serão utilizados os dados do teste realizado em 25/01/2006.

5.1.1

Metodologia

A taxa de energia térmica recuperada dos gases de exaustão da microturbina é definida como a quantidade de calor recuperado pelo sistema microturbina - trocador de calor, esta taxa foi verificada pela medição do fluxo e temperaturas quente (fornecimento) e fria (retorno) do fluido de trabalho, neste caso o fluido utilizado é a água. Nesta parte é apresentada a metodologia para a avaliação dos parâmetros de desempenho da parte térmica do sistema de cogeração.

Para a verificação da energia térmica recuperada do sistema de cogeração serão utilizados os dados do teste realizados no dia 25/01/2006. O teste foi realizado durante a operação contínua do sistema e para a carga máxima às condições ambientais, quer dizer, temperatura e pressão ambiente. Durante a realização do teste, e com ajuda dos sensores de medição instalados que foram descritos e esquematizados no capítulo 3, item 3.4, foram monitoradas as seguintes variáveis:

- Vazão de Gás Natural.
- Temperatura do Gás Natural.

- Temperatura dos gases de exaustão da microturbina.
- Temperatura dos gases de exaustão do sistema de cogeração
- Temperatura da água de saída da caldeira (água para o reservatório).
 - Vazão da água de saída da caldeira (água para o reservatório).
- Temperatura da água de entrada à caldeira (água do reservatório).
- Potência fornecida pela microturbina.

Com ajuda das variáveis indicadas anteriormente e para a verificação do desempenho do sistema de cogeração foram calculados os seguintes parâmetros:

1. Eficiência Elétrica do Sistema (%)
2. Taxa de Recuperação de Calor (kW).
3. Eficiência Térmica do Sistema (%).
4. Eficiência Total do Sistema (%).

Conforme referenciado em [43] o cálculo da eficiência elétrica do sistema de cogeração, pode ser calculado com a seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_o}{H_I} \quad (16)$$

Onde:

P_o : Potência elétrica média gerada pela microturbina (kW), calculada com a equação (17).

H_I : Energia térmica média de entrada à turbina, baseado no PCI do combustível, calculada com a equação (18).

A potência elétrica média é calculada como a média aritmética dos valores das potências medidas durante o desenvolvimento do teste, conforme a equação (17):

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} P_{o_i}}{N} \quad (17)$$

Onde:

P_{o_i} : Potência elétrica em cada medição ao longo do teste (kW).

N : Número total de medições ao longo do teste.

A energia térmica média de entrada à turbina (HI) é determinada através da quantidade média de gás utilizada pela microturbina e o PCI do combustível ao longo do teste:

$$HI = F_m \cdot PCI \quad (18)$$

Onde:

F_m : Fluxo de combustível fornecido à microturbina (kg/s).

PCI : Poder Calorífico Inferior médio do combustível no dia do teste (kJ/kg).

O PCI do Gás Natural assim como outras características, para o dia do teste, foi obtido da concessionária CEG e são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Características médias do Gás Natural fornecido pela CEG em 25/01/2006.

Composição	(%)
CO ₂	0.2934
C ₂ H ₆	4.0912
N ₂	0.7579
CH ₄	94.1631
C ₃ H ₈	0.6409
IC ₄	0.0174
NC ₄	0.0278
IC ₅	0.0030
NC ₅	0.0030
>C ₆	0.0022
PCS (kJ/Nm ³)	38269
PCI (kJ/ Nm ³)	34522
ρ (kg/Nm ³)	0.7079

O cálculo da taxa de recuperação de calor dos gases de exaustão do fluido de trabalho pode ser feito com a seguinte equação:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (19)$$

Onde:

Q: Taxa de calor recuperado (kW).

\dot{m} : Fluxo mássico médio da água (kg/s).

C_p : Calor específico da água (kJ/kg-K).

T_1 : Temperatura de saída da água, do trocador de calor (K).

T_2 : Temperatura de entrada da água, ao trocador de calor (K).

A eficiência de conversão térmica pode ser calculada pela razão do calor médio recuperado e a energia térmica média de entrada à turbina (HI), assim:

$$\eta_r = \frac{Q}{HI} \quad (20)$$

A medição das temperaturas foram feitas com termo resistências tipo PT100. Segundo referenciado em [44] a equação que relaciona o valor da resistência da termo resistência com o valor da temperatura media é a equação de Callendar - Van Dusen que é mostrada na seguinte equação:

$$R_t = R_o \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (21)$$

Onde:

R_o : Resistência a 0 °C. (Ω).

R_t : Resistência à temperatura T (Ω).

T : Temperatura (°C).

Os coeficientes das constantes são apresentados na Tabela 22 [44].

Tabela 22 - Valores das constantes da Equação de Callendar - Van Dusen.

Constantes	DIN 43760 IEC 751	Grandezas
Ro	100	Ω
A	0,00390802	-
B	$-5,80195 * 10^{-7}$	-

Na Tabela 23 são apresentados os dados registrados no teste do sistema de cogeração. Cabe destacar que as medições foram realizadas com os sensores externos incorporados ao sistema e os dados foram adquiridos através de um aquisitor de dados AGILENT 34970A.

Tabela 23 - Dados do teste do Sistema de Cogeração na PUC-Rio, realizados no dia 25/01/2006.

Hora	P _{ATM} (kPa)	RPM	P _{MTG} kW	T _{GN} (°C)	V _{GN} (Nm ³ /h)	T _{EX IN} (°C)	T _{EX OUT} (°C)	T _{ÁGUA IN} (°C)	T _{ÁGUA OUT} (°C)	V _{ÁGUA} (m ³ /h)	T _{AR} (°C)	η (%)	Q _{GAS EXAUST} (kJ/h)	Q _{ÁGUA} (kJ/h)
10:40	98.8	96300	23.1	39.02	14.44	298.91	150.23	34.33	38.83	10.57	35	16.7	170744.0	198562.4
10:45	98.7	96279	23.4	39.02	14.57	302.25	231.92	36.26	37.77	10.52	34	16.8	80759.2	66089.2
10:50	98.8	96300	23.2	38.77	14.52	303.39	236.52	37.47	38.94	10.55	34	16.7	76792.9	64932.3
10:55	98.9	96300	23.1	38.85	14.67	303.17	238.18	38.69	40.17	10.48	34	16.4	74634.5	64845.9
11:00	98.8	96260	23.3	39.33	14.78	303.58	239.47	39.83	41.31	10.47	35	16.4	73632.3	64568.8
11:05	98.8	96195	22.6	39.56	14.35	304.89	240.78	41.02	42.49	10.45	38	16.4	73625.2	64152.0
11:10	98.8	96300	23.0	39.87	14.61	305.37	241.74	42.22	43.72	10.43	34	16.4	73069.7	65157.0
11:15	98.8	96300	23.3	38.90	14.87	304.31	240.78	43.50	44.98	10.42	34	16.3	72956.3	64268.9
11:20	98.8	96279	23.2	38.72	14.59	304.27	241.43	44.59	46.02	10.38	35	16.6	72157.8	62001.9
11:25	98.9	96300	23.2	39.31	14.66	304.67	242.11	45.71	47.14	10.42	36	16.5	71847.3	62264.4
11:30	98.8	96321	22.9	39.74	14.13	305.64	243.04	46.90	48.30	10.41	40	16.9	71895.0	60848.8
11:35	98.9	96237	22.5	39.59	14.29	305.38	244.12	48.03	49.45	10.42	37	16.4	70352.8	61532.1
11:40	98.8	96300	23.1	39.60	14.80	303.99	242.60	49.22	50.63	10.44	35	16.3	70498.7	61417.1
11:45	98.8	96300	23.3	38.67	15.00	303.22	241.94	50.31	51.70	10.47	35	16.2	70376.9	60720.4
11:50	98.8	96258	23.5	38.30	14.98	302.46	241.89	51.43	52.81	10.48	35	16.4	69555.7	60458.7
11:55	98.8	96238	23.6	38.38	14.91	302.82	242.15	52.52	53.90	10.50	35	16.5	69668.2	60103.1
12:00	98.8	96300	23.6	37.67	15.16	302.38	241.51	54.11	54.99	10.50	33	16.2	69908.6	38852.0
12:05	98.8	96300	23.6	37.26	15.23	303.60	244.40	54.74	56.08	10.48	35	16.2	67990.9	58331.7
12:10	98.8	96300	23.8	37.74	15.22	302.74	244.65	55.76	57.10	10.48	34	16.3	66708.1	58794.2
12:15	98.8	96300	23.7	37.89	15.16	303.21	244.99	56.88	57.17	10.48	35	16.3	66863.9	12634.1
12:20	98.9	96300	23.7	37.88	15.30	303.12	245.30	57.91	59.23	10.50	34	16.1	66405.6	57709.5
12:25	98.8	96300	23.2	37.61	15.20	303.72	246.01	58.97	60.28	10.48	35	15.9	66275.8	57518.2
12:30	98.8	96279	23.6	37.55	15.38	302.95	245.72	57.43	61.33	10.46	34	16.0	65730.1	170310.5
12:35	98.8	96300	23.4	37.82	14.71	303.75	246.57	61.05	62.33	10.47	35	16.6	65667.5	55884.2
12:40	98.8	96300	23.6	37.97	14.94	304.09	247.16	62.06	63.33	10.48	35	16.5	65373.4	55604.8
12:45	98.8	96300	23.6	37.96	14.94	303.72	247.20	63.07	64.35	10.53	35	16.5	64909.1	55890.2
MÉD.	98.8	96286	23.3	38.58	14.82	303.52	238.94	49.38	50.94	10.47	35	16.4	74169.2	67825.1

5.1.2

Análise

Baseados nos dados do teste do sistema de cogeração e na metodologia apresentada no item 6.1 mostra-se a seguir a avaliação dos parâmetros de desempenho do sistema de cogeração.

Conforme pode-se observar na Tabela 23, na coluna P_{MTG} , o valor de potência média fornecida pela microturbina (P_{MTG}) é de 23.3 kW para as condições ambientais de operação no dia do teste (30 °C e 98.8 kPa aproximadamente), correspondendo-lhe uma velocidade média de rotação de aproximadamente 96286 RPM, sendo a temperatura média do ar de entrada à microturbina (T_{AR}) que é medida na entrada do compressor de 35 °C. Cabe destacar que se considerou como tempo útil do teste o tempo no qual existia troca de calor entre os gases de exaustão da microturbina e a água, já que, neste tempo a “clapeta” da caldeira de recuperação permanecia aberta permitindo a circulação dos gases dentro da caldeira de recuperação; este tempo útil foi de 2.1 horas aproximadamente, sendo que o tempo total do teste foi de 2.6 horas aproximadamente. Durante este tempo útil o sistema de cogeração aqueceu a água desde uma temperatura inicial de 34.33 °C, até uma temperatura de 64.35 °C aproximadamente.

Também na Tabela 23, pode-se observar que as temperaturas da água na entrada da caldeira ($T_{ÁGUA IN}$) e na saída da caldeira ($T_{ÁGUA OUT}$) aumentam quase da mesma maneira durante o tempo útil do teste, até atingir a temperatura final da água de 64.35 °C aproximadamente, isto pode, também, ser observado na Fig. 49. O motivo pelo qual ambas as temperaturas aumentam dessa forma é devido a que durante o desenvolvimento do teste, não existiu o consumo da água que é aquecida pelo sistema de cogeração, originando com isto que gradativamente a água fique mais quente.

Considera-se que o calor absorvido pela água dos gases quentes de exaustão é devido à diferença de temperaturas no momento da medição, quer dizer, supõe-se que as temperaturas no momento de realizar as medições são as instantâneas. Esta condição é suposta para a utilização da equação (19), já que se requer que as temperaturas da água de entrada e saída na equação sejam permanentes.

A Fig. 50 apresenta graficamente os valores das Temperaturas dos gases de exaustão de entrada à caldeira (TEX IN) e de saída da caldeira (TEX OUT) durante o desenvolvimento do teste no Sistema de Cogeração. Pode-se observar que esta última é menor do que a primeira devido à utilização de parte de sua energia térmica para o aquecimento da água.

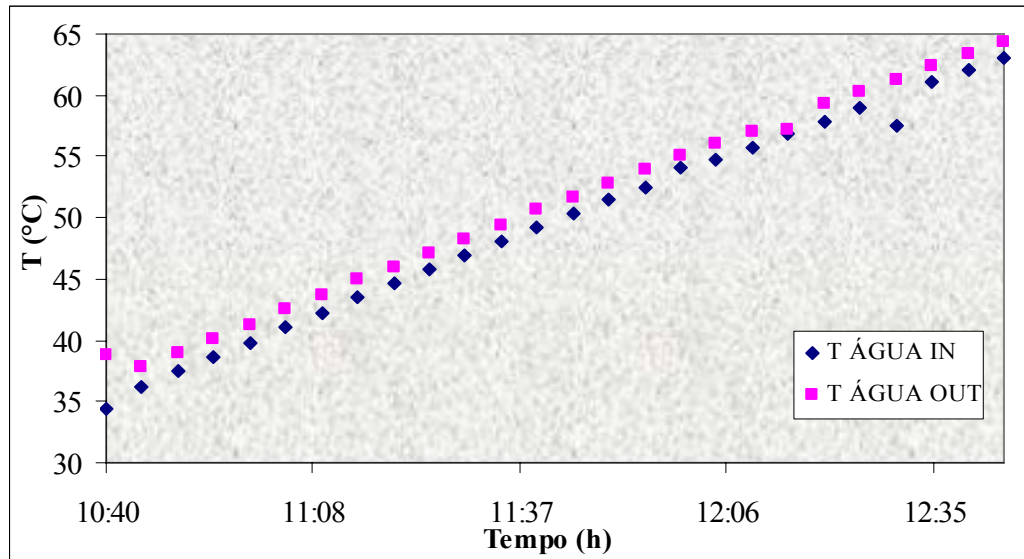


Figura 49 - Variação das Temperaturas da água de entrada (TÁGUA IN) e de saída (TÁGUA OUT) da caldeira de recuperação durante o desenvolvimento do teste no Sistema de Cogeração da microturbina Capstone C30 LPNG.

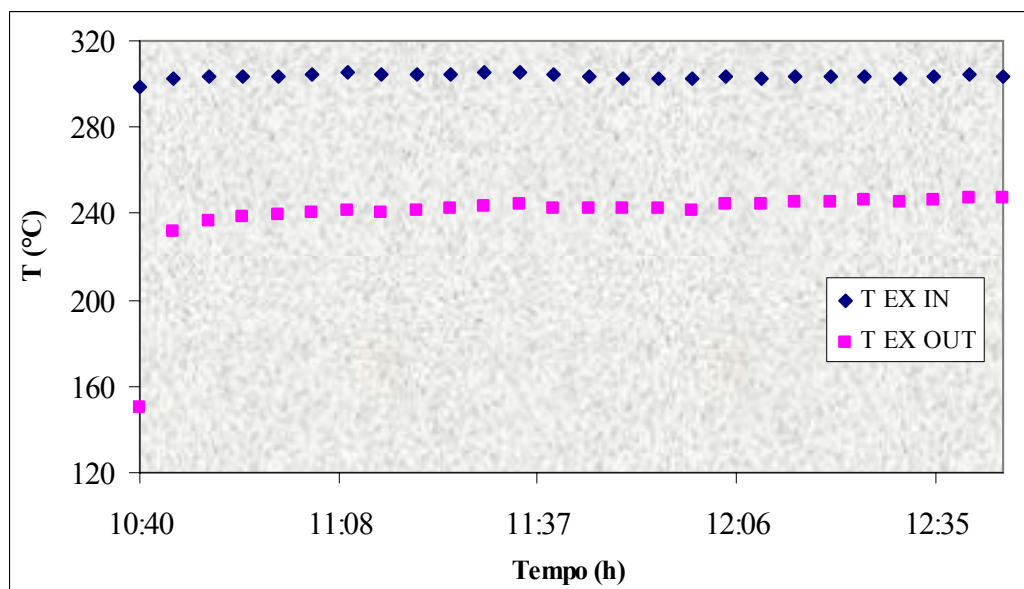


Figura 50 - Variação da Temperatura dos gases de exaustão de entrada à caldeira (TEX IN) e de saída da caldeira (TEX OUT) durante o desenvolvimento do teste no Sistema de Cogeração.

Na Tabela 24, pode-se observar que o valor das eficiências elétrica, térmica e total do sistema são aproximadamente 16.40 %, 13.25 % e 29.65 %, respectivamente.

Tabela 24 - Desempenho do Sistema de Cogeração calculado com os dados do teste realizado no 25/01/2006.

Parâmetros	Valor
Po (kW)	23.30
Q (kW)	18.80
η (%)	16.40
η_T (%)	13.25
η_{TOTAL} (%)	29.65

Conforme mencionado no capítulo 4, a potência e eficiência elétrica do sistema podem também ser estimadas mediante um procedimento indicado pela Capstone, para as condições ambientais do local de operação, cujos resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Desempenho do Sistema de Cogeração estimado a partir do procedimento da Capstone, para as condições ambientais do local de operação.

Parâmetros	Valor
Power Ratio	0.97
E.B.P.P.R	1.00
$W_{Tab.2}$ (kW)	23.80
W_{site} (kW)	23.10
Po (kW)	23.30
$\eta_{Tab.2}$ (%)	23.10
E.B.P.E.R.	1.00
η_{site} (%)	23.10
η (%)	16.40

Ao se analisar a Tabela 25, pode-se notar que a potência máxima esperada para as condições ambientais durante o desenvolvimento do teste (W_{site}) foi de

23.10 kW. O valor médio medido durante o teste, Tabela 23, foi de 23.30 kW. A variação percentual entre o valor medido e o calculado é de 0.90%, quer dizer, que a potência gerada pela microturbina encontra-se dentro da faixa de tolerância admitida no capítulo 4, que é de ± 1 kW. Cabe destacar que devido à não existência de um manômetro para a medição da perda de carga na caldeira de recuperação, supõe-se que o valor de E.B.P.P.R. (Exhaust Back Pressure Power Ratio) é 1.00, este é um fator que está relacionado com a degradação da potência e eficiência elétrica da microturbina como função da perda de carga nos gases de exaustão.

Uma grande diferença encontrada refere-se ao valor calculado da eficiência elétrica da microturbina. Ao se analisar a Tabela 25, pode-se notar que a eficiência esperada para as condições ambientais durante o desenvolvimento do teste (η_{site}) foi de 23.10%. O valor médio calculado através dos valores informados pelo sistema de aquisição de dados, Tabela 6, foi de 16.40%, sendo a variação percentual entre o valor esperado e o calculado é de 40.85%.

É necessário indicar que, com os dados apresentados no capítulo 4, a eficiência elétrica calculada através dos valores informados pelo sistema de aquisição de dados foi de 18.50%, sendo que também a eficiência esperada foi maior (22.90%). Cabe destacar que a temperatura ambiente considerada naquela ocasião foi aproximadamente a mesma que para este teste (30 °C). Além disto, calculando o valor da variação percentual entre o primeiro e o último valor das eficiências elétricas, que é 11.7%, pode-se mostrar que a microturbina poderia ser menos eficiente que o apresentado pelo fabricante. Para uma melhor confirmação desta afirmação, novos e adequados testes serão necessários.

O principal fator que pode ser atribuído a esta diferença é devido aos erros sistemáticos durante o desenvolvimento do teste, quer dizer ao momento de realizar as medições do fluxo do Gás Natural para a microturbina e provavelmente também a avaliação da incerteza do PCI do combustível. Foi utilizado um valor médio diário, obtido através da concessionária CEG.

Na Fig. 51 se observa graficamente a variação da potência da microturbina como função da temperatura de entrada do ar. Esta temperatura foi medida com o sensor interno da microturbina localizado na entrada do compressor (depois de passar pelo gerador elétrico); esta relação, tem uma dependência linear. A faixa de

variação de potência é de 22.5 até 23.8 kW, aproximadamente para uma variação de temperatura do ar de entrada de 33 até 40 °C, aproximadamente.

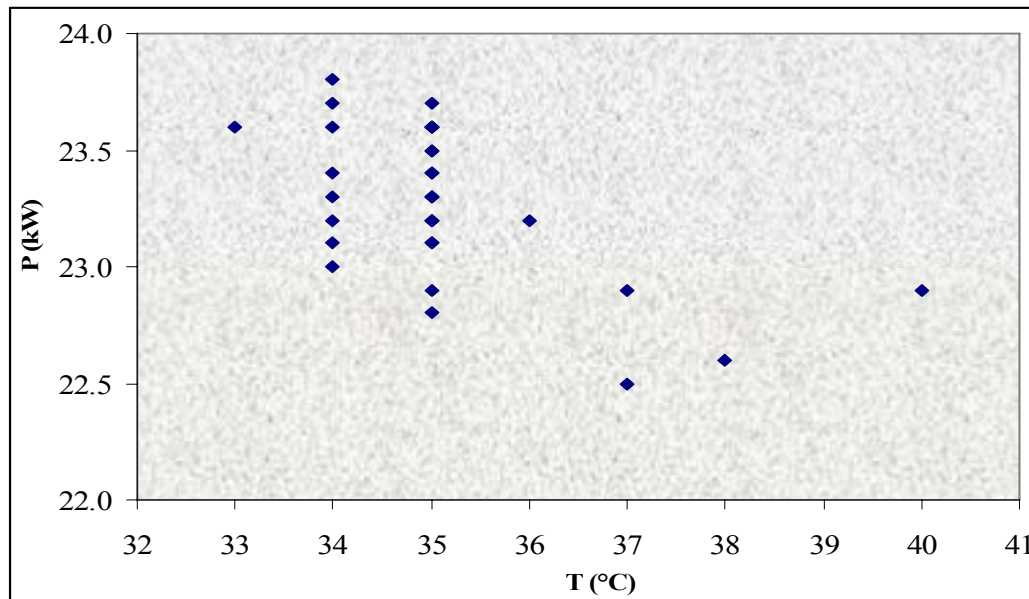


Figura 51 - Variação da Potência da microturbina com respeito à Temperatura de Entrada do Ar durante o desenvolvimento do teste no Sistema de Cogeração.

Também, na Tabela 23, pode-se observar que o calor médio ganho pela água é de aproximadamente 67825.1 kJ/h (18.84 kW), sendo que o calor médio disponível nos gases quentes da exaustão na caldeira é de 74169.2 kJ/h (20.60 kW). A variação destes calores durante o desenvolvimento do teste pode ser observada graficamente na Fig. 52.

Conforme mencionado no capítulo 4, para as condições ambientais do teste, o fabricante menciona que o valor da energia disponível nos gases de exaustão da microturbina é de 309131 kJ/h (85.86 kW), que comparado com o valor da energia calculada com os dados informados pelo sistema de aquisição (20.60 kW), no dia do teste, verifica-se que a relação de 24%, o que quer dizer que o sistema esta aproveitando somente um 24% da energia disponível nos gases de exaustão.

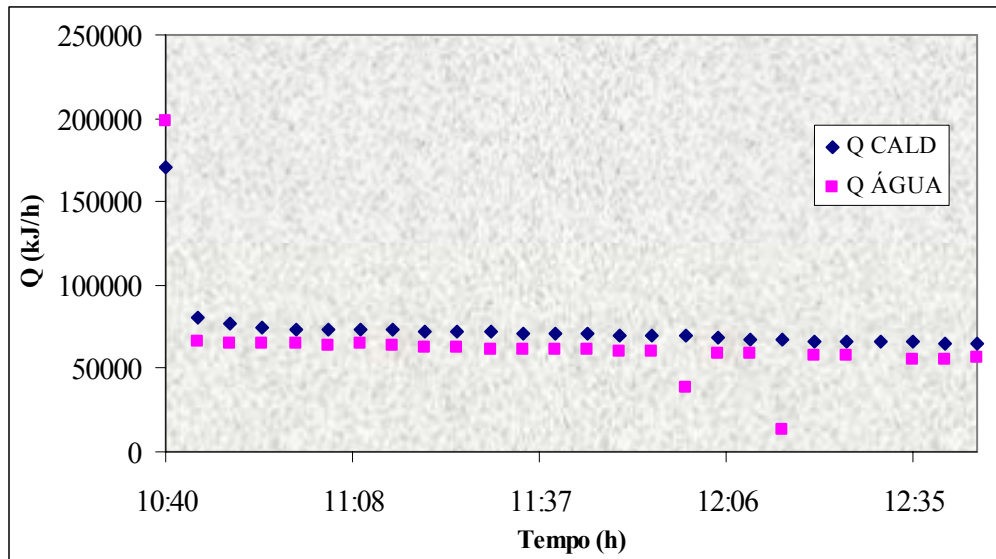


Figura 52 - Variação do Calor dos Gases na Caldeira (QCALD) e o Calor absorvido pela água (QAGUA) durante o desenvolvimento do teste de Sistema de Cogeração.

5.2

Critérios de avaliação e desempenho na produção e qualidade de energia elétrica e térmica com diferentes cargas de operação

O objetivo deste capítulo é a apresentação de dados de desempenho e o estabelecimento de critérios para a avaliação do desempenho na produção e qualidade, da energia elétrica gerada pela microturbina Capstone C30 LPNG. Juntamente com a energia elétrica, também será avaliada a energia térmica; quando associada com a caldeira de recuperação para o aproveitamento dos seus gases de exaustão numa planta de cogeração.

Neste capítulo será descrita e desenvolvida uma metodologia para a realização dos testes na planta de cogeração do ginásio esportivo da PUC-Rio, assim como a determinação das incertezas nas medições e cálculos realizados.

Para a verificação da metodologia desenvolvida serão utilizados os dados do teste realizado no dia 27/05/2006. O teste foi realizado durante a operação contínua do sistema e para diferentes cargas de operação, quer dizer, carga total e cargas parciais e para as condições ambientais do momento; as medições dos parâmetros foram feitas com os sensores de medição instalados na planta de cogeração e que foram descritos e esquematizados no capítulo 3.

5.2.1

Metodologia

Para a verificação do desempenho das plantas de cogeração em sistemas de geração distribuída, como referenciado em [43, 45], realiza-se a análise de uma série de parâmetros; neste capítulo vão ser analisados alguns destes, a seguir:

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.

Por outro lado, quando se apresenta o resultado de medição de uma ou várias grandezas físicas, como referenciado em [46], é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade; nesse sentido, é necessário que exista um procedimento, facilmente compreendido e de aceitação geral, para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, através da estimativa da incerteza.

Cálculo da incerteza

- Cálculo da incerteza.

Portanto, neste capítulo será descrita uma metodologia para a realização dos testes numa planta de cogeração, assim como o cálculo das incertezas das medições realizadas.

A verificação de cada um dos parâmetros de desempenho, listados anteriormente, realizou-se durante o desenvolvimento do teste no ginásio esportivo da PUC-Rio; na seguinte tabela apresentam-se as características dos testes desenvolvidos.

Tabela 26 - Testes controlados da planta de cogeração do ginásio esportivo da PUC-Rio.

DATA	TEMPO	CARACTERÍSTICAS DO TESTE	PARÂMETROS VERIFICADOS
27/05/06	15:30 – 15:50	100% da Potência (Carga Total), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados a cada 5 minutos.	Pot. Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.
27/05/06	16:35 – 16:55	75% da Potência (Carga Parcial), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados a cada 5 minutos.	Pot. Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.
27/05/06	17:10 – 17:30	50% da Potência (Carga Parcial), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados a cada 5 minutos.	Pot. Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.
27/05/06	17:45 – 18:05	25% da Potência (Carga Parcial), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados a cada 5 minutos.	Pot. Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.

Simultaneamente, realizou-se também o monitoramento das seguintes variáveis: vazão, pressão e temperatura do Gás Natural (GN), pressão e temperatura ambiente, vazão e temperaturas de entrada e saída da água na caldeira, temperatura dos gases de exaustão que entram e saem da caldeira, composição e Poder Calorífico Inferior (PCI) do GN.

Neste ponto é necessário indicar dois aspectos:

- (i) segundo referenciado em [27, 47] para o sistema os dados da temperatura ambiente são medidos na entrada do compressor e;

(ii) tanto a composição como o PCI do GN, foi obtida da concessionária CEG e cujas características são apresentadas posteriormente.

5.2.2

Desempenho na produção de calor e potência

Uma das características mais importantes, do ponto de vista do consumidor, é saber qual é econômica e operacionalmente a melhor opção de produção e/ou transformação de energia para as características próprias dos seus requerimentos; nesse sentido, 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.

As turbinas e MTG foram projetadas para melhores respostas operativas em capacidades máximas; mais é provável que, muitas vezes, menores capacidades de operação sejam requeridas.

Para o cálculo da eficiência elétrica, como referenciado em [18, 40, 43, 45], usa-se a potência elétrica média gerada pelo sistema, vazão e PCI médios do GN e determina-se com ajuda da seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_o}{HI} \quad (22)$$

Onde:

P_o : Potência elétrica média gerada pelo sistema (kW), calculada com a equação (23).

HI : Energia térmica média de entrada ao sistema (kW), baseado no PCI do GN, calculada com a equação (24).

A potência elétrica média é calculada como a média aritmética dos valores das potências medidas durante o desenvolvimento do teste, conforme a equação (23):

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} P_{o_i}}{N} \quad (23)$$

Onde:

P_{o_i} : Potência elétrica em cada medição ao longo do teste (kW).

N : Número total de medições ao longo do teste.

A energia térmica média de entrada ao sistema (HI) é determinada através dos valores médios da vazão e PCI do GN ao longo do teste:

$$HI = F_m \cdot PCI \quad (24)$$

Onde:

F_m : Vazão média do GN (Nm³/s).

PCI : PCI médio do GN (kJ/Nm³).

A vazão média do GN calculada como a média aritmética dos valores das vazões medidas durante o desenvolvimento do teste, conforme a equação (25):

$$F_m = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} F_{mi}}{N} \quad (25)$$

Onde:

F_{mi} : Vazão do GN em cada medição ao longo do teste (Nm³/s).

Conforme mencionado no capítulo 1, diversas atividades econômicas podem utilizar a cogeração para suprir as suas necessidades térmicas, motivo pelo qual a energia térmica que pode ser recuperada nestes sistemas é de muita importância. A taxa de calor recuperada, que indica quanto de calor pode ser aproveitada nestes sistemas, serve para quantificar a energia térmica recuperada e será verificada

com os valores médios da vazão e temperaturas de entrada e saída da água na caldeira, com a seguinte equação:

$$Q_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot C_{PH_2O} \cdot (T_{OUT} - T_{IN}) \quad (26)$$

Onde:

Q_{H_2O} : Taxa de calor recuperado (kW).

V_{H_2O} : Vazão da água (m³/s).

ρ_{H_2O} : Massa específica da água (kg/m³) para $(T_{OUT} + T_{IN})/2$.

C_{PH_2O} : Calor específico da água (kJ/kg-K) para $(T_{OUT} + T_{IN})/2$.

T_{IN} : Temperatura da água na entrada da caldeira de recuperação (K).

T_{OUT} : Temperatura da água na saída da caldeira de recuperação (K).

A eficiência térmica pode ser calculada pela divisão da taxa de calor recuperada e a energia térmica média de entrada à turbina (HI), assim:

$$\eta_T = \frac{Q_{H_2O}}{HI} \quad (27)$$

Finalmente a eficiência total da planta de cogeração pode ser calculada somando as eficiências elétrica e térmica, assim:

$$\eta_{TOTAL} = \eta + \eta_T \quad (28)$$

Qualidade da Potência

Duas das principais características da microturbina Capstone C30 (Recuperated) LPNG são: sua versatilidade para poder ser configurada para a geração de energia de forma paralela (Grid Connect) ou isolada (Stand Alone) da rede elétrica e sua capacidade para se alinhar com a rede, caso esteja operando em paralelo a esta. Sendo que a planta de cogeração da PUC-Rio opera em forma paralela à rede elétrica, é necessário o monitoramento do desempenho da

qualidade da energia produzida que, segundo referenciado em [18, 43, 45], atinge a avaliação da frequência e tensão elétrica de saída.

Uma vez realizadas as medidas da frequência elétrica durante o teste da planta de cogeração determina-se o valor da frequência máxima, mínima e média assim como o desvio padrão com as seguintes equações:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} F_i}{N} \quad (29)$$

$$s_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (F - F_i)^2}{(N-1)}} \quad (30)$$

Onde:

F : Frequência média (Hz).

F_i : Frequência de cada medição ao longo do teste (Hz).

s_F : Desvio padrão da frequência (Hz).

Como referenciado em no capítulo 5, a tolerância de variação da frequência pode ser de ±1% do valor nominal (60 Hz no caso brasileiro), para assim evitar o sobre aquecimento e até a queima de motores e equipamentos em geral.

No caso da tensão elétrica de saída, também é necessário determinar os valores da tensão máxima, mínima e média, juntamente com o desvio padrão dos dados registrados no teste, para isso utiliza-se as seguintes equações:

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

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

Onde:

V : Tensão média de saída (V).

V_i : Tensão de cada medição ao longo do teste (V).

s_v : Desvio padrão da tensão (V).

5.2.3

Desempenho operacional

Nos sistemas de potência, existe um tempo necessário desde o momento que se dá a partida até se chegar às condições de operação requeridas. As microturbinas são sistemas geradores de potência, e não estão isentas desta operação; este tempo é conhecido como o tempo de partida ou tempo de arranque, este, é o tempo requerido para alcançar a potência máxima que ela pode fornecer.

Para uma correta caracterização dos parâmetros, como referenciado em [18, 43], o desenvolvimento de cada teste deve ser feito com a uma máxima variabilidade de alguns parâmetros operacionais tal que não excedam alguns limites estabelecidos, sendo estes parâmetros: potência, vazão de GN, pressão e temperatura ambientes ao sistema; os quais são mostrados, com suas respectivas variações, na Tabela 27.

Tabela 27 - Variação permitida das condições de operação.

PARÂMETRO	VARIAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA ^a
Potência	± 2 %
Vazão de Combustível	± 2 %
Pressão Atmosférica	± 0.5 %
Temperatura Atmosférica	± 2.2°C

$$^a \text{Máximo} = \frac{\text{Valor médio no teste} - \text{Valor em cada medição}}{\text{Valor médio no teste}} * 100$$

5.2.4

Cálculo das incertezas

Segundo referenciado em [46], na estimativa da incerteza total, de uma medição, é necessário tratar separadamente cada fonte de incerteza para se saber a sua contribuição e dividi-lo pelo seu respectivo divisor correspondente à distribuição de probabilidade estatística atribuída. Os divisores para as principais distribuições se encontram listados na Tabela 28 [28].

Tabela 28 - Divisores para distribuição de probabilidade (95,45% de nível de confiança).

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

* Valor escolhido.

Nesta parte, baseados na referência [28, 46, 48], apresenta-se uma metodologia para o cálculo das incertezas nos resultados dos testes realizados no sistema de cogeração da microturbina Capstone C30. Cabe destacar que para um número de N medições (N = 4), a incerteza de medição “ U_x ” (Incerteza Expandida) foi estimada com um nível de confiabilidade de 95,45% (k = 2) e lhe corresponde um coeficiente de abrangência de 3,31 ($k_{95,45\%} = 3,31$).

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

Incerteza na Potência Elétrica (U_p)

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (P_o - P_{o_i})^2}{(N-1)}} \quad (33)$$

$$u_m = \frac{U_m}{2} \quad (34)$$

$$u_p = \sqrt{(s_p^2 + u_m^2)} \quad (35)$$

$$U_p = 3,31 \cdot u_p \quad (36)$$

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:

$$s_{Fm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (Fm - Fm_i)^2}{(N-1)}} \quad (37)$$

$$u_{Fm} = \sqrt{(s_{Fm}^2 + u_m^2)} \quad (38)$$

$$U_{Fm} = 3,31 \cdot u_{Fm} \quad (39)$$

$$u_{HI} = HI \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{Fm}}{Fm}\right)^2 + \left(\frac{u_{PCI}}{PCI}\right)^2} \quad (40)$$

$$U_{HI} = 2 \cdot u_{HI} \quad (41)$$

$$u_{Fm} = \frac{U_{Fm}}{2} \quad (42)$$

$$u_{PCI} = \frac{U_{PCI}}{2} \quad (43)$$

Incerteza na Eficiência Elétrica (U_{η})

$$u_{\eta} = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{u_P}{P_O}\right)^2 + \left(\frac{u_{HI}}{HI}\right)^2} \quad (44)$$

$$U_{\eta} = 2 \cdot u_{\eta} \quad (45)$$

$$u_P = \frac{U_P}{2} \quad (46)$$

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

Para o cálculo da incerteza da taxa de recuperação de calor, como referenciado em [28], 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 se considera $\Delta T_{H2O} = T_{OUT} - T_{IN}$, massa específica ($U_{\rho_{H2O}}$) e Calor Específico da água ($C_{p_{H2O}}$), assim:

$$V_{H2O} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} V_{H2O_i}}{N} \quad (47)$$

$$s_{V_{H2O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (V_{H2O} - V_{H2O_i})^2}{(N-1)}} \quad (48)$$

$$u_{V_{H2O}} = \sqrt{(s_{V_{H2O}}^2 + u_m^2)} \quad (49)$$

$$U_{V_{H2O}} = 3,31 \cdot u_{V_{H2O}} \quad (50)$$

$$s_{\Delta T_{H2O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\Delta T_{H2O} - \Delta T_{H2O_i})^2}{(N-1)}} \quad (51)$$

$$u_{\Delta T_{H2O}} = \sqrt{(s_{\Delta T_{H2O}})^2 + u_m^2} \quad (52)$$

$$U_{\Delta T_{H2O}} = 3,31 \cdot u_{\Delta T_{H2O}} \quad (53)$$

$$u_{Q_{H2O}} = Q_{H2O} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{V_{H2O}}}{V_{H2O}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{H2O}}}{\rho_{H2O}}\right)^2 + \left(\frac{u_{C_{p_{H2O}}}}{C_{p_{H2O}}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T_{H2O}}}{\Delta T_{H2O}}\right)^2} \quad (54)$$

$$U_{Q_{H2O}} = 2 \cdot u_{Q_{H2O}} \quad (55)$$

$$u_{V_{H2O}} = \frac{U_{V_{H2O}}}{2} \quad (56)$$

$$u_{\Delta T_{H2O}} = \frac{U_{\Delta T_{H2O}}}{2} \quad (57)$$

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

$$u_{PCI} = \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^N PCI_i \cdot u_{x_i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N x_i \cdot u_{PCI_i}\right)^2\right)} \quad (58)$$

$$u_{x_i} = \frac{U_{x_i}}{2} \quad (59)$$

$$u_{PCI_i} = \frac{U_{PCI_i}}{2} \quad (60)$$

$$U_{PCI} = 2 \cdot u_{PCI} \quad (61)$$

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

$$u_F = \sqrt{(s_F^2 + u_m^2)} \quad (62)$$

$$U_F = 3,31 \cdot u_F \quad (63)$$

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

$$u_V = \sqrt{(s_V^2 + u_m^2)} \quad (64)$$

$$U_V = 3,31 \cdot u_V \quad (65)$$

A seguir, na Tabela 29, apresenta-se a composição do GN, assim como o seu PCI, para o dia do teste, os quais foram fornecidos pela concessionária CEG.

Tabela 29 - Características médias do Gás Natural fornecido pela CEG em 27/05/2006.

COMPOSIÇÃO	(%)
CO2	0,350
C2H6	4,756
N2	0,6992
CH4	93,356
C3H8	0,777
IC4	0,0171
NC4	0,0315
IC5	0,0046
NC5	0,0049
>C6	0,0042
PCS (kJ/Nm3)	38514,35
PCI (kJ/Nm3)	34752,73
ρ (kg/Nm3)	0,7140

5.2.5

Análise

Na Tabela 30 mostra-se a variabilidade dos parâmetros durante o desenvolvimento do teste.

Tabela 30 - Variabilidade observada nos parâmetros operacionais no teste realizado no dia 27/05/2006.

CONDIÇÃO DO TESTE	Nº TESTE	P _O ± 2 %	V _{GN} ± 2 %	P _{AMB} ± 0,5 %	T _{AMB} * ± 2,2 °C
100%	1	0,73	0,24	0,00	0,50
	2	0,29	0,32	0,00	0,20
	3	0,91	0,71	0,00	0,90
	4	0,10	0,16	0,00	0,20
75%	5	0,18	0,37	0,00	0,02
	6	0,03	0,27	0,00	0,13
	7	0,14	0,16	0,00	0,13
	8	0,00	0,80	0,00	0,28
50%	9	0,84	0,41	0,03	0,38
	10	0,40	0,59	0,03	0,13
	11	0,88	0,35	0,03	0,03
	12	0,44	0,64	0,08	0,23
25%	13	1,45	4,43	0,00	0,87
	14	1,71	2,92	0,00	0,73
	15	1,34	4,91	0,00	0,23
	16	1,60	2,43	0,00	0,07

***A microturbina Capstone C30 LPNG considera como Temperatura Ambiente (T_{AMB}) a temperatura do ar medida na entrada do compressor**

A Frequência e Tensão Elétricas foram monitoradas continuamente durante o desenvolvimento dos testes; na Tabela 31, mostram-se os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão da Frequência e Tensão Elétrica durante o período do teste.

Tabela 31 - Valores médios, máximos, mínimos e desvio padrão da Frequência e Tensão Elétrica durante o desenvolvimento do teste no teste realizado no dia 27/05/2006.

CONDIÇÃO DO TESTE	VALOR	FREQUÊNCIA (Hz)	TENSÃO FASE A (V)	TENSÃO FASE B (V)	TENSÃO FASE C (V)
100%	Média	60	260,3	261,3	261,0
	Máximo	60	261,0	262,0	261,0
	Mínimo	60	260,0	261,0	261,0
	Desvio Padrão	0,0	0,5	0,5	0,0
75%	Média	60	259,0	259,3	259,5
	Máximo	60	259,0	260,0	260,0
	Mínimo	60	259,0	259,0	259,0
	Desvio Padrão	0,0	0,0	0,5	0,6
50%	Média	60	254,3	253,3	254,3
	Máximo	60	255,0	254,0	255,0
	Mínimo	60	254,0	253,0	254,0
	Desvio Padrão	0,0	0,5	0,5	0,5
25%	Média	60	253,0	252,0	253,3
	Máximo	60	253,0	252,0	254,0
	Mínimo	60	253,0	252,0	253,0
	Desvio Padrão	0,0	0,0	0,0	0,5

Nas Tabelas 32 e 33 apresentam-se os valores do desempenho na produção de Potência e Calor da planta de cogeração e as características do GN, do fluido recuperador de calor (água) e dos gases de exaustão obtidos durante o desenvolvimento do teste na PUC-Rio.

Tabela 32 - Desempenho na produção de Potência e Calor no teste realizado no dia 27/05/2006.

Nº TESTE	CONDIÇÃO DO TESTE	HI (kW)	DESEMPENHO ELÉTRICO		DESEMPENHO TÉRMICO		η TOTAL (%)	CONDIÇÕES AMBIENTE	
			P _O (kW)	η (%)	Q _{H2O} (kW)	η_T (%)		T _{AR ENT} (°C)	P _{AMB} (kPa)
1	100%	153,4	25,0	16,29	17,4	11,35	27,64	29,5	99,4
2		153,5	25,1	16,35	17,2	11,19	27,55	29,2	99,4
3		155,1	25,4	16,37	17,4	11,22	27,59	28,1	99,4
4		153,0	25,2	16,47	17,6	11,54	28,00	29,2	99,4
MÉDIA		153,7	25,2	16,37	17,4	11,32	27,69	29,0	99,4
5	75%	128,1	21,0	16,38	14,9	11,67	28,05	29,5	99,4
6		128,9	20,9	16,25	15,0	11,63	27,88	29,6	99,4
7		128,4	20,9	16,30	14,8	11,49	27,79	29,6	99,4
8		127,6	21,0	16,42	14,9	11,69	28,11	29,2	99,4
MÉDIA		128,2	21,0	16,34	14,9	11,62	27,96	29,5	99,4
9	50%	87,4	13,9	15,94	11,0	12,55	28,49	28,3	99,5
10		87,7	13,7	15,73	11,2	12,85	28,58	27,8	99,5
11		86,5	13,7	15,82	10,9	12,56	28,38	27,9	99,5
12		86,3	13,9	16,07	11,0	12,81	28,88	27,7	99,4
MÉDIA		86,9	13,8	15,89	11,0	12,69	28,58	27,9	99,5
13	25%	44,9	7,2	16,09	7,5	16,78	32,87	28,7	99,4
14		44,1	7,0	15,86	7,4	16,87	32,73	27,1	99,4
15		40,9	7,0	17,18	7,4	18,18	35,37	27,6	99,4
16		41,8	7,2	17,31	7,4	17,79	35,11	27,9	99,4
MÉDIA		42,9	7,1	16,61	7,5	17,41	34,02	27,8	99,4

Tabela 33 - Condições do GN, fluido recuperador de calor (água) e gases de exaustão da planta de cogeração da PUC-Rio.

Nº TESTE	CONDIÇÃO DO TESTE	CARACTERÍSTICAS DO GN				CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA				GASES DE EXAUSTÃO	
		V _{GN} (Nm ³ /h)	PCI* (kJ/Nm ³)	P _{GN} (kPa)	T _{GN} (°C)	V _{ÁGUA} (m ³ /h)	T _{ÁGUA IN} (°C)	T _{ÁGUA OUT} (°C)	ΔT _{ÁGUA} (°C)	T _{EX IN} (°C)	T _{EX OUT} (°C)
1	100%	15,89	34752	85,53	23,15	10,40	37,75	39,21	1,45	299,81	234,85
2		15,90	34752	85,79	23,13	10,43	38,09	39,52	1,43	299,51	235,05
3		16,07	34752	85,86	23,11	10,47	38,53	39,97	1,44	299,08	234,83
4		15,85	34752	84,83	23,02	10,44	38,92	40,39	1,47	299,52	235,44
MÉDIA		15,93	34752	85,50	23,10	10,44	38,32	39,77	1,45	299,48	235,04
5	75%	13,27	34752	84,87	21,93	10,49	40,75	41,99	1,24	283,76	223,98
6		13,35	34752	86,13	21,84	10,45	40,83	42,07	1,25	283,99	224,03
7		13,30	34752	85,54	21,74	10,46	40,89	42,12	1,23	283,63	223,75
8		13,22	34752	86,10	21,67	10,46	40,86	42,10	1,24	283,29	223,44
MÉDIA		13,28	34752	85,66	21,79	10,46	40,83	42,07	1,24	283,67	223,80
9	50%	9,05	34752	88,04	21,29	10,44	40,24	41,15	0,91	260,39	206,20
10		9,05	34752	87,73	21,21	10,46	40,07	41,00	0,93	259,89	205,77
11		8,96	34752	87,48	21,12	10,46	39,95	40,85	0,90	260,01	205,43
12		8,94	34752	87,49	21,05	10,43	39,69	40,61	0,92	259,79	205,30
MÉDIA		9,00	34752	87,68	21,17	10,45	39,99	40,90	0,92	260,02	205,68
13	25%	4,65	34752	92,68	20,78	10,47	38,35	38,97	0,62	239,43	189,93
14		4,57	34752	92,06	20,70	10,47	38,01	38,63	0,62	239,03	189,29
15		4,23	34752	92,63	20,64	10,47	37,80	38,42	0,62	239,21	189,18
16		4,33	34752	91,83	20,60	10,47	37,38	38,00	0,62	239,08	188,69
MÉDIA		4,44	34752	92,30	20,68	10,47	37,88	38,50	0,62	239,18	189,27

* Dados fornecidos pela concessionária CEG para o dia do teste

Nas Fig. 53, 54, 55, 56, 57 e 58 apresenta-se a variação da RPM, frequência, potência e tensão, respectivamente; durante o desenvolvimento do teste, para cada uma das quatro cargas selecionadas (100%, 75%, 50% e 25%).

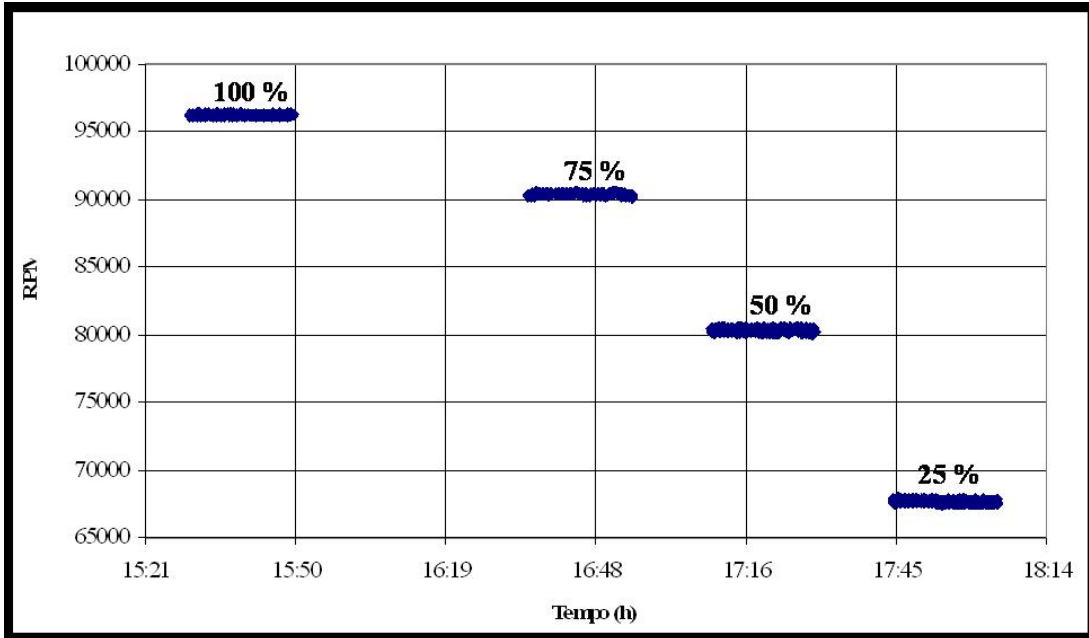


Figura 53 - Variação da RPM durante o desenvolvimento do teste realizado no dia 27/05/2006.

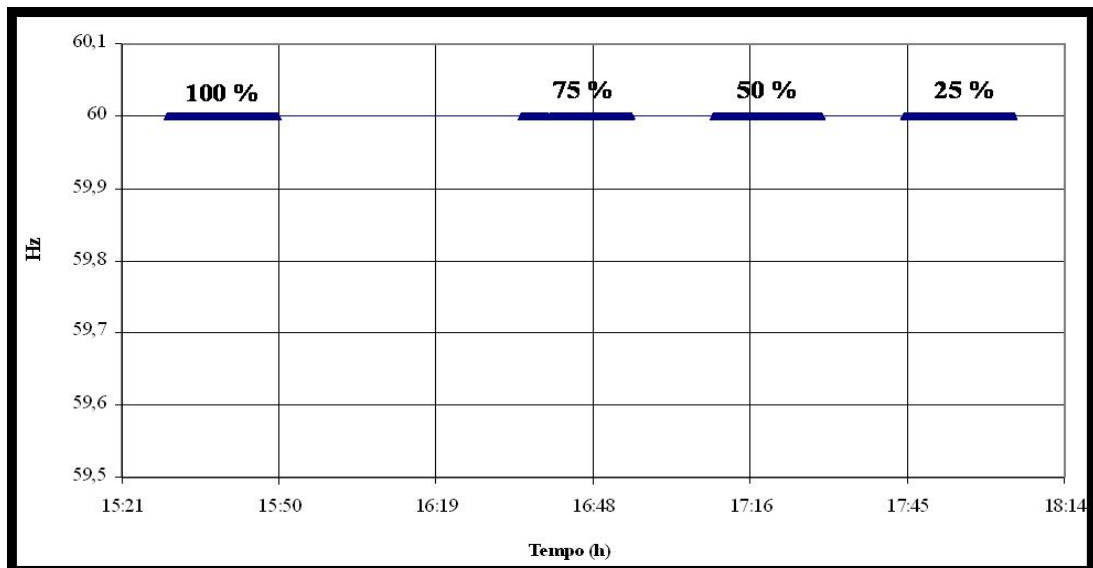


Figura 54 - Variação da Frequência durante o desenvolvimento do teste realizado no dia 27/05/2006..

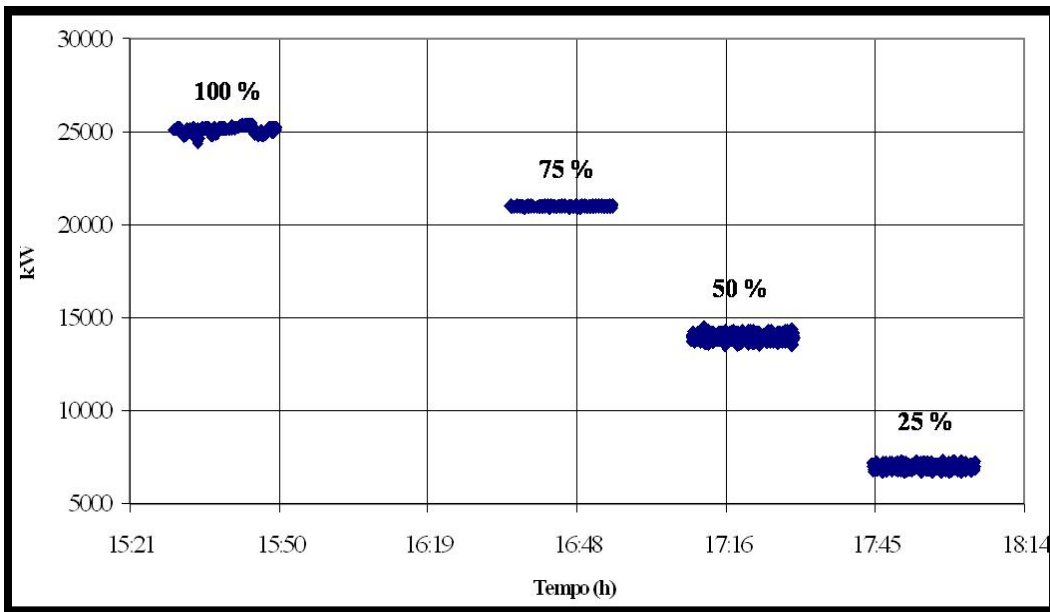


Figura 55 - Variação da Potência durante o desenvolvimento do teste realizado no dia 27/05/2006.

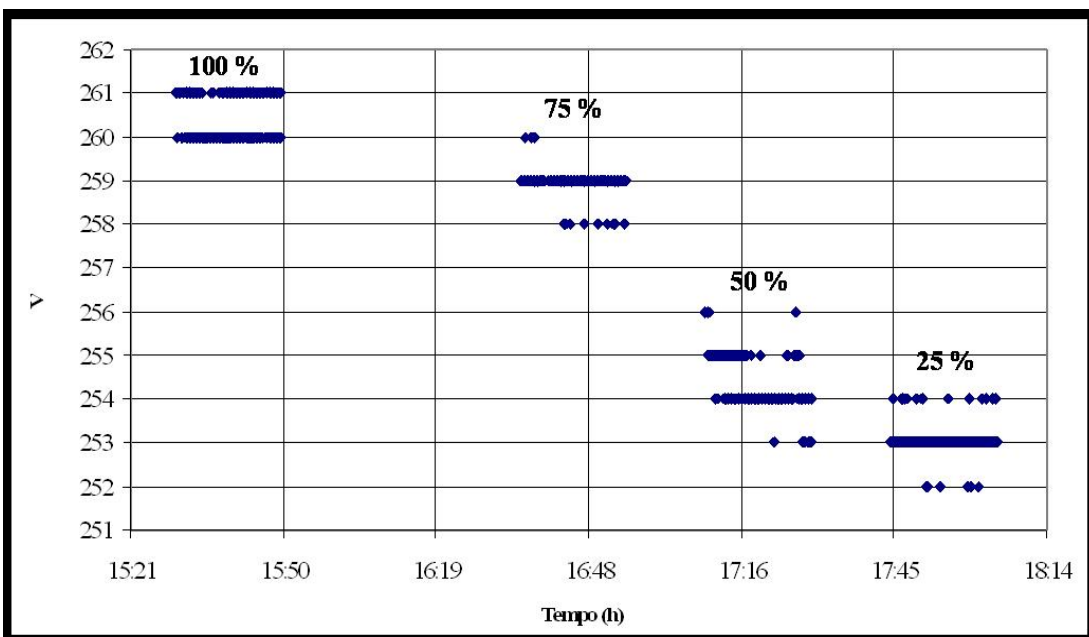


Figura 56 - Variação da Tensão Fase _ A durante o desenvolvimento do teste realizado no dia 27/05/2006.

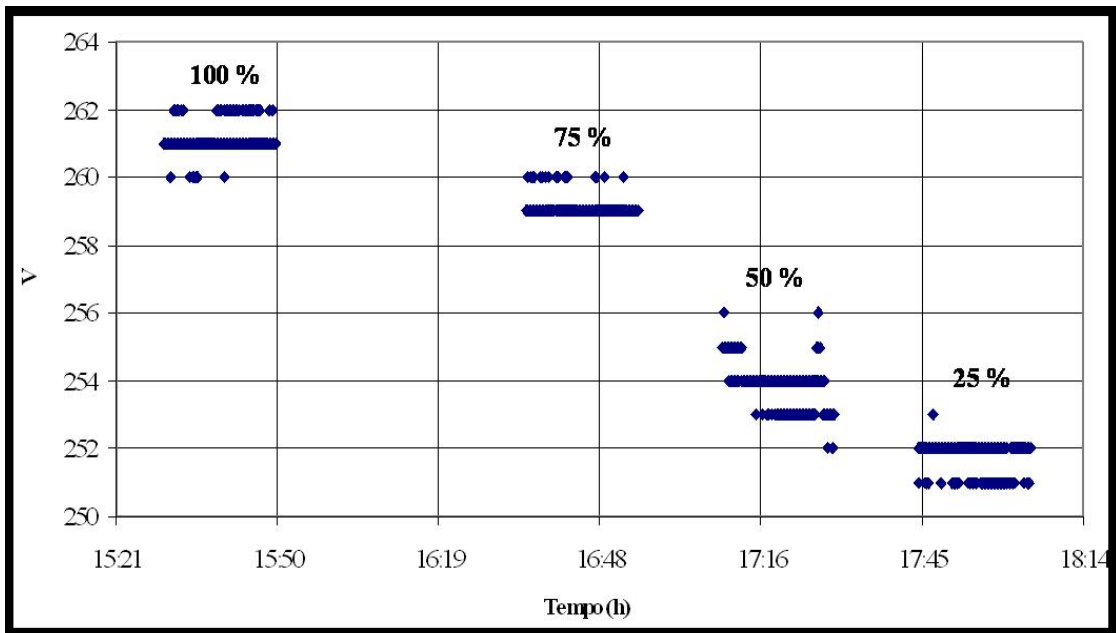


Figura 57 - Variação da Tensão Fase _ B durante o desenvolvimento do teste realizado no dia 27/05/2006.

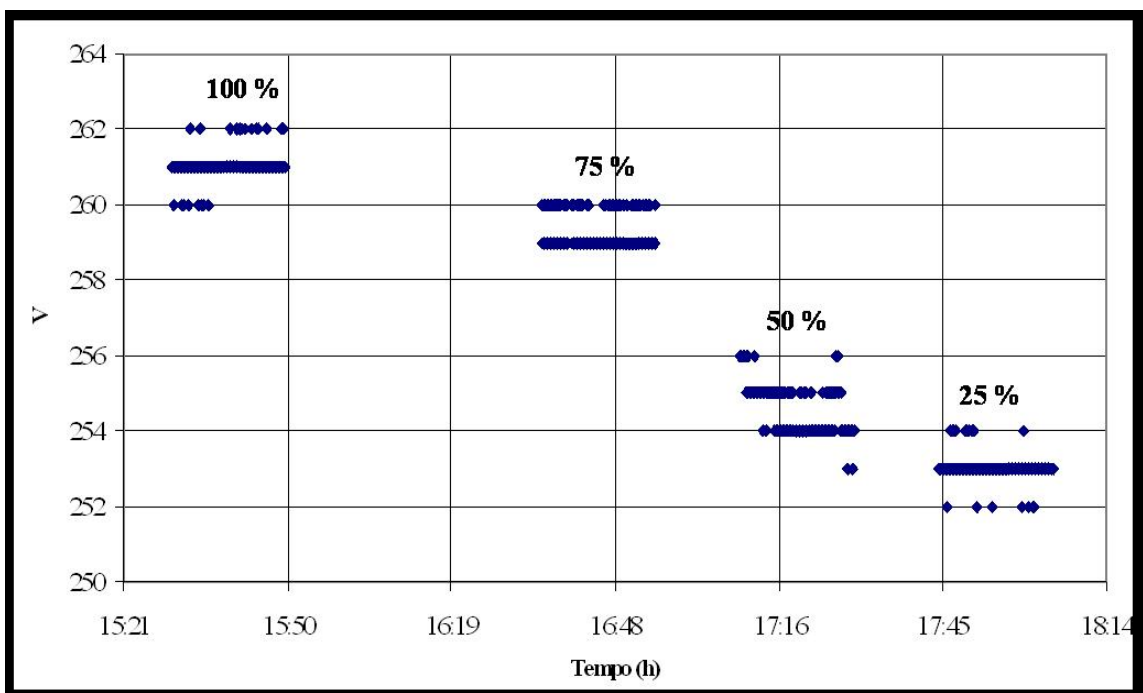


Figura 58 - Variação da Tensão Fase _ C durante o desenvolvimento do teste realizado no dia 27/05/2006.

Nas Fig. 59, 60, 61 e 62 apresenta-se a variação da RPM, potência, temperatura de exaustão, tensão e corrente, respectivamente; durante o processo de partida da microturbina no dia do teste.

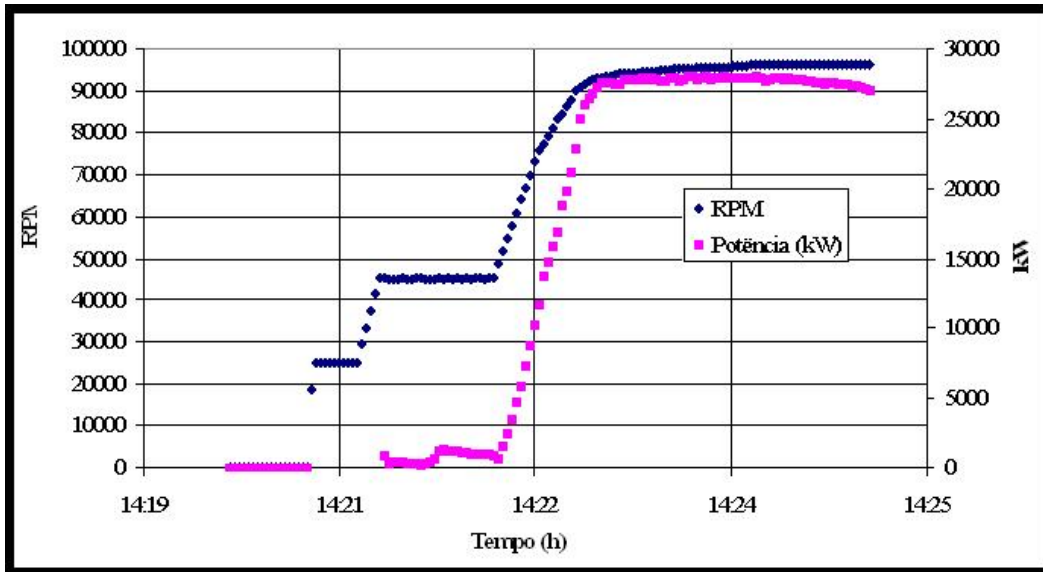


Figura 59 - Variação da RPM e Potência durante a partida da microturbina no teste realizado no dia 27/05/2006.

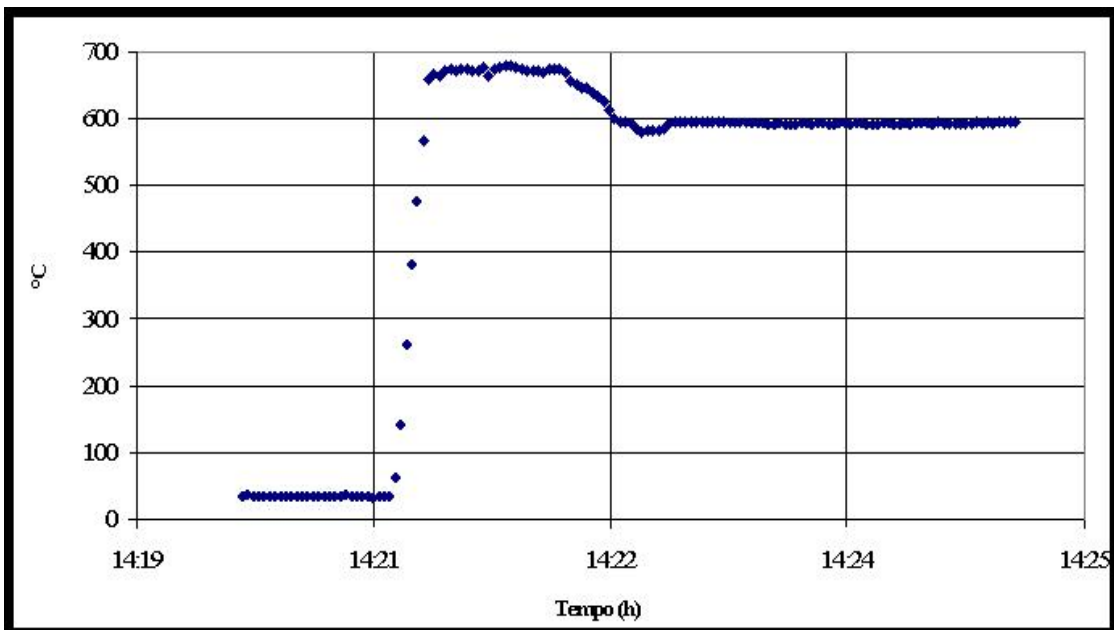


Figura 60 - Variação da Temperatura de Exaustão durante a partida da microturbina no teste realizado no dia 27/05/2006..

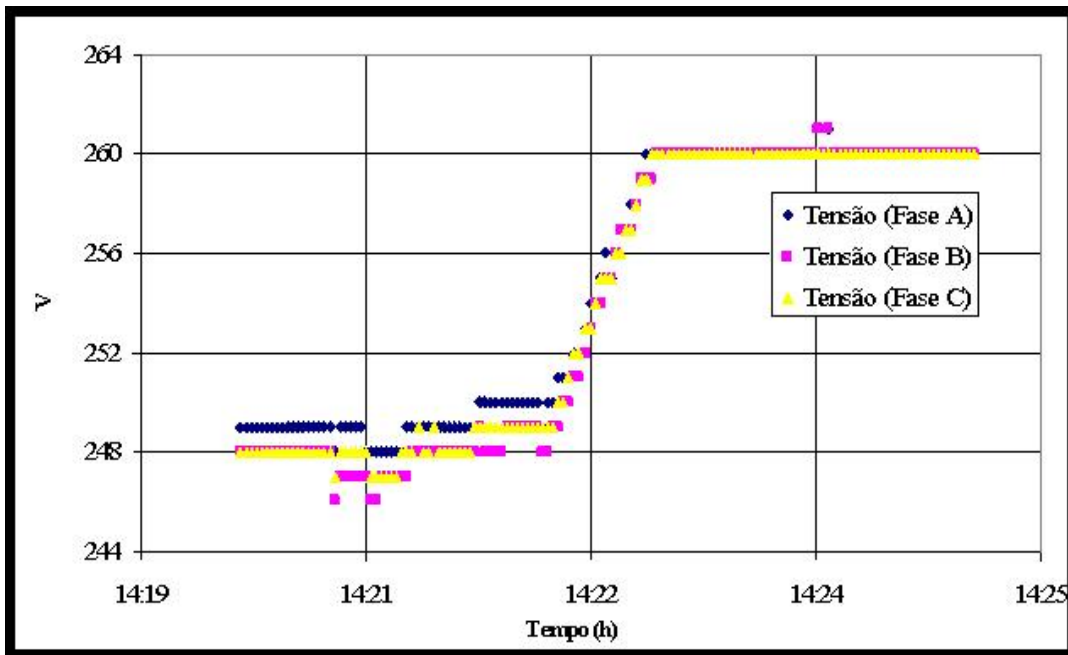


Figura 61 - Variação da Tensão durante a partida da microturbina no teste realizado no dia 27/05/2006.

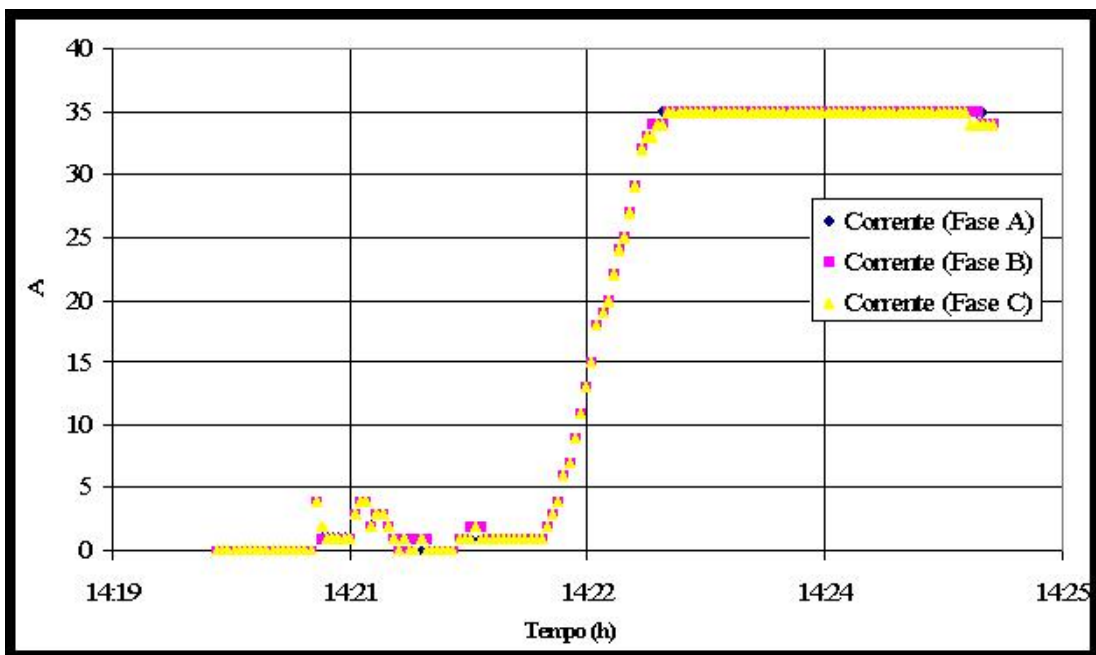


Figura 62 - Variação da Corrente durante a partida da microturbina no teste realizado no dia 27/05/2006.

Na Tabela 34, apresentam-se os valores das incertezas, para a condição de máxima potência (100 %), nas medições realizadas no dia do teste na planta de cogeração da PUC-Rio, assim como as incertezas dos instrumentos utilizados na medição dos parâmetros.

Tabela 34 - Resumo das incertezas dos instrumentos de medição e dos parâmetros medidos, para a máxima potência, no dia do teste (27/05/2006), na planta de cogeração da PUC-Rio.

VARIÁVEL MEDIDA	UNIDADE	INCERTEZA INSTRUMENTO	INCERTEZA DA VARIÁVEL
V_A	V	$\pm 6,9$	$\pm 11,5$
V_B	V	$\pm 6,9$	$\pm 11,5$
V_C	V	$\pm 6,9$	$\pm 11,4$
I_A	A	$\pm 1,1$	$\pm 1,8$
I_B	A	$\pm 1,1$	$\pm 1,8$
I_C	A	$\pm 1,1$	$\pm 2,6$
f	Hz	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$
P_O	kW	$\pm 1,0$	$\pm 1,8$
η	%	--	$\pm 1,6$
HI	kW	--	$\pm 9,5$
V_{GN}	m^3/h	$\pm 0,10$	$\pm 0,21$
P_{GN}	kPa	$\pm 2,3$	$\pm 4,1$
$T_{GN}, \Delta T_{H2O}$	$^{\circ}C$	$\pm 0,6$	$\pm 0,5$
PCI	kJ/Nm^3	--	$\pm 681,2$
η_T	%	--	$\pm 4,0$
V_{H2O}	m^3/h	$\pm 0,18$	$\pm 0,3$
Q_{H2O}	kW	--	$\pm 6,05$

Na Tabela 30 pode ser observado que quando o sistema opera com 100, 75 e 50% da carga máxima de operação, os parâmetros operacionais encontram-se dentro da faixa permissível de variação. No entanto, quando o sistema opera com 25% da carga máxima a variação da vazão do GN encontra-se fora dos limites permitidos. Isto se pode dever a que a potência para essas condições de operação é baixa (7,1 kW aproximadamente) originando com isto que o medidor de turbina do GN opere perto da sua faixa mínima de operação, lugar onde as oscilações e incertezas são maiores. Portanto, estes valores nos indicam que não seria recomendável o funcionamento do sistema nessas potências devido à instabilidade do medidor de vazão de GN.

Como pode ser observado na Tabela 32, o valor da potência elétrica da planta de cogeração, para uma carga total (100%) é de 25,2 kW aproximadamente (correspondendo uma eficiência elétrica média (η) de 16,37%). Pode também se observar que a eficiência elétrica para as diferentes cargas de operação da planta

varia desde 15,73 até 17,31%, tendo uma variação percentual de 9,1% com respeito à máxima eficiência calculada.

Também na Tabela 32, pode-se observar que a temperatura do ar de entrada muda desde 27,1 até 29,6 °C, sendo que a pressão atmosférica permanece quase constante; estas condições de operação (em pressão e temperatura) são diferentes às condições de referência ISO (15 °C, 101,3 kPa).

Para um consumo de água quente do sistema de aproximadamente 0,65 m³/h, como pode ser observado na Tabela 32, a eficiência térmica calculada na planta aumenta conforme a potência elétrica gerada pelo sistema diminui (máximo de 17,41 %, correspondendo uma eficiência total de 34,02 %). Neste ponto é necessário ressaltar que a eficiência térmica calculada durante o desenvolvimento do teste, em geral, é muito baixa. Como exemplo, a eficiência térmica de uma planta de cogeração com uma microturbina Capstone de 30 kW, segundo referenciado em [49], muda desde um mínimo de 40,6 até 50,5 % conforme o fornecimento de potência diminui.

A eficiência térmica é muito baixa já que, como pode ser observado na Tabela 33, o sistema não está aproveitando convenientemente a energia térmica contida nos gases de exaustão da microturbina. Devido a isto, os gases de exaustão estão saindo quentes demais, motivo pelo qual a variação na temperatura da água que entra e sai da caldeira é mínima, como pode ser observado na Tabela 33, e é de aproximadamente 1,45 °C para a máxima potência.

Logo após pesquisar na planta de cogeração o motivo para eficiência térmica estar muito baixa, descobriu-se que o damper que abre e fecha a passagem dos gases de exaustão da microturbina para a caldeira estava trabalhando em forma invertida, quer dizer, quando o damper deveria deixar passar os gases para a caldeira com o fim aquecer a água, este permanecia fechado, motivo pelo qual os gases de exaustão saíam diretamente para a atmosfera sem aquecer a água. Esta falha era originada por uma má conexão nos fios do atuador da caldeira que é o responsável pelo controle do damper. Nessa situação (operação defeituosa), o máximo calor aproveitado pela água é de 17,6 kW aproximadamente. Novos testes serão desenvolvidos, e apresentados no capítulo 8, para a verificação e análise da eficiência térmica da planta e dos demais parâmetros.

Como mencionado anteriormente, permite-se à tensão uma tolerância de $\pm 10\%$ da tensão nominal para não causar danos significantes na operação da maioria de equipamentos, com isto a faixa de variação da tensão é de:

$$228,6 \text{ V} \leq \text{TENSÃO FASE A, B e C} \leq 279,4 \text{ V}$$

Também com referência à frequência elétrica, a sua máxima variação indicada é de $\pm 1\%$ do valor nominal, com isto a faixa de variação da frequência, para o caso brasileiro, é de:

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

Como se pode observar na Tabela 31 os valores da frequência e tensão (para as três fases), durante o desenvolvimento do teste, encontram-se dentro da faixa permitida de variação. Com isto se pode afirmar que o sistema consegue manter uma contínua sincronização com a rede elétrica (em tensão e principalmente em frequência). Isto pode ser observado graficamente nas fig. 54, 55, 56, 57 e 58.

Na Fig. 60 pode observar-se que o tempo de partida da microturbina é de 5 minutos aproximadamente (o teste foi iniciado às 14h20min e às 14h25min aproximadamente a microturbina alcançou a sua máxima potência).

Conforme mostrado na Tabela 34, através do desenvolvimento deste teste, vimos que o valor da incerteza na potência elétrica é de $\pm 1,8 \text{ kW}$, sendo esta incerteza elevada (se for comparada com a sugerida na referência [28], $\pm 1,5\%$ do valor de leitura). Sendo que este valor depende basicamente da repetitividade e da incerteza do medidor e como observado na Tabela 31 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 C30 LPNG) cujo valor é de $\pm 1,0 \text{ kW}$. 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 C30 LPNG) são de $\pm 1,1 \text{ A}$ e $\pm 6,9 \text{ V}$, respectivamente.

Também, conforme mostrado na Tabela 34, o valor da incerteza para a frequência é de $\pm 0,05 \text{ Hz}$, que também é elevada, se for comparado com a sugerida na referência [28] ($\pm 0,01\%$ do valor de leitura); isto basicamente devido

ao valor da incerteza do medidor (sensor interno da microturbina Capstone C30 LPNG).

Como mencionado anteriormente, o PCI do GN foi calculado, a partir de uma composição típica, fornecida pela Companhia Distribuidora de Gás Natural do Rio de Janeiro – CEG, e o valor da incerteza calculada foi de aproximadamente $\pm 681,2$ kJ/Nm³, este valor é elevado se for comparado com o sugerido na referência [28] ($\pm 0,2$ % do valor de leitura); foi justamente este 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 (QH₂O), cujas incertezas são $\pm 4,0$ % e $\pm 6,05$ kW, respectivamente. Esta incerteza foi estimada conforme referenciado em [28]; como uma solução para a diminuição dessa incerteza, dever-se-ia efetuar uma medida direta, através de um calorímetro.

5.3

Critérios de avaliação e desempenho parcial da planta de cogeração, após o reparo do mecanismo de acionamento do damper da caldeira de recuperação

O objetivo deste capítulo é apresentar os dados de desempenho na produção e qualidade da energia elétrica gerada pela microturbina Capstone C30 LPNG, juntamente com a avaliação do aproveitamento de sua energia térmica quando associada, logo após do reparo no mecanismo de acionamento do damper da caldeira de recuperação.

Também será apresentado, o cálculo das incertezas das variáveis analisadas. Para isto serão utilizados os dados dos testes realizados no dia 09/06/2006, na planta de cogeração localizada no ginásio esportivo da PUC-Rio.

5.3.1

Resultados e análise

Nesta parte são apresentados os resultados e conclusões dos testes realizados na planta de cogeração da PUC-Rio no dia 09/06/2006. A metodologia, assim como os procedimentos experimentais, foram já desenvolvidos na referência [18].

5.3.1.1

Resultados

Na Tabela 35 apresentam-se as características do teste desenvolvido na planta de cogeração.

Tabela 35 - Testes controlados da planta de cogeração do ginásio esportivo da PUC-Rio, no dia 09/06/06.

DATA	TEMPO	CARACTERÍSTICAS DO TESTE	PARÂMETROS VERIFICADOS
09/06/06	18:35 – 18:55	100% da Potência (Carga Total), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados cada 5 minutos.	Potência Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.
09/06/06	19:10 – 19:30	75% da Potência (Carga Parcial), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados cada 5 minutos.	Potência Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.
09/06/06	19:45 – 20:05	50% da Potência (Carga Parcial), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados cada 5 minutos.	Potência Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.
DATA	TEMPO	CARACTERÍSTICAS DO TESTE	PARÂMETROS VERIFICADOS
09/06/06	20:20 – 20:40	25% da Potência (Carga Parcial), duração do teste de 20 minutos e aquisição de dados cada 5 minutos.	Potência Elétrica, Recuperação de Calor, Eficiência Elétrica, Térmica e Total, Frequência e Tensão Elétricas de Saída do Sistema.

Simultaneamente, realizou-se também o monitoramento das seguintes variáveis: vazão, pressão e temperatura do Gás Natural (GN), pressão e temperatura ambiente, vazão e temperaturas de entrada e saída da água na caldeira, temperatura dos gases de exaustão que entram e saem da caldeira, composição e Poder Calorífico Inferior (PCI) do GN.

Como já referenciado em 5.2:

- (i) para o sistema os dados da temperatura ambiente são medidos na entrada do compressor
- (ii) tanto a composição como o PCI do GN, foi obtida da concessionária CEG e cujas características são apresentadas na Tabela 36.

Tabela 36 - Características médias do Gás Natural fornecido pela CEG em 09/06/2006.

COMPOSIÇÃO	(%)
CO ₂	0,2892
C ₂ H ₆	4,4974
N ₂	0,7773
CH ₄	93,5846
C ₃ H ₈	0,7733
IC ₄	0,0223
NC ₄	0,0399
IC ₅	0,0057
NC ₅	0,0061
>C ₆	0,0044
PCS (kJ/Nm ³)	38475,22
PCI (kJ/Nm ³)	34714,65
ρ (kg/Nm ³)	0,7124

Também como referenciado em 5.2, o desenvolvimento de cada teste deve ser feito com a uma máxima variabilidade potência, vazão de GN, pressão e temperatura ambientes ao sistema, tal que não excedam os limites estabelecidos na Tabela 37.

Tabela 37 - Variação permitida das condições de operação.

PARÂMETRO	VARIAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA ^a
Potência	± 2 %
Vazão de Combustível	± 2 %
Pressão Atmosférica	± 0.5 %
Temperatura Atmosférica	± 2.2°C

$$^a \text{Máximo} = \frac{\text{Valor médio no teste} - \text{Valor em cada medição}}{\text{Valor médio no teste}} * 100$$

Na Tabela 38 mostra-se a variabilidade dos parâmetros operacionais durante o desenvolvimento do teste na planta de cogeração da PUC-Rio.

Tabela 38 - Variabilidade observada nos parâmetros operacionais no teste realizado o dia 09/06/2006.

CONDIÇÃO DO TESTE	Nº TESTE	P _O ± 2 %	V _{GN} ± 2 %	P _{AMB} ± 0,5 %	T _{AMB} * ± 2,2 °C
100%	1	0,13	0,87	0,03	0,15
	2	0,06	0,02	0,08	0,05
	3	0,00	0,09	0,03	0,05
	4	0,06	0,98	0,03	0,25
75%	5	0,15	0,19	0,08	0,98
	6	0,13	0,19	0,03	0,42
	7	0,29	0,05	0,03	0,32
	8	0,02	0,34	0,03	0,22
50%	9	0,54	0,41	0,05	0,90
	10	1,29	0,58	0,05	0,60
	11	1,33	0,35	0,05	1,60
	12	0,50	0,64	0,05	0,10
25%	13	1,79	1,10	0,08	0,20
	14	1,75	1,68	0,03	1,00
	15	0,73	1,26	0,03	0,90
	16	0,69	1,53	0,03	0,30

* A microturbina Capstone C30 LPNG considera como Temperatura Ambiente (T_{AMB}) a temperatura do ar medida na entrada do compressor.

A Frequência e Tensão Elétricas foram monitoradas continuamente durante o desenvolvimento dos testes; na Tabela 39, mostram-se os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão da Frequência e Tensão Elétrica durante o período do teste.

Nas Tabelas 40 e 41 apresentam-se os valores do desempenho na produção de Potência e Calor da planta de cogeração e as características do GN, do fluido recuperador de calor (água) e dos gases de exaustão obtidos durante o desenvolvimento do teste na PUC-Rio.

Tabela 39 - Valores médios, máximos, mínimos e desvio padrão da Frequência e Tensão Elétrica durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

CONDIÇÃO DO TESTE	VALOR	FREQUÊNCIA	TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO
		(Hz)	FASE A (V)	FASE B (V)	FASE C (V)
100%	Média	60	262	261	263
	Máximo	60	263	262	264
	Mínimo	60	262	260	262
	Desvio Padrão	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
	Desvio Padrão	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
	Desvio Padrão	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
	Desvio Padrão	0,0	1,4	1,5	1,3

Tabela 40 - Desempenho na produção de Potência e Calor durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

Nº TESTE	CONDIÇÃO DO TESTE	HI (kW)	DESEMPENHO ELÉTRICO		DESEMPENHO TÉRMICO		η TOTAL (%)	CONDIÇÕES AMBIENTE	
			P _O (kW)	η (%)	Q _{H2O} (kW)	η_T (%)		T _{ARENT} (°C)	P _{AMB} (kPa)
1	100%	152,0	25,1	16,5	42,9	28,2	44,7	29,5	99,7
2		152,9	25,0	16,4	44,0	28,8	45,1	29,4	99,6
3		152,8	25,0	16,4	44,3	29,0	45,3	29,4	99,7
4		153,9	25,0	16,3	44,3	28,8	45,0	29,1	99,7
MÉDIA		152,9	25,0	16,4	43,9	28,7	45,1	29,4	99,7
5	75%	128,1	21,0	16,4	38,4	30,0	46,4	28,0	99,6
6		127,8	21,0	16,4	38,6	30,2	46,6	29,4	99,7
7		127,6	20,9	16,4	38,8	30,4	46,8	29,3	99,7
8		128,1	21,0	16,4	39,1	30,5	46,9	29,2	99,7
MÉDIA		127,9	21,0	16,4	38,7	30,3	46,7	29,0	99,7
9	50%	87,3	13,9	15,9	28,9	33,1	49,0	29,5	99,7
10		87,3	14,0	16,0	29,3	33,6	49,6	29,2	99,8
11		86,4	13,6	15,7	29,3	33,9	49,7	27,0	99,7
12		86,2	13,7	15,9	29,3	34,0	49,9	28,7	99,8
MÉDIA		86,8	13,8	15,9	29,2	33,6	49,5	28,6	99,8
13	25%	47,5	6,9	14,4	21,7	45,7	60,2	28,3	99,6
14		47,1	7,1	15,1	21,6	45,9	61,0	27,5	99,7
15		48,5	7,0	14,5	22,1	45,5	60,1	29,4	99,7
16		48,8	6,9	14,2	22,0	45,2	59,4	28,8	99,7
MÉDIA		48,0	7,0	14,6	21,9	45,6	60,2	28,5	99,7

Tabela 41 - Condições do GN, fluido recuperador de calor (água) e gases de exaustão da planta de cogeração da PUC-Rio

Nº TESTE	CONDIÇÃO DO TESTE	CARACTERÍSTICAS DO GN				CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA				GASES DE EXAUSTÃO	
		V _{GN} (Nm ³ /h)	PCI* (kJ/Nm ³)	P _{GN} (kPa)	T _{GN} (°C)	V _{ÁGUA} (m ³ /h)	T _{ÁGUA IN} (°C)	T _{ÁGUA OUT} (°C)	ΔT _{ÁGUA} (°C)	T _{EX IN} (°C)	T _{EX OUT} (°C)
1	100%	15,8	34714,65	85,9	21,29	10,72	76,99	80,52	3,53	298,63	142,42
2		15,9	34714,65	85,3	21,25	10,72	76,36	79,98	3,62	298,76	141,67
3		15,8	34714,65	85,3	21,21	10,67	76,23	79,89	3,66	298,63	142,54
4		16,0	34714,65	84,6	21,20	10,65	76,26	79,93	3,67	298,37	141,48
MÉDIA		15,9	34714,65	85,3	21,24	10,69	76,46	80,08	3,62	298,60	142,03
5	75%	13,3	34714,65	87,6	21,17	10,65	76,01	79,19	3,18	283,40	130,37
6		13,3	34714,65	87,2	21,14	10,73	76,04	79,21	3,17	283,42	130,12
7		13,2	34714,65	86,5	21,14	10,72	75,84	79,03	3,19	282,92	130,08
8		13,3	34714,65	86,6	21,15	10,74	75,90	79,11	3,21	283,57	130,20
MÉDIA		13,3	34714,65	87,0	21,15	10,71	75,95	79,14	3,19	283,33	130,19
9	50%	9,1	34714,65	88,0	21,10	10,44	74,29	76,73	2,44	260,76	116,24
10		9,1	34714,65	87,7	21,04	10,46	73,72	76,19	2,47	260,88	115,60
11		9,0	34714,65	87,5	21,00	10,46	73,23	75,70	2,47	259,80	114,82
12		8,9	34714,65	87,5	20,98	10,43	72,68	75,15	2,47	260,24	114,45
MÉDIA		9,0	34714,65	87,7	21,03	10,45	73,48	75,94	2,46	260,42	115,28
13	25%	4,9	34714,65	94,4	20,89	10,67	69,44	71,23	1,79	241,12	101,92
14		4,9	34714,65	93,6	20,84	10,67	68,76	70,54	1,78	240,38	100,87
15		5,0	34714,65	93,7	20,83	10,66	67,73	69,55	1,82	240,78	99,91
16		5,1	34714,65	94,2	20,81	10,63	66,92	68,74	1,82	240,64	99,16
MÉDIA		5,0	34714,65	94,0	20,84	10,66	68,21	70,02	1,80	240,73	100,47

* Dados fornecidos pela concessionária CEG para o dia do teste.

Nas Fig. 63, 64, 65, 66, 67 e 68 apresenta-se a variação da RPM, frequência, potência e tensão, respectivamente; durante o desenvolvimento do teste, para cada uma das quatro cargas selecionadas (100%, 75%, 50% e 25%).

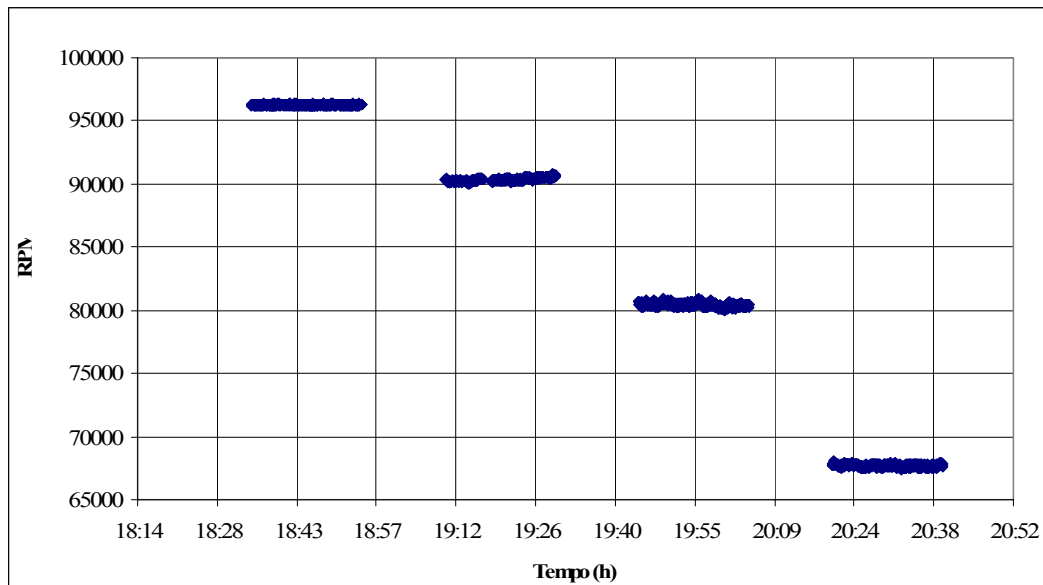


Figura 63 - Variação da RPM durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

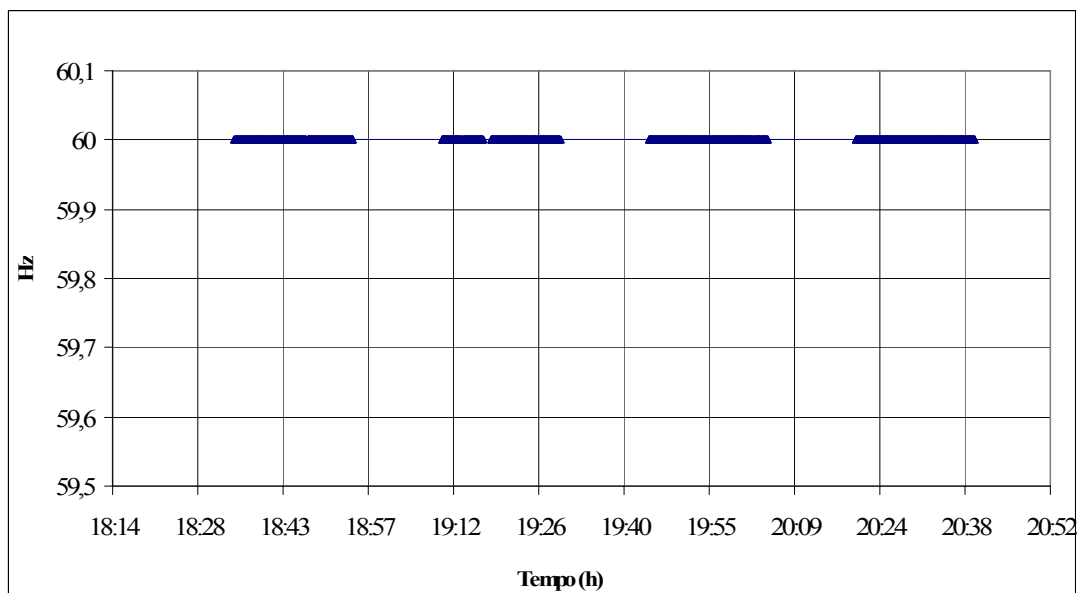


Figura 64 - Variação da Frequência durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

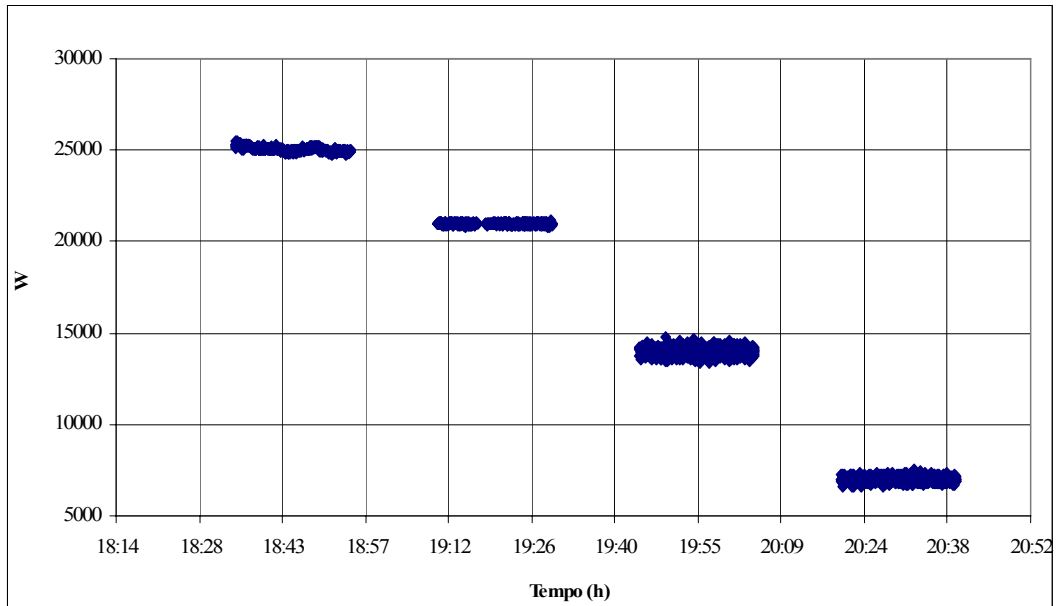


Figura 65 - Variação da Potência durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

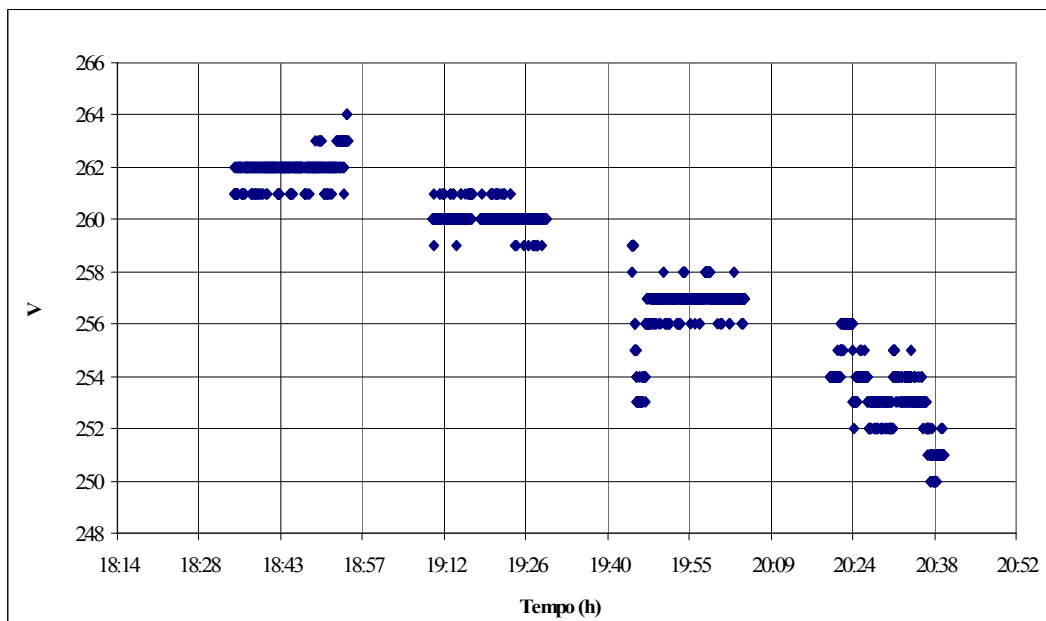


Figura 66 - Variação da Tensão na Fase _ A durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

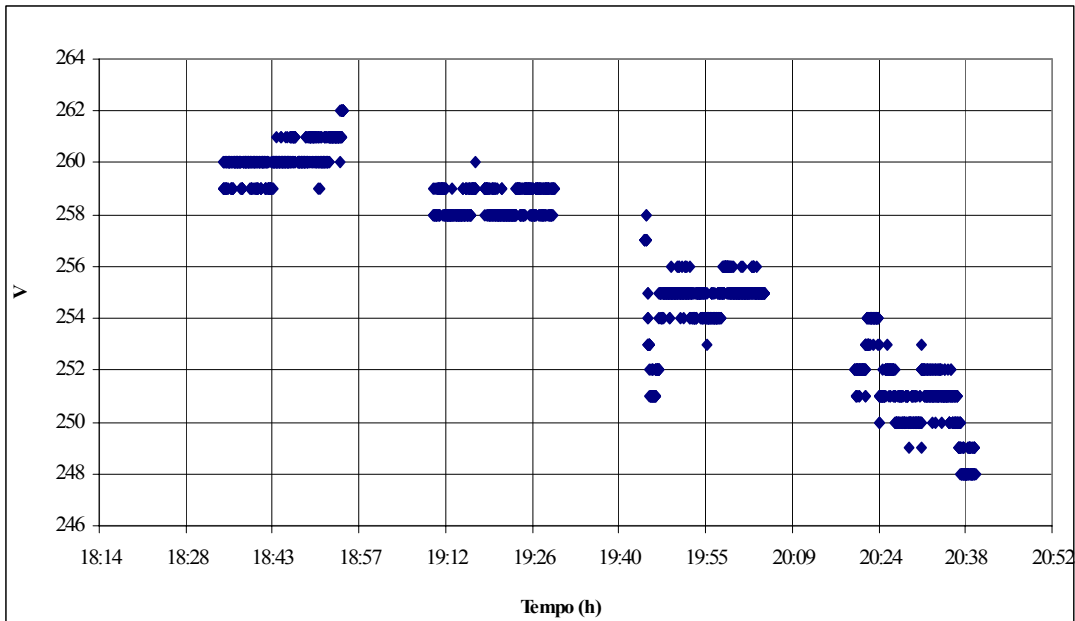


Figura 67 - Variação da Tensão na Fase _ B durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

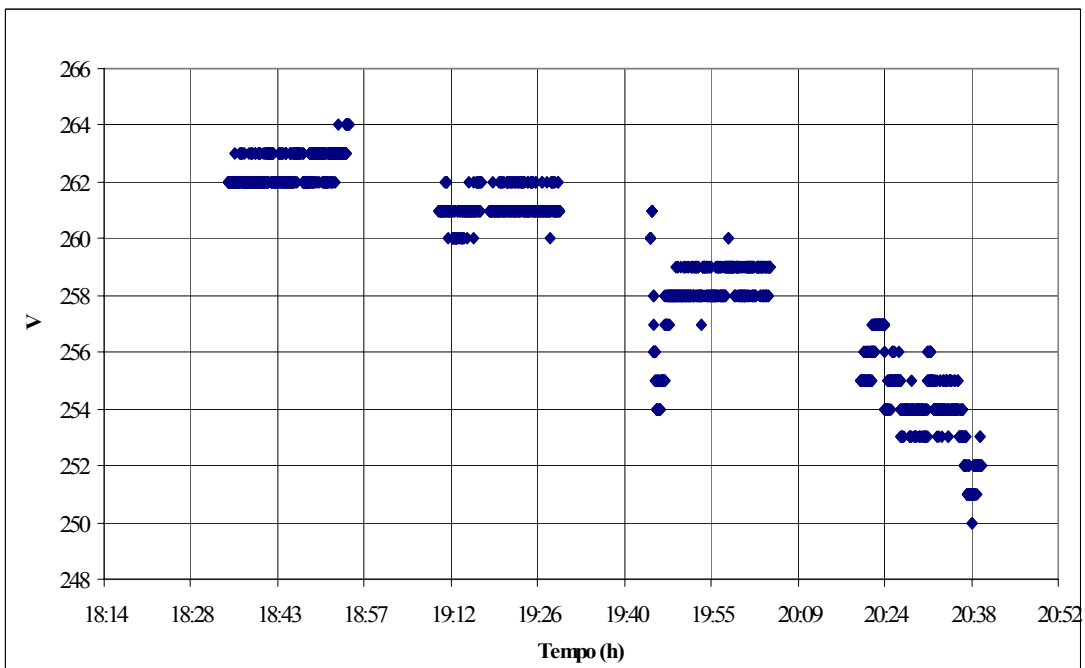


Figura 68 - Variação da Tensão na Fase _ C durante o desenvolvimento do teste no dia 27/05/2006.

Nas Fig. 69, 70, 71 e 72 apresenta-se a variação da RPM, potência, temperatura de exaustão, tensão e corrente, respectivamente; durante o processo de partida da microturbina no dia do teste.

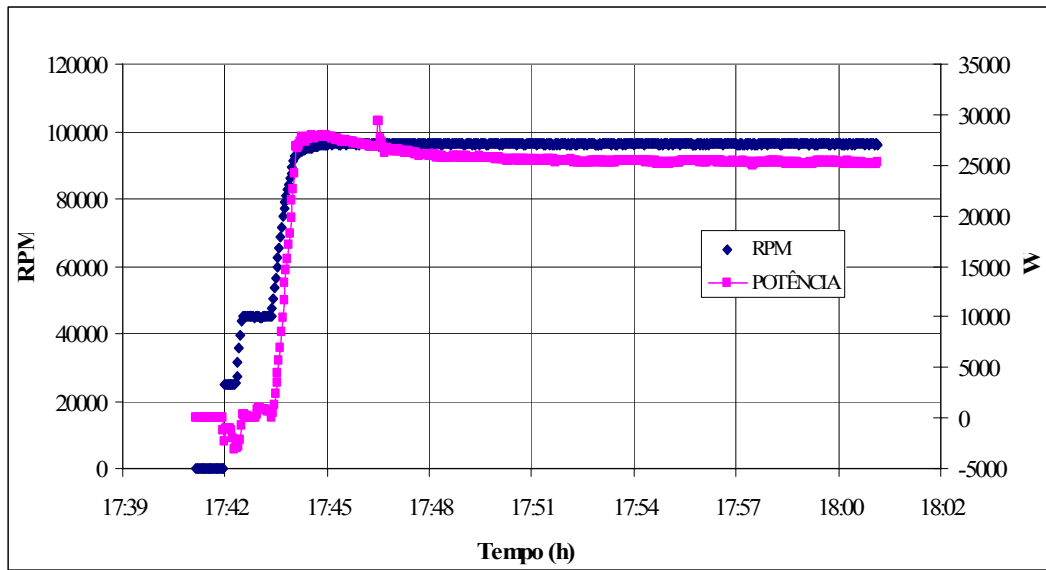


Figura 69 - Variação da RPM e Potência durante a partida da microturbina no dia 27/05/2006.

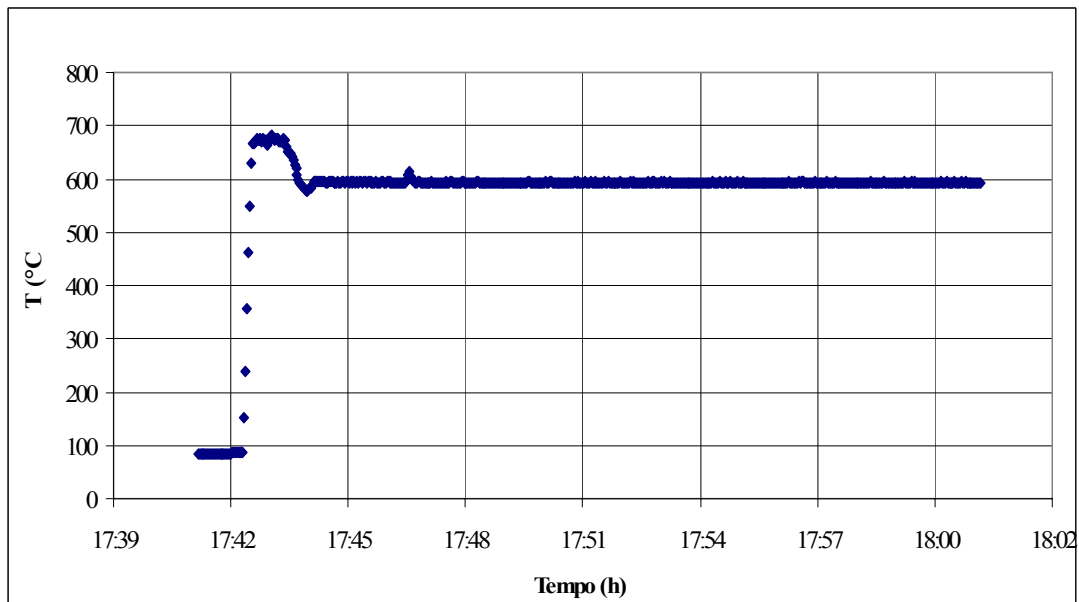


Figura 70 - Variação da Temperatura de Exaustão durante a partida da microturbina no dia 27/05/2006.

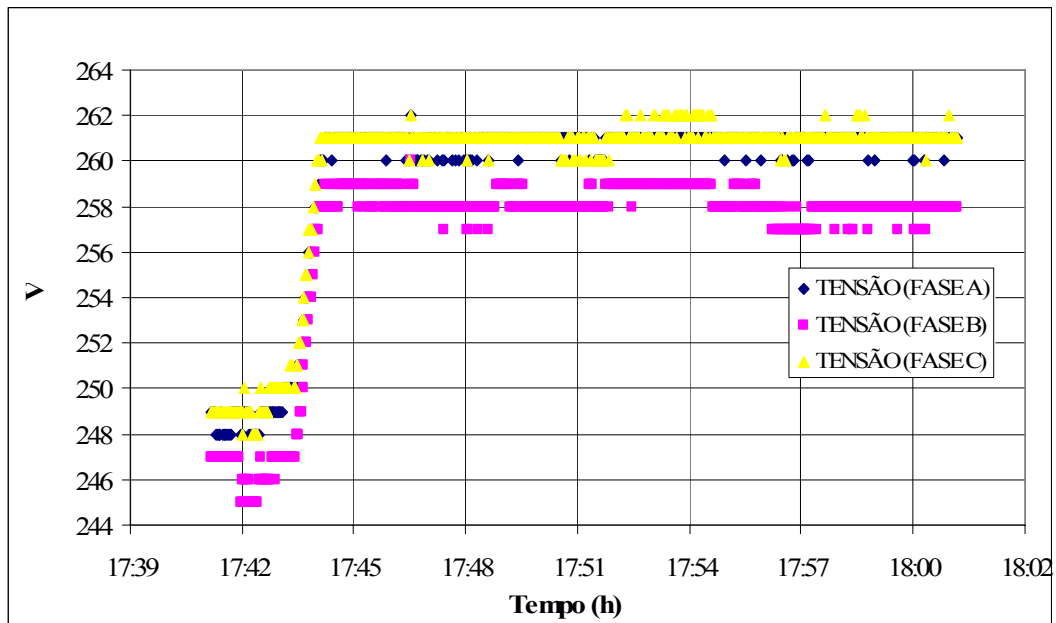


Figura 71 - Variação da Tensão durante a partida da microturbina no dia 27/05/2006.

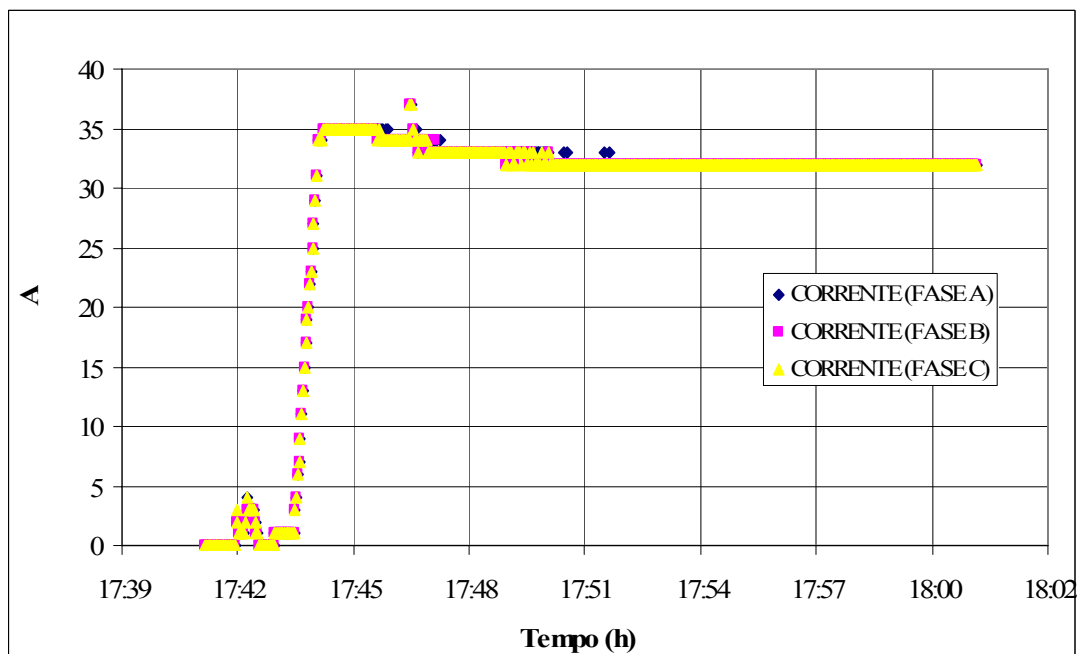


Figura 72 - Variação da Corrente durante a partida da microturbina no dia 27/05/2006.

Na Tabela 42, apresentam-se os valores das incertezas, para a condição de máxima potência (100 %), nas medições realizadas no dia do teste na planta de cogeração da PUC-Rio, assim como as incertezas dos instrumentos utilizados na medição dos parâmetros.

Tabela 42 - Resumo das incertezas dos instrumentos de medição e dos parâmetros medidos, para a máxima potência, no dia do teste (27/05/2006), na planta de cogeração da PUC-Rio.

VARIÁVEL MEDIDA	UNIDADE	INCERTEZA INSTRUMENTO	INCERTEZA DA VARIÁVEL
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	--	± 11,82
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	--	± 680,4
η _T	%	--	± 5,0
V _{H2O}	m ³ /h	± 0,18	± 0,32
Q _{H2O}	kW	--	± 6,8

A continuação apresenta-se, na Tabela 9, os valores da relação ar - combustível vazão de ar, vazão de combustível e vazão dos gases de exaustão; alguns aqisitados com o software CRMS da Capstone e outros medidos no teste realizado na planta de cogeração da PUC-Rio.

Cabe destacar que com os dados aqisitados e medidos, foram calculados a energia térmica disponível nos gases de exaustão no dia do teste, para o qual se utilizou a seguinte equação:

$$Q_{\text{GASES}} = \dot{m}_{\text{GASES}} \cdot C_{p_{\text{GASES}}} \cdot (T_{\text{EXIN}} - T_{\text{EXOUT}}) \quad (66)$$

Onde:

Q_{GASES} : Energia térmica disponível nos gases de exaustão que entram e saem da caldeira de recuperação (kW).

\dot{m}_{GASES} : Vazão mássica dos gases de exaustão (kg/s).

$C_{p_{GASES}}$: Calor específico a pressão constante dos gases de exaustão (kJ/kg-K).

Neste estudo será utilizado um $C_{p_{GASES}}$ de 1,10 kJ/kg-K, conforme referenciado em [2].

$T_{EX IN}$: Temperatura dos gases de exaustão que entram na caldeira de recuperação (K).

$T_{EX OUT}$: Temperatura dos gases de exaustão que saem da caldeira de recuperação (K).

Considera-se que a vazão mássica dos gases de exaustão é a soma da vazão mássica do ar de entrada (m_{AR}) e a vazão mássica do GN (m_{GN}).

Tabela 43 - Valores da relação ar - combustível, vazão de ar, vazão de combustível e vazão dos gases de exaustão no dia do teste.

Nº TESTE	CONDIÇÃO DO TESTE	R _{A/C} *	m _{AR} * (kg/s)	m _{GN} * (kg/s)	m _{GN} ** (kg/s)	m _{GASES} * (kg/s)	m _{GASES} *** (kg/s)	Q _{GASES} * (kW)	Q _{GASES} *** (kW)
1	100%	102	0,2805	0,0028	0,0031	0,2833	0,2837	48,7	48,7
2		100	0,2804	0,0028	0,0031	0,2832	0,2836	48,9	49,0
3		105	0,2808	0,0027	0,0031	0,2835	0,2839	48,7	48,8
4		100	0,2804	0,0028	0,0032	0,2832	0,2836	48,9	48,9
MÉDIA		102	0,2805	0,0028	0,0031	0,2833	0,2837	48,8	48,9
5	75%	110	0,2531	0,0023	0,0026	0,2554	0,2557	43,0	43,0
6		102	0,2521	0,0025	0,0026	0,2545	0,2547	42,9	43,0
7		99	0,2532	0,0026	0,0026	0,2558	0,2558	43,0	43,0
8		98	0,2543	0,0026	0,0026	0,2569	0,2570	43,3	43,4
MÉDIA		102	0,2532	0,0025	0,0026	0,2557	0,2558	43,1	43,1
9	50%	196	0,2094	0,0011	0,0018	0,2104	0,2112	33,5	33,6
10		189	0,2098	0,0011	0,0018	0,2109	0,2115	33,7	33,8
11		203	0,2108	0,0010	0,0018	0,2118	0,2125	33,8	33,9
12		198	0,2095	0,0011	0,0018	0,2106	0,2113	33,8	33,9
MÉDIA		197	0,2098	0,0011	0,0018	0,2109	0,2116	33,7	33,8
13	25%	153	0,1577	0,0010	0,0010	0,1588	0,1587	24,3	24,3
14		163	0,1578	0,0010	0,0010	0,1588	0,1588	24,4	24,4
15		163	0,1571	0,0010	0,0010	0,1581	0,1581	24,5	24,5
16		157	0,1582	0,0010	0,0010	0,1592	0,1592	24,8	24,8
MÉDIA		159	0,1577	0,0010	0,0010	0,1587	0,1587	24,5	24,5

* Valores calculados pelo software da microturbina CRMS.

** Valores medidos pelo medidor de turbina instalado na planta de cogeração.

*** Valores calculados com a soma do valor calculado pelo software e o medido com a turbina instalada na planta.

5.3.1.2

Análise

Conforme observado na Tabela 38, a diferença do anteriormente mostrado, as variações dos parâmetros operacionais durante o desenvolvimento do teste, encontram-se dentro da faixa permissível de variação, quando o sistema opera com 100, 75, 50 e 25% da carga máxima de operação. Nesta ocasião teve-se o maior cuidado quando o sistema operou com 25% da carga máxima, para não ter uma variação fora do limite na Vazão do GN, mesmo assim, como pode ser observado, também na mesma Tabela 38, existe uma máxima variação percentual da Vazão de GN com respeito às demais variáveis analisadas.

Na Tabela 40, pode-se observar que a temperatura do ar na entrada do compressor muda desde 27,0 até 29,5 °C, sendo que a pressão atmosférica permanece quase constante; estas condições de operação (em pressão e temperatura) são diferentes às condições de referência ISO (15 °C, 101,3 kPa).

Também na Tabela 40, pode-se observar, que o valor da potência elétrica da planta de cogeração, para uma carga total (100%) é de 25,0 kW aproximadamente (correspondendo uma eficiência elétrica média (η) de 16,4%). Pode também se observar que a eficiência elétrica para as diferentes cargas de operação da planta varia desde 14,2 até 16,5 %, tendo uma variação percentual de 13,3 % com respeito à máxima eficiência calculada.

Logo após do reparo no mecanismo de acionamento do damper da caldeira de recuperação, pode-se observar na Tabela 40; que para um mesmo consumo de água quente de 0,65 m³/h, a eficiência térmica da planta de cogeração aumentou com respeito aos valores indicados na mesma referência; nesta ocasião, a eficiência térmica calculada na planta aumenta desde um mínimo de 28,7% (correspondendo uma eficiência total de 45,1%) até uma eficiência térmica máxima de 45,6% (correspondendo uma eficiência total de 60,2%); valores maiores se forem comparados com os apresentados na referência [18] (eficiência total máxima de 34,02%).

Uma consequência deste resultado pode, também, ser observado na Tabela 41, onde nota-se que existe um melhor aproveitamento da energia térmica contida nos gases de exaustão que entram e saem da caldeira de recuperação (um $\Delta T_{\text{EXAUSTÃO}}$ de aproximadamente 145 °C), motivo pelo qual a variação na

temperatura da água que entra e sai da caldeira é de 3,62 °C, para a máxima potência; valores bem maiores se forem comparados com os apresentados em 5.2.

Como referenciado em 5.2, permite-se à tensão uma tolerância de $\pm 10\%$ da tensão nominal, com isto a faixa de variação da tensão é de:

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

Também com referência à frequência elétrica, a sua máxima variação indicada é de $\pm 1\%$ do valor nominal, com isto a faixa de variação da frequência, para o caso brasileiro, é de:

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

Conforme a Tabela 39, os valores da frequência e tensão, encontram-se dentro da faixa permitida de variação, com isto se pode afirmar que o sistema consegue manter uma contínua sincronização com a rede elétrica (em tensão e principalmente em frequência). Isto pode ser observado graficamente nas fig. 64, 66, 67 e 68. O tempo de partida da microturbina é de aproximadamente 5 minutos, como pode ser observado na Fig. 69.

Conforme mostrado na Tabela 42, através do desenvolvimento deste teste, o valor da incerteza na potência elétrica é de $\pm 1,7 \text{ kW}$, sendo esta incerteza elevada se for comparada com a sugerida na referência [18]. Sendo que este valor depende basicamente da repetitividade e da incerteza do medidor e como observado na Tabela 39 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 $\pm 1,0 \text{ kW}$. 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 $\pm 1,1 \text{ A}$ e $\pm 6,9 \text{ V}$, respectivamente.

Também, conforme mostrado na Tabela 42, o valor da incerteza para a frequência é de $\pm 0,05 \text{ Hz}$, que também é elevada, se for comparado com a sugerida em 5.2; isto basicamente devido ao valor da incerteza do medidor (sensor interno da microturbina Capstone).

Como mencionado anteriormente, o PCI do GN foi calculado, a partir de uma composição típica, fornecida pela CEG, e o valor da incerteza calculada foi de aproximadamente $\pm 680,4 \text{ kJ/Nm}^3$, este valor é elevado se for comparado com o sugerido em 5.2, foi justamente este 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. Esta incerteza foi estimada; como uma solução para a diminuição dessa incerteza, dever-se-ia efetuar uma medida direta, através de um calorímetro.

Na Tabela 43, pode-se observar dois valores para a vazão mássica do GN; o primeiro foi calculado com a relação ($m_{GN}^* = m_{AR}^* / R_{A/C}^*$), na qual os termos da direita foram calculados pelo software de microturbina e o segundo medido com o medidor tipo turbina instalado na planta de cogeração.

Também na mesma Tabela 43, pode-se observar dois valores para a vazão mássica dos gases de exaustão de microturbina; o primeiro calculado com os dados fornecidos pelo software ($m_{GASES}^* = m_{GN}^* + m_{AR}^*$), com o qual se calculou o calor disponível nos gases de exaustão que entram e saem de caldeira de recuperação (Q_{GASES}^*) e o segundo calculado com a vazão mássica do GN medido pelo medidor instalado na planta de cogeração e a vazão mássica de ar fornecido pelo software de microturbina ($m_{GASES}^{***} = m_{GN}^{**} + m_{AR}^*$), com o qual se calculou o calor disponível nos gases de exaustão que entram e saem de caldeira de recuperação (Q_{GASES}^{***}).

Existe uma pequena diferença entre os resultados dos calores calculados, isto devido provavelmente à diferença entre a vazão mássica do GN medido e o calculado com o software de microturbina.

Na Tabela 44, existe uma diferença entre os valores do calor ganho pela água (Q_{H_2O}) e o calor disponível nos gases de exaustão que entram e saem da caldeira de recuperação (Q_{GASES}^{***}), a maior variação percentual existente é de 13,6%, quando o sistema opera com 50% da carga máxima. Isto mostra que existe uma perda de energia térmica (calor) no trocador (caldeira de recuperação), para o meio ambiente, devido principalmente ao material isolante dela.

Tabela 44 - Valores calor da água e calor dos gases de exaustão no dia 27/05/2006.

CONDIÇÃO DO TESTE	Q_{H2O} (kW)	Q_{GASES}*** (kW)	R (%)
100%	43,9	48,9	10,2
75%	38,7	43,1	10,2
50%	29,2	33,8	13,6
25%	21,9	24,5	10,6

5.4

Desempenho da planta de cogeração em função das variações de carga e das condições ambientais

O objetivo deste capítulo é a avaliação do desempenho da planta de cogeração da PUC–Rio, ao longo do tempo em função das variações de carga e das condições ambientais. Para tal fim, será monitorada, principalmente, a potência elétrica produzida, o consumo de combustível, a energia térmica e condições ambientais durante um período de tempo. Cabe destacar que os dados para avaliação do desempenho foram adquiridos durante o desenvolvimento dos testes realizados nos dias 09, 12, 20, 21, 23 e 29 de Junho de 2006, nas quais se utilizaram diferentes potências do sistema. Todas as figuras e tabelas mencionadas neste capítulo estão relacionadas nos Apêndices A, B, C, D, E e F.

5.4.1

Testes realizados

Além de submeter à microturbina a testes de curta duração com cargas controladas, é importante medir o seu desempenho quando ela, assim como o sistema todo, estiver operando em um regime contínuo. Embora nos testes com cargas controladas seja necessária uma máxima variabilidade de alguns parâmetros operacionais, nos testes realizados, tal restrição não existiu.

Então, baseado nos testes realizados na planta de cogeração da PUC-Rio, nos dias 09, 12, 20, 21, 23 e 29 de Junho de 2006, são apresentado os resultados e

conclusões dos mesmos. Cabe ressaltar, que durante o desenvolvimento dos testes realizados não existiu consumo de água quente e que os últimos cinco testes (12, 20, 21, 23 e 29) e os mesmos foram realizados dentro do horário de ponta (17h30min - 20h30min horas).

5.4.1.1

Resultados

Na Tabela 45, baseados nos dados fornecidos pela CEG, apresentam-se as características do Gás Natural para o mês de Junho.

Tabela 45 - Características médias do Gás Natural fornecido pela CEG, para o mês de Junho de 2006.

COMPOSIÇÃO	(%)
CO ₂	0,3060
C ₂ H ₆	4,3911
N ₂	0,7355
CH ₄	93,7697
C ₃ H ₈	0,7295
IC ₄	0,0191
NC ₄	0,0344
IC ₅	0,0049
NC ₅	0,0053
>C ₆	0,0044
PCS (kJ/Nm ³)	38421
PCI (kJ/Nm ³)	34664
ρ (kg/Nm ³)	0,7111

Na Tabela 46, apresentam-se as características de cada teste.

Tabela 46 - Características dos testes realizados na planta de cogeração da PUC-Rio.

DATA	TEMPO	CARACTERÍSTICAS DO TESTE	TEMP. DO CONTROLADOR
09/06/06	12h25min – 13h45min	100% da carga, $T_{\text{INICIAL H}_2\text{O}} = 26,13 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{FINAL H}_2\text{O}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ e aquisição de dados cada 5 minutos.	80 °C
12/06/06	18h10min – 20h05min	75% da carga, $T_{\text{INICIAL H}_2\text{O}} = 40,06 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{FINAL H}_2\text{O}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ e aquisição de dados cada 5 minutos.	85 °C
20/06/06	18h00min – 20h30min	50% da carga, $T_{\text{INICIAL H}_2\text{O}} = 26,63 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{FINAL H}_2\text{O}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ e aquisição de dados cada 5 minutos.	85 °C
21/06/06	18h00min – 20h30min	25% da carga, $T_{\text{INICIAL H}_2\text{O}} = 27,71 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{FINAL H}_2\text{O}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ e aquisição de dados cada 5 minutos.	85 °C
DATA	TEMPO	CARACTERÍSTICAS DO TESTE	TEMP. DO CONTROLADOR
23/06/06	18h00min – 20h10min	75% da carga, $T_{\text{INICIAL H}_2\text{O}} = 23,53 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{FINAL H}_2\text{O}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ e aquisição de dados cada 5 minutos.	85 °C
29/06/06	18h05min – 20h00min	100% da carga, $T_{\text{INICIAL H}_2\text{O}} = 28,65 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{FINAL H}_2\text{O}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ e aquisição de dados cada 5 minutos.	85 °C

Na Tabela 47 são apresentados os valores médios, dos parâmetros mais importantes, dos diversos testes realizados. Os valores de cada parâmetro medido durante o desenvolvimento dos testes, assim como os diversos gráficos, encontram-se no apêndice.

Tabela 47 - Valores médios dos parâmetros principais nos testes realizados na planta de cogeração da PUC-Rio.

CONDIÇÃO		DATA					
PARÂM.	UNIDADE	09/06/06	12/06/06	20/06/06	21/06/06	23/06/06	29/06/06
P _o	%	100	75	50	25	75	100
T _{AR ENT}	°C	29,4	27,5	26,8	28,2	28,7	26,6
P _{AMB}	kPa	99,7	100,3	100,0	100,0	100,1	100,3
P _o	kW	24,8	21,0	14,0	7,0	20,7	25,8
η ELÉTRICA	%	16,7	16,5	16,3	14,4	15,9	16,7
T _{GN}	°C	25,1	21,2	19,8	21,1	20,7	19,5
P _{GN}	kPa	85,3	85,8	86,9	90,0	84,5	85,1
V _{GN}	Nm ³ /h	15,5	13,2	8,9	5,1	13,5	16,0
ΔT EXAUSTÃO	°C	175,9	129,3	145,9	152,5	142,9	140,9
ΔT _{AGUA}	°C	4,0	2,6	2,4	1,9	2,9	3,2
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 TÉRMICA	%	33,1	24,5	34,5	48,5	27,0	25,1
Q _{GÁS} EXAUSTÃO	kW	54,9	36,6	34,0	26,6	40,4	44,7
η TOTAL	%	49,7	41,0	50,8	62,9	42,9	41,8

5.4.1.2

Análise

Baseados nos testes realizados na planta de cogeração da PUC-Rio, realizados nos dias 09, 12, 20, 21, 23 e 29 de Junho, temos:

- No caso do teste realizado no dia 21/06, quando a potência da microturbina foi de 25% da máxima, a temperatura final da água foi de aproximadamente 75 °C, não atingindo a temperatura indicada no controlador de temperatura (85 °C). Cabe destacar que não se atingiu à temperatura indicada no controlador devido a restrição de não ultrapassar o horário de ponta (até às 20h30min horas).

➤ Quando a temperatura da água começa a atingir a temperatura indicada no controlador de temperatura, este fecha o “damper” da caldeira de recuperação, dessa forma os gases saem diretamente para a atmosfera não aquecendo a água que passa através do trocador. No caso dos testes em que a temperatura da água alcançou a indicada no controlador, observa-se graficamente nas Fig. B.1, C.1, E.1 e F.1 “variação da temperatura de saída da água da caldeira” o momento em que o damper da caldeira se fecha, quer dizer, quando ela está alcançando a temperatura indicada. Neste momento, existe um período no qual a temperatura da água permanece estável; motivo pelo qual pode-se observar nas Tabelas B.2, C.2, E.2 e F.2, considerável diminuição na diferença das temperaturas da água que entra e sai da caldeira de recuperação (ΔT ÁGUA), ao final do teste. Cabe destacar que para o teste realizado no dia 09/06 (Fig. A.1) não existe esse período de estabilização devido a que o sistema foi desligado no momento em que começava o fechamento do damper.

➤ Baseado no mencionado anteriormente, pode-se observar nas Fig. B.2, C.2, E.2 e F.2 “variação da temperatura dos gases de exaustão que entram e saem da caldeira de recuperação”, o aumento pronunciado da temperatura dos gases que saem da caldeira de recuperação, no final do teste; isto justamente devido ao fechamento do damper, já que os gases saem diretamente para a atmosfera sem passar pelo trocador; motivo pelo qual pode-se observar nas Tabelas B.2, C.2, E.2 e F.2 que existe uma considerável diminuição na diferença das temperaturas dos gases de exaustão que entram e saem da caldeira de recuperação (ΔT EXAUSTÃO), no final do teste. Como no caso anterior, para o teste realizado no dia 09/06 (Fig. A.2) não existe esse aumento devido a que o sistema foi desligado no momento em que começava o fechamento do damper.

➤ Uma outra consequência do fechamento do damper pode ser notoriamente observada nas Fig. B.8, C.8, E.8 e F.8 “variação do calor da água e o calor dos gases de exaustão”, ao final do teste, do calor ganho pela água como do calor disponível nos gases de exaustão, isto devido ao aumento da temperatura dos gases de exaustão que saem da caldeira quando o fechamento do damper.

- Como consequência do anteriormente mencionado, pode-se observar nas Fig. B.5, C.5, E.5 e F.5 “variação da eficiência elétrica, térmica e total”, uma redução na eficiência térmica ocasionando a diminuição na eficiência total.
- Dos quatro últimos parágrafos, pode-se concluir que a análise da parte térmica da planta de cogeração deve ser feita antes do fechamento do damper da caldeira de recuperação, evitando a aquisição de dados incongruentes.
- Para todos os casos, como pode ser observado nas Fig. A.3, B.3, C.3, D.3, E.3 e F.3 “variação das RPM e potência gerada pelo sistema” o tempo de partida da microturbina foi de 5 - 6 minutos aproximadamente. Sendo, a temperatura de exaustão da microturbina, durante o seu funcionamento, 600 °C, como se podem observar nas Fig. A.7, B.7, C.7, D.7, E.7 e F.7 “variação da temperatura de exaustão da microturbina”.
- Se compararmos os dados dos testes realizados nos dias 09/06 e 29/06 (100% da carga), principalmente de potência gerada (P_o) e eficiência elétrica (η ELÉTRICA), com as Tabelas das referências 45 e 46, pode-se observar que as potências e eficiências obtidas são menores do que as especificadas pelo fabricante, como é mostrado na Tabela 48.

Tabela 48 - Comparação da potência fornecida e eficiência calculada nos testes realizados na planta de cogeração da PUC-Rio e os fornecidos pelo fabricante.

PARÂMETRO	UNIDADE	TESTES	
		09/06/06	29/06/06
T_{AMBIENTE}	°C	22,8	20,0
P_o	kW	24,8	25,8
$\eta_{\text{ELÉTRICA}}$	%	16,7	16,7
FABRICANTE			
T_{AMBIENTE}	°C	22,8	20,0
P_o	kW	26,2	27,1
$\eta_{\text{ELÉTRICA}}$	%	24,1	24,4

5.5

Resumo das avaliações de desempenho e falhas na planta de cogeração

O presente capítulo tem como objetivo apresentar em forma resumida as partes principais dos capítulos 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, assim como as conclusões finais das avaliações de desempenho da planta. Também neste capítulo será apresentada uma lista, em forma resumida, das falhas acontecidas na planta de cogeração; desde o seu comissionamento, realizado pela representante da Capstone na América Latina. Da mesma forma, serão apresentadas as soluções que foram dadas para cada problema.

5.5.1

Resumo das avaliações de desempenho

Através das medições e posterior análise dos parâmetros Qualidade da Potência, Desempenho na Produção de Calor e Potência e Desempenho Operacional, mencionados em 5.2, pretende-se verificar a flexibilidade e adaptabilidade, da microturbina, na conexão com a rede elétrica, além da sua garantia para fornecer potência estável e confiável.

Como mencionado anteriormente, a planta de cogeração da PUC-Rio opera em paralelo com a rede elétrica da concessionária local, requiere-se, conforme dito em capítulos anteriores, que a geração de eletricidade seja em forma sincronizada à mesma frequência e tensão da rede, isto para garantir uma adequada qualidade da potência gerada pela microturbina.

Para o caso da frequência elétrica, foram determinados os valores da frequência máxima, mínima e média, juntamente com o desvio padrão dos valores medidos; além disso, a tolerância da variação da frequência deve ser de $\pm 1\%$ do valor nominal. Estes valores foram verificados e apresentados, os quais nos garantem que a frequência encontra-se dentro dos limites estabelecidos, assim, por exemplo, como mostrado na Fig. 45.

No que se refere a tensão elétrica, como no caso anterior, determinaram-se os valores da tensão máxima, mínima e média, juntamente com o desvio padrão dos valores medidos, assim, permite-se, à tensão uma tolerância de $\pm 10\%$ da

tensão nominal. Mesmo, que no caso anterior, estes valores foram verificados e apresentados, os quais nos garantem que a tensão encontra-se dentro dos limites estabelecidos.

Podemos afirmar que, em geral, a microturbina consegue uma contínua sincronização com a rede elétrica local, em frequência e tensão, o que assegura uma qualidade adequada da energia gerada pela mesma.

Como toda máquina térmica, as microturbinas a gás, foram projetadas para operação em capacidades máximas; sendo que, muitas vezes, seja requerida a operação em capacidades menores, motivo pelo qual o desempenho destas varia quando operada em carga parcial. Nesse sentido, através da realização de testes controlados, avaliou-se, a potência elétrica, a recuperação de calor, assim como a eficiência elétrica, térmica e total da planta, para cargas total e parcial; para dessa forma determinar o desempenho na produção de calor e potência.

Assim como na frequência e tensão elétrica, a potência também foi monitorada. Uma característica importante a destacar, quando a microturbina opera em cargas parciais, é a geração da potência conforme valor indicado no seu painel de controle; entanto que quando o sistema operava em carga máxima a potência gerada era menor à indicada no seu painel, assim como mostrado na Tabela 49.

Tabela 49 - Potência indicada no painel da microturbina a gás e potência média gerada.

CONDIÇÃO DA CARGA (%)	Po PAINEL (kW)	Po GERADA (kW)
100	28,0	25,0 *
75	21,0	21,0
50	14,0	13,8
25	7,0	7,0

* Para a temperatura ambiente no dia do teste (22,8 °C), a potência gerada pela microturbina deve ser de 26,2 kW, conforme referenciado nos capítulos 4 e 6.

Pode-se observar, na Tabela 49, que o valor da potência média gerada pela microturbina ($P_{o \text{ GERADA}} = 25,0 \text{ kW}$) é diferente do valor indicado no seu painel de controle ($P_{o \text{ PAINEL}} = 28,0 \text{ kW}$); além disso, conforme referenciado pelo

fabricante em [8], o valor da potência gerada pela mesma ($P_{o \text{ FABRICANTE}}$), operando a 100% da carga, deveria ser de aproximadamente 26,2 kW.

A diferença $P_{o \text{ GERADA}}$ e $P_{o \text{ FABRICANTE}}$ deve-se basicamente aos fatores de correção utilizados para calcular a potência efetiva nas condições ambientais do local de operação, conforme mostrado nas referências [18, 23], para isso se deve conhecer a perda de carga dos gases de exaustão da microturbina. Cabe destacar que para o cálculo da eficiência elétrica efetiva nas mesmas condições pode ser utilizado este mesmo procedimento. A perda de carga dos gases se deve basicamente à caldeira de recuperação existente, e conforme referenciado em [40], o valor desta perda é de 76 mmH₂O aproximadamente, então o valor da potência e eficiência elétrica nas condições de operação da microturbina é como mostrado na Tabela 50.

Tabela 50 - Potência e eficiência elétrica da microturbina a gás (fabricante e condições da planta).

CONDIÇÃO	P_o^* (kW)	P_o^{**} (kW)	η^* (%)	η^{**} (%)
FABRICANTE	26,2	25,5	24,1	23,9
CONDIÇÕES DA PLANTA	--	25,0	--	16,4

* Dados sem considerar a perda de carga nos gases de exaustão e para a temperatura ambiente no dia do teste, conforme referenciado no capítulo 4

** Dados considerando a perda de carga nos gases de exaustão e para a temperatura ambiente no dia do teste, conforme referenciado no capítulo 4.

Considerando a incerteza na medição da potência, conforme referenciada no capítulo 5, pode-se concluir que a potência gerada pela microturbina nas condições da planta pode variar assim: $23,3 \leq P_o^{**} \leq 26,7$ kW, encontrando-se a potência indicada pelo fabricante dentro de esta faixa, portanto considera-se a potência gerada nas condições da planta como a indicada pelo fabricante.

No caso da eficiência elétrica, pode-se observar na Tabela 50 que ela é muito baixa, se for comparada com a indicada pelo fabricante; embora seja considerada a incerteza da eficiência calculada.

Como mencionado anteriormente, pode-se dizer, em geral, que a microturbina consegue fornecer a potência indicada pelo fabricante, embora a eficiência elétrica seja menor que a especificada por ele mesmo.

5.5.2

Falhas e soluções

Nesta parte serão especificadas as falhas acontecidas na planta de cogeração de PUC-Rio desde o comissionamento da microturbina, além a mencionar as soluções para cada problema.

a) **Travamento na rotação do compressor de Gás Natural** - Logo após do comissionamento da microturbina pelo representante da Capstone na América Latina e realizada a capacitação para a correta operação da mesma; seguindo os procedimentos detalhados na capacitação (verificação do Gás Natural, verificação da energia na microturbina e na caldeira de recuperação), na terça-feira 17 de Janeiro de 2006, pela manhã, tentou-se ligar a planta de cogeração da PUC-Rio. No momento de efetuar a partida da microturbina, observou-se que, uma vez que ela alcançava uma velocidade de rotação de aproximadamente 45300 RPM (a velocidade nominal de rotação da microturbina é de 96000 RPM) o sistema eletrônico da mesma começava a realizar o “COOL DOWN” (etapa em que a microturbina prepara-se para desligar-se). Também se observou que a válvula proporcional SPV não abria, já que ficava a 0,0 % de abertura.

Realizadas as consultas respectivas com a representante da Capstone, determinou-se que a falha era devida ao travamento na rotação do compressor de Gás Natural, e que por esse motivo o combustível não estava chegando à câmara de combustão. O procedimento para resolver esse problema foi simplesmente girar manualmente o eixo do compressor (destravá-lo), com ajuda de uma chave alem.

b) **Falha no DPC (Controlador Digital de Potência)** - Na quinta-feira 23 de março de 2006, uma vez realizados os procedimentos para dar partida à microturbina, ao momento de energizá-la, o painel de controle não acendia.

Logo após de realizadas as consultas com a representante, verificou-se que a falha estava localizada no DPC e que devido a isto a microturbina não conseguia ser

energizada. O procedimento utilizado pelo representante para resolver este problema foi colocar um outro DPC na microturbina.

O representante da Capstone na América Latina manifestou que esses problemas acontecem geralmente em lugares de muita umidade, já que o condensado da água quando se dá a partida à microturbina dificulta a funcionalidade do sistema eletrônico do sistema.

c) **Falha na termo resistência da caldeira de recuperação** - Na quinta-feira 04 de maio de 2006, a aproximadamente 17:30 horas se deu partida à microturbina da planta de cogeração da PUC-Rio, juntamente com a caldeira de recuperação; a temperatura indicada no controlador de temperatura foi de 90 °C. Aproximadamente às 20:15 h, a termo resistência, que mede a temperatura de saída da água da caldeira de recuperação deslocou-se da sua posição, ocasionando com isto que a água quente (juntamente com o vapor) sai-se da caldeira de recuperação pelo orifício onde se localizava a termo resistência.

Logo após o contato com a CONUAR (fabricante e fornecedor da caldeira de recuperação), no foi enviada uma nova termo resistência com o seu suporte, para realizar a troca, com o qual o problema foi resolvido.

d) **Queima das resistências do DPC** - Na sexta-feira 02 de Junho de 2006, tentou-se ligar a microturbina, não se conseguindo dar a partida da mesma; dentro da microturbina escutou-se um “barulho” como se fosse uma explosão.

Logo após contato com o representante, verificou-se que o problema estava nas resistências do DPC, ele se haviam queimado. Para resolver o problema simplesmente trocaram-se as resistências.

Como no caso (b) o representante manifestou que o problema ocorreu, provavelmente, devido à umidade existente no meio.

e) **Falha no controlador de temperatura** - Na quinta-feira 05 de Junho, detectou-se que dos fios da parte eletrônica do controlador de temperatura estavam invertidos, motivo pelo qual quando o damper devia se fechar, este permanecia aberto e quando ele devia abrir, este permanecia fechado, originando com isso o mau funcionamento da caldeira de recuperação. Esta falha, foi a que provavelmente, originou a falha especificada em (c), já que quando a água atingiu

os 90 °C indicados no controlador, o damper começou a abrir aquecendo ainda mais a água até provavelmente passar os 100 °C.

f) **Falha no DPC (Controlador Digital de Potência) e na placa controladora do compressor RFC** - Aproximadamente no mês de Julho, quinta-feira 20, uma vez realizados os procedimentos para dar partida a microturbina, ao momento de energiza-la, o painel de controle não acendia. Cabe mencionar que era a segunda vez que este problema estava ocorrendo.

Realizadas as consultas com o representante do fabricante, determinou-se que a falha estava localizada no DPC (segunda vez) e na placa controladora do compressor. O procedimento utilizado pelo representante para resolver este problema foi trocar as duas placas da microturbina.