

6 Resultados

6.1 Avaliação dos resultados

A verificação dos testes do sistema de cogeração no Ginásio de esportes da PUC-Rio foi realizada no período entre os meses de junho e julho de 2006. Os testes da cogeração com cargas parciais da microturbina, testes controlados, foram conduzidos no dia 09 de junho de 2006. Os testes com cargas individuais para determinar o comportamento do sistema de cogeração durante o horário de ponta (de 17:30 às 20:30 h) foram realizados nos seguintes dias:

Tabela 17 – Cronograma de teste – Cargas individuais

Data	Carga (Potência elétrica)	
	%	kW
20/06/06	50	14
21/06/06	25	7
23/06/06	75	21
29/06/06	100	28

Para a verificação dos testes foram registrados os dados básicos para a análise dos parâmetros conforme tabela abaixo:

Tabela 18 – Parâmetros da cogeração

Condição do Teste	Parâmetro
100% (28 kW)	Potência Elétrica, Eficiência Elétrica, Frequência Elétrica e Tensão Elétrica
75% (21 kW)	Taxa de Recuperação de Calor, Eficiência Térmica
50% (14 kW)	Eficiência Total
25% (7 kW)	Taxas de Calor Disponível, Utilizada e de Perdas Efetividade da URC (trocador de calor)

6.2

Desempenho da produção de Potência elétrica e Taxa de calor

A seguir serão apresentados os desempenhos da produção de potência elétrica, da taxa de recuperação de calor (potência térmica), as eficiências elétrica, térmica e total, assim como a efetividade da URC durante os testes controlados e os testes com cargas individuais livres. Os testes controlados foram averiguados de acordo com o critério mencionado na *seção 4.2.1.1, capítulo 4*.

6.2.1

Teste de cargas parciais - controlado

Nesta seção analisaram-se de forma preliminar o comportamento da microturbina e simultaneamente o desempenho do sistema de cogeração. Durante os testes observou-se variação da temperatura ambiente (temperatura de admissão do ar) entre 28,0 e 29,5°C, umidade relativa do dia em 63%, enquanto que para a pressão atmosférica observou-se variação entre 99,60 e 99,80 kPa. Em relação à Condição ISO, notou-se uma aceitável proximidade para os valores da umidade relativa e pressão atmosférica, enquanto que para a temperatura atmosférica apresentaram-se valores superiores. Segundo o manual do fabricante da microturbina [32], é desprezível o efeito da umidade em relação à potência e eficiência da microturbina. De acordo com [11, 27], a correção exigida em relação à altitude de operação da microturbina foi desnecessária devido esta operar ao nível do mar. Desconsiderou-se a correção da potência elétrica em relação à contra-pressão na exaustão da microturbina pelo fato de não haver informações deste gênero no manual da URC.

Conforme descrito no procedimento experimental, *capítulo 3*, foram realizadas as seguintes medições:

- Vazão do gás natural;
- Pressão do gás natural;
- Temperatura do gás natural;
- Pressão e temperatura ambiente;
- Vazão da água do sistema de cogeração;
- Temperaturas de entrada e saída da água na URC;
- Temperatura de entrada e saída dos gases de exaustão na URC;
- Volume da saída de água quente do reservatório para consumo.

A composição do gás natural assim como outras propriedades como Poder Calorífico Inferior (PCI) e massa específica foram fornecidos através da concessionária local, CEG, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Composição e propriedades do gás natural
CEG - 09/06/2006

Composição	(%)
CH ₄	93,5846
C ₂ H ₆	4,4974
C ₃ H ₈	0,7733
i C ₄ H ₁₀	0,0223
n C ₄ H ₁₀	0,0399
i C ₅ H ₁₂	0,0057
n C ₅ H ₁₂	0,0061
C ₆ H ₁₄	0,0044
N ₂	0,7773
CO ₂	0,2892
PCS (kcal/Nm ³)*	9191
PCI (kcal/Nm ³)*	8293
ρ (kg/Nm ³)*	0,7124

* Condições: 20°C e 1 atm

A incerteza do PCI foi estimada a partir da contribuição das incertezas de cada componente do gás natural determinados pelo NIST para o PCS. Sabe-se, de acordo com [17], que o PCS do gás natural é maior que o seu PCI em 10% aproximadamente. Para a composição molar do gás natural adotou-se uma incerteza de 1%. Os dados relacionados à massa molecular e PCI do gás natural estão apresentados nos Apêndices 7 e 8, respectivamente.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados para os testes de variabilidade dos parâmetros operacionais: potência elétrica, vazão do gás natural, pressão e temperatura ambiente, onde estes respeitaram os limites determinados de acordo com o critério mencionado na *seção 4.2.1.1*. Para os testes foram coletados dados no intervalo de tempo de 5 minutos durante um total de 20 minutos.

Tabela 20 – Variabilidade dos parâmetros operacionais

Condição do teste	Teste	P_{el} $\pm 2 \%$	∇_{GN} $\pm 2 \%$	P_{AMB} $\pm 0,5 \%$	T_{AMB} $\pm 2,2 ^\circ C$
100% (28 kW)	1	-0,13	0,87	-0,03	-0,15
	2	0,06	0,03	0,08	-0,05
	3	0,00	0,09	-0,03	-0,05
	4	0,06	-0,99	-0,03	0,25
75% (21 kW)	5	-0,15	0,20	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% (14 kW)	9	-0,54	-0,41	0,05	-0,90
	10	-1,29	-0,59	-0,05	-0,60
	11	1,33	0,35	0,05	1,60
	12	0,50	0,64	-0,05	-0,10
25% (7 kW)	13	1,79	1,11	0,08	0,20
	14	-1,75	1,67	-0,03	1,00
	15	-0,73	-1,26	-0,03	-0,90
	16	0,69	-1,52	-0,03	-0,30

Na Tabela 21 estão apresentados os dados dos parâmetros referente ao desempenho do sistema da cogeração (regime permanente) em relação ao “heat input” (HI), à potência elétrica gerada e sua eficiência, as taxas de calor de disponível, utilizada e de recuperação, ao “heat rate” para a geração da energia elétrica assim como para cogeração, e o consumo específico de combustível (CEC).

Na Tabela 21 apresentam-se também os dados dos parâmetros referente ao desempenho do sistema da cogeração em relação à efetividade da URC, junto com os dados das principais variáveis registrados durante a cogeração.

Os testes foram realizados com uma demanda de consumo artificial com uma vazão média de água quente do reservatório de $0,012 \pm 0,002 \text{ m}^3/\text{min}$. A temperatura ambiente (externa) ficou em $22,6 \pm 0,3^\circ\text{C}$.

Os resultados mostraram que a microturbina C30 produziu durante os testes a 100% da carga uma potência elétrica média de $25,0 \pm 1,7 \text{ kW}$ com uma variação da temperatura ambiente de $29,1$ a $29,5^\circ\text{C}$. A média da eficiência elétrica foi de $16,7 \pm 1,6\%$.

Tabela 21 – Desempenho do sistema de cogeração
Produção de energia elétrica e calor

Parâmetros			Condição do Teste							
			100%	±	75%	±	50%	±	25%	±
Heat Input	HI	MJ/h	541,13	35,87	452,63	27,67	307,24	18,88	169,73	13,22
Potência elétrica	Líquida	kW	25,02	1,72	20,97	1,72	13,79	1,79	6,99	1,75
	Eficiência Elétrica	%	16,65	1,59	16,68	1,71	16,16	2,32	14,82	3,89
Taxa de Calor	Disponível	kW	80,65	5,57	68,53	4,31	51,55	3,28	35,36	2,81
	Utilizada	kW	45,76	3,20	40,26	2,54	31,46	2,03	22,74	1,89
	Recuperada	kW	43,81	6,54	38,67	6,14	29,22	5,95	21,83	6,07
	Eficiência Térmica	%	29,15	4,76	30,76	5,24	34,24	7,28	46,31	13,37
Sistema de Cogeração	Eficiência Total	%	45,79	8,66	47,43	9,42	50,40	12,94	61,13	23,86
Heat Rate	Microturbina	kJ/kWh	21627	2063	21586	2209	22280	3205	24301	6381
Heat Rate	Sistema de Cogeração	kJ/kWh	7862	932	7590	935	7144	1121	5890	1371
CEC	Microturbina	Nm ³ /kWh	0,62	0,06	0,62	0,06	0,64	0,09	0,70	0,18
Condição ambiental	Temp. Ambiente	°C	29,35	1,01	28,98	2,32	28,60	3,79	28,50	2,79
	Pressão Ambiente	kPa	99,68	0,00	99,68	0,00	99,75	0,00	99,68	0,00
Gás Natural	Vazão	Nm ³ /h	15,58	0,00	13,04	0,75	8,85	0,51	4,89	0,37
	PCI	kJ/Nm ³	34721		34721		34721		34721	
	Pressão Manométrica	kPa	85,28	4,18	86,97	4,21	87,68	3,91	93,98	4,00
	Temp.	°C	21,24	0,51	21,15	0,50	21,03	0,53	20,84	0,51
Condições do fluido (água)	Vazão	l/min	178,12	3,54	178,46	3,63	174,15	2,96	177,58	3,13
	Temp. Saída	°C	80,08	1,11	79,13	0,57	75,94	2,29	70,01	3,66
	Temp. Entrada	°C	76,46	1,28	75,95	0,59	73,48	2,32	68,21	3,71
	ΔT	°C	3,62	0,53	3,19	0,50	2,46	0,50	1,80	0,50
Condições dos gases de exaustão	Fluxo de massa	kg/s	0,28	0,02	0,26	0,02	0,21	0,01	0,16	0,01
	Temp. Entrada	°C	298,60	0,74	283,33	1,06	260,42	1,72	240,73	1,14
	Temp. Saída	°C	142,03	1,83	130,19	0,66	115,28	2,70	100,46	3,99
	ΔT	°C	156,57	1,72	153,14	0,95	145,14	1,82	140,26	3,62
Efetividade (URC)	Efetiv. - ε0 (Cmin/Cmin)	%	70,48	0,92	73,84	0,40	77,64	1,75	81,31	2,90
	Efetiv. - ε1 (Cmax/Cmin)	%	67,49	-	70,93	-	72,10	-	78,06	-

A maior média da taxa de recuperação de calor medida foi de $43,8 \pm 6,5$ kW, também a 100% da carga, enquanto que o valor médio de sua eficiência térmica foi de $29,2 \pm 4,8\%$ e uma eficiência total de $45,8 \pm 8,7\%$. Entretanto, a maior eficiência total na cogeração foi encontrada no teste com a carga de 25% (7kW), calculada em $61,1 \pm 23,9\%$, favorecida pela eficiência térmica que ficou em $46,0 \pm 13,0\%$.

Em comparação com as incertezas dos resultados encontrados nos testes em relação aos valores das incertezas sugeridas, conforme descrito em [13], de forma a garantir uma melhor análise, constatou-se que os resultados se mostraram muito acima do percentual devido principalmente às incertezas de alguns instrumentos e da quantidade de amostragens dos testes. O desenvolvimento dos resultados e os demais dados relativos à Tabela 21 estão apresentados no Apêndice 9.

A seguir apresentam-se os gráficos das potências, Fig. 40, e das eficiências, Fig. 41, desta primeira análise do sistema de cogeração.

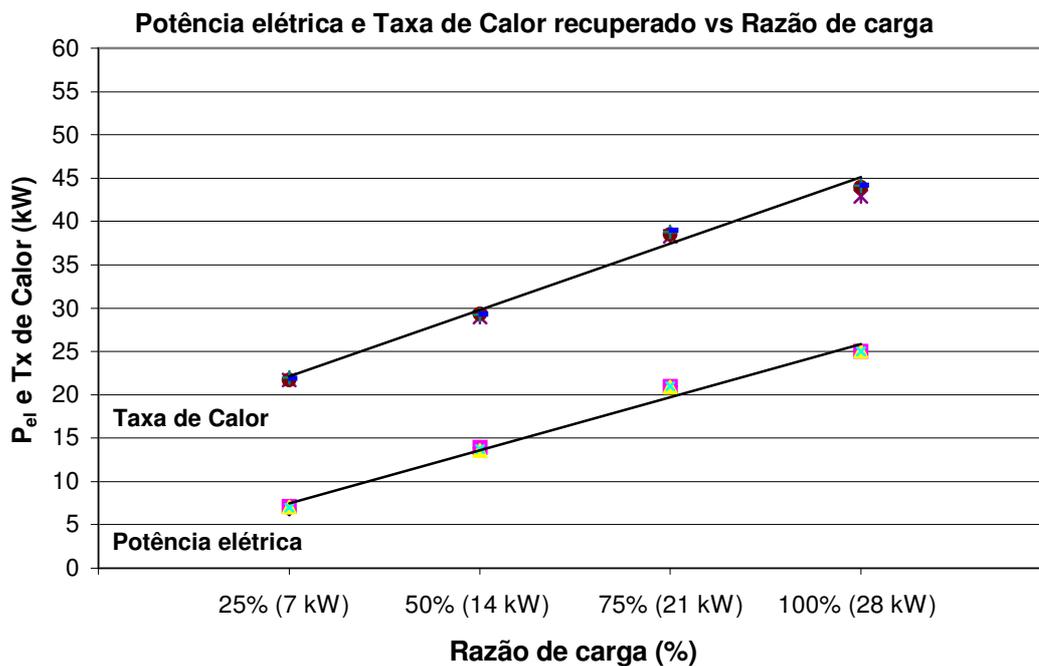


Figura 40 – Potência elétrica e Taxa de calor recuperado - Teste controlado

Conforme mencionado antes e mostrado na Fig. 40, o comportamento operacional da microturbina em relação à potência elétrica máxima se mostrou abaixo da potência nominal determinada, que fora de 28 kW. Na seção 6.2.2 este assunto foi analisado melhor.

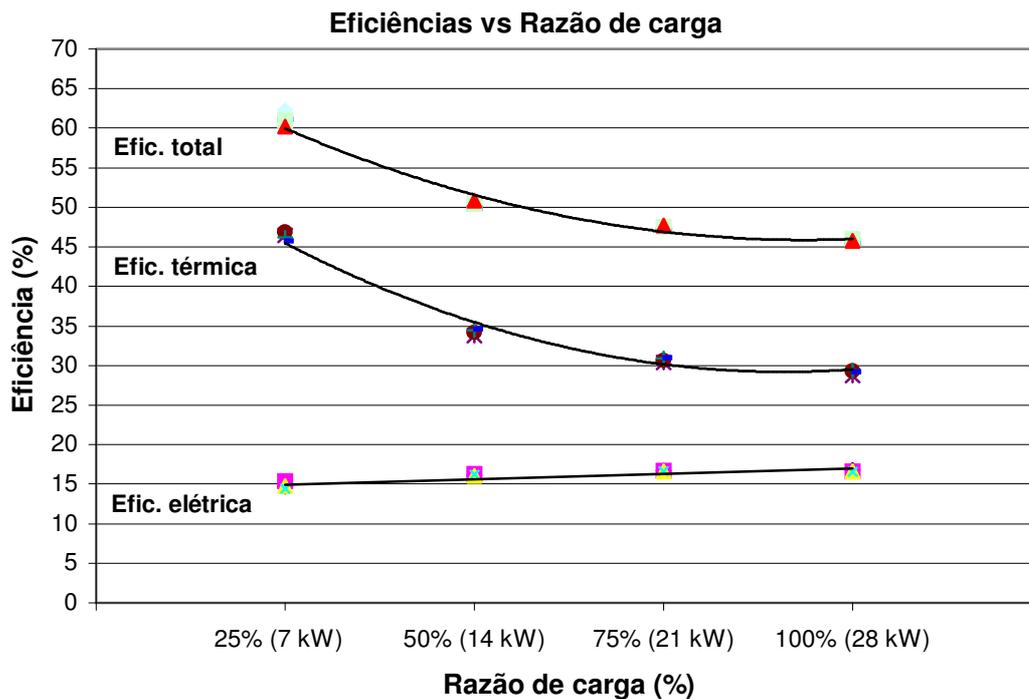


Figura 41 – Eficiências elétrica, térmica e total - Teste controlado

Como mostrado na Fig. 41, para os testes de 100, 75 e 50% de carga a eficiência elétrica permaneceu na faixa de 16,0%, o que evidenciou razões proporcionais entre as potências e o heat input.

Em relação à eficiência térmica, os resultados para 100 e 75% da carga mostraram que as suas eficiências ficaram próximas, para 50% da carga observou-se um aumento em 5% da eficiência em relação às cargas de 100 e 75%, o que contribuiu na eficiência total da cogeração, que ficou na faixa de 50%. Para 25% observa-se a melhor taxa de calor recuperado, que proporcionou a maior eficiência total da cogeração, apesar da menor eficiência elétrica encontrada para 25% da carga.

Antes da verificação dos testes, a temperatura inicial da água de armazenamento foi estabilizada em 85,0°C. Na Fig. 42 estão apresentados os perfis de temperatura dos gases de exaustão (T_g) e da água (T_{ag}) no decorrer dos testes já com a demanda de consumo aplicada.

Observou-se durante os testes uma redução quase proporcional em relação à temperatura de entrada dos gases de exaustão, onde a temperatura máxima foi de $298,6 \pm 0,7^\circ\text{C}$ para 100% de carga. Para as cargas de 75, 50 e 25% foram observadas reduções de 5,1, 12,8 e 19,4%, respectivamente, em relação à temperatura máxima da exaustão.

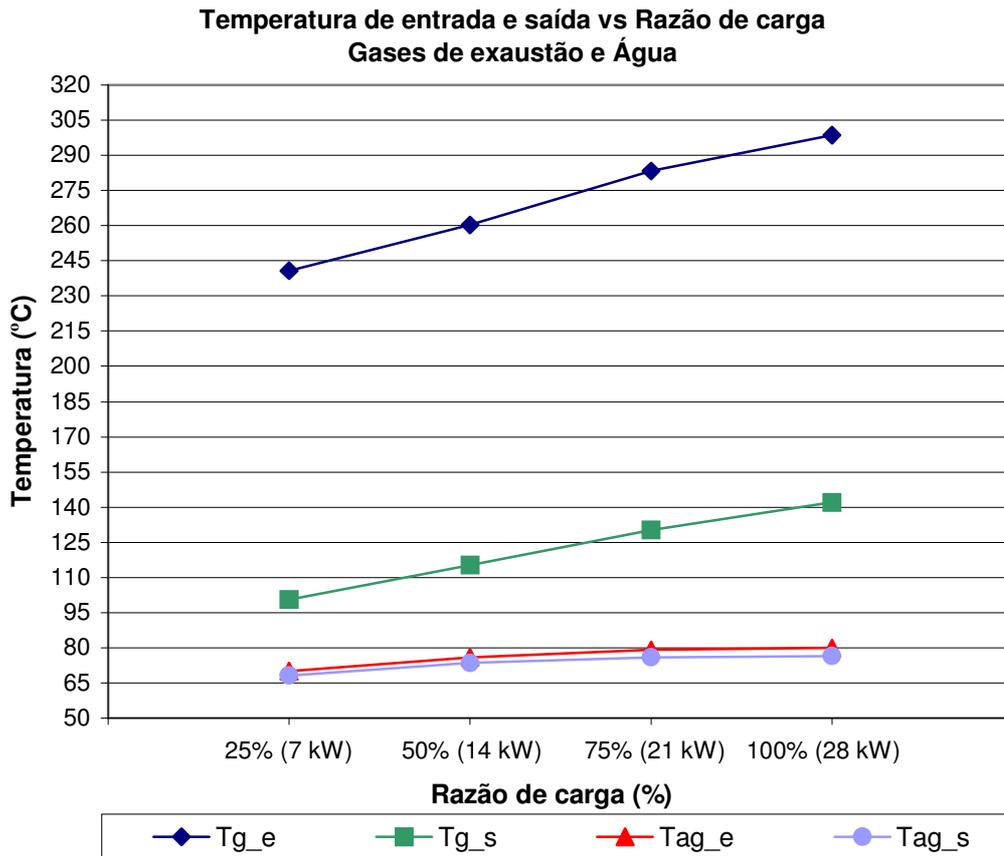


Figura 42 – Perfis de temperatura dos gases de exaustão e da água - Teste controlado

Para as temperaturas de entrada e saída da água na URC, de acordo com a demanda especificada (12 l/min), observou-se no 1º teste (100% da carga) uma redução média de 5°C na temperatura inicial do teste, para a entrada da água verificou-se uma temperatura média de 76,5°C. Com condições de temperaturas bem próximas às do teste anterior, os resultados para 75% da carga mostraram pequenas variações nas temperaturas, alterando o ΔT em apenas 0,4°C.

Para 50% da carga, as temperaturas apresentaram uma redução considerável, onde a temperatura média da água de entrada na URC foi de 75,9°C com um ΔT de 2,5°C e finalmente para 25% da carga, as menores temperaturas registradas com um ΔT de 1,8°C.

Em relação à efetividade da URC, foi observado, durante os testes, um aumento da efetividade na medida que as cargas decresciam. Inicialmente, para 100% da carga, obteve-se uma efetividade no valor de $70,5 \pm 0,9\%$, alcançando-se um valor de $81,3 \pm 2,9\%$ para 25% da carga. A análise do comportamento da efetividade dos testes desta seção será discutida na seção 6.2.4.

6.2.2

Desempenho da microturbina com carga de 100% (28 kW)

Sabe-se de acordo com [11, 16, 27] que a temperatura ambiente tem um efeito significativo na potência elétrica gerada pelas microturbinas a gás. De acordo com [27] considera-se a temperatura do ar admitido pelo compressor da microturbina como a temperatura ambiente. Verificou-se durante os testes com carga de 100% da potência elétrica nos meses de junho e julho o seguinte comportamento conforme mostrado na Fig. 43. Em comparação com a curva de potência elétrica em função da temperatura a pressão atmosférica padrão de 101,325 kPa [11], as potências medidas ficaram com valores um pouco superior, mas dentro da margem de incerteza adotada, determinada na Tabela 21.

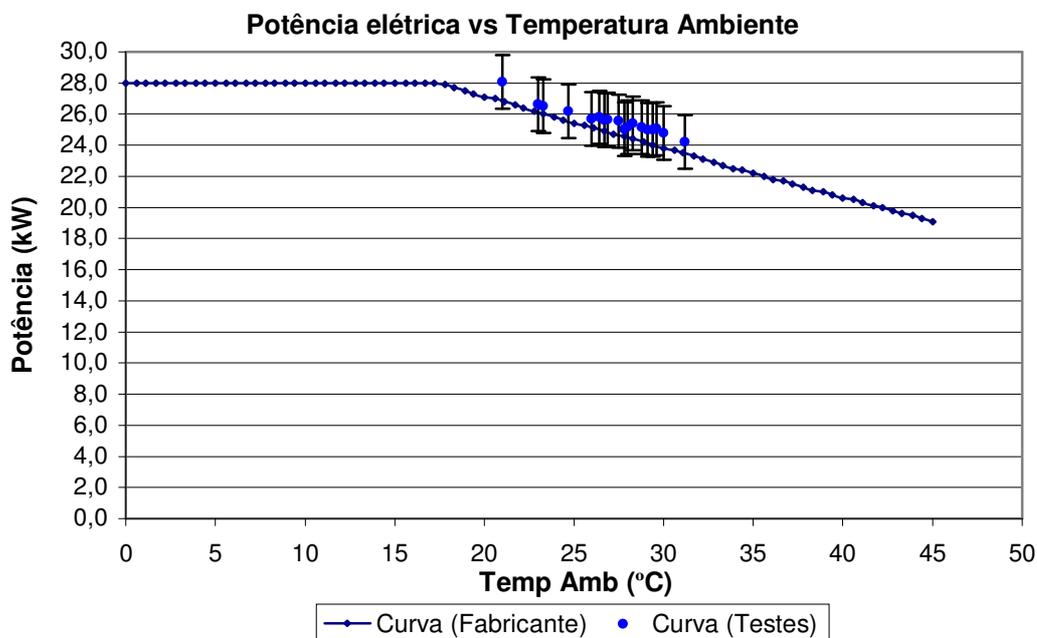


Figura 43 – Potência elétrica vs Temperatura Ambiente

Na Fig. 44, o comportamento da eficiência elétrica dos testes com carga de 100% em função da temperatura ambiente.

Apesar da potência elétrica gerada para os testes com carga a 100% se mostrarem dentro da margem de incerteza, a eficiência elétrica se mostrou com valores bem abaixo quando comparada com a curva de eficiência da referência [11].

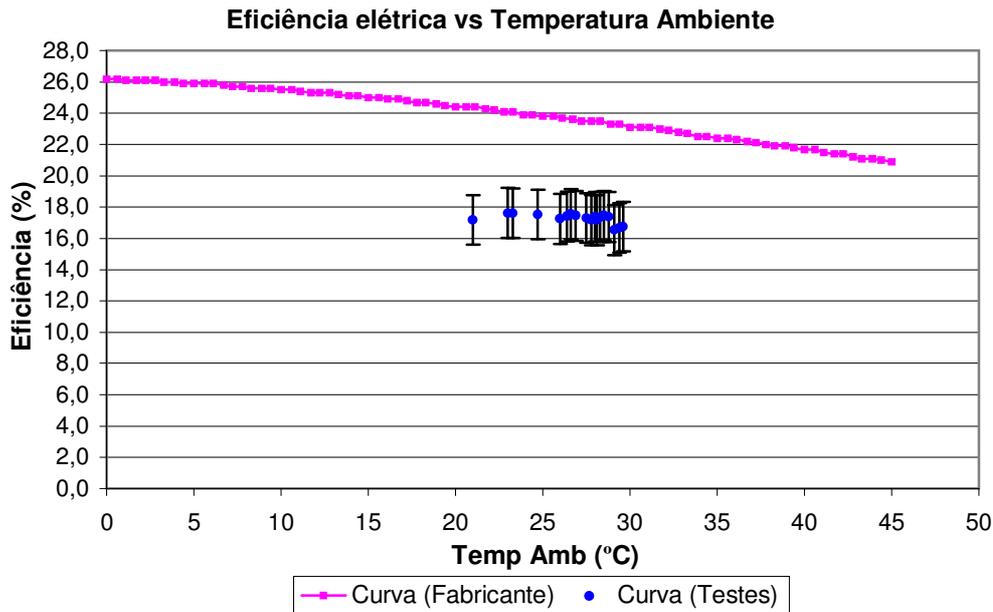


Figura 44 – Eficiência elétrica vs Temperatura Ambiente

Outro fator importante para a eficiência é o “heat input”, determinado pelo PCI e a vazão consumida do gás natural, entretanto, o fluxo de massa dos gases de exaustão, com a margem de incerteza da Tabela 21, se portou dentro do valor referenciado em [11]. Portanto, para uma melhor exatidão e comparação nos resultados em relação à massa total dos gases de exaustão, seria necessário a realização dos testes com o analisador de gases e com a sonda de Pitot, através dos métodos descritos nas seções 4.3, 4.4, 4.6.2. Infelizmente estes testes não puderam ser realizados por motivo de uma falha no sistema eletrônico da microturbina.

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados encontrados no teste a carga de 100% (28kW) a uma temperatura ambiente (admissão de ar) média de 29,4°C, conforme descrito na Tabela 21 e comparados com os valores referenciados em [11].

Tabela 22 – Tabela comparativa de parâmetros – Microturbina C30

Temp Amb	P_{EI}	η_{EI} (PCI)	Heat Rate (PCI)	Temp Gases de Exaustão	Fluxo de Massa Gases de Exaustão	Energia Gases de Exaustão	Heat Input (PCI)
°C	kW	%	kJ/kWh	°C	kg/s	kJ/h	kJ/h
29,40*	24,00	23,30	15479	285,00	0,290	310186	371496
29,40	25,02	16,65	21626	298,60	0,284	318947**	541127

*Referência [11] - ** Calculado a Temperatura Ambiente (externa) = 15 °C

Observou-se uma variação considerável no “heat input” medido no teste em 45,7% superior em relação ao indicado pelo fabricante, o que implicou em um maior consumo de gás natural para o processo. Os valores obtidos para consumo de gás durante os testes mostraram certa conformidade com os valores coletados no medidor local da CEG (não demonstrados aqui). O consumo específico de combustível, CEC, para este mesmo teste foi de $0,623 \pm 0,058 \text{ Nm}^3/\text{kWh}$.

6.2.3 Desempenho da qualidade da energia elétrica

De acordo com a *seção 4.2.1.5, capítulo 4*, analisou-se a qualidade da energia elétrica durante os testes controlados e os de cargas individuais, testes livres.

6.2.3.1 Desempenho da freqüência elétrica

A freqüência elétrica foi monitorada continuamente através do software CRMS durante o desenvolvimento dos testes realizados e os resultados médios a cada 5 minutos estão apresentados na Fig. 45.

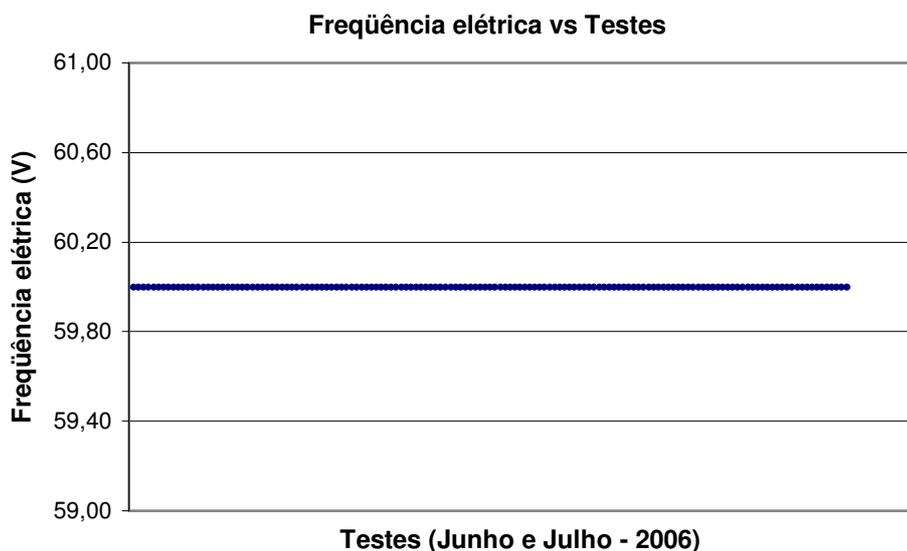


Figura 45 – Desempenho da freqüência elétrica

Na Tabela 23 apresenta-se o valor médio, máximo, mínimo e o desvio padrão da frequência elétrica, onde observa-se uma frequência elétrica média constante de 60,00 Hz e, portanto, com um desvio padrão nulo.

Tabela 23 – Parâmetros da frequência elétrica – Microturbina C30

Parâmetro	Frequência elétrica (Hz)
Frequência média	60
Frequência mínima	60
Frequência máxima	60
Desvio padrão	0

6.2.3.2 Desempenho da tensão elétrica

A tensão elétrica também foi monitorada através do software CRMS durante o desenvolvimento dos testes realizados e os resultados médios a cada 5 minutos estão apresentados na Fig. 46.

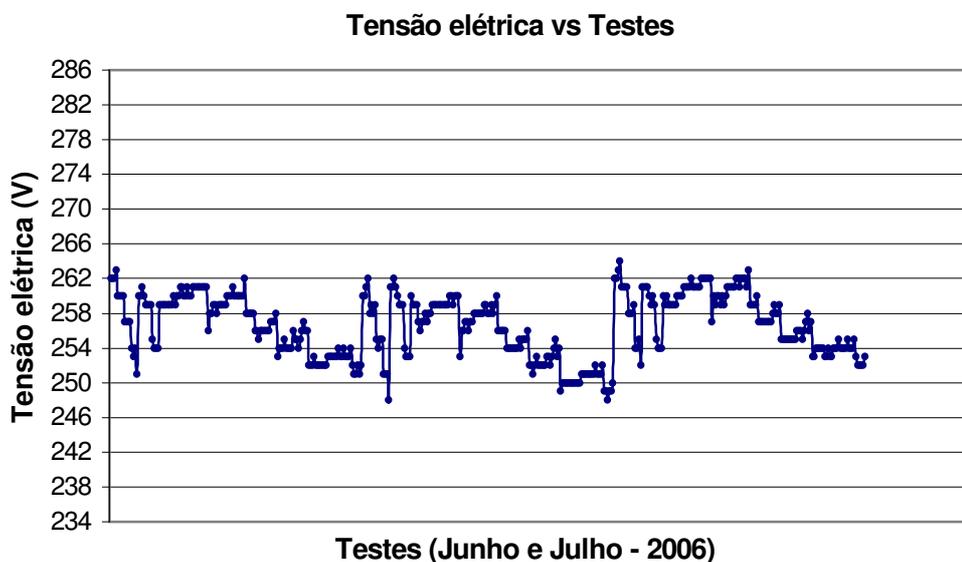


Figura 46 – Desempenho da tensão elétrica

De acordo com os resultados e conforme visto na figura acima foram respeitados os limites de tolerância de $\pm 10\%$ da tensão nominal.

Na Tabela 24 apresenta-se o valor médio, máximo, mínimo e o desvio padrão da tensão elétrica, onde se observou uma tensão elétrica média de 256,60 V e um desvio padrão de $\pm 3,57$ V.

Tabela 24 – Parâmetros da tensão elétrica – Microturbina C30

Parâmetro	Tensão elétrica (V)
Tensão média	256,60
Tensão mínima	248,00
Tensão máxima	264,00
Desvio padrão	3,57

De acordo com os resultados dos parâmetros para a verificação da qualidade da energia elétrica gerada pela microturbina, estes se portaram dentro das condições exigidas para manter a distribuição e o uso da energia elétrica estável, garantindo então um bom funcionamento deste processo.

6.2.3.3 Desempenho da Partida a frio da microturbina

Durante os testes realizados a 100% da carga da microturbina foram obtidos os seguintes tempos da partida a frio da microturbina, tempo necessário para alcançar a potência estável, conforme apresentado na Fig. 47. Cabe ressaltar que a potência elétrica gerada sofre variações de acordo com a temperatura ambiente, e que para determinadas aplicações da microturbina, esta deverá ser melhor analisada, como por exemplo o caso de suprimento de uma demanda fixa de energia elétrica ao longo de um tempo.

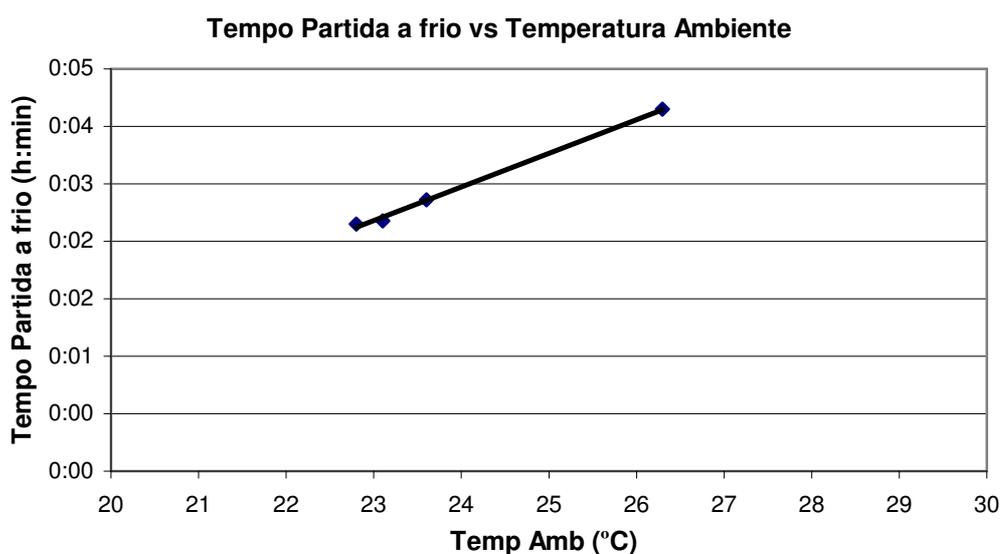


Figura 47 – Desempenho da partida a frio da microturbina C30

estão apresentadas também as equações ajustadas para as temperaturas para posterior comparação com os resultados da simulação numérica.

No comportamento da efetividade da URC observa-se, durante o período inicial, aproximadamente 25 minutos, um regime transiente e após isto um regime bem estável (permanente) até o tempo total de aquecimento, seguido de uma queda brusca devido ao fechamento do “damper”, necessário para o controle da temperatura da água.

Na Fig. 48 foram apresentados os valores de efetividade, de acordo com as seguintes equações:

$$\varepsilon = \frac{(T_{g-e} - T_{g-s})}{(T_{g-e} - T_{ag-e})} \quad \text{Eq. (143)}$$

$$\varepsilon = \frac{C_{\max} (T_{ag-s} - T_{ag-e})}{C_{\min} (T_{g-e} - T_{ag-e})} \quad \text{Eq. (42)}$$

O estudo da efetividade foi baseado em condições, onde a temperatura dos gases de exaustão na entrada da URC se mantinha constante, temperatura ambiente constante e vazão dos gases de exaustão e da água constantes.

No estudo da 1ª efetividade, calculada pela Eq. (143) e representada no gráfico por (e0), observa-se apenas a influência das temperaturas de entrada e saída dos gases e da temperatura de entrada da água, para a mesma capacidade térmica dos fluidos. Para este teste (100% da carga) obteve-se uma efetividade média de 70,4%, a mesma efetividade encontrada nos testes controlados, em regime permanente.

Em relação à 2ª efetividade, calculada pela Eq. (42) e representada no gráfico por (e1), obteve-se uma efetividade média de 67,7%, portanto, inferior à mencionada acima (e0). Analisando as contribuições das temperaturas, assim como de C_{\min} e C_{\max} , observou-se uma diferença entre as efetividades calculadas, ao se considerar as perdas de calor residentes na URC e no trecho do circuito de leitura da temperatura de saída da água. A taxa média destas perdas ficou em 1,84 kW, o que representou 2,2 % da taxa do calor disponível.

O método da efetividade se tornou o mais indicado por causa de não disponibilidade de dados importantes da URC, como a área total da transferência de calor (A) e do coeficiente global de transferência de calor (U). Aliado a isto, está também, a dificuldade de encontrar dados (curvas) na literatura para obter o fator de correção, para o método DTML.

Nos dois tipos de testes da cogeração, controlado (regime permanente) e livre (regime transiente), foi observado que as efetividades, após uma fase inicial transiente, não variaram com o tempo.

Como primeira análise para as perdas de calor no sistema, um estudo da transferência de calor no circuito e reservatório térmico foi elaborado para uma condição de temperatura a 85,0°C para o fluido de trabalho e está apresentado no Apêndice 10.

A perda de calor para o circuito do sistema ficou com uma taxa média de 2,22 kW, representando 4,7% da taxa de calor recuperado. Os parâmetros médios de UA efetivo, parâmetro obtido pelo método DTML através de uma modelagem nas perdas de calor, conforme ilustrado na Fig. 39 – seção 5.2, e denominados como UA_1 e UA_2 efetivos, tiveram distintos comportamentos para o teste a 100% de carga, conforme mostrado na Fig. 49.

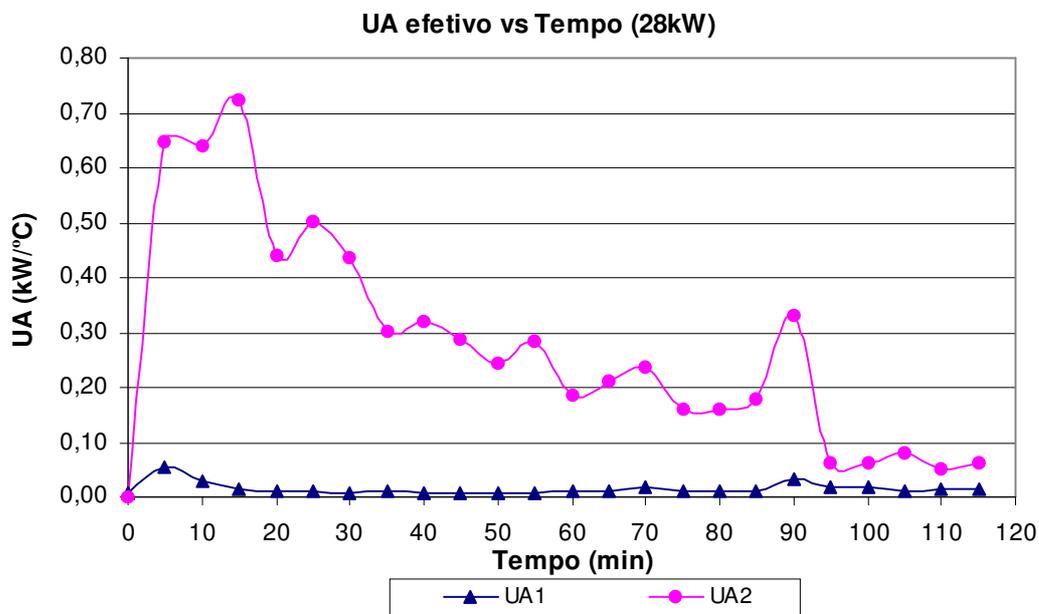


Figura 49 – UA efetivo vs tempo – Teste 28 kW

Como pode observar o parâmetro UA_1 se comportou bem estável, porém para UA_2 observa-se grande variação ao longo do tempo, tornando-se inadequado para a análise futura. Para os demais testes observou-se comportamento semelhante.

Entretanto, para a realização dos cálculos referentes ao parâmetro UA_2 nas simulações lançou-se mão dos valores médios das taxas de perdas de calor no circuito, \dot{Q}_{perdas_circ} , determinados nos testes da cogeração, conforme apresentado na Tabela 25 no final desta seção.

Na Fig. 50 observa-se uma taxa média de calor disponível de 81,0 kW, o que representou 55,0% da taxa de calor de entrada (heat input). Em relação à taxa de recuperação de calor nota-se um pico de 51,0 kW, que decresceu de forma quase linear, caindo aproximadamente 8,0 kW ao atingir a temperatura necessária, e conseqüentemente um aumento, de mesma proporção, na taxa de calor indisponível.

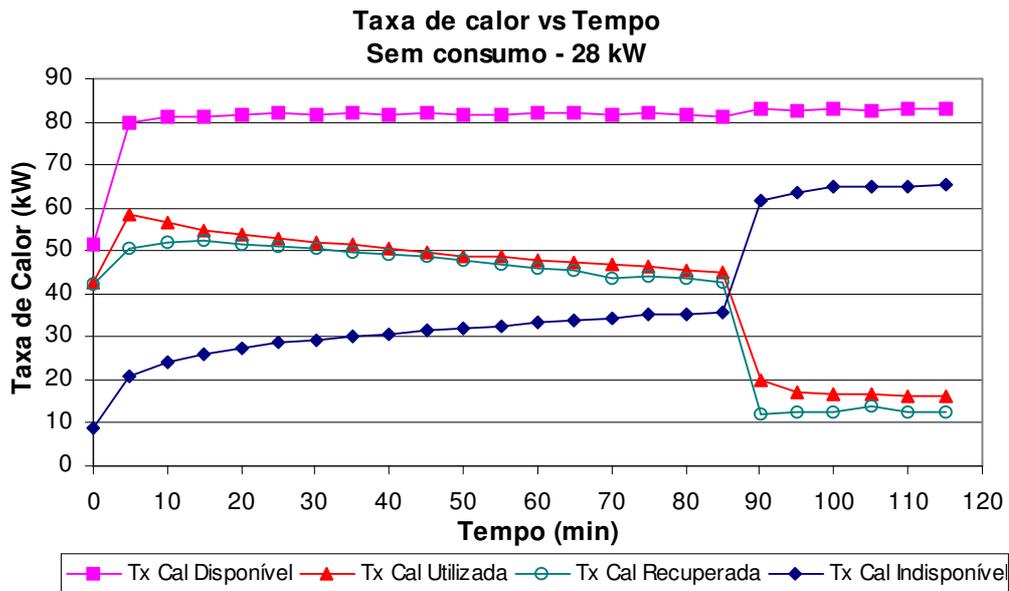


Figura 50 – Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 28 kW

Os resultados de alguns parâmetros, como potência elétrica e CEC, ficaram em conformidade com os da Tabela 21.

A seguir os perfis de Temperatura da água e Efetividade da URC, e das Taxas de calor (potências térmicas) para os demais testes (75, 50 e 25% da carga).

Para o teste de 75%, Fig. 51, o tempo necessário para o aquecimento da água, de 23,5 a 85,0°C, foi de 105 minutos. Observa-se inicialmente para a efetividade (e_1) uma oscilação brusca, devido às variações na medição do gás natural.

Foi observado nos diferentes testes realizados que a efetividade aumenta para valores mais baixos de carga da microturbina, devido à variação da razão dos gases de exaustão, conforme apresentado na Fig. 51.

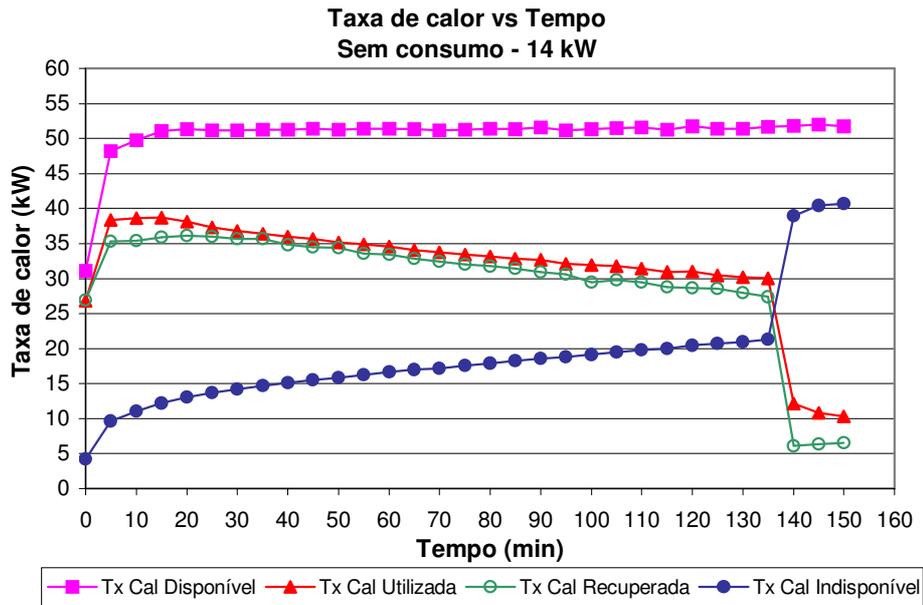


Figura 54 – Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 14 kW

Na Fig. 55, teste a 25% da carga, observa-se um tempo total da cogeração em 150 minutos, onde a temperatura máxima ficou em 75°C. A redução do tempo neste teste foi devido à necessidade de um tempo extra para ativar e desativar a microturbina em segurança.

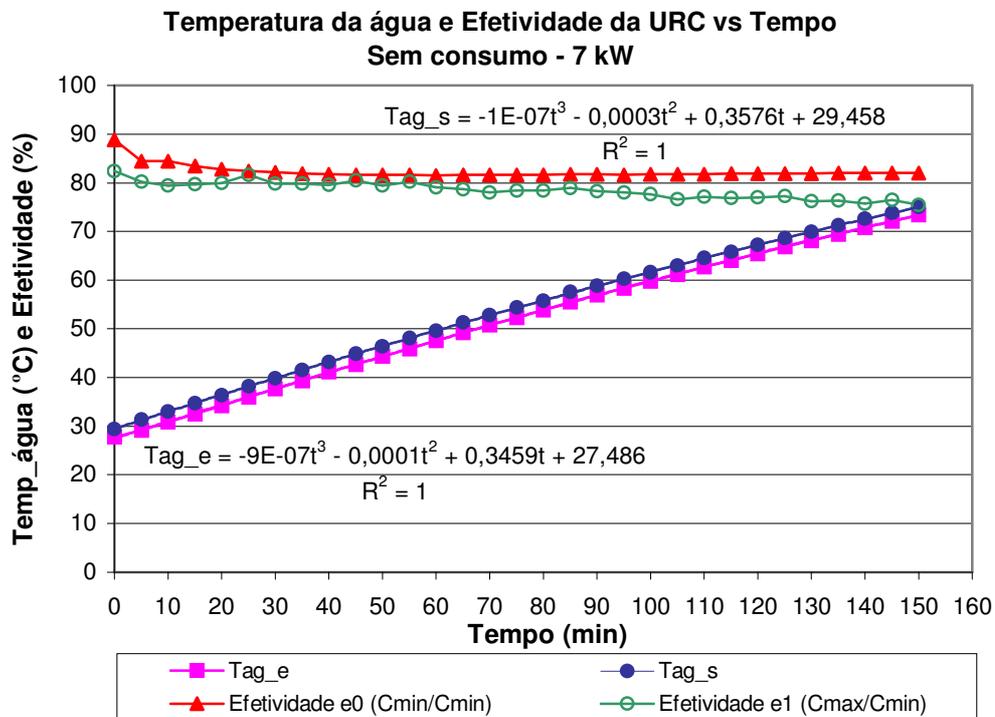


Figura 55 – Perfil da Temperatura de entrada e saída da água e Efetividade na URC - Teste 7 kW

Neste teste, 25% de carga, foi encontrada a maior efetividade dentre os demais testes realizados. Semelhante ao teste anterior, 75% de carga, observa-se que a efetividade (e_1), após o primeiro terço do tempo, se afasta em dois níveis, onde nota-se durante este processo um afastamento médio de 5% em relação a efetividade (e_0), que foi de 81,8%. Contribuiu para este efeito uma demanda crescente de gás natural para o processo na microturbina. Foram constatadas também, ao fazer a leitura de medição do gás natural, maiores variações nos dados, influenciadas, talvez, pela baixa vazão do gás próxima do limite inferior de medição do sensor de vazão do gás natural.

Na Fig. 56 observa-se uma taxa média de calor disponível de 35,0 kW. A taxa de calor recuperado teve um valor máximo de 26,5 kW, representando 75,0% da taxa de calor disponível, decrescendo até 20,0 kW ao longo dos 150 minutos, o que representou agora 57,0% da taxa de calor disponível. Em relação à taxa de calor indisponível observa-se já no início do processo um comportamento quase linear, um pouco diferente dos testes anteriores.

Para a taxa das perdas de calor na URC, obteve-se uma média de 1,07 kW (3,0% da taxa de calor disponível). A taxa das perdas de calor no circuito ficou em 1,53 kW (4,6% da taxa de calor recuperado).

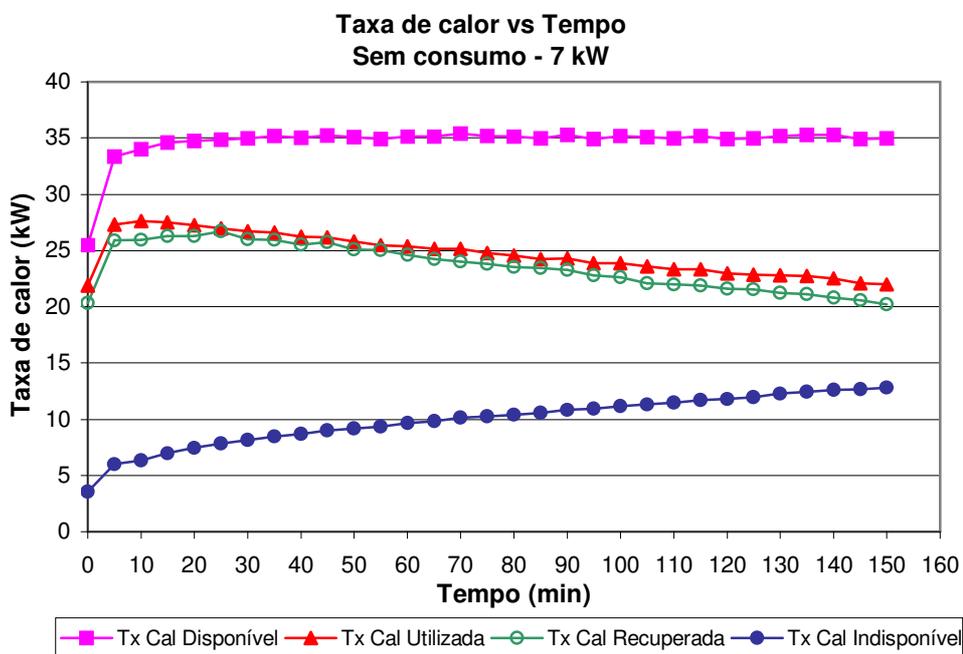


Figura 56 – Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 7 kW

A seguir, na Tabela 25, os parâmetros referentes às perdas de calor encontrados nos testes e que serão utilizados na simulação numérica.

Tabela 25 – Parâmetros UA_1 e \dot{Q}_{perdas_circ}

Condições	UA_1 (kW/°C)	\dot{Q}_{perdas_circ} (kJ/min)
100% (28 kW)	0,0101	133,200
75% (21 kW)	0,0088	110,400
50% (14 kW)	0,0107	91,800
25% (7 kW)	0,0083	64,800

6.2.5

Validação da simulação numérica

Através do algoritmo desenvolvido para a simulação numérica do desempenho do sistema de cogeração, e dos parâmetros obtidos experimentalmente como dados de entrada, conforme mostrado na Tabela 26, foram analisados todos os casos anteriormente experimentados na bancada de testes conforme demonstrados na seção anterior.

Tabela 26 – Parâmetros para simulação numérica

T_{g_e}	Temperatura média dos gases de entrada	°C
T_0	Temperatura inicial da água no Sistema	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C
T_m	Temperatura da mistura da água (consumo)	°C
\dot{m}_{ag}	Fluxo de massa da água do Sistema	kg/min
\dot{m}_g	Fluxo de massa do gás	kg/min
\dot{V}_{ag}	Vazão da mistura da água (consumo)	l/min
\dot{V}_q	Vazão de água quente	l/min
m_{sist}	Massa de água do sistema	Kg
c_{pag}	Calor específico médio a pressão constante da água	kJ/kg°C
c_{pg}	Calor específico médio a pressão constante dos gases	kJ/kg°C
ε	Efetividade do trocador de calor (URC)	%
C_{min}	Taxa da capacidade térmica mínima	kJ/min°C
C_{max}	Taxa da capacidade térmica máxima	kJ/min°C
UA_1	Parâmetro de Transferência de calor (Perda) na URC	kW/°C
UA_2	Parâmetro de Transferência de calor (Perda) no Sist.	kW/°C

O volume de água de todo o sistema de cogeração foi medido através de um hidrômetro e o seu valor foi de $1,042 \pm 0,021 \text{ m}^3$.

Para a temperatura de saída dos gases, T_{g_s} , na URC, verificou-se que esta era intimamente influenciada pela temperatura de entrada da água, T_{a_e} , por isso foi determinado para a simulação, equações por ajuste de curvas no Excel[®] para T_{g_s} em função de T_{a_e} . As equações estão apresentadas no Apêndice 11.

Com o objetivo de determinar a temperatura da água de armazenamento da cogeração e de acordo com os modelos descritos no capítulo 5, o algoritmo para o processo da simulação numérica se baseou em três etapas.

A primeira etapa foi baseada no processo da URC, onde através dos modelos da efetividade, perdas de calor e UA_1 efetivo, junto com o método DTML, determinou-se a temperatura de saída da água, T_{a_s} , da URC.

Na segunda etapa, de acordo com o modelo do processo da cogeração, ou seja, com ou sem consumo de água quente, determinou-se, através do método de Runge-Kutta, a temperatura da água de armazenamento do processo.

Na terceira etapa, através das perdas de calor no circuito do sistema de cogeração, calculou-se a variação da temperatura da água, que fora subtraída da temperatura da água de armazenamento, determinando-se, portanto, a temperatura de entrada da água da URC, T_{a_e} .

Os testes da simulação numérica foram realizados com um incremento de tempo (Δt) no valor de 1 minuto. De acordo com os dados de entrada específicos de cada condição, testada experimentalmente, obteve-se a curva de forma a validar a simulação perante o confronto dos valores calculados para a temperatura de entrada da água da URC, T_{a_e} , com os valores da mesma, medida experimentalmente.

Na Fig. 57, para a condição de 100% da carga (28 kW), é apresentada uma comparação entre os resultados da simulação numérica para as temperaturas de entrada e saída da água na URC, juntamente com as curvas das temperaturas medidas (reais) e de suas curvas ajustadas em Excel[®]. Os demais testes estão apresentados no Apêndice 12.

Como pode ser visto, as soluções do método numérico para a temperatura da água tiveram uma aproximação satisfatória, favorecida pelo comportamento quase linear do processo.

Na análise do processo da cogeração pela simulação numérica, observou-se uma maior influência da temperatura de saída da água da URC, T_{ag_s} , decorrente da efetividade e das perdas de calor na URC, nos resultados. Outro fator que também foi observado ter uma interferência significativa nos resultados foi a massa de água do sistema.

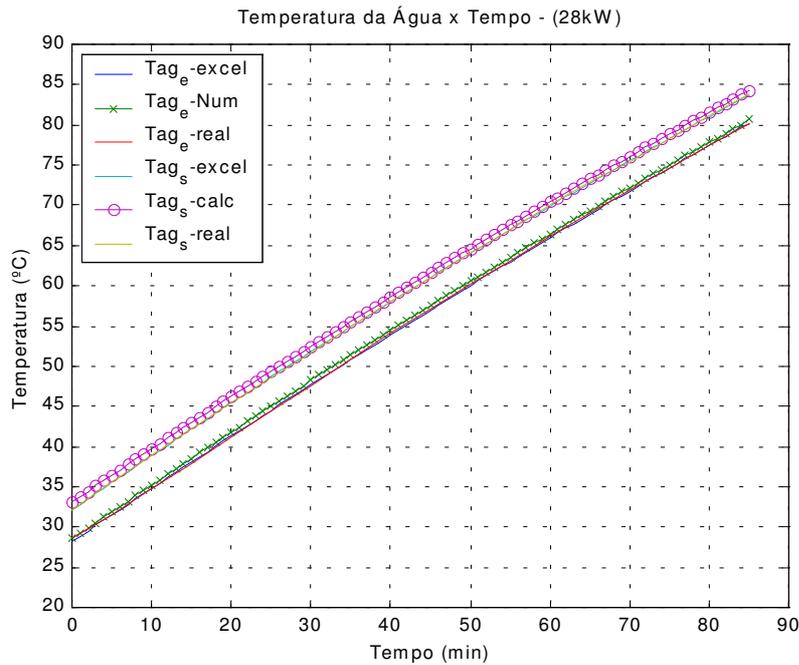


Figura 57 – Simulação numérica – Teste 28 kW
Temperatura da água vs Tempo

Observou-se uma boa concordância entre os valores medidos de temperatura com os valores simulados dentro de uma faixa de 0,20 e 0,70°C, para uma incerteza de medição da temperatura da água igual a $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Cabe ressaltar que a boa aproximação dos resultados da simulação numérica com os resultados reais se justificou com o uso da efetividade da URC, obtida experimentalmente, nos modelos.

6.2.6

Simulação do desempenho da cogeração como função do consumo

Definida a validação da simulação numérica, o próximo passo foi a verificação do desempenho da cogeração em função do consumo e a determinação de parâmetros novos de acordo com as diferentes configurações e condições que o sistema de cogeração possa estar submetido.

Sendo a demanda de consumo uma das principais necessidades na cogeração, foram simulados dois casos hipotéticos, onde se observa a influência da vazão de consumo (água quente) na temperatura da água de armazenamento no sistema.

Nas duas simulações estipulou-se uma aplicação da cogeração no consumo de água para chuveiros a uma temperatura de mistura de 40°C.

Na Fig. 58 está apresentado o 1º caso com uma vazão de 30 l/min para 100% da carga da microturbina. Após o fornecimento de água quente para

atender o consumo observa-se um crescimento na temperatura da água, mas observa-se também uma redução da taxa de calor recuperado, aumentando assim a taxa de calor indisponível.

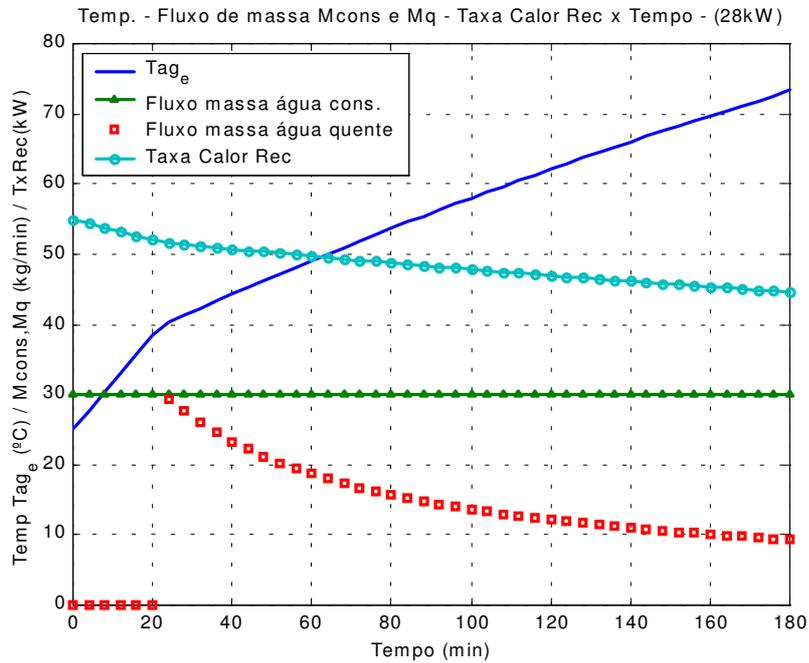


Figura 58 – Simulação numérica 1 – Função do consumo Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo

No 2º caso, Fig. 59, simulando agora com uma vazão de 90 l/min nota-se interrupções sucessivas no fornecimento de água quente devido a impossibilidade do sistema suprir a energia necessária de forma a manter a temperatura estável para atender a demanda.

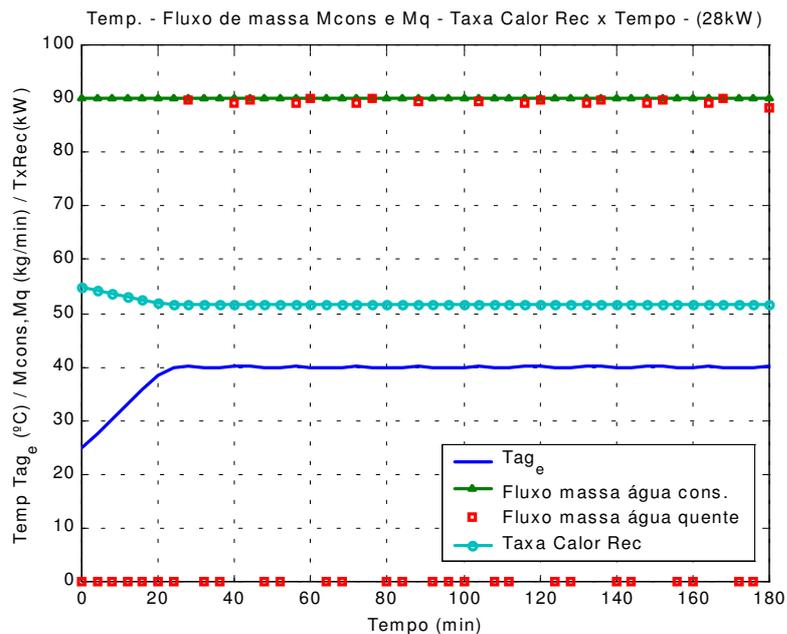


Figura 59 – Simulação numérica 2 – Função do consumo Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo

Portanto, de forma a otimizar o uso da cogeração foi proposto o estudo de 2 Casos, descritos a seguir.

6.2.6.1 Simulação do desempenho da cogeração – 1º Caso

No 1º Caso foi analisado o desempenho da cogeração com a principal aplicação de aquecer a água de uma temperatura inicial (25°C) a 40°C e mantê-la com a finalidade de atender o consumo nos chuveiros do Ginásio da PUC-Rio. Pela simulação determinou-se o tempo necessário para a água atingir a temperatura de 40°C assim como a vazão máxima disponível de forma a garantir a temperatura estável. Foi determinada também a taxa média do calor recuperado, tanto no regime transiente quanto no permanente.

Então, simulando uma cogeração para uma carga de 100% da microturbina obteve-se o seguinte desempenho mostrado nas figuras a seguir.

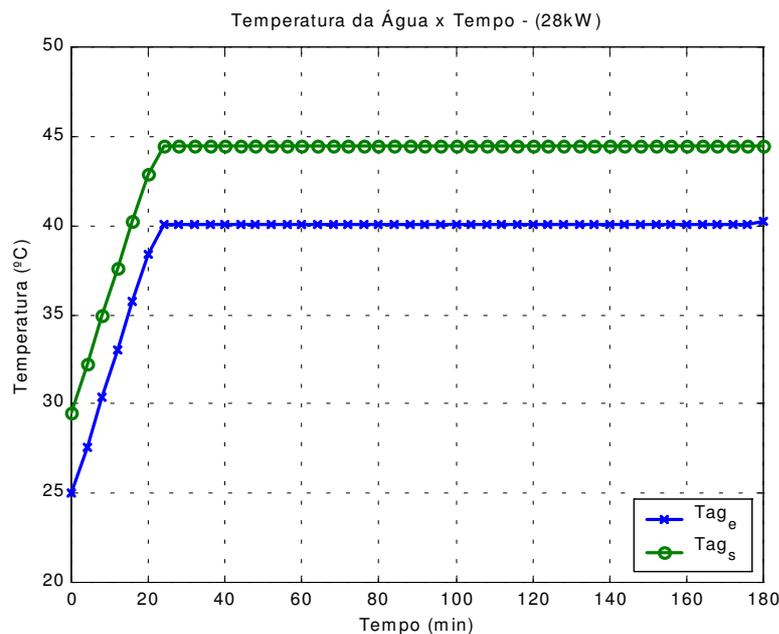


Figura 60 – Cogeração simulação – 1º Caso
Temperatura da água vs Tempo

Na Fig. 60, nota-se um tempo de aquecimento de 23 minutos.

Através de tentativas, foi determinado o valor máximo de consumo, representado pelo fluxo de massa da água em 50 kg/min, de modo que o sistema de cogeração pudesse atender a demanda.

Na Fig. 61, observa-se o comportamento constante da taxa de recuperação de calor assim como o fluxo de massa da água quente no modo otimizado.

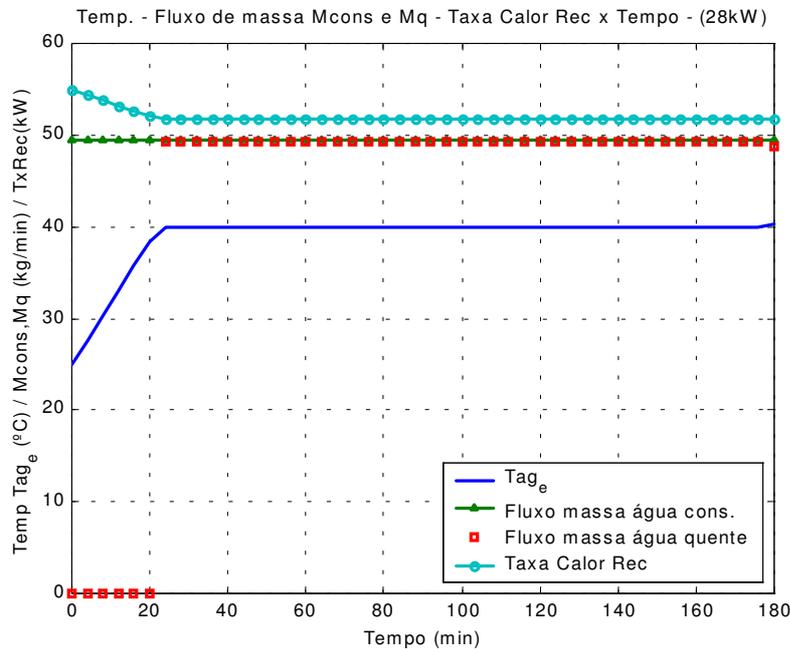


Figura 61 – Cogeração simulação – 1º Caso
Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo

As taxas de recuperação de calor foram obtidas por meio de integração para os diferentes regimes. Os valores do tempo para aquecimento, do fluxo de massa da água e das taxas de calor para a carga de 100% e para as demais estão mencionados na Tabela 29.

As simulações para 75, 50 e 25% da carga estão apresentadas no Apêndice 13.

6.2.6.2 Simulação do desempenho da cogeração – 2º Caso

A análise do desempenho do 2º Caso procedeu-se de forma semelhante à do 1º Caso, só que agora aplicada para um consumo onde a água será aquecida de 25 a 85°C.

Nas Figs. 62 e 63 estão apresentadas as simulações da cogeração para 100% de carga da microturbina.

Observa-se na Fig. 62 um tempo de 100 minutos para aquecer a água em 85°C, o que representa mais de 50% do tempo disponível para a cogeração.

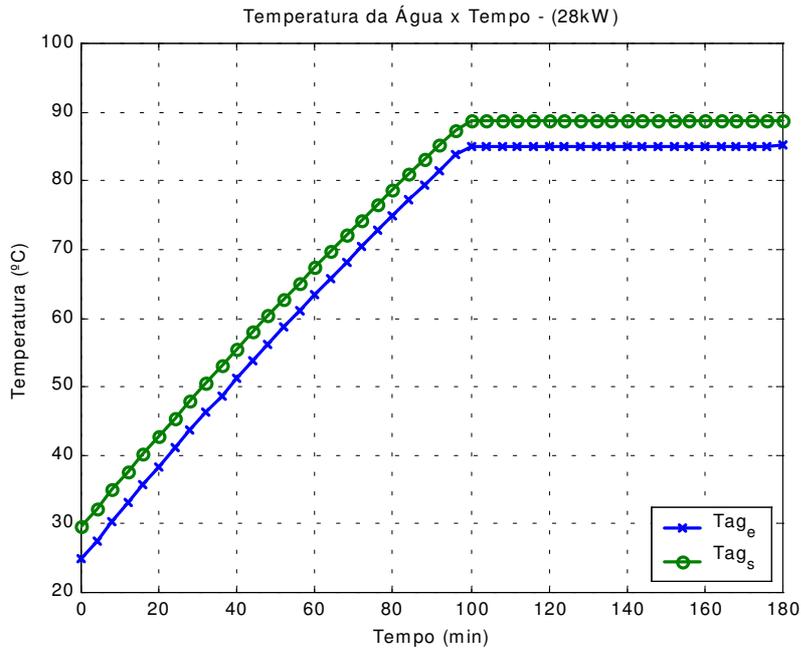


Figura 62 – Cogeração simulação – 2º Caso
Temperatura da água vs Tempo

Na Fig. 63 nota-se uma redução na taxa de recuperação de calor, quase 20% menor, em relação à do 1º Caso. Os valores do tempo para aquecimento, do fluxo de massa da água e das taxas de calor para a carga de 100% e para as demais cargas estão mencionados na Tabela 30.

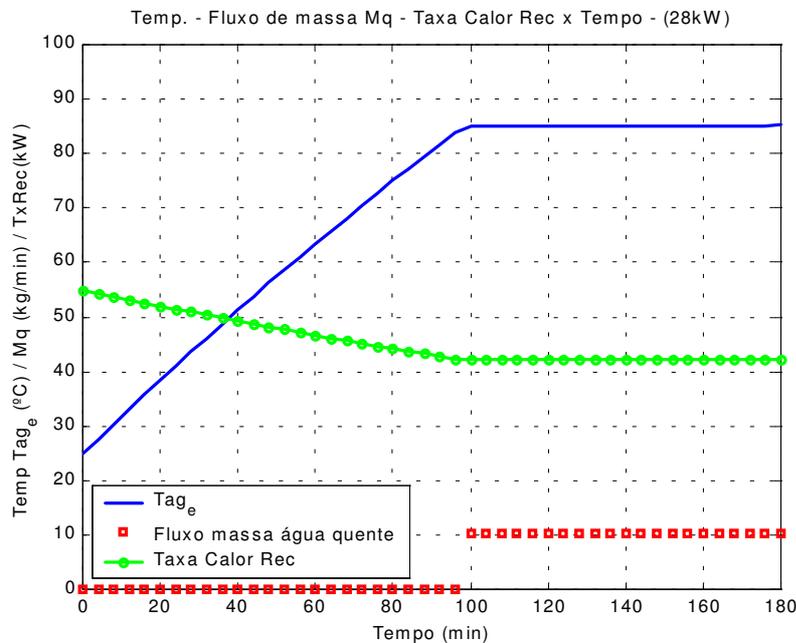


Figura 63 – Cogeração simulação – 2º Caso
Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo

6.2.7 Análise da viabilidade do uso da cogeração

A análise do desempenho desenvolveu-se no estudo de 2 Casos, descritos na seção anterior, onde a cogeração simulada teve um cenário onde a microturbina operava no horário de ponta com uma temperatura ambiente de 25°C.

Considerou-se como referência de cálculo a potência elétrica nominal de 3,2 kW de um chuveiro convencional, onde determinou-se junto com o ΔT a vazão necessária e adotando-se um tempo de 10 minutos para o banho obteve-se o volume total por banho de 30,57 litros.

Embora o objetivo principal deste trabalho foi de verificar o desempenho do sistema de cogeração, procurou-se através de um estudo sumário dos diferentes custos obtidos pelas simulações realizadas, contribuir parcialmente para o estudo de uma viabilidade econômica.

As tarifas propostas para o estudo foram a Tarifa Horo-Sazonal (THS) Verde – subgrupo A4, por ser a utilizada pela PUC-Rio, e a tarifa de classe residencial B1 para uma faixa de consumo acima de 300 kWh. Adotou-se para a THS o período seco por ser o mais crítico.

Na Tabela 27 apresenta-se o resumo das tarifas homologadas pela ANEEL de acordo com a Resolução Nº 391 de 6 de novembro de 2006 para a concessionária LIGHT.

Tabela 27 – Resumo das tarifas: ANEEL / LIGHT

THS Verde A4 – Seca (R\$/MWh)		B1 (R\$/MWh)
HP	FHP	-
950,19	157,15	318,69

Sobre as tarifas incidiram-se o tributo de ICMS de 30%. Para a tarifa B1 incidiu-se também os tributos PIS/COFINS, valor disponível no site da LIGHT.

Para o consumo de gás natural foi utilizada a tarifa para uso industrial, especificado no site da CEG e mostrada na Tabela 28. Cabe ressaltar que as tarifas são ajustadas de acordo com a faixa de consumo.

Tabela 28 – Resumo das tarifas: CEG

Faixa de consumo (m ³ /mês)	Tarifa limite (R\$/m ³)
0 – 200	2,1192
201 – 2000	1,1798

O estudo da viabilidade econômica se baseou em 3 condições de custo relacionadas de acordo com as tarifas e horário de consumo que foram classificadas como situação 1 (HP), 2 (FHP) e 3 (tarifa B1). A economia gerada foi a diferença entre o custo para geração de energia elétrica da microturbina com os custos especificados a seguir:

Custo 1: neste foi considerado apenas o custo para a geração de energia elétrica durante o horário de ponta;

Custo 2: além do custo para a geração de energia elétrica durante o horário de ponta foi adicionado o custo da energia elétrica que seria gerado pelo uso dos chuveiros de acordo com a quantidade disponível de banhos no Ginásio da PUC-Rio durante a cogeração;

Custo 3: custo para a geração de energia elétrica durante o horário de ponta mais o custo para geração da energia térmica total.

Nas Tabelas 29 e 30 estão apresentados os resultados dos estudos referidos nesta seção de acordo com dados obtidos no decorrer deste trabalho.

Os resultados para os 2 Casos indicaram um melhor aproveitamento da energia térmica durante a cogeração, entretanto foi observado no 1º Caso um aproveitamento superior da energia térmica. Observou-se que na simulação com carga de 25% para o 2º Caso, o tempo de 180 minutos foi insuficiente para aquecer a água em 85°C, motivo pelo qual não foi analisada nesta seção.

A maior quantidade de volume de água quente disponível para o 1º Caso (40°C) ao mês foi de 193305 l/mês, enquanto que para o 2º Caso (85°C) foi de 42356 l/mês, o que equivale a um volume de 169424 l/mês a 40°C, 12% menor em relação ao 1º Caso.

Considerando o uso da água quente da cogeração para o consumo nos chuveiros e de acordo com os parâmetros de referência estipulados para o banho obteve-se um número máximo de 292 banhos disponíveis por dia (100% de carga) para o 1º Caso, enquanto que para o 2º Caso, também a 100% da carga, obteve-se o máximo de 256 banhos.

Para o caso específico na PUC-Rio adotou-se o uso maximizado dos chuveiros durante o horário de ponta e a quantidade de banhos foi estabelecida de acordo com o tempo mínimo de aquecimento da água de armazenamento. Desprezando-se as diferenças de tempo para o aquecimento nas condições de 100, 75 e 50% de carga para o 1º Caso e para as condições de 100 e 75% no 2º Caso, observou-se que haveria uma utilização abaixo da quantidade de banhos disponíveis na cogeração.

Tabela 29 – Estudo de Viabilidade Econômica – 1º Caso

Coeracão - PUC-Rio				Tarifa de Energia elétrica			Tarifa de Gás Natural		
Tempo da Coeracão - Horário de Ponta				THS Verde A4 Seca		B1	Cons1	Cons2	
Aquecimento da água: 25 a 40°C				HP	FHP	> 300 kWh	0 - 200 m³	201-2000 m³	
h/dia	min/dia	Dias (úteis)	h/mês	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/m³	R\$/m³	
3	180	5	65	1,35741	0,22450	0,49767	2,11920	1,17980	
Parâmetro				Condição					
				100% (28 kW)			75% (21 kW)		
Potência elétrica Nominal	kW			28,000			21,000		
Potência elétrica Gerada	kW			25,000			21,000		
CEC	Nm³/kWh			0,623			0,622		
Consumo de GN	Nm³/h			15,575			13,062		
	Nm³/mês			1012,375			849,030		
Custo energia el. MT-C30 - Cons1 GN	R\$/kWh			1,320			1,318		
Custo energia el. MT-C30 - Cons2 GN	R\$/kWh			0,735			0,734		
Custo energia el. MT-C30 - Cons Médio	R\$/kWh			0,851			0,871		
Cogeração									
Temperatura de estabilização	°C			40,00			40,00		
Tempo de aquecimento	min			23			26		
	h			0,383			0,433		
Tempo de aquec - Reg Trans (Total)	h/mês			8,306			9,389		
Tempo de aquec - Reg Perm (Total)	h/mês			56,694			55,611		
Vazão - consumo máximo	l/min			49,390			43,500		
Taxa de Calor Rec - Reg Transiente	kW			53,327			47,005		
Taxa de Calor Rec - Reg Permanente	kW			51,668			45,518		
Taxa de Calor Rec - Reg Trans (Total)	kWh/mês			442,910			441,325		
Taxa de Calor Rec - Reg Perm (Total)	kWh/mês			2929,289			2531,307		
Energia Térmica Total - COG	kWh/mês			3372,199			2972,631		
Qtd disponível de chuv durante a COG				16			14		
Volume total disponível (40°C) - Mês	litros/mês			193305			170400		
Volume disponível (40°C) - Dia	litros/dia			8922			7865		
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/mês			6323			5574		
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/dia			292			257		
Qtd Banhos Disp. durante a COG	Banho/dia			254			219		
Qtd Banhos Disp. - PUC - COG	Banho/dia			157			154		
Potência elétrica do chuveiro	kW			3,200			3,200		
Consumo de energia elétrica por Banho	kWh/Banho			0,533			0,533		
Energia elétrica total - Dia - PUC-Rio	kWh/dia			83,733			82,133		
Energia Elétrica Total - Chuveiro	kWh/mês			1814,222			1779,556		
Energia Elétrica Total - Gerada	kWh/mês			1625,000			1365,000		
Custo geração energia elétrica				HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
LIGHT	R\$/mês			2205,80		808,71	1852,87		679,32
MT-C30	R\$/mês			1382,28			1189,57		
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês			2462,65	407,29	902,88	2415,59	399,51	885,63
Custo geração energia térmica	R\$/mês			4577,47	757,06	1678,24	4035,09	667,36	1479,39
Custo vs Economia				Situação1	Situação2	Situação3	Situação1	Situação2	Situação3
Custo 1 Energia elé (gerada)				HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
Custo geração energia elétrica	R\$/mês			2205,80	0,00	808,71	1852,87	0,00	679,32
Economia 1	R\$/mês			823,52	0,00	-573,57	663,30	0,00	-510,25
Custo 2 Energia elé (ger + chuv)									
Custo geração energia elétrica	R\$/mês			2205,80	0,00	808,71	1852,87	0,00	679,32
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês			2462,65	407,29	902,88	2415,59	399,51	885,63
Custo total	R\$/mês			4668,45	2613,09	1711,60	4268,46	2252,38	1564,95
Economia 2	R\$/mês			3286,17	1230,81	329,32	3078,90	1062,82	375,39
Custo 3 Energia (elét + térm)									
Custo geração energia elétrica	R\$/mês			2205,80	0,00	808,71	1852,87	0,00	679,32
Custo geração energia térmica total	R\$/mês			4577,47	757,06	1678,24	4035,09	667,36	1479,39
Custo total	R\$/mês			6783,27	2962,86	2486,96	5887,96	2520,23	2158,71
Economia 3	R\$/mês			5400,99	1580,58	1104,68	4698,40	1330,66	969,14
Coeracão - Sistema Híbrido (Aux)									
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/dia								
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/mês								
Custo Energia complementar									
Custo energia elétrica compl / chuveiro	R\$/mês								
Economia 2 - Sistema Hib	R\$/mês								

Tabela 29 – Estudo de Viabilidade Econômica – 1º Caso (continuação)

Parâmetro		Condição					
		50% (14 kW)			25% (7 kW)		
Potência elétrica Nominal	kW	14,000			7,000		
Potência elétrica Gerada	kW	14,000			7,000		
CEC	Nm³/kWh	0,642			0,700		
Consumo de GN	Nm³/h	8,988			4,9		
	Nm³/mês	584,220			318,500		
Custo energia el. MT-C30 - Cons1 GN	R\$/kWh	1,361			1,483		
Custo energia el. MT-C30 - Cons2 GN	R\$/kWh	0,757			0,826		
Custo energia el. MT-C30 - Cons Médio	R\$/kWh	0,964			1,239		
Cogeração							
Temperatura de estabilização	°C	40,00			40,00		
Tempo de aquecimento	min	33			45		
	h	0,550			0,750		
Tempo de aquec - Reg Trans (Total)	h/mês	11,917			16,250		
Tempo de aquec - Reg Perm (Total)	h/mês	53,083			48,750		
Vazão - consumo máximo	l/min	33,590			24,350		
Taxa de Calor Rec - Reg Transiente	kW	36,508			26,451		
Taxa de Calor Rec - Reg Permanente	kW	35,225			25,426		
Taxa de Calor Rec - Reg Trans (Total)	kWh/mês	435,054			429,829		
Taxa de Calor Rec - Reg Perm (Total)	kWh/mês	1869,860			1239,518		
Energia Térmica Total - COG	kWh/mês	2304,914			1669,346		
Qtd disponível de chuv durante a COG		11			8		
Volume total disponível (40°C) - Mês	litros/mês	132125			95692		
Volume disponível (40°C) - Dia	litros/dia	6098			4417		
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/mês	4322			3130		
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/dia	199			144		
Qtd Banhos Disp. durante a COG	Banho/dia	162			107		
Qtd Banhos Disp. - PUC - COG	Banho/dia	147			135		
Potência elétrica do chuveiro	kW	3,200			3,200		
Consumo de energia elétrica por Banho	kWh/Banho	0,533			0,533		
Energia elétrica total - Dia - PUC-Rio	kWh/dia	78,400			72,000		
Energia Elétrica Total - Chuveiro	kWh/mês	1698,667			1560,000		
Energia Elétrica Total - Gerada	kWh/mês	910,000			455,000		
Custo geração energia elétrica		HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
LIGHT	R\$/mês	1235,25		452,88	617,62		226,44
MT-C30	R\$/mês	877,14			563,65		
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês	2305,79	381,35	845,38	2117,57	350,22	776,37
Custo geração energia térmica	R\$/mês	3128,72	517,45	1147,09	2265,99	374,77	830,78
Custo vs Economia		Situação1	Situação2	Situação3	Situação1	Situação2	Situação3
Custo 1 Energia elé (gerada)		HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
Custo geração energia elétrica	R\$/mês	1235,25	0,00	452,88	617,62	0,00	226,44
Economia 1	R\$/mês	358,10	0,00	-424,26	53,98	0,00	-337,21
Custo 2 Energia elé (ger + chuv)							
Custo geração energia elétrica	R\$/mês	1235,25	0,00	452,88	617,62	0,00	226,44
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês	2305,79	381,35	845,38	2117,57	350,22	776,37
Custo total	R\$/mês	3541,04	1616,60	1298,26	2735,19	967,84	1002,81
Economia 2	R\$/mês	2663,90	739,45	421,11	2171,54	404,20	439,16
Custo 3 Energia (elét + térm)							
Custo geração energia elétrica	R\$/mês	1235,25	0,00	452,88	617,62	0,00	226,44
Custo geração energia térmica total	R\$/mês	3128,72	517,45	1147,09	2265,99	374,77	830,78
Custo total	R\$/mês	4363,97	1752,70	1599,97	2883,62	992,39	1057,22
Economia 3	R\$/mês	3486,83	875,56	722,82	2319,97	428,75	493,58
Cogeração - Sistema Híbrido (Aux)							
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/dia				14,653		
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/mês				317,488		
Custo Energia complementar					HP	FHP	B1
Custo energia elétrica compl / chuveiro	R\$/mês				430,96	71,28	158,00
Economia 2 - Sistema Hib	R\$/mês				1740,58	332,92	281,15

Tabela 30 – Estudo de Viabilidade Econômica – 2º Caso

Coeracão - PUC-Rio				Tarifa de Energia elétrica			Tarifa de Gás Natural		
Tempo da Coeracão - Horário de Ponta				THS Verde A4 Seca		B1	Cons1	Cons2	
Aquecimento da água: 25 a 85°C				HP	FHP	> 300 kWh	0 - 200 m³	201-2000 m³	
h/dia	min/dia	Dias (úteis)	H/mês	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/m³	R\$/m³	
3	180	5	65	1,35741	0,22450	0,49767	2,11920	1,17980	
Parâmetro				Condição					
				100% (28 kW)			75% (21 kW)		
Potência elétrica Nominal	kW			28,000			21,000		
Potência elétrica Gerada	kW			25,000			21,000		
CEC	Nm³/kWh			0,623			0,622		
Consumo de GN	Nm³/h			15,575			13,062		
	Nm³/mês			1012,375			849,030		
Custo energia el. MT-C30 - Cons1 GN	R\$/kWh			1,320			1,318		
Custo energia el. MT-C30 - Cons2 GN	R\$/kWh			0,735			0,734		
Custo energia el. MT-C30 - Cons Médio	R\$/kWh			0,851			0,871		
Cogeração									
Temperatura de estabilização	°C			85,00			85,00		
Tempo de aquecimento	min			99			112		
	h			1,650			1,867		
Tempo de aquec - Req Trans (Total)	H/mês			35,750			40,444		
Tempo de aquec - Req Perm (Total)	H/mês			29,250			24,556		
Vazão - consumo máximo	l/min			10,230			8,850		
Taxa de Calor Rec - Req Transiente	kW			48,240			42,392		
Taxa de Calor Rec - Req Permanente	kW			42,086			36,694		
Taxa de Calor Rec - Req Trans (Total)	kWh/mês			1724,580			1714,521		
Taxa de Calor Rec - Req Perm (Total)	kWh/mês			1231,016			901,042		
Energia Térmica Total - COG	kWh/mês			2955,596			2615,562		
Volume total disponível (85°C) - Mês	l/mês			42356			37483		
Volume total disponível (40°C) - Mês	litros/mês			169424			149932		
Volume disponível (40°C) - Dia	litros/dia			7819,553			6919,935		
Vazão equivalente (40°C)	l/min			40,920			35,400		
Qtd disponível de chuv durante a COG				13			12		
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/mês			5542			4904		
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/dia			256			226		
Qtd Banhos Disp. durante a COG	Banho/dia			108			79		
Qtd Banhos Disp. - PUC - COG	Banho/dia			81			68		
Potência elétrica do chuveiro	kW			3,200			3,200		
Consumo de energia elétrica por Banho	kWh/Banho			0,533			0,533		
Energia elétrica total - Dia - PUC-Rio	kWh/dia			43,200			36,267		
Energia Elétrica Total - Chuveiro	kWh/mês			936,000			785,778		
Energia Elétrica Total - Gerada	kWh/mês			1625,000			1365,000		
Custo geração energia elétrica				HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
LIGHT	R\$/mês			2205,80		808,71	1852,87		679,32
MT-C30	R\$/mês			1382,28			1189,57		
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês			1270,54	210,13	465,82	1066,63	176,41	391,06
Custo geração energia térmica	R\$/mês			4011,97	663,53	1470,91	3550,40	587,19	1301,69
Custo vs Economia				Situação1	Situação2	Situação3	Situação1	Situação2	Situação3
Custo 1 Energia elét (gerada)				HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
Custo geração energia elétrica	R\$/mês			2205,80	0,00	808,71	1852,87	0,00	679,32
Economia 1	R\$/mês			823,52	0,00	-573,57	663,30	0,00	-510,25
Custo 2 Energia elét (ger + chuv)				Situação1	Situação2	Situação3	Situação1	Situação2	Situação3
Custo geração energia elétrica	R\$/mês			2205,80	0,00	808,71	1852,87	0,00	679,32
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês			1270,54	210,13	465,82	1066,63	176,41	391,06
Custo total	R\$/mês			3476,34	2415,93	1274,53	2919,50	2029,28	1070,38
Economia 2	R\$/mês			2094,06	1033,65	-107,75	1729,93	839,71	-119,19
Custo 3 Energia (elét + térm)				Situação1	Situação2	Situação3	Situação1	Situação2	Situação3
Custo geração energia elétrica	R\$/mês			2205,80	0,00	808,71	1852,87	0,00	679,32
Custo geração energia térmica total	R\$/mês			4011,97	663,53	1470,91	3550,40	587,19	1301,69
Custo total	R\$/mês			6217,77	2869,33	2279,62	5403,27	2440,06	1981,01
Economia 3	R\$/mês			4835,49	1487,05	897,34	4213,71	1250,50	791,44
Coeracão - Sistema Híbrido (Aux)									
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/dia								
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/mês								
Custo Energia complementar									
Custo energia elétrica compl / chuveiro	R\$/mês								
Economia 2 - Sistema Hib	R\$/mês								

Tabela 30 – Estudo de Viabilidade Econômica – 2º Caso (continuação)

Parâmetro		Condição						
		50% (14 kW)			25% (7 kW)			
Potência elétrica Nominal	kW	14,000			7,000			
Potência elétrica Gerada	kW	14,000			7,000			
CEC	Nm³/kWh	0,642			0,700			
Consumo de GN	Nm³/h	8,988			4,9			
	Nm³/mês	584,220			318,500			
Custo energia el. MT-C30 - Cons1 GN	R\$/kWh	1,361			1,483			
Custo energia el. MT-C30 - Cons2 GN	R\$/kWh	0,757			0,826			
Custo energia el. MT-C30 - Cons Médio	R\$/kWh	0,964			1,239			
Cogeração								
Temperatura de estabilização	°C	85,00			85,00			
Tempo de aquecimento	min	147			0			
	h	2,450			0,000			
Tempo de aquec - Reg Trans (Total)	H/mês	53,083			0,000			
Tempo de aquec - Reg Perm (Total)	H/mês	11,917			0,000			
Vazão - consumo máximo	l/min	6,670			0,000			
Taxa de Calor Rec - Reg Transiente	kW	32,419			0,000			
Taxa de Calor Rec - Reg Permanente	kW	27,505			0,000			
Taxa de Calor Rec - Reg Trans (Total)	kWh/mês	1720,909			0,000			
Taxa de Calor Rec - Reg Perm (Total)	kWh/mês	327,768			0,000			
Energia Térmica Total - COG	kWh/mês	2048,677			0,000			
Volume total disponível (85°C) - Mês	l/mês	29359			0			
Volume total disponível (40°C) - Mês	litros/mês	117436			0			
Volume disponível (40°C) - Dia	litros/dia	5420,138			0,000			
Vazão equivalente (40°C)	l/min	26,680			0,000			
Qtd disponível de chuv durante a COG		9			0,00			
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/mês	3841			0			
Qtd Banhos Disponíveis - Total	Banho/dia	177			0			
Qtd Banhos Disp. durante a COG	Banho/dia	29			0			
Qtd Banhos Disp. - PUC - COG	Banho/dia	33			0			
Potência elétrica do chuveiro	kW	3,200			3,200			
Consumo de energia elétrica por Banho	kWh/Banho	0,533			0,533			
Energia elétrica total - Dia - PUC-Rio	kWh/dia	17,600			0,000			
Energia Elétrica Total - Chuveiro	kWh/mês	381,333			0,000			
Energia Elétrica Total - Gerada	kWh/mês	910,000			455,000			
Custo geração energia elétrica			HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
LIGHT	R\$/mês	1235,25		452,88		617,62		226,44
MT-C30	R\$/mês	877,14				563,65		
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês	517,63	85,61	189,78	0,00	0,00	0,00	
Custo geração energia térmica	R\$/mês	2780,90	459,93	1019,56	0,00	0,00	0,00	
Custo vs Economia			Situação1	Situação2	Situação3	Situação1	Situação2	Situação3
Custo 1 Energia elét (gerada)			HP	FHP	B1	HP	FHP	B1
Custo geração energia elétrica	R\$/mês	1235,25	0,00	452,88		617,62	0,00	226,44
Economia 1	R\$/mês	358,10	0,00	-424,26		53,98	0,00	-337,21
Custo 2 Energia elét (ger + chuv)								
Custo geração energia elétrica	R\$/mês	1235,25	0,00	452,88		617,62	0,00	226,44
Custo energia elétrica / chuveiro	R\$/mês	517,63	85,61	189,78		0,00	0,00	0,00
Custo total	R\$/mês	1752,87	1320,86	642,66		617,62	617,62	226,44
Economia 2	R\$/mês	875,73	443,71	-234,48		53,98	53,98	-337,21
Custo 3 Energia (elét + térm)								
Custo geração energia elétrica	R\$/mês	1235,25	0,00	452,88		617,62	0,00	226,44
Custo geração energia térmica total	R\$/mês	2780,90	459,93	1019,56		0,00	0,00	0,00
Custo total	R\$/mês	4016,15	1695,17	1472,44		617,62	617,62	226,44
Economia 3	R\$/mês	3139,01	818,03	595,30		53,98	53,98	-337,21
Cogeração - Sistema Híbrido (Aux)								
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/dia	13,760						
Energia elétrica complementar / chuveiro	kWh/mês	298,134						
Custo Energia complementar			HP	FHP	B1			
Custo energia elétrica compl / chuveiro	R\$/mês	404,69	66,93	148,37				
Economia 2 - Sistema Hib	R\$/mês	471,04	376,78	-382,86				

Na cogeração do 1º Caso com carga de 25%, além de necessitar de um tempo maior para o aquecimento, foi observado que esta não atenderia à demanda necessária para todos os chuveiros da PUC-Rio, sendo necessário um sistema híbrido complementar, o mesmo acontecendo para a condição de 50% da carga no 2º Caso.

Para a aplicação da cogeração do 2º Caso no uso em chuveiros, notou-se como um agravante o maior tempo para aquecimento da água.

O desempenho inferior do 2º Caso para com o 1º Caso deve-se ao fato de que na medida que exige-se uma temperatura maior da água, acarreta numa menor absorção de energia (calor) no trocador e conseqüentemente um aumento na temperatura de saída dos gases, contudo mantendo a efetividade estável.

Observou-se também que uma forma prática de melhorar o desempenho, para ambos os casos, seria a utilização de mais um reservatório térmico em paralelo, otimizando o uso da água quente e uma maior taxa de recuperação de calor.

A seguir, uma tabela comparativa do percentual do total da energia térmica recuperada ao mês em relação ao total da energia elétrica gerada para ambos os casos:

Tabela 31 – Tabela comparativa - Percentual de energia térmica

Condição	Microturb.	1º Caso		2º Caso	
	Energia elétrica	Energia térmica	%	Energia térmica	%
Carga	KWh/mês	KWh/mês		KWh/mês	
100%	1625	3372	207,5	2955	181,8
75%	1365	2972	217,7	2615	191,5
50%	910	2305	253,3	2048	225,0
25%	455	1669	366,8	-	-

De acordo com o estudo realizado para a cogeração, onde se determinaram os diferentes custos e as possíveis economias, de forma a indicar uma melhor situação para viabilidade econômica declara-se o seguinte:

Nos estudos propostos ficou evidente uma tendência natural do sistema de cogeração em aplicações onde há a exigência da energia térmica como energia primária.

Devido ao grande potencial para geração de energia térmica ficou claro nas simulações e estudos a necessidade do uso maximizado da energia térmica para uma melhor economia e retorno de capital.

Ao contrário do que possa parecer, a melhor situação que gerou melhores economias foi na cogeração aplicada ao uso de água quente com temperaturas não muito altas, como no caso aqui estudado (40°C).

A viabilidade econômica para aplicação da cogeração em residências ou em pequenos empreendimentos, que utilizam a tarifa B1, se mostrou mais crítica, devido à necessidade de uma grande demanda de energia térmica. Contudo, nos casos onde se adequam este requisito, os estudos demonstraram que a economia gerada poderá representar quase 50% do valor a ser pago pela energia elétrica nas mesmas condições de uso.

Como exemplo, pode-se citar a aplicação da cogeração a 100% de carga do 1º Caso, onde utilizando todo o potencial de energia térmica, foi gerada uma economia de R\$ 1104, o que representou 44% do valor que seria gasto com energia elétrica, mostrando-se favorável para a sua viabilidade econômica.

Para o caso de usuários da tarifa THS A4 ficou demonstrado que a viabilidade econômica da cogeração se torna mais significativa, principalmente quando operada no horário de ponta, devido às altas tarifas cobradas. Nos dois casos estudados observou-se economias bem variadas. Aplicando novamente o caso para cogeração citada no exemplo acima, foi observada as maiores economias no estudo, que variaram de R\$ 1500 a R\$ 5400, onde algumas delas representaram mais de 80% do valor gasto em energia elétrica.

Foi observado também que as tarifas para o gás natural se mostraram altas, inibindo principalmente a cogeração com cargas de potência elétrica mais baixas.