

METODOLOGIA DE ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA EM SISTEMAS DE TRIGERAÇÃO

Fernando Eustáquio de Lima

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
fernbnh@yahoo.com.br

Alexandre Marcial da Silva

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
alexmarcial@yahoo.com.br

Elizabeth Marques Duarte Pereira

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
green@pucminas.br

José Ricardo Sodré

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
ricardo@pucminas.br

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliação de sistemas de trigeriação aplicados ao setor terciário, baseado em análise energética e exergética. Um modelo numérico foi desenvolvido para automatizar os cálculos. Os resultados obtidos das análises foram submetidos a uma análise econômica para verificação do prazo de retorno de investimento sob diferentes cenários. Uma análise de sensibilidade de parâmetros, como custo do gás natural, condições de financiamento e de dimensionamento da instalação, também foi executada. Um estudo de caso foi realizado tomando-se por base o Hospital João XXIII, localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais. A configuração apresentou uma eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica de 75 % e uma eficiência de Segunda Lei de 37 %, implicando em uma redução de 37 % no consumo de combustível, quando comparado com uma mesma produção de energia por sistemas convencionais operando isoladamente. O preço do gás natural foi o fator mais relevante da análise de retorno do investimento que, neste caso, resultou em sete anos para uma redução de 50 % no valor da tarifa considerada para o gás natural.

Palavras chave: análise energética, análise exergética, trigeriação, hospitais.

1. Introdução

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais privilegiado com uma vasta bacia hidrográfica, optou pelos sistemas de hidroeletricidade como base de geração elétrica, que garantiu até recentemente todas as necessidades de eletricidade para o desenvolvimento do país. Com as recentes mudanças climáticas ocorreu no ano de 2000 um período de escassez de chuvas, provocando grande redução nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Como consequência, ocorreu uma queda na capacidade de geração elétrica, trazendo à tona a fragilidade de se apoiar toda a demanda elétrica de um país em praticamente uma única opção de geração. A geração hidrelétrica em 1998 era cerca de 65 GW, o que correspondia a 87 % de toda a energia elétrica gerada no país, sendo os 12,9 % restantes gerados principalmente por termelétricas e centrais nucleares (BEN, 1999). Um modelo de racionamento energético foi imposto com urgência, desestabilizando o crescimento econômico e causando desconforto à população pelas medidas emergenciais adotadas. Nesta mesma época, o governo federal decidiu incentivar a diversificação do parque gerador elétrico nacional através da criação do PROINFA (Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de Energia) e do PPT (Programa Prioritário de Termelétricas). Neste contexto, passa a ter maior importância a busca por diferentes soluções para geração de eletricidade e inicia-se o incentivo aos programas de uso racional das fontes energéticas.

Entende-se por sistemas de trigeriação aqueles que produzem, a partir de um mesmo combustível, energia elétrica e térmica, esta última aproveitada na forma de calor e frio. Um sistema de trigeriação é um ciclo de cogeração que produz eletricidade e vapor, associado a um ou mais *chillers* de absorção. Comparado aos sistemas convencionais de geração de energia, os sistemas de trigeriação apresentam maiores eficiências globais e uma significativa redução nos impactos ambientais. A Fig. 1 apresenta um esquema típico de trigeriação, no qual a potência mecânica gerada pela turbina ou motor a gás é usada no acionamento de alternadores para produção de eletricidade. Os gases de exaustão desta fonte motriz são utilizados para trocar calor em uma caldeira de recuperação, produzindo vapor ou água a alta temperatura.

Uma parte deste insumo é utilizada no processo e a outra parte é enviada ao gerador do *chiller* de absorção para produção de água gelada. A Fig. 2 representa o fluxo da conversão da energia em um ciclo de trigeração.

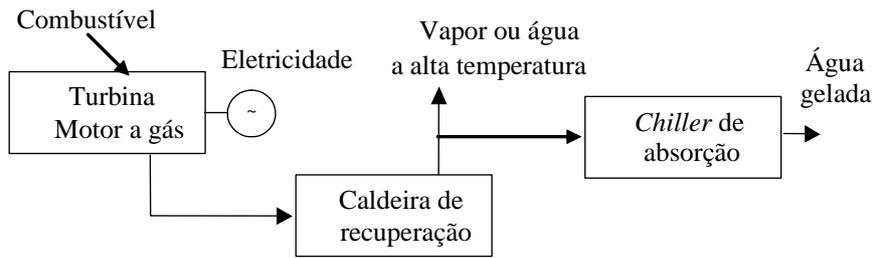


Figura 1– Esquema típico de trigeração.

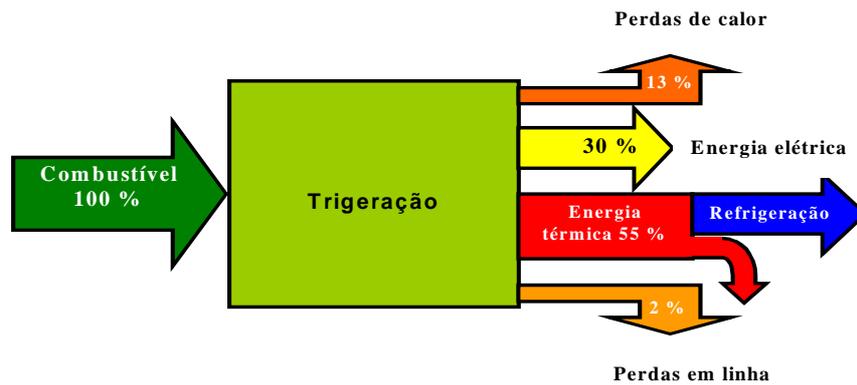


Figura 2 – Conversão da energia em um ciclo de trigeração (adaptado de TRIGEMED (2004)).

Elliott e Spurr (1999) apresentaram estudo citando a eficiência de um equipamento CHP obtida através da contribuição das eficiências individuais dos equipamentos. Os autores verificaram que a eficiência global pode ultrapassar 80 %, quando a produção térmica é superior à produção elétrica. Segundo White e Knowles (1999), a eficiência de um equipamento CHP no inverno é 75% e, no verão, 45%. Sistemas de cogeração e trigeração utilizando gás natural como combustível vêm sendo instalados no Brasil e as indústrias de bebidas são as pioneiras no emprego destas tecnologias. A Tab. 1 apresenta dados de sistemas instalados nos Estados do Rio de Janeiro e em São Paulo.

Tabela 1 - Alguns sistemas de cogeração e trigeração instalados no Brasil.

INDÚSTRIA	CIDADE	EQUIPAMENTOS	UTILIZADAS	PRODUZIDAS
Ambev	Rio de Janeiro	Turbina a gás Caldeira de recuperação	Eletricidade	13,5 MW
			Vapor	175 ton/h
Coca-Cola	Jundiaí	Motor a gás Caldeira de recuperação Chiller de absorção	Eletricidade	8 MW
			Vapor	6 ton/h
			Refrigeração	1.000 TR *
			Água quente	9 MW
			CO ₂	80 ton/dia
Coca-Cola	Rio de Janeiro	Motor a gás Caldeira de recuperação Chiller de absorção	Eletricidade	4,8 MW
			Vapor	3,6 ton/h
			Refrigeração	800 TR
			Água quente	4 MW
O Globo	Rio de Janeiro	Motor a gás Caldeira de recuperação Chiller de absorção	Eletricidade	5,4 MW
			Refrigeração	1.500 TR
Projac	Rio de Janeiro	Motor a gás Caldeira de recuperação Chiller de absorção	Eletricidade	4,8 MW
			Refrigeração	1.000 TR
			Água quente	2 MW

Fonte: Cogesar (2004)

* Tonelada de Refrigeração (TR) equivale a 3,518 kW.

2. Metodologia

O critério para avaliação do desempenho do ciclo convencional de geração de potência elétrica baseado na Primeira Lei é dado por Li (1996):

$$\eta_c = \frac{\dot{W}}{F_c} \quad (1)$$

Onde \dot{W} é a potência elétrica gerada, F é a energia de combustível e o subscrito c está relacionado a plantas de geração de energia convencional, sem cogeração ou trigeração. A Fig. 3 apresenta o esquema de um sistema de trigeração onde ocorre a geração simultânea de potência elétrica, vapor e água gelada.

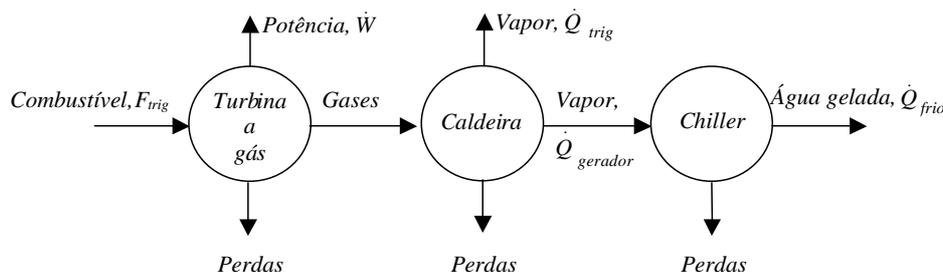


Figura 3 – Esquema típico de um sistema de trigeração

Baseando nas equações de Li (1996), define-se o fator de utilização da energia (EUF_{trig}) como um índice que avalia o desempenho do sistema de trigeração pela Primeira Lei da Termodinâmica.

$$EUF_{trig} = \frac{\dot{Q}_{trig} + \dot{Q}_{frio} + \dot{W}_{trig}}{F_{trig}} \quad (2)$$

onde \dot{Q}_{trig} é a potência térmica em forma de vapor destinado aos processos da instalação, \dot{Q}_{frio} a potência de refrigeração, \dot{W}_{trig} a potência elétrica gerada e F_{trig} é a energia do combustível fornecida ao sistema, dada por:

$$F_{trig} = m_f \cdot PCI \quad (3)$$

Na Eq. (2), a potência elétrica recebe o mesmo tratamento das potências térmicas geradas, entretanto a energia elétrica é muito mais valiosa que a térmica. Isto ocorre pelo fato destas equações terem sido avaliadas pela Primeira Lei da Termodinâmica. O critério de avaliação de desempenho pela Segunda Lei é dado pelo fator de utilização da disponibilidade (AUF_{trig}):

$$AUF_{trig} = \frac{A_{vaprocesso} + A_{frio} + A_w}{A_f} \quad (4)$$

sendo $A_{vaprocesso}$ a disponibilidade recebida pelo vapor de processo, A_{frio} a disponibilidade produzida em forma de água gelada, A_w a disponibilidade da transferência de trabalho, ou seja, a disponibilidade produzida em forma de eletricidade e A_f a entrada de disponibilidade através do combustível no sistema.

Outra forma de avaliação do desempenho da trigeração é a comparação entre a quantidade de combustível necessária para geração das potências úteis com a quantidade de combustível necessária para geração dos mesmos índices de potência através de equipamentos separados. A economia de combustível ΔF_{trig} , baseado em Li (1996), é dada por:

$$\Delta F_{trig} = \frac{\dot{Q}_{trig}}{\eta_{cald}} + \frac{\dot{Q}_{frio}}{COP} + \frac{\dot{W}_{trig}}{\eta_c} - F_{trig} \quad (5)$$

em que η_{cald} , COP e η_c são respectivamente, a eficiência da caldeira, do *chiller* e do motor ou turbina a gás pela Primeira Lei.

A razão entre a economia de combustível (ΔF_{trig}) e o consumo de combustível requerido pelo sistema convencional é a taxa de economia da energia de combustível ($FESR_{trig}$) expressa como:

$$FESR_{trig} = \frac{\Delta F_{trig}}{\frac{\dot{Q}_{trig}}{\eta_{cald}} + \frac{\dot{Q}_{frio}}{COP} + \frac{\dot{W}_{trig}}{\eta_c}} = 1 - \frac{F_{trig}}{\frac{\dot{Q}_{trig}}{\eta_{cald}} + \frac{\dot{Q}_{frio}}{COP} + \frac{\dot{W}_{trig}}{\eta_c}} \quad (6)$$

Esta mesma avaliação pode ser feita utilizando-se o conceito da disponibilidade. A taxa de economia da disponibilidade de combustível ($FASR_{trig}$) é obtida através da economia de disponibilidade (ΔA_f).

$$\Delta A_{trig} = \frac{A_{vaprocesso}}{\varepsilon_{cald}} + \frac{A_{frio}}{\varepsilon_a} + \frac{\dot{W}_{trig}}{\varepsilon_c} - A_f \quad (7)$$

sendo que, ε_{cald} , ε_a e ε_c são respectivamente, a eficiência da caldeira, do *chiller* do motor ou turbina a gás pela Segunda Lei.

$$FASR_{trig} = \frac{\Delta A_{trig}}{\frac{A_{vaprocesso}}{\varepsilon_{cald}} + \frac{A_{frio}}{\varepsilon_a} + \frac{\dot{W}_{trig}}{\varepsilon_c}} = 1 - \frac{A_f}{\frac{A_{vaprocesso}}{\varepsilon_{cald}} + \frac{A_{frio}}{\varepsilon_a} + \frac{\dot{W}_{trig}}{\varepsilon_c}} \quad (8)$$

A equação do $FASR_{trig}$ é similar à do $FESR_{trig}$. A primeira utiliza o conceito da disponibilidade enquanto que a segunda utiliza o conceito da conservação da energia. Quando o combustível para um sistema de trigerção for o mesmo que o utilizado na geração convencional, estes parâmetros devem apresentar o mesmo valor numérico (Li, 1996).

3. Coeficientes Típicos da Trigerção

Os produtos dos sistemas de trigerção são a potência térmica em forma de vapor (\dot{Q}_{trig}), a potência de refrigeração (\dot{Q}_{frio}) e a potência elétrica (\dot{W}_{trig}). Li (1996) relata que a relação entre estas potências é uma forma de qualificá-los. Desta forma, as Eq. (9) e (10) representam estas relações:

$$\alpha_{trig} = \frac{\dot{Q}_{trig}}{\dot{W}_{trig}} \quad (9)$$

$$\kappa_{trig} = \frac{\dot{Q}_{frio}}{\dot{W}_{trig}} \quad (10)$$

A representação da Eq. (2) em função de α_{trig} e κ_{trig} é expressa pela Eq. (11).

$$EUF_{trig} = (1 + \alpha_{trig} + \kappa_{trig}) \cdot \eta_{trig} \quad (11)$$

onde η_{trig} é a eficiência da máquina térmica que produz a potencia elétrica pela Primeira Lei. Em termos de equação η_{trig} é expresso por:

$$\eta_{trig} = \frac{\dot{W}_{trig}}{F_{trig}} \quad (12)$$

A taxa de economia da energia de combustível $FESR_{trig}$ em termos de α_{trig} , κ_{trig} e η_{trig} é dada por:

$$FESR_{trig} = 1 - \frac{1}{\eta_{trig} \left(\frac{\alpha_{trig}}{\eta_{cald}} + \frac{\kappa_{trig}}{COP} + \frac{1}{\eta_c} \right)} \quad (13)$$

Pelo conceito da disponibilidade afirma-se que os produtos da trigerção são a disponibilidade térmica em forma de vapor ($A_{vaprocesso}$), a disponibilidade produzida em forma de água gelada (A_{frio}) e a disponibilidade da transferência de trabalho (A_w). Então, define-se (β_{trig}) e o (σ_{trig}) como sendo os parâmetros de avaliação equivalentes aos (α_{trig}) e (κ_{trig}) da análise pela Primeira Lei.

$$\beta_{trig} = \frac{A_{vaprocesso}}{A_w} \quad (14)$$

$$\sigma_{trig} = \frac{A_{frio}}{A_w} \quad (15)$$

A representação da Eq. (4) em função de β_{trig} e σ_{trig} é expressa pela Eq. (16).

$$AUF_{trig} = (1 + \beta_{trig} + \sigma_{trig}) \cdot \varepsilon_{trig} \quad (16)$$

onde ε_{trig} é a eficiência da máquina térmica que produz a potencia elétrica pela Segunda Lei, expressada por:

$$\varepsilon_{trig} = \frac{A_w}{A_f} \quad (17)$$

A Eq. (8) em função de β_{trig} , σ_{trig} e ε_{trig} pode ser expressa por:

$$FASR_{trig} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_{trig} \left(\frac{\beta_{trig}}{\varepsilon_{cald}} + \frac{\sigma_{trig}}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_c} \right)} \quad (18)$$

Na trigerção, os parâmetros β_{trig} e σ_{trig} que são baseados no conceito da disponibilidade deverão ser sempre menores que os parâmetros α_{trig} e κ_{trig} . Entretanto, o fator de utilização da disponibilidade é mais razoável e realístico que o fator de utilização da energia para avaliar o desempenho de sistemas de trigerção (Li, 1996).

4. Irreversibilidades

Na análise pela Segunda Lei da Termodinâmica é importante avaliar as irreversibilidades geradas pelos sistemas. A irreversibilidade para um sistema de trigerção é dada por:

$$I_{trig} = A_f - A_w - A_{frio} - A_{vaprocesso} \quad (19)$$

5. Estudo de Caso

A Tab. 2 representa a participação de cada centro de consumo na potência instalada no Hospital João XXIII. O percentual do consumo levantado foi obtido em função de estimativas de tempo de operação e funcionamento (CICE, 2003). O consumo médio mensal de 332.200 kWh por equipamento foi baseado na média da conta de energia durante o ano de 2004.

Tabela 2 – Caracterização energética dos centros de consumo do Hospital João XXIII.

USO FINAL	POTÊNCIA INSTALADA (kW)	CONSUMO LEVANTADO	
		%	kWh/mês
Aparelhos diversos	127	8,40	27.905
Ar comprimido e vácuo	40	3,60	11.959
Ar condicionado	425	42,00	139.524
Autoclave	80	5,30	17.607
Bombeamento de água	28	1,80	5.980
Elevadores	108	7,20	23.918
Iluminação	130	17,00	56.474
Máquinas de lavanderia	64	4,20	13.952
Sistema de refrigeração	29	2,00	6.644
Ventilação/Exaustão	112	7,50	24.915
Outros	13	1,00	3.322
Total	1.156	100	332.200

Fonte: CICE (2003) e Conta de energia da Cemig (2004)

Os cálculos das eficiências térmicas dos equipamentos atualmente existentes no Hospital João XXIII foram calculadas tomando-se por base as equações apresentadas nas Seções 2 e 3. A Tab. 3 apresenta os resultados obtidos através destes cálculos.

Tabela 3 – Resultados das eficiências calculadas.

EQUIPAMENTO	LEI	EFICIÊNCIA
Caldeira Flamotubular	Primeira Lei	$\eta_{cald} = 55,2\%$
	Segunda Lei	$\varepsilon_{cald} = 24,2\%$
Chillers de Compressão	Primeira Lei	COP= 1,44
	Segunda Lei	Não calculado

Os valores obtidos para as eficiências térmicas são considerados baixos. Entretanto, deve-se considerar que foram baseados em informações de consumo de longo prazo, como médias anuais.

O sistema de trigeração proposto utiliza o ciclo da turbina a gás, que nesta configuração visa atender prioritariamente o consumo de vapor, calculado em 4.665 kg/h, sendo que destes, 1.584 kg/h são destinados ao *chiller* de absorção e o restante para os processos hospitalares. Os dados técnicos da turbina selecionada estão relacionados na Tab. 4:

Tabela 4 – Dados técnicos da turbina.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Potência	1590 kW
Eficiência	25 %
Vazão de gás	8,53 kg/s
Temperatura do gás	565 °C
Razão de compressão	6,6
Fabricante	OPRA
Modelo	OP-16S1A

Devido à substituição dos dois *chillers* de compressão por um de absorção a demanda elétrica estimada para o horário de ponta passa ser de 410 kW. O excedente 1180 kW de energia elétrica a ser produzido com esta configuração pode ser, por exemplo, disponibilizado para venda no Mercado Atacadista de Energia. A escolha de uma turbina a gás para o sistema proposto se justifica pelo fato destes equipamentos serem mais adequados quando há necessidade de altas vazões de gás de exaustão com temperaturas mais elevadas.

Na especificação da caldeira de recuperação de calor sensível foram utilizados os dados técnicos das caldeiras flamotubulares instaladas, sendo selecionada a caldeira modelo AV-4 horizontal do fabricante Aalborg. O sistema proposto utiliza uma única caldeira de recuperação para atender à demanda de vapor nos processos hospitalares e, também, o consumo do *chiller* de absorção. Para especificação do *chiller* de absorção foi sugerido o emprego de *chillers* de duplo efeito, já que estes apresentam o COP maior que os equipamentos similares de simples efeito e a qualidade do vapor produzido pela caldeira de recuperação é adequado à sua necessidade. Para o estudo, o *chiller* selecionado foi o ABTF-380 do fabricante Trane, cujos dados de catálogo estão relacionados a seguir na Tab. 5.

Tabela 5 – Dados técnicos do *chiller*.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Capacidade	1266 kW
COP	1,20
Razão de Vapor	1,25 kg/kWh
Vazão de água gelada	196 m ³ /h
Temperatura da água gelada na entrada do <i>chiller</i>	12,20 °C
Temperatura da água gelada na saída do <i>chiller</i>	6,67 °C

A demanda atual de água gelada do hospital é de 802 kW e o excedente de 464 kW, previsto nesta configuração, para atendimento à necessidade de climatização em áreas que não dispõe desta utilidade atualmente, como os ambulatórios do andar térreo, a cozinha e a lavanderia. Nestas áreas a temperatura média anual é bem superior à temperatura ambiente, tornando-se áreas praticamente insalubres.

Os resultados a serem apresentados na seqüência foram calculados no programa computacional TrigerTG, desenvolvido por Lima (2005). A Fig. 4 representa o esquema do sistema de trigeração proposto para o hospital com a representação dos dados de entrada para os cálculos a serem realizados. As Tabs. 6 a 9 apresentam os resultados para turbina a gás, caldeira de recuperação de calor sensível, *chiller* de absorção e os parâmetros de desempenho calculados pela Primeira Lei da Termodinâmica. As Tabs. 7 os resultados nesta seqüência calculados pela Segunda Lei da Termodinâmica.

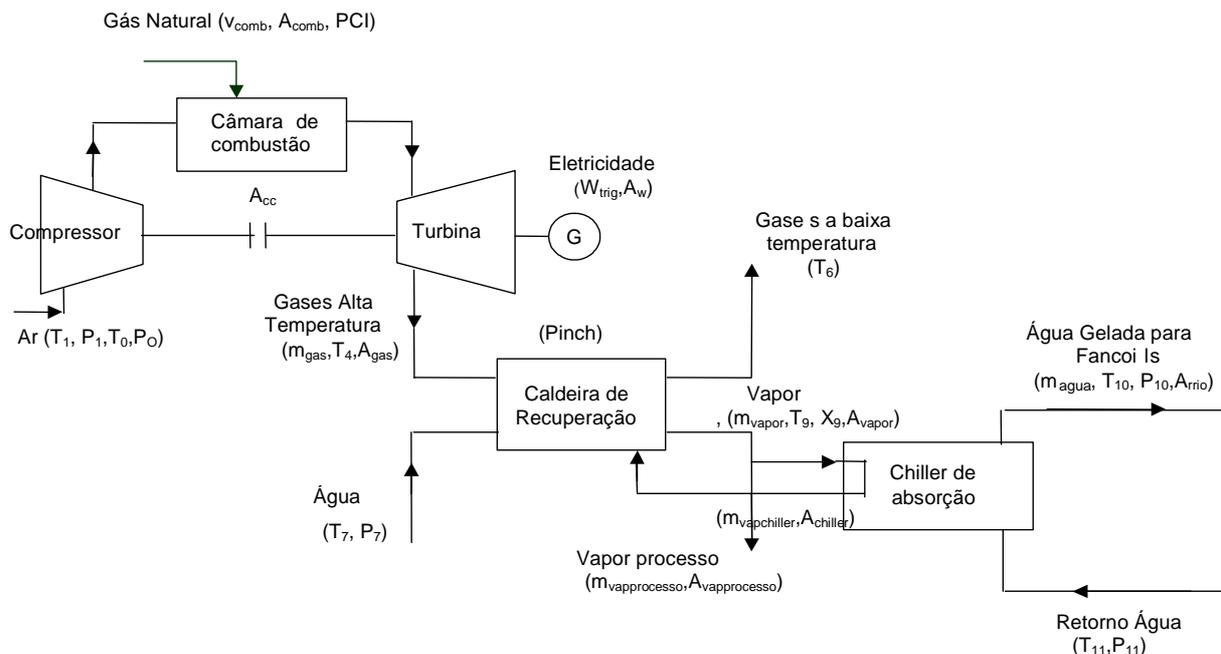


Figura 4 – Esquema do sistema de trigeração com parâmetros da Primeira Lei e da Segunda Lei.

Tabela 6 – Resultados dos cálculos para o ciclo da turbina a gás pela Primeira Lei.

PARÂMETRO	VALOR
Temperatura do ar na entrada do compressor – T_1	288 K
Pressão do ar na entrada do compressor - P_1	93 kPa
Volume de combustível admitido - \dot{V}_f	0,1691 Nm ³ /s
Poder Calorífico Inferior do Gás Natural – PCI	50.050 kJ/kg
Potência Elétrica - W_{trig}	1.590 kW
Temperatura dos gases na exaustão – T_4	838 K
Vazão mássica dos gases - \dot{m}_{gas}	8,53 kg/s
Eficiência - η_{tg}	28,35 %

Tabela 7 – Resultados dos cálculos para a caldeira de recuperação pela Primeira Lei.

PARÂMETRO	VALOR
Vazão mássica de vapor - \dot{m}_{vapor}	1,296 kg/s
Vazão de vapor destinado aos processos - $\dot{m}_{vaprocesso}$	0,856 kg/s
Vazão de vapor destinada ao <i>chiller</i> - $\dot{m}_{vapchiller}$	0,4396 kg/s
Temperatura dos gases para atmosfera – T_6	423 K
Temperatura da água na entrada da caldeira de recuperação – T_7	90 °C
Temperatura do vapor – T_9	212,4 °C
Pressão da água na entrada da caldeira de recuperação – P_7	2.000 kPa
Pressão do vapor na saída da caldeira de recuperação – P_9	2.000 kPa
Título do vapor – X_9	1
Pinch Point – P_{inch}	28,36 °C
Eficiência - η_{cald}	80 %

Tabela 8 – Resultados para os cálculos do *chiller* de absorção pela Primeira Lei.

PARÂMETRO	VALOR
Pressão da água gelada na saída do <i>chiller</i> - P_{10}	2.500 kPa
Pressão da água gelada retornando ao <i>chiller</i> - P_{11}	2.000 kPa
Temperatura da água na saída do <i>chiller</i> - T_{10}	6,67 °C
Temperatura da água gelada retornando ao <i>chiller</i> - T_{11}	12,2 °C
Coefficiente de Desempenho – COP	1,20

Tabela 9 – Parâmetros de Desempenho calculados pela Primeira Lei.

PARÂMETRO	VALOR
α_{trig}	1,303
κ_{trig}	0,7962
EUF_{trig}	0,7748
$FESR_{trig}$	0,3643

Tabela 10 – Resultados para os cálculos do ciclo da turbina a gás pela Segunda Lei.

PARÂMETRO	VALOR
Disponibilidade que entra no sistema através do combustível – A_f	6.360 kW
Disponibilidade da transferência de calor na Câmara de Combustão - A_{cc}	4.729 kW
Disponibilidade que deixa a turbina através dos gases de exaustão - ΔA_{gas}	1.995 kW
Transferência de disponibilidade de trabalho - A_w	1.590 kW
Eficiência - ϵ_c	33,6 %

Tabela 11 – Resultados para os cálculos da caldeira de recuperação pela Segunda Lei.

PARÂMETRO	VALOR
Disponibilidade do vapor - A_{vapor}	1.147 kW
Disponibilidade do vapor destinado aos processos - $A_{\text{vaprocesso}}$	757,8 kW
Disponibilidade do vapor destinado ao consumo do <i>chiller</i> - $A_{\text{vapchiller}}$	389,2 kW
Eficiência - ϵ_{cald}	57,5 %

Tabela 12 – Resultados para os cálculos para o *chiller* de absorção pela Segunda Lei.

PARÂMETRO	VALOR
Disponibilidade da água gelada - A_{frio}	1,87 kW
Eficiência - ϵ_a	0,48 %

Tabela 13 – Parâmetros de desempenho pela Segunda Lei.

PARÂMETRO	VALOR
β_{trig}	0,4766
σ_{trig}	0,00118
AUF_{trig}	0,3694
$FASR_{\text{trig}}$	0,01178

A baixa eficiência pela Segunda Lei do *chiller* de absorção ocorre porque o mesmo requer vapor a 212,4°C para diminuir a temperatura da água de climatização de 12,2 °C para 6,67 °C. Por este motivo atribui-se ao *chiller* o maior percentual de degradação da disponibilidade do sistema, totalizando 99,5 %.

6. Análise de sensibilidade

A fim de avaliar a viabilidade econômica do sistema de trigerção foram simulados seis cenários diferenciados por tópicos, relacionados a seguir. A Tab. 14 representa os custos de operação e manutenção anual avaliados em março de 2005. Os investimentos previstos para aquisição dos equipamentos necessários para configuração do sistema de trigerção proposto estão relacionados na Tab. 15. A Tab. 16 tem como finalidade referenciar o custo do investimento em equipamentos padronizados usados na trigerção. A Tab. 17 representa os dados referentes à simulação dos custos operacionais após a instalação do sistema de trigerção.

Tabela 14 – Custos operacionais atuais.

PARÂMETRO	CONSUMO MENSAL	CUSTO ANUAL
Energia Elétrica	332.200 kWh	R\$ 816.273,31
Óleo BPF	45.000 kg	R\$ 492.750,00
Funcionários	R\$ 1.500,00/Funcionário	R\$ 126.342,45 (3 Funcionários)
Manutenção	2 % dos Equipamentos	R\$ 41.010,00
Parada (Cada 5 anos)	4 % dos Equipamentos	R\$ 82.020,00

Fonte: CICE (2005) e Coelho (2001)

Tabela 15 – Custo do investimento para o sistema proposto.

EQUIPAMENTO	VALOR (US\$)
Turbina a Gás	\$1.033.500
Caldeira de recuperação	\$310.050
Chiller de absorção	\$270.000
Total	\$1.613.550

Tabela 16 – Custo de investimento em equipamentos para trigeração.

EQUIPAMENTO	CUSTO (US\$/kW)
Turbina a gás	500 – 850
Caldeira de Recuperação de calor	90 – 210
Chiller de absorção de simples efeito Água-BrLi	199 - 210
Chiller de absorção de duplo efeito Água-BrLi	213 - 223
Chiller de absorção de Água-NH ₃	285 – 398
Chiller de compressão	270 - 300

Fontes: Dhamadhikari (2000), Trigemed (2004) e Matche (2004).

Tabela 17 – Custos operacionais do sistema proposto.

PARÂMETRO	CONSUMO MENSAL	CUSTO ANUAL
Gás Natural	438.307 Nm ³	R\$ 3.249.237,02
Funcionários	R\$ 2.000,00/Funcionário	R\$ 224.608,80 (4 Funcionários)
Manutenção	2 % Equipamentos	R\$ 80.660,40
Parada (cada 5 anos)	4 % Equipamentos	R\$ 161.320,80

A Fig. 5 mostra uma análise de cenário, considerando o custo do gás natural R\$ 0,30465 por Nm³, com taxa de atratividade do mercado financeiro de 1,2 % ao mês e abatimento do custo de geração pela concessionária de US\$ 1,180,000.00. Uma redução de 50 % no custo da tarifa de gás natural foi proposta no cenário analisado e o investimento passou a ser viável, se pagando em 8 anos após a sua instalação. O tempo de vida útil estimado para os equipamentos utilizados nesta configuração é de 20 anos (Trigemed, 2004).

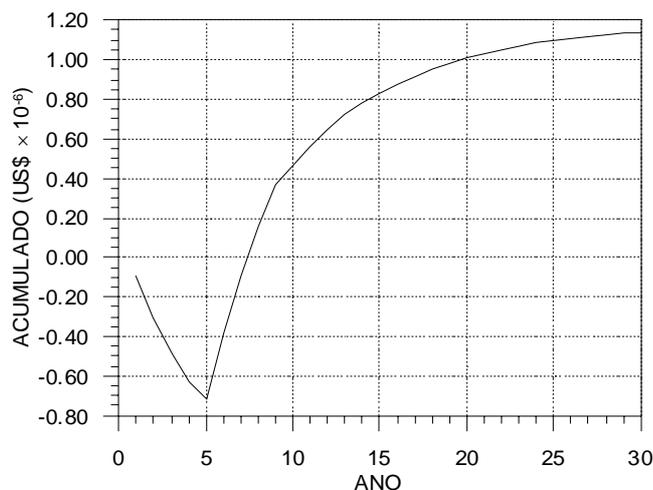


Figura 5 – Curva de retorno do investimento para o cenário analisado.

7. Conclusões

- Neste trabalho foi desenvolvida uma proposta metodológica de análise do desempenho energético e econômico de sistemas de trigeração.
- Esta simulação apresentou resultados satisfatórios no que tange aos conceitos termodinâmicos de eficiência, suprindo todas as necessidades de energia térmica e elétrica da instituição, além de apresentar um excedente de geração de eletricidade.
- A configuração proposta apresentou eficiência energética de 77,5 %, exergética de 37 %
- Se os resultados obtidos com a trigeração fossem comparados à mesma produção energética obtida por sistemas convencionais operando em separado, haveria uma redução no consumo de combustível de 36,4 %.
- A inexistência de uma política de incentivos à produção energética por cogeração no Estado de Minas Gerais acarreta um alto custo da tarifa do combustível, fazendo com que quaisquer investimentos desta natureza se tornem inviáveis na condição atual.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Eng. Rubens do Hospital João XXIII, aos gestores da rede FHEMIG pelas informações prestadas e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro a este projeto.

9. Referências

- BEN (Balanço Energético Nacional), 1999. Ministério de Minas e Energia.
- Cogerar Sistemas de Energia Ltda. Disponível em <http://www.cogerar.com.br>. Acessado em 11 de setembro de 2003.
- CICE (Comissão interna de Conservação de Energia), 2003. Comunicação Pessoal com membros do Hospital João XXIII, Belo Horizonte, MG.
- Coelho, G. B. P., Desenvolvimento de uma metodologia de análise e gestão energética para geração de água quente aplicada a indústria automotiva, Belo Horizonte-MG, 2001. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica, , Brasil.
- Dharmadhikari, S., 2000, "Trigeneration techniques for gas processing", Upstream, Ingeróp, Litwin – França.
- Elliott, R., e Spurr, M., 1999, "Combined heat and power: capturing wasted energy", ACEEE – American Council for an Energy-Efficient Economy.
- Matche. Disponível em <http://www.matche.com>. Acessado em 18 de novembro de 2004.
- Li, K. W., 1996, Applied Thermodynamics: Availability Method and Energy Conversion, 1 ed., Washington, Taylor & Francis.
- Lima, F. E., Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de sistemas de trigeriação com base nas leis da termodinâmica, Belo Horizonte-MG, 2005. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- Trigeneration Solution for the Mediterranean – Trigemed. Disponível em <http://www.trigemed.com>. Acessado em 12 de outubro de 2004.
- White, S.D., e Knowles, J., 1999, "A new trigeneration system for commercial buildings", Anais do 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, set., artigo n.143.

METHODOLOGY FOR ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF TRIGENERATION SYSTEMS

Fernando Eustáquio de Lima
Pontifical Catholic University of Minas Gerais
fernbh@yahoo.com.br

Alexandre Marcial da Silva
Pontifical Catholic University of Minas Gerais
alexmarcial@yahoo.com.br

Elizabeth Marques Duarte Pereira
Pontifical Catholic University of Minas Gerais
green@pucminas.com.br

José Ricardo Sodré
Pontifical Catholic University of Minas Gerais
ricardo@pucminas.com.br

Abstract

This work presents a methodology for evaluation of trigeneration systems applied to tertiary sector, based on energy and exergy analysis. A numerical model was developed to perform the calculations. The technical results obtained were submitted to an economical analysis to verify the investment return under different conditions. Sensibility to parameters such as natural gas cost, financing condition, and installation size were also evaluated. A case study was applied to João XXIII Hospital, located in the city of Belo Horizonte, state of Minas Gerais, Brazil. The proposed configuration presented First Law efficiency of 77.5%, Second Law efficiency of 37%, and fuel consumption reduction of 36.4%, when compared to the same energy production from conventional systems operating isolated. Natural gas price was the main factor in the analysis of investment return, which, in any case, would take seven years at a discount of 50% of the normal taxation.

Keywords: energy, exergy, trigeneration, hospital.