



8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA UNIDADE COGERATIVA PARA A CO-PRODUÇÃO DE ÁGUA GELADA EM UM CENTRO DE PESQUISA UTILIZANDO GÁS NATURAL E BIODIESEL

SANTOS, Alex Álisson B.*, TORRES, Ednildo A.º

*Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC– Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador–BA–Brasil, º Laboratório de Energia e Gás – Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente (CiEnAm) – Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Rua Professor Aristides Novis, nº 2 – Escola Politécnica, 3º Andar - Federação, Salvador–BA–Brasil
*alex.santos@cimatec.fieb.org.br

RESUMO

Apesar da aparente estabilização do fornecimento de energia no país, estudos recentes (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2004) indicam que a capacidade de produção de energia elétrica, em horário de ponta, para o Nordeste brasileiro, estará com cerca de 90% da capacidade instalada utilizada em 2009, o que aponta a necessidade que alguns empreendimentos devem possuir infra-estruturas próprias descentralizadas de produção de energia. Outro aspecto importante é o custo da energia elétrica, que já onera bastante o custo de operação de algumas instalações. O estudo em questão avalia através de uma análise exergética, um projeto básico preliminar de uma instalação de co-geração, que utiliza conjuntos motogeradores os quais possuem como fonte de energia a queima de gás natural e mistura de diesel/ biodiesel associados a chillers de absorção para a produção de energia elétrica e água gelada para sistema de ar condicionado central, de um centro de pesquisa localizada na cidade do Salvador- Bahia- Brasil. Palavras-chaves: Exergia, Análise Exergética, Co-Geração, Gás Natural, Biodiesel.

INTRODUÇÃO

Com a crise de fornecimento de energia elétrica no início do século XXI no país, soluções descentralizadas de geração de energia começaram a surgir como formas alternativas de geração de potência para médios e grandes consumidores, sejam do setor industrial ou comercial. Apesar da aparente normalização do fornecimento de energia, o Operador Nacional do Sistema Elétrico [1], estima que, por exemplo, 90% capacidade de produção de energia elétrica, em horário de ponta, estará sendo usada em 2009, o que mostra a real necessidade de soluções alternativas para a garantia do fornecimento de energia à sociedade. Outro aspecto relevante reside na diferenciação tarifária do fornecimento de energia elétrica para empreendimentos, que apesar de ser uma forma justa de cobrança, traz aos consumidores um alto impacto nos custos de operação de empreendimentos. Com isso, o setor terciário da economia, representado especialmente por hotéis, centros de pesquisa, universidades e shoppings, começam a se mobilizar para procurar soluções alternativas de produção própria de energia elétrica e utilidades importantes ao seu funcionamento, como frio para os sistemas de ar condicionado, a fim de se tornarem auto-suficientes, diminuindo os seus custos operacionais.

Surgem então, como uma solução alternativa de produção de energia, as unidades termoelétricas descentralizadas locais, instaladas na própria infra-estrutura do consumidor, que associada a um processo de co-geração pode atender

também a necessidade de frio ou calor. Estas unidades estariam operando a partir da produção de energia com a queima de gás natural e/ou combustíveis renováveis, como por exemplo, com biodiesel associado ao diesel.

Uma tendência atual do setor de serviços é procurar a auto-sustentação em energia elétrica, que associada ao interesse do governo brasileiro em aumentar a inserção do gás natural na matriz energética do país (elevar o uso para 13% da matriz até 2010), podem tornar as unidades cogenerativas – unidades de produção de energia elétrica associada a produção de outra potência, seja de frio, calor ou elétrica, a partir de correntes energéticas desperdiçadas, por exemplo, gases de exaustão de motores de combustão interna – uma boa alternativa para a geração de energia descentralizada [2].

A geração de potência elétrica através de motores de combustão interna representa cerca de 10 a 15% da capacidade total instalada em todo o mundo [3]. Também estes comentam que a produção descentralizada de energia oferece oportunidades interessantes a investidores privados.

Todavia, as possibilidades de implantação de unidades cogenerativas, devem ser avaliadas preliminarmente através de análises termodinâmicas, para estas serem ferramentas de tomada de decisão nas definições de modelos a serem utilizados como também na otimização de instalações. Dentre estas análises surge a análise exergetica, baseada na exergia, que pode identificar pontos de ineficiência energética, permitindo otimização de unidades com co-geração.

O conceito de exergia surge em 1956 a partir dos estudos de Rant [4]. Este conceito é então bastante disseminado a partir da década de 80 com uma série de trabalhos sobre o assunto, e, avaliações de plantas de geração de potência.

A implantação de uma termoelétrica em um determinado shopping de Salvador foi estudada a partir do conceito de exergia, avaliando as eficiências térmica e exergetica dos equipamentos da unidade e da instalação como um todo [2]. O trabalho identificou a partir dos dados fornecidos por fabricantes, que a melhor configuração a ser implantada, para o tipo de operação, seria a utilização de motores de combustão interna para a produção de potência elétrica.

Já no setor industrial, também no campo de avaliação exergetica, foi avaliada uma unidade termoelétrica de grande porte (baseada em ciclos de Rankine, Brayton e combinado), que alimenta um pólo petroquímico no Nordeste do Brasil, identificando possibilidades de melhoria nos modos de operação da unidade com base na análise exergetica como exergoeconômica [5].

Uma outra unidade de geração de potência que utiliza motores de combustão interna que operam com diesel foi também avaliada com este conceito [3]. Os mesmos identificaram as principais fontes de destruição da exergia, que podem servir de dados para a otimização da unidade.

O objetivo do estudo é avaliar, a partir de uma análise termodinâmica (baseada no conceito de exergia), um projeto básico de uma unidade cogenerativa para um centro de pesquisa na cidade do Salvador. A unidade visa produzir energia elétrica a partir de motores de combustão interna queimando gás natural e mistura de diesel/biodiesel, trazendo ao centro auto-suficiência na produção desta utilidade. Também será produzida água gelada para o sistema de ar condicionado central, através da co-geração a partir de chillers de absorção, que estarão aproveitando a energia rejeitada pelos motores tanto pelos gases de exaustão como pela água de resfriamento destes.

DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO E METODOLOGIA UTILIZADA

A instalação é apresentada na Figura 1. Esta é composta por três motores de combustão interna acoplados a geradores elétricos, e, associados a chillers de absorção para a produção de água gelada. Existe também na instalação uma torre de resfriamento utilizada para o resfriamento da água utilizada para a condensação do fluido refrigerante e arrefecimento do processo de absorção, ambos os processos localizados nos chillers de absorção. O circuito 1 (linhas em amarelo) indica o fornecimento de gás natural aos motores; o circuito 2 (linha em preto) o fornecimento da mistura diesel/biodiesel, e, o circuito 3 (linhas em azul), o fornecimento do ar de combustão. Já o circuito 4 (linhas em amarelo escuro), representa a água de resfriamento dos motores (AGRM); o circuito 5 (linhas em vermelho) representa os gases de exaustão dos motores, e, o circuito 6 (linhas em verde), apresenta o sistema de água de resfriamento dos chillers.

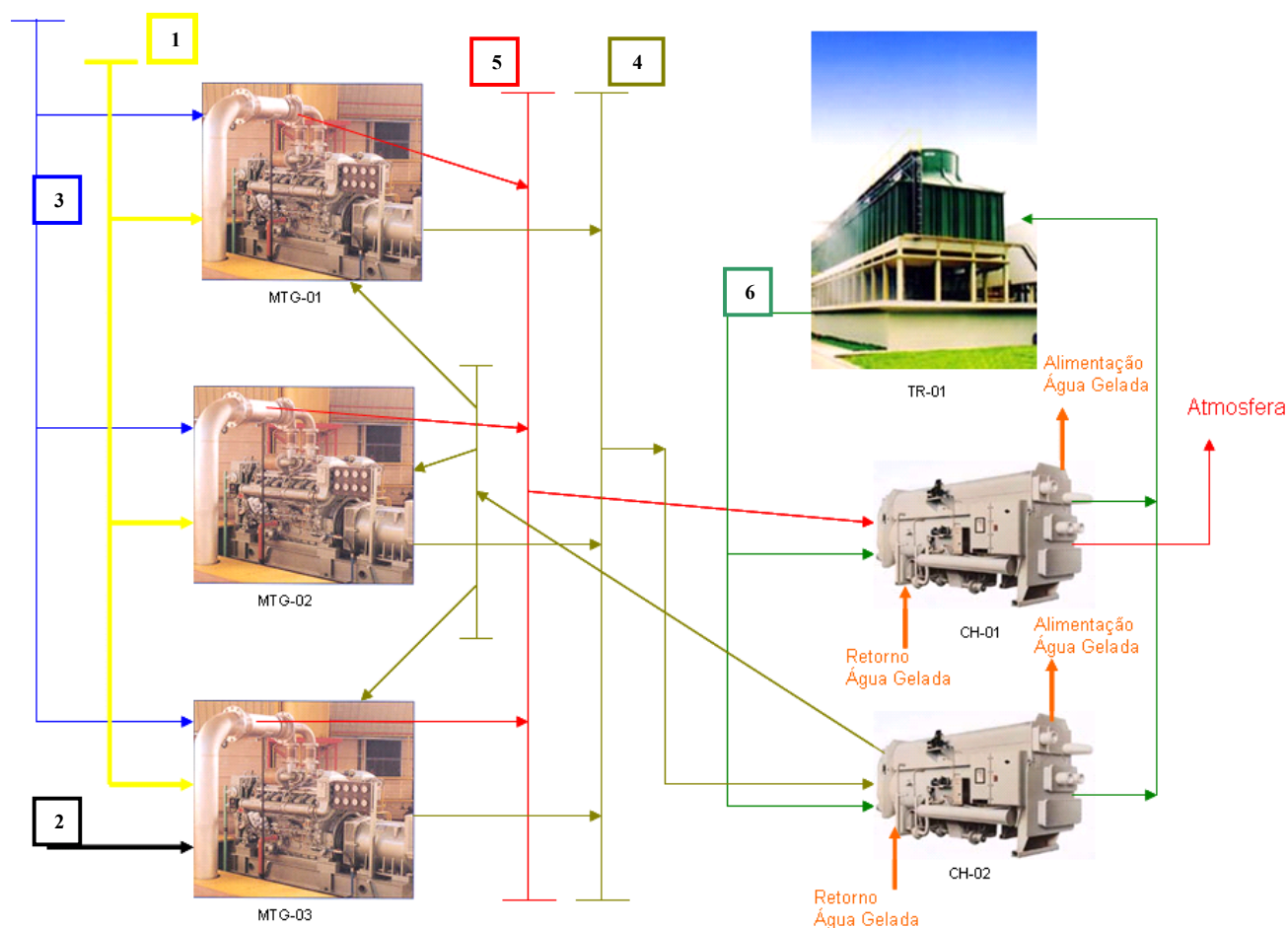


Fig. 1: Instalação da Unidade de Co-geração.

As especificações preliminares dos equipamentos principais da instalação (conjunto motogeradores e chillers de absorção), selecionados a partir da demanda do centro de pesquisa, são apresentadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Especificações Preliminares dos Conjuntos Motogeradores e Chillers de Absorção.

ITEM	DESCRIÇÃO	ESPECIFICAÇÃO
MTG-01	Conjunto motogerador ciclo Otto tendo como combustível gás natural	Conjunto moto-gerador com potência unitária de 395 kWe
MTG-02	Conjunto motogerador ciclo Otto tendo como combustível gás natural	Conjunto moto-gerador com potência unitária de 395 kWe
MTG-03	Conjunto motogerador ciclo diesel tendo como combustível gás natural/ diesel-biodiesel	Conjunto moto-gerador com potência unitária de 395 kWe
CH-01	Chiller de absorção tendo como fonte quente gases de exaustão	Capacidade de Refrigeração de 221 TR com COP (coeficiente de performance) de 1,38275
CH-02	Chiller de absorção tendo como fonte quente água de arrefecimento dos motores	Capacidade de Refrigeração de 258 TR com COP de 0,75175

Os dados para a avaliação termodinâmica da instalação são apresentados na Tabela 2. Estes dados foram coletados com os fabricantes dos equipamentos pré-selecionados para a instalação, além de algumas condições estimadas em que as informações não foram devidamente fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 2: Propriedades Termodinâmicas na Instalação.

Ponto Coleta	Descrição	T (°C)	P (kPa)	m (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/KgK)	Ex (kW)
1	Entrada de ar para os motores	25	101,30	0,747*	298,60	5,695	0,06175
2	Entrada de gás natural para os motores MTG01/02	25	202,60	0,023*	-	-	1182
3	Entrada de gás natural para o motor MTG-03	25	202,60	0,0052*	-	-	267,3
4	Entrada de diesel/biodiesel para o motor MTG-03	25	202,60*	0,0208*	-	-	17,06**
5	Saída da água de resfriamento nos motores	99	303,90*	1,513*	415	1,295	50,48
6	Saída dos gases de exaustão nos motores	478	303,90*	1,194*	69831	220,10	4368**
7	Saída de água de resfriamento da torre	30	150,00*	158,06*	125,8	0,4365	41,08
8	Entrada de água de resfriamento da torre	35,50	152,00*	158,06*	148,80	0,5117	133,10
9	Entrada da água gelada no chillers de absorção CH-01	12	160*	37,22	50,52	0,1804	48,97
10	Saída da de água gelada no chiller de absorção CH-01	7	160*	37,22	29,57	0,1063	91,74
11	Entrada da água gelada no chillers de absorção CH-02	12	160*	43,33	50,52	0,1804	57,01
12	Saída da de água gelada no chiller de absorção CH-02	7	160*	43,33	29,57	0,1063	106,80

A metodologia de análise implementada foi a avaliação com base no conceito de exergia, a partir da qual foram avaliadas as eficiências exergéticas (de 2ª Lei) dos conjuntos motogeradores e da instalação, comparando os valores encontrados com as eficiências térmicas de 1ª Lei.

A exergia calculada das taxas de água e dos gases de exaustão, considerando a exergia química zero, foi levantada a partir do conceito de exergia específica (ex), difundido em várias literaturas, entre elas a de Kotas [6], sendo apresentada como:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

na qual, o símbolo h referencia a entalpia específica e s a entropia específica em uma temperatura e pressão qualquer, e h_0 e s_0 os valores de entalpia e entropia específica para as condições de referência.

A variação de entalpia, entropia e calor específico dos gases de exaustão são dadas pelas correlações a seguir:

$$\Delta h = \int c_p \Delta T, \quad \Delta s = \int \frac{c_p}{T} dT \quad e \quad c_p = \sum_j x_j c_{pj} \quad (2)$$

sendo $c_{pi} = A_i + B_i T + C_i T^2$ [7] e representa a capacidade calorífica do composto i presente nos gases de exaustão, calculados a partir da composição do gás natural e da mistura diesel/biodiesel, massas do ar e do combustível, considerando combustão estequiométrica.

Já as exergias dos combustíveis utilizados foram determinadas a partir da formulação apresentada por Kotas [6] referenciando Szargut, e Styrylska [8], que determinam um fator ϕ para o cálculo da exergia associada ao combustível, a partir da composição elementar em massa do combustível, e do poder calorífico inferior (PCI). Este fator, para combustíveis líquidos, é dado da seguinte forma:

* Valores estimados por ainda não haver definição completa do projeto da instalação e dos equipamentos. ** Para mistura de 2% de biodiesel ao diesel.

$$\varphi = 1,0401 + 0,1728 \frac{h_c}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h_c}{c} \right) \quad (3)$$

na qual h_c , c , o , s são os percentuais em massa da análise elementar do combustível. Para o gás natural este valor é tabelado e apresenta o valor de $1,04 \pm 0,5\%$ [6].

As exergias dos combustíveis serão encontradas a partir da multiplicação deste fator com o PCI de cada combustível analisado, sendo:

$$ex_{Comb.} = \varphi * PCI_{Comb.} \quad (4)$$

As condições de referência estabelecidas de pressão e temperatura ambientes para o trabalho foram de 101,30kPa e 25°C.

As eficiências térmicas, elétricas e globais calculadas, sejam de 1ª ou de 2ª Lei, foram baseadas em conceitos apresentados em trabalhos na literatura [2][6]. As formulações para os cálculos das eficiências, tanto para os equipamentos, quanto para a instalação, estão sumarizadas nas Tabelas 3 e 4.

Todas as análises foram elaboradas através de modelo de simulação elaborado na plataforma EES (Engineering Equation Solver).

Tabela 3: Formulações para o Cálculo de Eficiências de 1ª Lei na Instalação.

ITEM	FORMULAÇÃO
TÉRMICA MTG-01/02	$\eta_{Motor} = \frac{W_{Motor}}{\dot{m}_{gás} PCI_{gás}}$
MTG-03	$\eta_{Motor} = \frac{W_{Motor}}{\sum \dot{m}_{comb.} PCI_{comb.}}$
Instalação	$\eta_{Instalação} = \frac{\dot{m}_{água\ gelada} \cdot \Delta h_{água\ gelada}}{\sum \dot{m}_{comb.} PCI_{comb.}}$
ELÉTRICA Instalação	$\eta_{Instalação} = \frac{W_{elétrico\ total}}{\sum \dot{m}_{comb.} PCI_{comb.}}$
GLOBAL Instalação	$\eta_{Instalação} = \frac{\dot{m}_{água\ gelada} \Delta h_{água\ gelada} + W_{elétrico\ total}}{\sum \dot{m}_{comb.} PCI_{comb.}}$

Tabela 4: Formulações para o Cálculo de Eficiências de 2ª Lei na Instalação.

ITEM	FORMULAÇÃO
TÉRMICA MTG-01/02	$\psi_{Motor} = \frac{W_{motor}}{\dot{m}_{gás} PCI_{gás} \varphi_{gás}}$

MTG-03	
Instalação	$\psi_{Motor} = \frac{W_{motor}}{\sum \dot{m}_{comb.} \cdot PCI_{comb.} \cdot \varphi_{comb.}}$ $\psi_{Instalação} = \frac{\Delta Ex_{\acute{a}gua\ gelada}}{\sum \dot{m}_{comb.} \cdot PCI_{comb.} \cdot \varphi_{comb.}}$
ELÉTRICA Instalação	$\psi_{Instalação} = \frac{W_{elétrico\ total}}{\sum \dot{m}_{comb.} \cdot PCI_{comb.} \cdot \varphi_{comb.}}$
GLOBAL Instalação	$\psi_{Instalação} = \frac{\Delta Ex_{\acute{a}gua\ gelada} + W_{elétrico\ total}}{\sum \dot{m}_{comb.} \cdot PCI_{comb.} \cdot \varphi_{comb.}}$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As eficiências de 1ª (η) e de 2ª (Ψ) Leis encontradas para os motores e para a instalação são apresentadas nas Tabelas 5 e 6 a seguir:

Tabela 5: Eficiências de 1ª Lei do Sistema.

ITEM	η (%)
TÉRMICA	
MTG-01/02	34,75
MTG-03	34,51
Instalação	49,35
ELÉTRICA	
Instalação	34,67
GLOBAL	
Instalação	57,51

Tabela 6: Eficiências de 2ª Lei do Sistema.

ITEM	ψ (%)
TÉRMICA	
MTG-01/02	33,41
MTG-03	32,52
Instalação	2,59
ELÉTRICA	
Instalação	33,11
GLOBAL	
Instalação	35,70

A avaliação dos valores de eficiência de primeira e segunda Lei nos permite afirmar que a grande fonte de redução da eficiência do sistema é o processo de transferência de calor nos chillers, o que gerou uma eficiência baixa de 2ª Lei, apesar de possuir uma eficiência de 1ª Lei maior que a dos motores e da geração de eletricidade. Isso mostra a baixa capacidade do sistema em gerar frio com uma maior qualidade. Para uma análise mais

consistente foi preciso analisar cada equipamento para identificar a principal fonte de destruição da exergia. Para tanto, foram calculadas as irreversibilidades dos equipamentos.

As irreversibilidades (I) dos equipamentos do sistema são apresentadas na Tabela 7. Também são apresentados os valores percentuais de destruição da exergia disponível global em cada equipamento.

Tabela 7: Irreversibilidades e Destruição da Exergia do Sistema.

ITEM	I (kW/K)	Destruição Exergia (%)
MTG-01	787,3	11,78
MTG-02	787,3	11,78
MTG-03	819,5	12,26
CH-01	4278	64,00
TR-01	12,29	0,18

As irreversibilidades foram calculadas a partir do cálculo de eficiência de 2ª Lei dos equipamentos. O cálculo da eficiência para os chillers e torre, por serem equipamentos dissipativos, foi baseada no grau de perfeição termodinâmica. A análise dos dados nos permite verificar que a de perda de eficiência do sistema é causada pelos motores e chiller CH-01, em especial pelo chiller, que, por utilizar um processo de transferência de calor tendo como fonte de energia gases de exaustão a alta temperatura, possui grau de destruição da exergia alto, mostrando a influência da transferência de calor para a destruição da exergia.

O valor de irreversibilidade encontrada para o CH-02 foi muito baixa, decorrente ao alto grau de perfeição termodinâmica, o que nos remete a necessidade de uma análise mais criteriosa deste equipamento, quando todos os dados de projeto para este estejam definidos.

As análises elaboradas até o momento, foram baseadas no MTG-03 utilizando uma mistura de 2% de biodiesel na mistura diesel/biodiesel.

Para uma melhor análise do efeito da adição do biodiesel no motor MTG-03, e, sua influência na eficiência da unidade, foi simulada a variação do percentual de adição no motor, em acordo com a nomenclatura definida pelo governo brasileiro (por exemplo, B2: teor de mistura de 2% de biodiesel ao diesel). Os níveis de adição testados foram 2, 5, 10 e 20%. Na Tabela 8 são apresentados os valores de eficiências encontrados, tanto de 1ª como de 2ª Lei.

Tabela 8: Eficiências com a Variação do Teor de Biodiesel na Mistura com Diesel.

ITEM	B2	B5	B10	B20
MTG-03 (1ª Lei)	34,51	34,60	34,76	35,07
MTG-03 (2ª Lei)	32,52	32,60	32,73	33,00
Eficiência Térmica 1ª Lei (Instalação)	49,35	49,40	49,47	49,62
Eficiência Elétrica 1ª Lei (Instalação)	34,67	34,70	34,75	34,85
Eficiência Global 1ª Lei (Instalação)	57,51	57,56	57,65	57,82
Eficiência Térmica 2ª Lei (Instalação)	2,60	2,60	2,60	2,60
Eficiência Elétrica 2ª Lei (Instalação)	33,11	33,14	33,18	33,27
Eficiência Global 2ª Lei (Instalação)	35,70	35,72	35,77	35,87

A avaliação dos resultados da Tabela 8 nos permite afirmar que a utilização do biodiesel nos percentuais de mistura analisados não traz maior eficiência e qualidade energética ao sistema. O grande impacto que poderá ser gerado com a utilização do biodiesel é na redução de poluentes, o que deverá ser avaliado caso o empreendimento venha a ser viabilizado.

CONCLUSÕES

Foram avaliadas as eficiências energética e exergetica de um projeto básico preliminar de uma unidade termoeletrica com co-geração de água gelada para um centro de pesquisa em Salvador/BA. A análise dos resultados encontrados nos permite concluir que:

- A instalação possui baixas eficiência térmica e qualidade energética em seus processos.
- A grande fonte de destruição de exergia no sistema é decorrente ao processo de produção de água gelada no chiller que utiliza como fonte de energia gases de exaustão dos conjuntos motogeradores.

- A utilização do biodiesel nos teores avaliados (B2, B5, B15 e B20) não traz aumento significativo de eficiência energética ao sistema, todavia pode trazer uma diminuição da emissão de poluentes.
- Uma análise energética e exergetica mais consistente do sistema devem ser feitas, com a definição completa do projeto básico do sistema, para possibilitar melhorias energéticas e com isso uma operação mais eficiente e de melhor qualidade energética, caso o empreendimento seja viabilizado.

REFERÊNCIAS

1. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Planejamento Anual da Operação Energética – Sumário Executivo 2005, Brasília, 42p., 2004.
2. Santana, G.C.S., Torres, E.A., Campos, M.F. Avaliação Termodinâmica de uma Planta Cogenerativa de um Shopping Center, Rio Oil & Gas Expo and Conference, CD-ROM, 2004.
3. Kanoglu, M., Isik, S.K., Abusoglu, A. Performance Characteristics of a Diesel Engine Power Plant, Energy Conversion & Management, v. 46, pg. 1692-1702, 2005.
4. Rant, Z. Exergy, A New Word for Technical Work Capacity, Forsch, Gebiete Ingenieurwes., 1956.
5. Torres, E.A. Avaliação Exergetica e Termoeconômica de um Sistema de Cogeração de um Pólo Petroquímico, Tese de Doutorado, Unicamp/SP/Brasil, 1999.
6. Kotas, T. J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, 1st ed., Butterworths, London, 296 p, 1985.
7. Callen, H.B. Thermodynamics and Introduction to Thermostatistics, John Wiley & Sons, New York, 1960.
8. Szargut, J., Styrylska, T. Angenaherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen, Brennstoff-Warme-Kraft, v. 16, n°12, pa. 589-596, 1964.

NOMENCLATURA

<i>MTG</i>	conjunto moto-gerador
<i>CH</i>	chiller
<i>T</i>	temperatura (°C)
<i>P</i>	pressão (kPa)
<i>c_p</i>	calor específico (kJ/kgK)
<i>m</i>	vazão mássica (kg/s)
<i>h</i>	entalpia específica (kJ/kg)
<i>s</i>	entropia específica (kJ/kgK)
<i>Ex</i>	exergia (kW)
<i>ex</i>	exergia específica (kW/kg)
<i>η</i>	eficiência de primeira lei (%)
<i>ψ</i>	eficiência de segunda lei (%)
<i>PCI</i>	poder calorífico inferior (kJ/jg)
<i>φ</i>	fator de exergia associada ao combustível
<i>c</i>	teor de carbono no combustível (adimensional)
<i>s</i>	teor de enxofre no combustível (adimensional)
<i>o</i>	teor de oxigênio no combustível (adimensional)
<i>h_c</i>	teor de hidrogênio no combustível (adimensional)
<i>W</i>	trabalho (kW)
<i>I</i>	irreversibilidade (kW/K)
<i>B</i>	teor de biodiesel na mistura entre diesel/biodiesel