

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UNIDADE DE COGERAÇÃO A PARTIR DO GÁS NATURAL.

Carlos Marlon Silva Santos

*Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, CEP 58059-900, João Pessoa, PB, Brasil, Telefone: (0-xx-83)216-7225, E-mail: c.marlon@bol.com.br.

Carlos Antônio Cabral dos Santos

(*), E-mail: cabral@les.ufpb.br.

Ednildo Andrade Torres

Laboratório de Energia, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Rua Aristides Novis, nº: 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador, BA, Brasil, E-mail: ednildo@ufba.br

Francisco Souza Almeida

(*), E-mail: frsoza@bol.com.br

Paulo Henrique Dias dos Santos.

(*), E-mail: paulohenriqueles@uol.com.br

RESUMO Diversos estudos de análise térmica vem sendo realizados tendo como base a 1º e 2º leis da termodinâmica, essa abordagem fornece resultados que se complementam, e propiciam a tomada de decisão no que diz ao projeto e/ou operação mais eficiente de um sistema térmico, bem como a identificação das perdas de cada componente que compõe o sistema. A unidade estudada é composta de um moto-gerador acionado com gás natural responsável pela geração de energia acionamento de um sistema de refrigeração por absorção, através dos gases de exaustão, para a produção de frio.

Palavras-chave: Refrigeração, cogeração, exergia, gás natural.

1. INTRODUÇÃO

Com o gradativo aumento nos custos de geração de energia elétrica e a degradação das fontes tradicionais de energia disponíveis, a comunidade técnica encontrou-se na necessidade de buscar opções para a reversão deste quadro, atuando assim, em duas vertentes: A primeira vertente objetiva encontrar outras fontes energéticas em substituição à energia não renovável e a segunda, consiste na melhor utilização da energia consumida, isto é, o uso racional da energia preconiza Torres (1999).

A conservação de energia engloba não apenas a diminuição do seu consumo, mas também a construção de um novo estilo de desenvolvimento, que implique num perfil reduzido de demanda energética para a um mesmo grau de satisfação das necessidades sociais. Neste contexto pode-se observar que a questão energética requer uma mudança de estilo de vida, e muitas vezes uma revisão dos conceitos que têm-se enraizado desde o nascimento.

A geração de energia elétrica via hidroelétrica foi, por muito tempo, a única forma de geração de energia que vinha a mente de muitos brasileiros, quando perguntado sobre o assunto, entretanto depois da última crise que deflagrou em racionamento, termos com geração distribuída, cogeração, geração termoelétrica, dentre outros, passaram a soar de forma mais amigável, não sendo raro que nos dias atuais o conhecimento por leigos de outras formas de aproveitamento energético, além do potencial gravitacional das águas, geração hidroelétrica.

A busca de novas tecnologias para geração de energia elétrica, colabora com o conceito mais amplo de conservação de energia, que engloba muito mais que a simples e pura eliminação de desperdício e sim, a melhoria no funcionamento de equipamentos, a exploração de formas alternativas, dentre outras.

A cogeração, como uma alternativa tecnológica para geração de energia elétrica, apresenta-se com desempenho otimizado, graças ao maior aproveitamento do potencial energético do combustível, tendo em vista que por definição, esta nada mais é que processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, que pode ser convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada por um ou mais combustíveis. É evidente que quanto mais produtos forem obtidos numa planta de cogeração mais eficiente ela será, assim algumas plantas aproveitam-se produtos químicos como CO₂, além de energia mecânica e térmica.,

2. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

O que se observa nas análises de sistemas térmicos é a tentativa de diagnosticar as unidades através da análise energética ou de primeira lei, entretanto, não obstante esta análise oferecer resultados úteis, ela não contabiliza a quantidade de energia que está sendo perdida, nem onde ocorrem a irreversibilidades, preconiza TORRES (1999). Este mesmo autor lista algumas limitações da análise de primeira lei, e indica que ela deve ser complementada pela análise de segunda lei ou exergética.

Segundo Moreira (2004) o desenvolvimento da análise exergética foi iniciado por F. Bosnjakovic, que, em 1938, clamou a todos para combater a irreversibilidades com o slogan “*Fight against the irrversibilities*” (Luta contra as irreversibilidades).

Segundo Tsatsaronios (1993) a avaliação exergética permite complementar a análise energética da seguinte forma:

- a) numa melhor medida para avaliação da magnitude da energia perdida em relação à energia total fornecida sob a forma de insumo energético.
- b) numa medida da qualidade (ou do desperdício) da energia do ponto de vista termodinâmico;
- c) numa variável para definir a eficiência racional que é a relação entre a exergia do efeito desejado e a exergia necessária ao processo, para o sistema energético.

Para os sistemas de refrigeração por absorção, que é freqüentemente citado como ineficiente, quando confrontada com a refrigeração a vapor pois a avaliação é, muitas vezes, feita comparando os coeficiente de performance (COP), que é definido como a razão entre o efeito desejado e a energia que é consumida dos sistemas, dos dois sistemas. Entretanto Cortez *et. al* (1997) relatam que este não é o parâmetro mais apropriado de comparação de tecnologias onde a energia acionadora é de natureza diferente. Eles ainda apontam a análise exegética como único método consistente para esta comparação.

Nesta conjuntura, Torres (1999) enfatiza que as análises de primeira e segunda lei não são concorrentes, e sim complementares, e juntas contribuem pra uma avaliação coerente do sistema térmico.

Na literatura pode-se encontrar diversas definições para a exergia, Torres (1999), condensa em seu trabalho algumas, entretanto citaremos a definição proposta por Tsatsaronis (1993) que propõe a exergia como o máximo trabalho útil que se pode obter de um portador de energia quando este é lavado até a condições ambientais

A exergia de um portador de energia é a propriedade termodinâmica, que depende tanto do estado termodinâmico em que se encontra o portador, quanto das condições ambientais, e expressa a máxima capacidade que o portador de energia possui para causar mudanças. Desta forma a exergia não é meramente um objeto de medida termodinâmica, mas algo relacionado ao valor econômico desse portador, pois o usuário da energia paga pelo potencial energético para causar mudança em seu processo produtivo.

A exergia (Ex) de um fluxo pode ser dividida em quatro componentes como pode ser vista na figura 1: exergia cinética (EX_c), exergia potencial (EX_p), exergia física (EX_f) e exergia química (EX_q),

$$EX = EX_c + EX_p + EX_f + EX_q \quad (1)$$

Analizando cada termo da eq (1) temos a exergia cinética é a própria energia cinética quando a velocidade relativa considerada é a da superfície da terra.

$$EX_c = \frac{mV_o^2}{2} \quad (2)$$

A exergia potencial é igual a energia potencial, quando o referencial é a superfície do local avaliado, por exemplo a superfície da terra.

$$EX_p = mg_0 Z_0 \quad (3)$$

Exergia física que é o trabalho máximo obtido através de processos reversíveis quando uma quantidade de matéria é levada do estado inicial (P e T) ao estado de pressão e temperatura de referência (P₀ e T₀). Desta forma se a pressão e a temperatura se igualam com a do meio, afirma-se que esse é o Estado Inativo Restrito, portanto, não tem mais capacidade de gerar trabalho, assim, quando esses níveis de operação afastam-se das condições ambientais temos um potencial com relação ao meio permitindo calcular esta parcela da exergia, conforme segue

$$EX_f = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0) \quad (4)$$

Onde h_i e s_i correspondem a entalpia e entropia do fluxo em uma determinada condição i. Já T₀, h₀ e s₀ são temperatura, entalpia e entropia do fluxo para o estado de referência (nível zero).

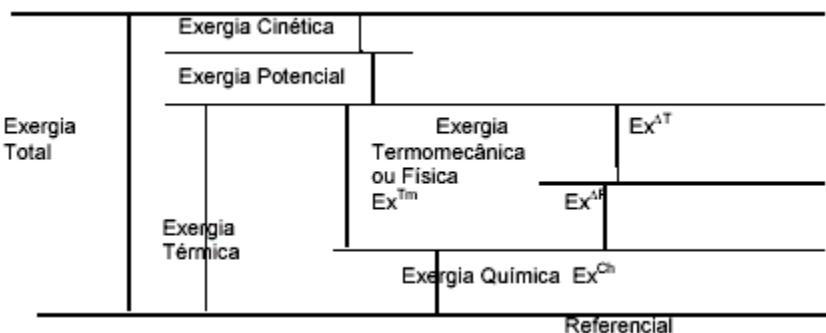


Figura 1-Parcelas da exergia

3.COGERAÇÃO

Segundo Espírito Santo et al (2001) (in Santana 2003), motores de combustão interna têm sua aplicação mais difundida em sistemas de pequeno e médio porte, enquanto para grandes unidades de cogeração tem-se preferido as turbinas. Embora a escolha por motor, turbina ou qualquer outra tecnologia dependerá de diversos fatores, tais como: a relação de demanda térmica com trabalho mecânico e /ou eletricidade, preço do combustível, preço da tarifa de energia elétrica, característica da curva de demanda térmica e elétrica do empreendimento, disponibilidade de combustível, dentre tantos outros fatores.

Na figura 2 pode-se observar um balanço típico de uma central de cogeração com motor a gás natural, nota-se que o potencial energético do motor é muito vasto. A partir da combustão do gás natural (100%) tem-se que, cerca de 42% estaria sendo utilizado para a produção de energia mecânica, 31% da energia estaria disponibilizada nos gases de exaustão, 22% na água de arrefecimento e 5% entre perdas e água não aproveitáveis, desta forma conclui-se que o não aproveitamento de todo esse potencial fatalmente implicaria em elevados custos de produção de energia.

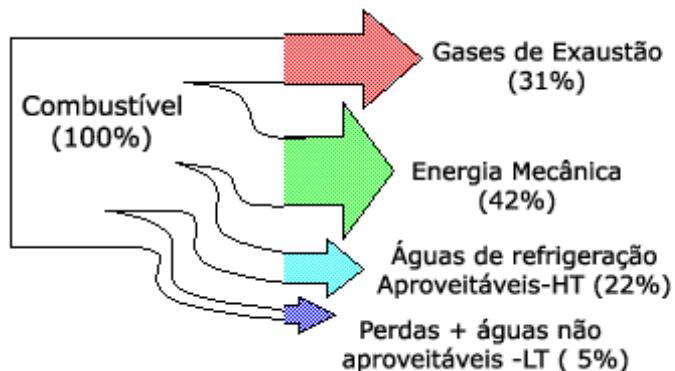


Figura 2- Balanço típico de uma unidade de cogeração

4. METODOLOGIA

Faz-se uma simulação computacional de sistema composto por um motor 8,1 litros, taxa de compressão 9:1, acoplado diretamente a um sistema de refrigeração por absorção que utiliza como fluido de trabalho o par água-amônia, desta forma os gases de exaustão provenientes do motor acionam diretamente o sistema de refrigeração. Esta condição foi proposta para uma primeira avaliação para o sistema como pode ser visto na fig.(3)

Este sistema de refrigeração tem a configuração do ciclo básico, para sistemas que operam com o par água amônia e pode ser visto na figura (4), constituído de gerador+retificador de vapor de refrigerante, condensador, válvula de expansão, evaporador, absorvedor, trocador de calor intermediário e uma bomba de solução.

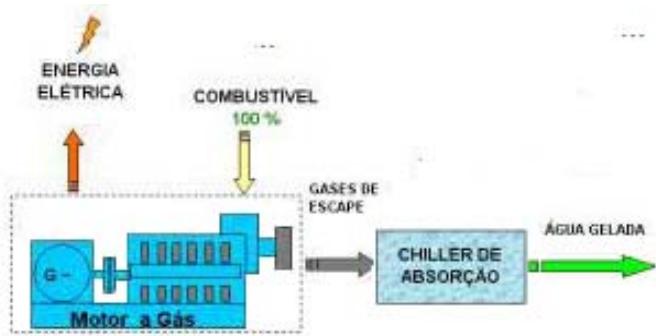


Figura 3- Desenho esquemático do sistema simulado

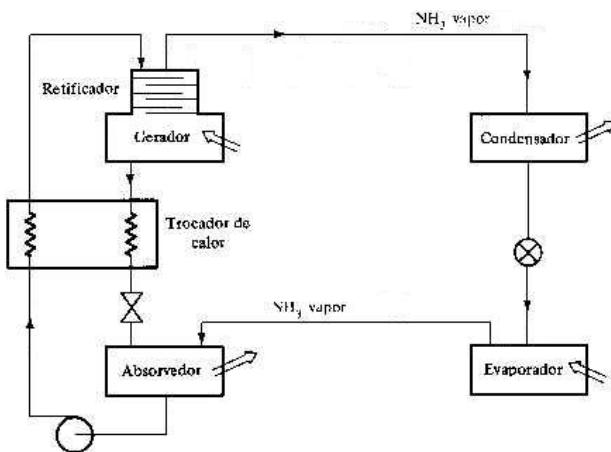


Figura 4- Ciclo de refrigeração por absorção

O motor utiliza o gás natural como combustível e a composição deste é mostrada na tab. 01 fornecido pela empresa distribuidora de gás natural.

A simulação foi feita com auxílio do Engineer Equation Solver (EES) que calcula as propriedades termodinâmicas dos fluxos dos fluidos de trabalho do sistema. A simulação é alimentada com a composição do combustível, a relação ar combustível da combustão o motor. Os dados de entrada requeridos para simular o sistema de refrigeração são: a temperatura de condensação, temperatura de evaporação, diferença de temperatura no trocador de calor de solução e as concentrações de da solução.

O motor foi modelado a partir de equações ajustadas dos parâmetros fornecidos pelo fabricante, mostrado na tab. (2).

Tabela 1- composição do combustível

Composição	%Vol
Metano	91,8
Etano	5,58
Propano	0,97
I-Butano	0,03
N-Butano	0,05
Pentano	0,1
outros	1,47
total	100

Tabela 2- Parâmetros do motor

Carga	%	37,64	43,86	50,11	56,33	62,61	68,83	75,09	81,28	87,59	93,81	100,00
Velocidade (operação)	RPM	1204	1403	1603	1802	2003	2202	2402	2600	2802	3001	3199
Potência (POT)	kW	74,1	86,9	98,4	109	120,7	131,3	140,9	150	157,2	163,5	167,2
Vazão de combustível	kg/s	0,005	0,006	0,006	0,007	0,008	0,009	0,009	0,010	0,011	0,011	0,012
Vazão de ar	kg/s	0,0798	0,0802	0,0929	0,1038	0,1289	0,1375	0,1400	0,1638	0,1662	0,1835	0,1797
Vazão de gases de exaustão	kg/s	0,0845	0,0859	0,0993	0,1111	0,1369	0,1463	0,1493	0,1737	0,1767	0,1949	0,1913
Temperatura dos gases exaustão	°C	637,7	660,4	691,9	713,5	735,5	756,2	779,8	798,8	816,2	816,5	832,5

O sistema de refrigeração foi modelado a partir das equações para ponto de orvalho e ponto de bolha a mistura água-amônia obtidas em Tamm (2003), onde dessas equações foram obtidos os níveis de pressão de operação, admitindo que a temperatura de orvalho (T_d) corresponde à temperatura de condensação através da Eq. (5) determina-se o nível de pressão alta

$$T_d = T_c - \sum_{i=1}^6 \left\{ A_i + \sum_{j=1}^4 A_{ij} \cdot \left[\ln(1,0001-x) \right]^j \right\} \cdot \left[\ln \left(\frac{P_c}{P_{alta}} \right) \right]^i \quad (5)$$

onde T_c e P_c podem ser encontradas a partir das Eq.(6) e Eq (7) respectivamente; e T_{cw} e P_{cw} são a temperatura e pressão critica da água e x é a concentração de amônia na mistura.

$$T_c = T_{cw} - \sum_{i=1}^4 a_i x^i \quad (6)$$

$$P_c = P_{cw} \cdot \exp \left(\sum_{i=1}^4 b_i x^i \right) \quad (7)$$

e considerando que a temperatura de evaporação como a temperatura de bolha (T_b), com Eq.(8) obtemos a pressão baixa. Os coeficientes citados nas equações podem ser encontrados em Tamm (2003).

$$T_b = T_c - \sum_{i=1}^7 \left(C_i + \sum_{j=1}^{10} C_{ij} \cdot x_j \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{P_c}{P_{baixa}} \right) \right]^i \quad (8)$$

5. AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DO SISTEMA

A avaliação termodinâmica do sistema esquematizado conforme a Fig.(3) é realizado com base das equações da primeira e segunda lei da termodinâmica, além da equação da continuidade. O sistema foi dividido em: motor e sistema de refrigeração, onde o último foi segregado em volumes de controles a

citar: gerador, condensador, válvula de expansão, evaporador, absorvedor, bomba de circulação e válvula de solução e aplicados os balanço massa, energia e exergia.

A energia disponibilizada pelo combustível é de 352,3 kW já e exergia corresponde a 368,4 kW, após a queima do combustível a energia disponibilizada nos gases de exaustão é de 86,68 sua exergia de 39,44kW. Dados estes para o motor operando a 1800 RPM.

Tabela 3. Resultados energéticos e exergéticos para motor a 1800 RPM

	Energia (kW)	Exergia (kW)
Combustível	352,3	368,4
Gases de Exaustão	86,68	39,44

Como a energia que aciona o sistema de refrigeração por absorção é proveniente da energia disponível nos gases de exaustão obtemos os resultados encontrados na Tab.(4) e tab (5) para a avaliação energética e exergética respectivamente a partir desta quantidade de energia de energia acionadora, temperatura de condensação igual a 40°C, temperatura de evaporação de -10°C e uma diferença de temperatura no trocador de solução de 60 °C.

Tabela 4-Resultado energético

Resultado energético		
Equipamentos	Q (kW)	W (kW)
Gerador	86,68	
Condensador	52,27	
Evaporador	42,93	
Absorvedor	59,81	
Bomba		2,73

Tabela 5- Irreversibilidades do sistema de refrigeração

Equipamentos	Irreversibilidades	
	(kW)	%
Gerador	19,79	53%
Absorvedor	5,36	14%
Condensador	5,00	13%
Evaporador	3,73	10%
Bomba	2,36	6%
Válvula de Expansão	0,84	2%
Total	37,07	100%

Determina-se a eficiência de primeira lei para o motor através da Eq (9) do sistema de refrigeração pela Eq (10) e para unidade como um todo pela Eq.(11).

$$\eta_{motor} = \frac{Pot}{\dot{m}_{gn} \cdot PCI} \cdot 100 \quad (9)$$

$$Cop = \frac{\dot{Q}_{evaporador}}{\dot{Q}_{gerador} + \dot{W}_{bomba}} \quad (10)$$

$$\eta_{global} = \frac{Pot + \dot{Q}_{evaporador}}{\dot{m}_{gn}.PCI} \cdot 100 \quad (11)$$

e as eficiências de segunda lei para o motor através da Eq (12) do sistema de refrigeração pela Eq (13) e para unidade como um todo pela Eq.(14).

$$\varepsilon_{motor} = \frac{Pot}{\phi \cdot \dot{m}_{gn} \cdot PCI} \cdot 100 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{absorção} = \frac{\dot{Ex}_{evaporador}}{\dot{Ex}_{gerador}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{global} = \frac{Pot + \dot{Ex}_{evaporador}}{\phi \cdot \dot{m}_{gn} \cdot PCI} \cdot 100 \quad (14)$$

os resultados dessas equações podem ser encontrados na Tab. (6) e retratam o desempenho energético e exergético do sistema.

Tabela 6- Eficiências do sistema

Sistema	Eficiência de 1º lei (%)	Eficiência de 2º lei (%)
Motor	30,65	29,31
Global	42,84	30,32
	COP	Eficiência de 2º lei
Sistema de refrigeração	0,48	0,094

6.CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de fazer a avaliação energética e exergética de um ciclo de cogeração, simplificado, possibilitando o desenvolvimento da metodologia, código computacional e a possibilidade de prever alguns resultados. Algumas modificações serão observadas para o amadurecimento do trabalho como a utilização de uma caldeira de recuperação para que os gases de exaustão não sejam utilizados diretamente no sistema de absorção.

As irreversibilidades determinadas para o sistema de refrigeração seguem os valores encontrados na literatura onde mostra o gerador com o maior grau de irreversibilidade do sistema seguido do

absorvedor e condensador estes resultados indicam que para melhorar a eficiência estes seriam os equipamentos onde deveria intervir para uma melhoria.

A redução dessas irreversibilidades ou destruição de exergia levaria a uma utilização mais racional dos recursos energéticos, além da consequente redução de emissão de efluentes para o meio ambiente.

O trabalho continuara com a realização da analise termoeconômica contabilizando os custos exergéticos e econômicos do sistema.

7.REFERÊNCIAS

- Balestiere, J. A. P., 2002 “Cogeração combinada de eletricidade e calor” Florianópolis SC. Ed UFSC,
- Cortez, L.A.B., Larson, D.L., Silva, A. 1997 - Energy and Exergy Evaluation of Ice Production by Absorption Refrigeration, ASAE Transaction vol. 40(2) pp 395-403
- Moreira, H. L. 2004. “Análise termoeconômica de sistemas de refrigeração por absorção com o par H₂O-LiBr”. CPGEM/UFPB tese de (doutorado) João Pessoa PB.
- Santana, G.C.S. 2003 “Análise energética e exergética em um sistema de cogeração para uma empresa do setor terciário” PPGEQ/DEQ/UFBA dissertação de (mestrado) Salvador BA.
- Szargut, J.; Morris, D.R.; And Steward, F.R., 1988 “Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes” Hemisphere Publishing Co., New York, USA ,
- Klein S.A 1992-“Engineering Equation Solver for Microsoft Windows Operating Systems Commercial and Professional Versions” F-Chart Software
- Kotas, T. J., 1985, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Butterworths, London, UK,
- Torres E. A. 1999, “Avaliação energética e termoeconômica de um sistema de co-geração de um pólo petroquímico” FEM/UNICAMP, tese de (doutorado). Campinas-SP.
- Tamm G.O. (2003). Experimental investigation of an ammonia-based combined power and cooling cycle”. A Dissertation (PHD) Florida -USA

ENERGY EXERGETIC EVALUATION OF A COGENERATION UNIT USING NATURAL GAS AS FUEL.

Carlos Marlon Silva Santos

*Laboratório de Energia Solar Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, CEP 58059-900, João Pessoa, PB, Brasil, Telefone: (0-xx-83)216-7225, e-mail: c.marlon@bol.com.br.

Carlos Antônio Cabral dos Santos

(*), e-mail: cabral@les.ufpb.br.

Ednildo Andrade Torres

Laboratório de Energia, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Rua Aristides Novis, nº: 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador, BA, Brasil, e-mail: ednildo@ufba.br

Francisco Souza Almeida

(*), e-mail: frsoza@bol.com.br

Paulo Henrique Dias dos Santos.

(*), e-mail: paulohenriqueles@uol.com.br

ABSTRACT. Several studies of thermal analysis are being accomplished based on first and second law of thermodynamics, that approach supplies good results to identify a more efficient operation of the system, as well as the identification of the losses and mainly which component responsible of the largest irreversibility in the system. The studied unit is composed of a generator worked with natural gas, that it is the responsible for the generation of energy, and it will go it supplies thermal input for a system of absorption refrigeration that is the responsible for the production of cold.

Key words: refrigeration cogeneration exergy, natural gas.