

COGERAÇÃO COM TURBINA A GÁS ASSOCIADA AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO: UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE EXERGOECONÔMICA

Júlio Santana Antunes¹

José Luz Silveira²

José Antônio Perrella Balestieri²

UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, ¹Departamento de Matemática,

²Departamento de Energia, 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brasil. E-mail: santana@feg.unesp.br

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa computacional para análise exergoeconômica de sistemas de cogeração que empregam turbinas a gás associado ao sistema de refrigeração por absorção. O programa computacional seleciona sistemas de turbinas a gás, visando a operação em paridade térmica, através de um banco de dados composto de turbinas a gás comercialmente disponíveis no mercado, nas condições ISO (*International Standards Organization*). O programa computacional corrige os parâmetros de performance dos sistemas selecionados para as condições locais da instalação. A análise exergoeconômica é feita com base no menor custo de manufatura exergetico no qual é considerado o melhor sistema entre os selecionados, àquele que apresentar o menor índice de irreversibilidade. O programa computacional foi desenvolvido em linguagem FORTRAN77, é um programa bastante amigável, com janelas que descrevem cada etapa de sua utilização. Um exemplo de estudo de caso da aplicação do programa computacional é apresentado neste trabalho.

Palavras chaves: Turbina a gás, Sistema de Refrigeração por Absorção, Cogeração, Exergia,

1. INTRODUÇÃO

Num projeto de centrais de cogeração, muitas vezes é conveniente ter acesso a alguma ferramenta de simulação que permita um cálculo rápido e seguro de balanços de massa e energia, bem como uma estimativa dos custos dos componentes e avaliação dos balanços de custos por meio de estudos exergoeconômicos (combinação dos conceitos de exergia com aspectos econômicos).

A grande diversidade de máquinas catalogadas por diferentes fabricantes possibilita a apresentação de um amplo leque de alternativas, as quais devem ser analisadas, para a seleção daquelas que mais adequadamente respondem às necessidades de um determinado processo produtivo. Estas são algumas das razões que justificam a elaboração de um programa computacional (Antunes *et al.*, 1999).

1.1 Sistema de cogeração proposto

Sistemas de cogeração com turbina a gás podem ser utilizados para produzir água gelada, com uso dos gases de exaustão da turbina para acionar um sistema de refrigeração por absorção (Najjar & Radhwan, 1991), como mostra a figura 1.

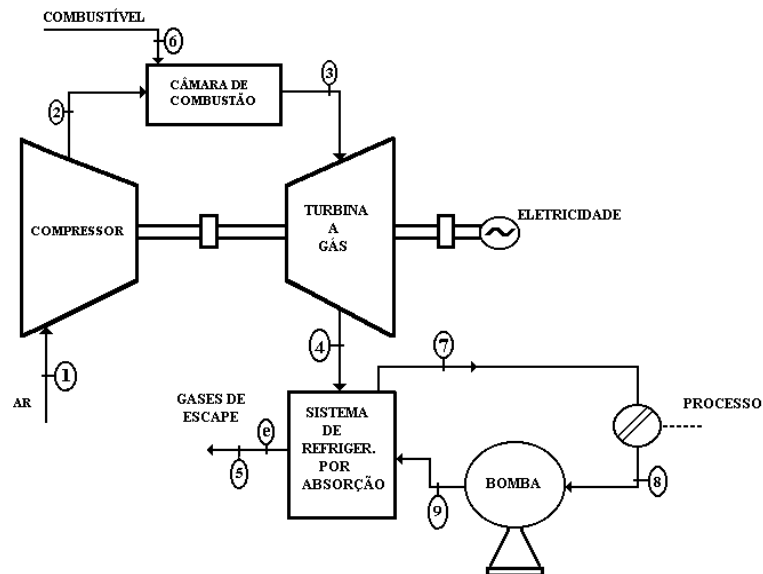


Figura 1 – Sistema de turbina a gás associada à turbina a vapor (ciclo combinado)

Um sistema de refrigeração por absorção consiste basicamente em um gerador, um condensador, um evaporador e um absorvedor. O ciclo opera com dois fluidos, um refrigerante (água, no caso de instalações utilizando solução de água e brometo de lítio, ou amônia, no caso de solução de água e amônia) e um absorvente (brometo de lítio ou água), de acordo com a solução utilizada.

Os sistemas com brometo de lítio (água refrigerante), são limitados a temperaturas acima de 0 °C, (ponto de congelamento da água). Se temperaturas inferiores são requeridas, o sistema de água e amônia deverá ser utilizado (Orlando, 1991 e Najjar & Radhwan, 1991).

Sistemas de refrigeração por absorção também podem ser classificados como de simples estágio, cujo coeficiente de performance (COP) situa-se entre 0,40 e 0,70; ou de duplo estágio ou duplo efeito que apresentam dois geradores e coeficiente de performance em torno de 1,4. Esses sistemas requerem pressão de vapor superiores, sendo mais utilizados em sistemas de cogeração (Orlando, 1991).

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

O código computacional escrito em linguagem de programação FORTRAN 77, utilizando o programa FORTRAN PowerStation versão 1.0 é um programa interativo, muito amigável, com janelas que descrevem cada etapa de sua utilização tornando-o bastante versátil, podendo ser executado em PCs em ambientes operacionais Windows ou DOS (Antunes, 1999).

Está composto por três blocos de programas (análise energética, análise exergética e análise exergoeconômica) que interagem entre si, sendo cada bloco responsável por um aspecto fundamental do processo de análise.

O banco de dados para a seleção dos sistemas de turbina a gás é formado por máquinas comercialmente disponíveis no mercado catalogadas no ano de 1997, cujos dados (nas

condições ISO: temperatura de 15 °C, nível do mar, com 60% de umidade relativa) foram fornecidos pelos fabricantes e agrupados em um catálogo, o *Gas Turbine World Handbook* (Biasi, 1997). A seguir passa-se a descrição detalhada dos blocos que compõem o programa computacional.

2.1 Análise energética

Ao executar o programa computacional, é solicitado do usuário as seguintes informações: fluxo mássico de água, temperatura da água, temperatura da água de retorno do processo, tipo de sistema de refrigeração por absorção, condições locais da instalação do sistema: temperatura ambiente, umidade relativa e a altitude; energia elétrica requerida e por fim o nome do arquivo de dados em que os resultados deverão ser gravados. Para a entrada de dados, o usuário pode escolher entre as opções (m^3/h , m^3/s ou kg/s), a unidade em que o fluxo de água deverá ser fornecida. Para a temperatura da água, a unidade que o usuário pode optar é °C ou K.

O programa também solicita do usuário o tipo de sistema de refrigeração por absorção que será utilizado (tipo simples ou de duplo efeito).

A toda entrada de dado, o programa solicita do usuário a sua confirmação, podendo este dado ser alterado nesta fase.

Com as informações fornecidas pelo usuário o programa chama a rotina para cálculo das propriedades termodinâmicas cujas equações são dadas por Badr *et al.* (1990); na fase seguinte, o programa seleciona os possíveis sistemas de turbina a gás comercialmente disponíveis no mercado, acessando o banco de dados de máquinas comerciais. Para a seleção dos equipamentos é feita uma análise de Primeira Lei da Termodinâmica, através de um balanço de energia sobre o sistema de refrigeração por absorção.

As seguintes considerações são efetuadas:

- Calor específico a pressão constante da água tem valor constante e igual a 4,187 kJ/kg K.
- Para o sistema de refrigeração por absorção do tipo simples efeito o coeficiente de performance (COP) é adotado como sendo igual a 0,65 e para o tipo duplo efeito o coeficiente de performance é adotado como 1,1 (Orlando, 1991).
- No caso da temperatura da água gelada, ser maior que 7 °C é utilizado o sistema de absorção que emprega a solução água e brometo de lítio em virtude da maior vida útil do equipamento, já que a solução de água e brometo de lítio é menos corrosiva do que a solução de água e amônia. Para temperatura da água gelada menor que 7 °C é utilizado o sistema de absorção que emprega a solução água e amônia (Najjar & Radhwan, 1991).
- Para sistemas de absorção que empregam água e brometo de lítio, é fixado valor de 170 °C para temperatura dos gases de escape e de 160 °C para temperatura dos gases de escape para sistemas de absorção que utilizam água e amônia (Najjar & Radhwan, 1991 e Aly, 1991).

Os dados, fornecidos pelos fabricantes, de turbinas a gás selecionadas nas condições ISO são: nome do fabricante, código da máquina, ano de fabricação, peso, dimensões, potência de eixo, *Heat rate* (BTU/h de combustível gasto para produzir 1 kW de potência de eixo), razão de pressão, rotação, vazão mássica dos gases de exaustão, temperatura dos gases de exaustão e em alguns casos a temperatura de entrada dos gases na turbina a gás.

Após a seleção dos equipamentos, o programa faz as devidas correções em função dos parâmetros de performance dos sistemas selecionados para as condições locais da instalação (Brooks, 1994). Na próxima etapa o programa chama a rotina para cálculo dos fluxos mássicos de ar e combustível, cujos cálculos são dados por Si-Doek *et al.* (1996).

Em seguida é feito o dimensionamento dos sistemas de turbina a gás selecionados cujo procedimento está indicado em (Antunes *et al.*, 1998), sendo efetuados cálculos tais como:

eficiência térmica da turbina a gás, eletricidade produzida pela turbina a gás, potência suprida pelo combustível, fluxo de calor recuperado dos gases de exaustão, eficiência da geração de água gelada, eficiência de geração de energia elétrica e eficiência global do sistema (eficiência da geração de água gelada mais eficiência de geração de energia elétrica).

Por fim, o programa mostra os resultados da análise energética no monitor de vídeo e grava estes resultados no arquivo de dados fornecido pelo usuário

2.2 Análise exergética

Terminada a análise energética, o programa efetua a análise exergética, utilizando as equações para cálculo do balanço de exergia dadas por Kotas (1985), aplicado para cada sistema de turbina a gás selecionado. Em seguida, a rotina determina as irreversibilidades para cada componente do sistema de turbina a gás associado ao sistema de refrigeração por absorção selecionado, bem como a irreversibilidade total do sistema; finalmente, os resultados das irreversibilidades são mostrados no monitor de vídeo e gravados no arquivo de dados.

2.3 Análise exergoeconômica

O programa, em sua última etapa, chama a Rotina Exergoeconômica para a realização da análise termoeconômica dos sistemas selecionados. Com as informações trazidas da análise energética e exergética, o programa calcula as funções exergéticas incrementais (Silveira, 1998) associadas a cada componente do sistema selecionado; em seguida o programa calcula o custo exergético anualizado de produção de eletricidade e custo exergético anualizado de produção de água gelada. Numa próxima etapa o programa calcula o custo de manufatura exergético (Silveira, 1998; Antunes, 1999) do sistema de turbina selecionado. Finalmente o programa mostra no monitor de vídeo e grava no arquivo de dados os custos de produção exergético de eletricidade e água gelada, o custo de manufatura exergético e os melhores sistemas selecionados, isto é, aqueles que apresentam menores custos de manufaturas exergéticos.

Após a análise exergoeconômica o comando do programa retorna ao menu principal para que o usuário possa realizar outras simulações ou então, encerrar a execução do programa.

3. ESTUDO DE CASO

Utilização de turbina a gás associada ao sistema de refrigeração por absorção, do tipo simples efeito, com uso direto dos gases de exaustão para a produção de água gelada a 7 °C em substituição aos chillers elétricos, correspondente a vazão de 94 kg/s de água gelada de um hospital, em um local situado a 640 m de altitude, de umidade relativa média de 76% e temperatura média de 30 °C. A temperatura de retorno da água é de 15 °C, sendo a eletricidade requerida de 2000 kW.

Para efeito de simulação foram fornecidos os seguintes dados:

- tarifa de energia elétrica paga a concessionária = 0,08 [US\$/kWh],
- preço de venda da energia elétrica excedente = 0,035 [US\$/kWh],
- taxa de juros anual = 12%,
- preço do combustível (gás natural) = 0,011 [US\$/kWh] e
- período de utilização de = 7000 h/ano.

3.1 Sistemas de turbinas a gás selecionados

A Tabela 1, mostra os sistemas selecionados de turbinas a gás comercialmente disponíveis no mercado, nas condições ISO.

Tabela 1. Sistemas de turbinas a gás selecionados (condições ISO)

Nome do fabricante	Solar Turbines	Mitsui Engineering & Shipbuilding
Código da máquina	Centaur 40S	SB15
Ano de fabricação	1992	1986
Peso - [kg]	27216	6400
Dimensões – LxWxH [m]	28,8 x 8,0 x 9,7 [ft]	3,0 x 1,5 x 3,0
Potência de eixo - [kW]	3515	2720
Heat Rate - [Btu/kWh]	1224	1330
Razão de pressão	9,7	10,0
Rotação da turbina - [rpm]	14951	13070
Vazão mássica dos gases de exaustão - [kg/s]	18,6	14,5
Temperatura de exaustão - [°C]	437,2	491,0
Temperatura na entrada da turbina - [°C]	Não fornecida	Não fornecida

3.2 Análise energética

A tabela 2 mostra a análise energética para cada sistema selecionado anteriormente. Os dados obtidos referem-se as condições para o local da instalação. Nota-se pela tabela que, o melhor sistema selecionado é a **SB15** do fabricante **Mitsui Engineering & Shipbuilding**, pois apresenta a maior eficiência energética entre os sistemas de turbinas a gás selecionados.

Tabela 2. Análise energética para os sistemas selecionados

Máquina	Solar Turbines	Mitsui Engineering & Shipbuilding
Código	Centaur 40S	SB15
Eletricidade produzida- [kW]	2875	2225
Potência suprida no combustível - [kW]	11243,3	9475,1
Fluxo mássico de gases de exaustão - [kg/s]	16,5	12,9
Fluxo mássico de gás combustível - [kg/s]	0,243	0,222
Fluxo mássico de ar - [kg/s]	14,96	11,64
Relação estequiométrica	66,9	57,0
Fluxo de calor recuperado - [kW]	4876,9	4544,8
Eficiência da geração de energia elétrica - [%]	25,5	23,5
Eficiência térmica da turbina a gás- [%]	26,9	24,7
Eficiência da geração de água gelada - [%]	43,4	47,9
Eficiência global - [%]	68,9	71,4

3.3 Análise exergetica

A tabela 3 mostra a irreversibilidade para cada componente do sistema de turbina a gás associada ao sistema de refrigeração por absorção, selecionado anteriormente.

Tabela 3: Irreversibilidade de cada componente

Máquina	Solar Turbines	Mitsui Engineering & Shipbuilding
Código	Centaur 40S	SB15
Compressor - [kW]	1084,4	853,9
Câmara de combustão - [kW]	5310,0	3900,4
Turbina a gás - [kW]	5003,7	4427,5
Sistema de absorção - [kW]	2221,0	2189,6
Bomba - [kW]	1796,1	1673,7
Bomba do resfriador - [kW]	3965,6	3695,5
Resfriador - [kW]	2153,7	2007,0
Irreversibilidade total	21534,7	18748,0

Pela análise da tabela 3, o melhor sistema de turbinas a gás é a **SB15** do fabricante **Mitsui Engineering & Shipbuilding**, pois este apresenta a menor irreversibilidade total.

3.4 Análise exergoeconômica

A tabela 4 mostra os custos de produção exergetico de eletricidade e de água gelada, além do custo de manufatura exergetico, para cada sistema de turbina a gás selecionado.

Tabela 4: Análise exergoeconômica

Máquina	Solar Turbines	Mitsui Engineering & Shipbuilding
Código	Centaur 40S	SB15
Custo de produção exergetico de eletricidade - [US\$/kWh]	0,0861	0,1019
Custo da produção exergetico de água gelada- [US\$/kWh]	0,9742	0,9371
Custo de manufatura exergetico - [US\$/ano]	2,372.10 ⁶	2,298.10 ⁶

Pela análise da tabela 4, nota-se que o melhor sistema de turbina a gás é o **SB15** do fabricante **Mitsui Engineering & Shipbuilding**, pois apresenta o menor custo de manufatura exergetico, o próximo é a **Centaur 40S** do fabricante **Solar Turbines**.

4 CONCLUSÕES

O programa computacional foi desenvolvido com o objetivo de realizar análises energéticas, exergeticas e exergoeconômicas de sistemas de cogeração com turbina a gás associado ao sistema de refrigeração por absorção, sempre buscando escolher os melhores sistemas selecionados dentre os sistemas de turbinas a gás comercialmente disponíveis no

mercado. Da análise exergoeconômica, conclui-se que o melhor sistema escolhido é aquele que apresenta menor custo de manufatura exergético; deve-se observar que este fato está associado ao sistema que apresenta o menor índice de irreversibilidade.

A grande vantagem do programa computacional é a sua grande rapidez e eficiência na seleção e análise dos sistemas, já que o mesmo faz consulta a um banco de dados com mais de quatrocentas máquinas comercialmente disponíveis no mercado num tempo muito pequeno, corrigindo inclusive os níveis de performance para as condições locais da instalação.

O banco de dados do programa computacional é facilmente atualizado com a inclusão de novas máquinas que estiverem disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

- Aly, S. E., 1991, “Gas Turbine Waste Heat Driven Multiple Effect Absorption System”. Heat Recovery Systems and CHP, v 11, n° 5, p. 407-413, Pergamon Press Publishing London.
- Antunes, J. S., 1999, “Código Computacional para Análise de Sistemas de Cogeração com Turbinas a Gás”. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, Brasil, 157.
- Antunes, J. S., Silveira, J. L., Balestieri, J. A. P., 1999, “Cogeração em Ciclos Combinados: Um Programa Computacional para Análise Exergoeconômica”, Proceedings of the 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, anais em CD ROM, Águas de Lindóia, Brasil.
- Antunes, J. S., Silveira, J. L., Balestieri, J. A. P., 1998, “Programa para Seleção, Dimensionamento e Especificação de Sistemas de Cogeração com Turbina a Gás”. Proceedings of the VII Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor y Materia - LATCYM98, Anais..., Salta – Argentina, pp. 46-50.
- Badr, O., Probert, S. D., O’Callaghan, P., 1990, “Rankine Cycles for Steam Power-Plants”. Applied Energy, v. 36, pp. 191-231.
- Biasi, V.(publisher), 1997, “Gas Turbine World Handbook”, Southport, Pequot Publishing.
- Brooks, F. J., 1994, “GE Gas Turbine Performance Characteristics”. 38th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar. GER 3567E.
- Kotas, T. J., 1985, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”. Editôra Butterworths, London, 296p.
- Najjar, Y. S. H., Radhwan, A. M., 1991, “Comparison of total Energy Systems Using Gas Turbine and Diesel Engines for Combined Cooling”. International Journal of Refrigeration, v. 14, p. 351-356.
- Orlando, J. A., 1991, “Cogeneration Planner’s Handbook”. Rio de Janeiro: Editôra Prentice-Hall do Brasil Ltda., 314p.
- Si-Doek, O., Hyo-Sun, P., Si-Moon, K., Ho-Young, K., 1996, “Exergy Analysis for a Gas Turbine Cogeneration System”. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 118, pp. 782-791.
- Silveira, J. L., 1998, “Uma Contribuição para a Modelagem Termoeconômica: Otimização da Operação e do projeto de Sistemas Energéticos”. Tese de Livre-Docência, , Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, Brasil, 58.