



COGERAÇÃO EM CICLOS COMBINADOS: UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE EXERGOECONÔMICA

Júlio S. Antunes¹

José L. Silveira²

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá,¹Departamento de Matemática, ²Departamento de Energia Cx. P. 205 – 12500-000 – Guaratinguetá, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa computacional para análise exergoeconômica de sistemas de cogeração que empregam turbinas a gás associado a caldeira de recuperação e turbina a vapor. 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. 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. Um exemplo de estudo de caso da aplicação do programa computacional é apresentado neste trabalho.*

Palavras chaves: *Turbina a gás, Turbina a vapor, Cogeração, Exergia, Irreversibilidade*

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.

Diferentes programas computacionais têm sido propostos na literatura de modo a auxiliar no projeto de sistemas de cogeração. Resumidamente pode-se destacar os seguintes programas: o programa elaborado por Babus’Haq *et al.* (1988) que faz análise energética, avalia os custos associados e verifica se o sistema de cogeração é viável; Balestieri (1994)

apresenta um modelo em que a seleção dos ciclos combinados é automatizada por um modelo de otimização multiobjetivo, associado à programação linear; Witzani & Pechtl (1996) apresentam um programa para análise econômica baseado em planilha de cálculos associados a bibliotecas gráficas, cuja base de dados contém mais de cem modelos de turbinas a gás. Cabe aqui, destacar o programa TEMP – ThermoEconomic Modular Program (Agazzani & Massardo, 1997), no qual a análise termoeconômica para ciclos combinados é baseada na Análise Termoeconômica Funcional, que é feita através do diagrama funcional produtivo; o programa faz análises termodinâmica, exérgica e termoeconômica, mas não trabalha com dados de máquinas reais.

O programa computacional proposto (Antunes, 1999) seleciona sistemas de turbinas a gás comercialmente disponíveis no mercado (através de um banco de dados) nas condições ISO (International Standards Organization) e faz correções devido à temperatura ambiente, à umidade relativa e à altitude do local da instalação do sistema de cogeração. Em seguida, é feita a análise energética de cada sistema selecionado, com base em dados de máquinas reais. A análise exérgica de cada sistema selecionado é feita calculando-se a exergia e as irreversibilidades dos componentes do sistema. Por fim, a análise termoeconômica é baseada na análise do custo de manufatura exérgico (Silveira, 1998), com o objetivo de se determinar o melhor sistema de cogeração, dentre os selecionados, pautado na escolha do sistema que implique no menor índice de irreversibilidade total do ciclo combinado.

1.1 Sistema de cogeração proposto

O conceito de cogeração de energia pressupõe a combinação dos seguintes equipamentos: turbina a gás acoplada a gerador elétrico para a geração de eletricidade e caldeira de recuperação para a produção de vapor, a partir de energia térmica dos gases de exaustão da turbina. Como medida adicional para aumentar a eficiência do sistema de cogeração é utilizada uma turbina a vapor para a geração adicional de energia elétrica, constituindo assim o chamado ciclo combinado (Reis, 1991).

Um sistema de cogeração em ciclo combinado compõe-se de: turbina a gás para produção de energia mecânica ou elétrica; aproveitamento dos gases de escape através da caldeira de recuperação para produção de vapor de alta pressão; turbina a vapor para produção complementar de energia mecânica ou elétrica e aproveitamento do vapor de baixa pressão no processo industrial.

O esquema mais simples utilizado para cogeração em ciclo combinado é aquele que emprega um sistema de turbina a gás, caldeira de recuperação com um nível de pressão sem queima suplementar e turbina a vapor (Chase *et al.*, 1994), como mostra a ‘fig.1’.

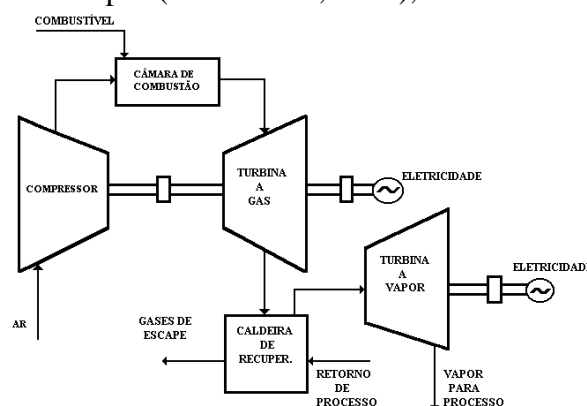


Figura 1 – Sistema de turbina a gás associada à turbina a vapor (ciclo combinado)

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.

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 programa foi elaborado para que o sistema de cogeração selecionado seja capaz de produzir os requerimentos térmicos de cada período de tempo, de maneira que sejam satisfeitas as necessidades de vapor do processo, ou seja, o programa trabalha com seleção de sistema operando em paridade térmica. Para tanto a energia elétrica é tratada como um subproduto que sempre se poderá comprar ou vender, dependendo da situação.

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: vazão mássica e pressão do vapor necessário ao processo, condições locais da instalação do sistema: temperatura ambiente, umidade relativa e a altitude; a 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, a unidade em que a vazão mássica de vapor deverá ser fornecida (kg/s, kg/h ou ton/h). Para a pressão de vapor, a unidade que o usuário pode optar é MPa, Atm ou Bar.

O programa também solicita do usuário que ele forneça a pressão e a temperatura do vapor na saída na caldeira de recuperação, entre as opções mostradas na “fig. 2”.

1) P = 2,1 MPa	e	T = 300 °C
2) P = 4,2 MPa	e	T = 400 °C
3) P = 6,3 MPa	e	T = 450 °C
4) P = 8,0 MPa	e	T = 500 °C

Figura 2 - Menu de opções para pressão e temperatura

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 operado na caldeira de recuperação (Antunes *et al.*, 1998a) e na turbina a vapor.

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.*, 1998b), 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 calor, eficiência de geração de energia elétrica e eficiência global do sistema

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. O programa informa se o sistema selecionado está operando com excesso ou déficit de energia elétrica, assim como mostra características da turbina a vapor, como: a pressão e a temperatura na entrada, pressão na saída, potência de eixo, etc.

2.2 Análise exergetica

Terminada a análise energética, o programa efetua a análise exergetica, 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 associada à caldeira de recuperação e turbina a vapor, bem como a irreversibilidade total do sistema. Na etapa seguinte é realizado o cálculo das eficiências exergeticas, segundo Valero & Serrano (1994), para cada componente do sistema de turbina a gás selecionado; finalmente, os resultados dos cálculos das exergias, irreversibilidades e eficiências exergeticas 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 exergetica, o programa calcula as funções exergeticas incrementais (Silveira, 1998) associadas a cada componente do sistema selecionado; em seguida o programa calcula o custo exergetico anualizado de produção de eletricidade e custo exergetico anualizado de produção de vapor. Numa próxima etapa o programa calcula o custo de manufatura exergetico (Silveira, 1998; Antunes, 1999) do sistema de turbina a gás (no apêndice é apresentado um resumo da determinação do custo de manufatura exergetico). Finalmente o programa mostra no monitor de vídeo e grava no arquivo de dados os custos de produção exergetico de eletricidade e vapor, o custo de manufatura exergetico e os melhores sistemas selecionados, isto é, aqueles que apresentam menores custos de manufaturas exergeticos ou menores irreversibilidades totais associados.

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 à caldeira de recuperação e turbina a vapor (ciclo combinado) para geração de 25 ton/h de vapor de processo a pressão de 1,3 MPa, em um local situado a 640 m de altitude, com umidade relativa média de 76% e temperatura ambiente média de 30 °C, sendo a eletricidade requerida de 30000 kW. Para a caldeira de recuperação considera-se que o vapor na saída está a pressão de 8,0 MPa e a temperatura de 500 °C. 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	Dresser - Rand	Dresser – Rand	Stewart & Stevenson
Código da máquina	DR61G PLUS	VECTRA – 40	TG2500+
Ano de fabricação	1996	1997	1997
Peso - [kg]	38555	38555	204117
Dimensões – LxWxH [ft]	47,0 x 11,5 x 10,5	51,0 x 12,5 x 13,3	71,0 x 13,6 x 13,5
Potência de eixo - [kW]	26980	27350	28600
Heat Rate - [Btu/kWh]	9215	9308	8660
Razão de pressão	21,2	21,0	22,8
Rotação da turbina - [rpm]	3000	6200	3600
Vazão mássica dos gases de exaustão - [kg/s]	83,14	81,01	83,01
Temp. de exaustão - [°C]	511,1	515,5	510,0
Temp. na entrada da turbina - [°C]	796,1	798,3	815,5

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 TG2500+ do fabricante Stewart & Stevenson, pois apresenta a maior eficiência energética entre os sistemas de turbinas a gás selecionados.

Tabela 2. Análise energética para os sistemas selecionados

Nome do fabricante	Dresser - Rand	Dresser – Rand	Stewart & Stevenson
Código da máquina	DR61G PLUS	VECTRA – 40	TG2500+
Eletricidade produzida- [kW]	22070,0	22370,0	23390,0
Potência suprida pelo combust. - [kW]	64968,7	66524,3	64721,8

Fluxo mássico de gases de exaustão - [kg/s]	73,99	72,10	73,87
Potência de eixo turbina a vapor - [kW]	4917,8	4851,7	4894,4
Fluxo mássico gás combustível - [kg/s]	1,47	1,45	1,48
Fluxo mássico de ar - [kg/s]	66,54	64,82	66,43
Relação estequiométrica	49,1	48,6	48,9
Fluxo de calor recuperado - [kW]	3033,0	2992,5	3018,6
Eficiência da geração de energia elétrica - [%]	43,3	42,7	45,6
Eficiência térmica da turbina a gás - [%]	35,7	35,3	38,0
Eficiência da geração de calor - [%]	25,3	24,4	25,3
Eficiência global - [%]	68,6	67,1	70,9
Energia elétrica - [kW]	Déficit – 3260,0	Déficit – 3020,0	Déficit – 1957,0

3.3 Análise exérgica

A “Tabela 3” mostra a eficiência exérgica para cada componente do sistema de turbina a gás associada à caldeira de recuperação e a turbina a vapor, selecionado anteriormente.

Tabela 3. Eficiência exérgica

Nome do fabricante	Dresser - Rand	Dresser – Rand	Stewart & Stevenson
Código da máquina	DR61G PLUS	VECTRA – 40	TG2500+
Compressor [%]	84,5	84,9	85,3
Câmara de combustão – [%]	73,5	71,5	74,2
Turbina a gás – [%]	55,5	56,9	56,1
Caldeira de recuperação – [%]	64,7	64,5	64,7
Bomba – [%]	60,8	60,8	60,8
Turbina a vapor – [%]	84,7	84,7	84,7

A “Tabela 4” mostra a irreversibilidade para cada componente do sistema de turbina a gás associada à caldeira de recuperação e a turbina a vapor, selecionado anteriormente.

Tabela 4. Irreversibilidade de cada componente

Nome do fabricante	Dresser - Rand	Dresser – Rand	Stewart & Stevenson
Código da máquina	DR61G PLUS	VECTRA – 40	TG2500+
Sistema turbina a gás - [kW]	24522,6	25954,1	22972,2
Caldeira de recuperação - [kW]	6148,7	6120,0	6105,8
Bomba - [kW]	137,4	135,5	136,7
Turbina a vapor - [kW]	1513,7	1493,3	1506,5
Irreversibilidade total - [kW]	72443,7	72609,7	72189,9

Pela análise da “Tabela 4”, o melhor sistema de turbinas a gás é a TG2500+ do fabricante Stewart & Stevenson, pois este apresenta a menor irreversibilidade total.

3.4 Análise exergoeconômica

A “Tabela 5” mostra os custos de produção exergético de eletricidade e de vapor, além do custo de manufatura exergético, para cada sistema de turbina a gás selecionado.

Tabela 5: Análise exergoeconômica

Nome do fabricante	Dresser - Rand	Dresser – Rand	Stewart & Stevenson
Código da máquina	DR61G PLUS	VECTRA – 40	TG2500+
Custo de produção exergético de eletricidade TG- [US\$/MWh]	78,28	78,81	77,98
Custo de produção exergético de eletricidade TV- [US\$/MWh]	88,62	87,81	89,11
Custo da produção exergético de vapor - [US\$/MWh]	93,17	92,40	93,65
Custo de manufatura exergético - [US\$Bilhões/ano]	16,78	16,85	16,74

Pela análise da “Tabela 5”, nota-se que o melhor sistema de turbina a gás é o TG2500+ do fabricante Stewart & Stevenson, pois apresenta o menor custo de manufatura exergético, o próximo é a DR61G PLUS do fabricante Dresser - Rand. Deve observar que este fato está associado ao sistema que apresenta menor índice de irreversibilidade total, conforme mostrado na tabela 4.

4. CONCLUSÕES

O programa computacional foi desenvolvido com o objetivo de realizar análises energéticas, exergéticas e exergoeconômicas de sistemas de em ciclos combinados, 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

- Agazzani, A. & Massardo, A. A., 1997, A Tool for Thermo-economic Analysis and Optimization of Gas, Steam, and Combined Plants, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 119, pp. 885-891.
- 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.

- Antunes, J. S., Silveira, J. L., Balestieri, J. A. P., 1998a, Modelagem de Sistema de Cogeração Utilizando Turbina a Gás. In: Proceedings of the 7TH Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences – ENCIT98, *Anais...*, Rio de Janeiro - RJ, pp. 342-436.
- Antunes, J. S., Silveira, J. L., Balestieri, J. A. P., 1998b, 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.
- Babus’Haq, R. F. Probert, S. D., O’Callaghan, P. W., 1988, Assessing the Prospects and Commercial Viabilities of Small-scale CHP Schemes. *Appl. Energy*, v. 31, n° 1, p.19-30.
- Badr, O., Probert, S. D., O’Callaghan, P., 1990, Rankine Cycles for Steam Power-Plants. *Applied Energy*, v. 36, pp. 191-231.
- Balestieri, J. A. P., 1994, Planejamento de Centrais de Co-geração: Uma Abordagem Multiobjetivo. Tese de Doutorado. Universidade de Campinas, 154p. Campinas, SP.
- 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.
- Chase, D. L., Tomlinson, L. O., Davidson, T. L., Smith, R. W., Maslak, C. E., 1994, GE Combined-Cycle Product line and Performance, Proceedings in the 38th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar, GER 3576E.
- Kotas, T. J., 1985, The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Editôra Butterworths, London, 296p.
- Reis, J. G. N., 1991, Co-geração de Energia na Indústria, Proceedings of the XI SNPTEE – Seminário Nacional de produção e Transmissão de Energia Elétrica, Novembro, Rio de Janeiro, pp. 1-6.
- 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.
- Valero, A. C., Serrano, M. A. L., 1994, Curso de Termoeconômica. Universidade de Campinas, Campinas.

COGENERATION IN COMBINED CYCLES: A COMPUTATIONAL PROGRAM FOR EXERGOECONOMIC ANALYSIS

Abstract. *This work presents the development of a computational program for exergoeconomic analysis of cogeneration systems that use gas turbines associated with the recovery boiler and steam turbine. The computational program selects systems of gas turbines, seeking the operation in thermal parity, through a database composed of gas turbines commercially available in the market. The computational program corrects the parameters of performance of the systems selected for the local conditions of the installation. The exergoeconomic analysis is made by taking into account manufacturing of exergetic manufacture in which the best system is considered among them selected, in order to present the smallest irreversibility index. An application of the computational program is presented in this work.*

Keywords: *Gas turbine, Steam turbine, Cogeneration, Exergy, Irreversibility*

APÊNDICE

1. Determinação do custo de manufatura exerético

Através do diagrama de custos associados a manufatura, fig. 3, determina-se o custo de

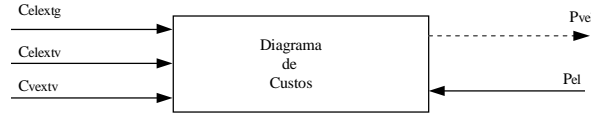


Figura 3 - Diagrama de custos associados

manufatura exerético (CM_{ex}), o qual é encontrado pela soma dos custos de geração e de compra ou venda das distintas energias terciárias associadas. O excedente de energia elétrica é representado no diagrama pela linha pontilhada quando for o caso.

A equação para o custo de manufatura exerético, em US\$/ano, no caso de déficit de energia elétrica, é dada por,

$$CM_{ex} = C_{electg} \cdot H \cdot Y_{C.1} + C_{electv} \cdot H \cdot Y_{H.1} + C_{vextv} \cdot H \cdot Y_{H.2} + P_{el} \cdot H \cdot (E_r - Y_{C.1} - Y_{H.1}) \quad (1)$$

ou, quando houver excedente de energia elétrica, é dada por,

$$CM_{ex} = C_{electg} \cdot H \cdot Y_{C.1} + C_{electv} \cdot H \cdot Y_{H.1} + C_{vextv} \cdot H \cdot Y_{H.2} - P_{vel} \cdot H \cdot (-E_r + Y_{C.1} + Y_{H.1}) \quad (2)$$

sendo o custo exerético de produção de eletricidade pela turbina a gás (C_{electg}), em US\$/kWh, dado por,

$$C_{electg} = \frac{I_{stg} \cdot f \cdot T_{ex}}{H \cdot Y_{C.1}} + \frac{C_{comb} \cdot (Y_{B.1} - Y_{C.2})}{Y_{C.1}} \quad (3)$$

o custo exerético de produção de eletricidade pela turbina a vapor (C_{electv}), em US\$/kWh, dado por,

$$C_{electv} = \frac{(I_{stv} + I_{vcr}) \cdot f \cdot T_{ex} \cdot f1_{ex}}{H \cdot Y_{H.1}} + \frac{C_{comb} \cdot (Y_{C.2} - Y_{H.2})}{Y_{H.1}} \quad (4)$$

e o custo exerético de produção de vapor (C_{vextv}), em US\$/kWh, é dado por,

$$C_{vextv} = \frac{(I_{stv} + I_{vcr}) \cdot f \cdot T_{ex} \cdot f2_{ex}}{H \cdot Y_{H.2}} + \frac{C_{comb} \cdot (Y_{C.2} - Y_{H.1})}{Y_{H.2}} \quad (5)$$

Os fatores exeréticos de produção de eletricidade e de vapor ($f1_{ex}$) e ($f2_{ex}$) são dados respectivamente por,

$$f1_{ex} = \frac{Y_{H.1}}{Y_{H.1} + Y_{H.2}} \quad (6)$$

$$f_{2ex} = \frac{Y_{H.2}}{Y_{H.1} + Y_{H.2}} \quad (7)$$

O fator de anuidade (f), em 1/ano, dado pela equação,

$$f = \frac{q^k \cdot (q-1)}{q^k - 1} \quad (8)$$

com,

$$q = 1 + j/100 \quad (9)$$

onde k é o período de amortização ou pay-back, dado em anos, j é a taxa anual de juros em % e H é o período equivalente de produção, em horas/ano. C_{comb} é o custo do combustível, gás natural, dado em US\$/kWh e E_r é a eletricidade requerida pelo processo, em kW.

O custo de investimento no sistema de turbina a gás (I_{stg}), segundo dados obtidos do Gas Turbine World Handbook (Biasi, 1997), agrupadas em forma de gráficos e a partir de ajustes de regressão tem-se que o I_{stg} em kW é dado por:

$$I_{stg} = -3 \cdot 10^{-11} \cdot \dot{W}_e^3 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot \dot{W}_e^2 - 0,045 \cdot \dot{W}_e + 776,63 \quad (10)$$

O custo de investimento em caldeira de recuperação (I_{vcr}) foi considerado com sendo 30% do custo do investimento no sistema de turbina a gás associado.

O custo do investimento em turbina a vapor (I_{stv}), em kW, segundo Balestieri (1994) é dado por,

$$I_{stv} = (\dot{m}_v / 6,4) \cdot 1000 \quad (11)$$

Onde o fluxo mássico de vapor (\dot{m}_v) é dado em kg/h. T_{ex} é a taxa de manutenção em base exergética considerado 10% sobre o investimento (fator multiplicativo de 1,1).

As funções exergéticas Y, em kW, são dadas por:

$$\begin{aligned} Y_{C.1} &= E_p, \\ Y_{H.1} &= \dot{W}_{etv}, \\ Y_{H.2} &= \dot{m}_v \cdot ex_8, \\ Y_{B.1} &= E_{comb} \\ Y_{C.2} &= \dot{m}_{gas} \cdot (ex_4 - ex_8) \end{aligned} \quad (12)$$

Em que E_p é a eletricidade produzida na turbina a gás, em kW, \dot{W}_{etv} é a potência da turbina a vapor, em kW, ex_8 é a exergia específica na saída da turbina a vapor (condição real), ex_4 é a exergia específica na saída da turbina a gás, em kJ/kg, \dot{m}_{gas} é o fluxo mássico de gases de exaustão, em kg/s e finalmente E_{comb} é a potência suprida pelo combustível, em kW.

Com as equações acima, escolhe-se o melhor sistema de turbina a gás como sendo aquele que apresente o menor valor para o custo de manufatura exergético, o qual está associado o menor índice de irreversibilidade total do sistema.