

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO EXERGEOCONÔMICA DE SISTEMAS DE TRIGERAÇÃO

Fábio Moraes de Oliveira

fabiomoraesdeoliveira@gmail.com

Resumo. Diferentes configurações de plantas de trigeração permitem, através da queima de um combustível como o gás natural, a obtenção de três produtos: energia elétrica, vapor para determinado processo industrial e água gelada através do uso de um chiller. Do ponto de vista de implementação na indústria, cabe à análise exergoeconômica fornecer a dimensão dos custos envolvidos neste processo. Assim, o presente trabalho busca definir as configurações mais viáveis do ponto de vista exergético e econômico para cada cenário de demanda. Os custos totais envolvidos foram otimizados em base monetária para diversos sistemas com a variação da magnitude de energia elétrica e refrigeração extraídas dos ciclos, detectando-se desta forma, vantagens comparativas ao investidor.

Palavras chave: Trigeração, exergoeconomia, otimização, custos.

1. Introdução

O tema central considerado é a otimização em termos exergéticos de diversas configurações de plantas de trigeração. Foram introduzidos balanços de custo em termos monetários na análise exergoeconômica de cada uma das plantas no sentido de detectar vantagens comparativas na implementação.

O trabalho consiste em determinar os pontos que minimizam o custo total horário em termos monetários [US\$/h] na geração de energia sob três formas – eletricidade, calor na extração de vapor para determinado processo industrial e insumo energético para um chiller na produção de água gelada.

Inicialmente foi realizada a minimização dos custos para casos pontuais de demanda, em três diferentes situações, seguindo as linhas de aplicação presentes no trabalho de BURBANO (2011).

Já a fase final do estudo busca uma generalização do comportamento das plantas diante da variação das demandas de eletricidade e refrigeração.

2. Aspectos teóricos e descrição da metodologia

Os sistemas térmicos de trigeração possuem como produtos a geração de potência motora convertida em energia elétrica através de acoplamentos a geradores, de vapor destinado a um determinado processo industrial e de água gelada. Os ciclos de potência e refrigeração associados podem possuir diversas combinações de configurações – ciclo Rankine ou combinado (Rankine-Brayton) para o ciclo de potência, assim como chiller de compressão, de absorção (simples ou duplo estágio) ou ejeto-compressão no caso do ciclo de refrigeração.

Ao longo do projeto, trabalhou-se basicamente com quatro configurações diferentes de plantas, e uma análise comparativa foi traçada com base em princípios da exergoeconomia, onde os balanços de custo são fundados nos fluxos de exergia ao longo do sistema.

Apesar das variações encontradas nos ciclos de potência e refrigeração, o funcionamento das plantas é bastante similar do ponto de vista do sentido percorrido pela água na obtenção dos três produtos energéticos. Pode-se dizer que os sistemas operam em cascata térmica.

O projeto visa à obtenção dos parâmetros que implicam no máximo rendimento exergético e o mínimo custo em base monetária das plantas de trigeração, sendo definidas as variáveis:

- (i). A demanda de eletricidade da planta W_{PLANTA} (kW);
- (ii). As condições do vapor saturado utilizado no processo industrial (pressão e vazão mássica);
- (iii). O fluxo de calor absorvido pelo chiller no evaporador (kW).

2.1. Balanços de custo e exergoeconomia

O equacionamento e rotinas envolvidas propõem minimizar uma função objetivo representada pelo custo global de produção dos três produtos da planta, o custo total em base monetária (CTBM) segundo a Eq. 1. Esta pode ser representada pelo fluxo de caixa por segundo que multiplicado pelo período de $\Delta T = 3600$ s fornece o gasto total horário de produção dos três produtos da planta [US\$/h].

$$\text{CTBM} = 3600 * [C_{\text{ELETR.}}(W_{\text{PLANTA}} + W_{\text{REDE}}) + C_{\text{AG.GELADA}} \cdot (\Delta B_{\text{AG.GELADA}}) + C_{\text{VAPOR}} \cdot (\Delta B_{\text{PROCESSO}})] \quad (1)$$

Assim, na determinação dos custos exergéticos específicos de cada produto, faz-se necessária a análise dos balanços e repartição dos custos dos produtos intermediários e finais para cada equipamento.

Considerando B_i os fluxos de exergia (kW) dos insumos e produtos e c_i os custos específicos em base exergética (US\$/kJ), pode-se escrever o balanço de custo para cada equipamento pela Eq. 2.

$$\sum_i B_i \cdot c_i \Big|_{ENTRADA} + \dot{C}_{EQ} = \sum_i B_i \cdot c_i \Big|_{SAÍDA} \quad (2)$$

Onde C_{EQ} é o custo relativo ao equipamento de operação e manutenção (Eq. 3). A estimativa destes custos foi baseada no trabalho de BOEHM (1987) ajustado pelo índice de preços do dólar americano no período 1987-2011. O princípio de distribuição do investimento inicial ao longo da vida útil dos equipamentos seguiu o sistema francês Price que define o fator f_A (Eq. 4) a uma taxa de juros i de 15% aa e um horizonte N de 20 anos.

$$\dot{C}_{EQ} = \frac{C_r \cdot f_A \cdot f_{O\&M}}{3600 \cdot NHO} \cdot \left(\frac{S}{S_r} \right)^m \quad (3)$$

$$f_A = \frac{i}{1 - (i + 1)^{-N}} \quad (4)$$

Além disso, definem-se:

- NHO representa o número de horas de operação por ano. Foi adotado o valor de 8000h/ano para a presente análise.
- $f_{O\&M}$ é um fator de correção devido à operação e manutenção. O valor utilizado foi de 1,06.
- C_r , S_r , S e m são valores dependentes do equipamento e tabelados na bibliografia.

O critério utilizado na partição de custos para equipamentos que possuem mais de um produto (como é o caso da turbina a vapor) foi o critério da **igualdade**, segundo o qual custos não devem ser discriminados, e os custos exergéticos são igualmente distribuídos entre cada produto.

2.2. A rotina de otimização utilizada

A primeira parte do estudo envolveu uma primeira aproximação com as rotinas de otimização disponibilizadas pela versão profissional do EES® 2010. Apesar de se apresentar bastante robusto, o método do algoritmo genético é demasiadamente custoso do ponto de vista computacional, e não permitiria a análise do volume de dados com o qual se pretendia trabalhar. Assim, como o trabalho tomou por base os pontos já determinados por BURBANO (2011) como critério de verificação, determinados estes pelo algoritmo genético, foi decidida a utilização do Simplex de Nelder-Mead para a análise da variação de condições de demanda.

Segundo o método, tomam-se $N+1$ pontos dentro dos intervalos definidos para as variáveis independentes, onde N é o número de graus de liberdade do sistema. O ponto de valor mais distante do objetivo de otimização é desprezado e o ponto simétrico ao hiperplano formado por todos os outros pontos é tomado para a próxima avaliação, e assim sucessivamente até que um dos critérios de parada seja atingido.

3. As restrições do problema de otimização

O custo total em base monetária (Eq. 1) é a função a ser minimizada, sujeita aos parâmetros de entrada definidos pelas demandas da planta na Seção 2. As restrições do problema de otimização dos sistemas são representados abaixo.

$$\begin{aligned} 20 &\leq P_{CALDEIRA} \leq 120 && [bar] \\ 280 &\leq T_{CALDEIRA} \leq 580 && [^{\circ}C] \\ 0,8 &\leq P_{EXTRAÇÃO\ CHILLER} \leq 1,5 && [bar] \end{aligned}$$

Os intervalos considerados para os três parâmetros foram igualmente extraídos do trabalho de BURBANO (2011), por condições de disponibilidade do mercado.

4. Estudos de caso

Tomando caráter complementar ao trabalho de BURBANO (2011), trabalhou-se inicialmente com estudos de uma indústria de laticínios, de um hospital e de uma indústria de bebidas, cada qual com as duas plantas que apresentam ciclo Rankine de Potência e refrigeração por compressão de vapor (Fig. 1) e absorção de simples estágio (Fig. 2).

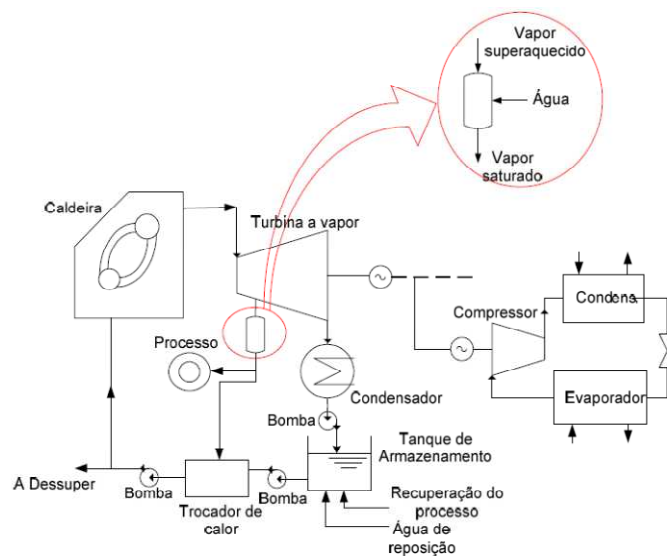


Figura 1. Ciclo Rankine e refrigeração por compressão de vapor.

O segundo exemplo de aplicação envolve uma variação no ciclo de refrigeração com relação à primeira planta. Neste caso, tem-se um chiller de absorção simples de simples estágio com a solução água-LiBr. Neste caso, a própria água funciona como fluido refrigerante.

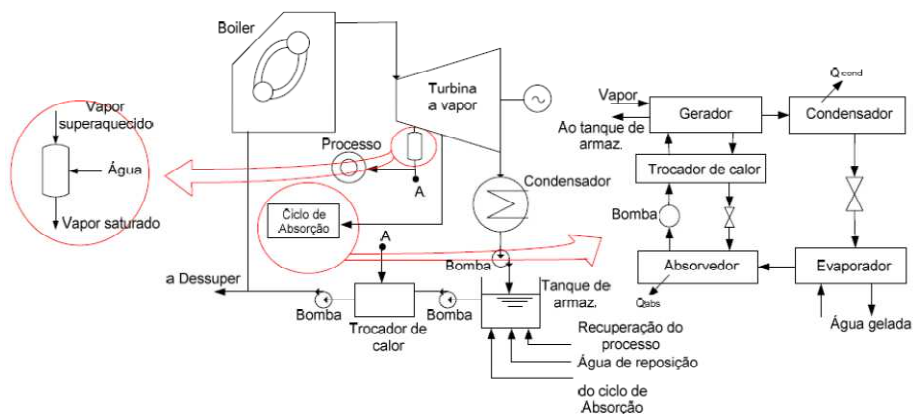


Figura 2. Ciclo Rankine e refrigeração por absorção simples

As demandas consideradas nos estudos de caso para efeito da minimização dos custos podem ser avaliadas na Tabela 1.

Tabela 1. Demandas das plantas para cada caso na minimização do CTBM

Aplicação	W_{PLANTA} (kW)	$Q_{EVAPORADOR}$ (kW)	$M_{VAPOR\ PROC}$ (kg/s)	$p_{VAPOR\ PROC}$ (bar)
Ind. Laticínios	2300	525	2,00	5,0
Hospital	2200	2100	1,55	5,0
Ind. Bebidas	8000	2000	1,70	5,0

Resumindo-se os resultados obtidos neste estágio do projeto, são tomados os dados de rendimento energético, exergetico e os custos por unidade de tempo para todos os cenários em análise nos pontos de mínimo CTBM (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados finais para 2 configuração de refrigeração em 3 cenários de demanda

Análise por Ciclos de Refrigeração		
Aplicação 1 - Indústria de Laticínios		
Parâmetro	Compressão	Absorção (SE)
$\eta_{\text{ENERGETICO}}$	68,80%	67,98%
$\eta_{\text{EXERGETICO}}$	32,00%	31,64%
CTBM (US\$/h)	345,93	347,57
Aplicação 2 - Hospital		
Parâmetro	Compressão	Absorção (SE)
$\eta_{\text{ENERGETICO}}$	69,89%	71,67%
$\eta_{\text{EXERGETICO}}$	28,27%	29,06%
CTBM (US\$/h)	367,52	352,46
Aplicação 3 - Indústria de Bebidas		
Parâmetro	Compressão	Absorção (SE)
$\eta_{\text{ENERGETICO}}$	44,46%	44,28%
$\eta_{\text{EXERGETICO}}$	28,08%	27,99%
CTBM (US\$/h)	950,29	949,62

Pôde-se notar que no caso da aplicação do hospital (em que se tem uma mesma proporção de energia elétrica e refrigeração), um aumento do rendimento exergético é acompanhado por uma queda nos custos, evidenciando a vantagem em se trabalhar com ciclos de absorção quando se possui uma demanda importante de água gelada em relação à demanda de eletricidade. Isso ocorre pelo fato de que os ciclos de refrigeração por absorção possuem uma menor destruição de exergia com relação aos ciclos por compressão de vapor. Uma segunda conclusão importante do trabalho é a vantagem dos sistemas de refrigeração por absorção ao se trabalhar com grandes complexos em relação a plantas menores de cogeração. As aplicações 1 e 3 possuem ambas aproximadamente a mesma relação de demanda de eletricidade sobre refrigeração – da ordem de 4. Porém, a indústria de bebidas apresenta uma demanda 4 vezes superior à fábrica de laticínios. Por trabalhar com demandas sensivelmente menores, esta última possui um custo ligeiramente inferior trabalhando com compressão de vapor. Isso não ocorre na indústria de bebidas por os ciclos de absorção são menos custosos para grandes demandas de refrigeração.

Na sequência do documento serão apresentadas análises comparativas nas generalizações nos casos de demanda de eletricidade e refrigeração no sentido de traçar o comportamento dos principais parâmetros relacionado à análise exergoeconômica das plantas.

5. Análise na variação das condições de demanda

Os dados obtidos ao do trabalho com quatro configurações diferentes de plantas permitem ao menos três cenários de análise para os intervalos de demanda considerados, podendo ser extrapolados a sistemas mais robustos e a casos particulares como os três estudos apresentados anteriormente. As demandas consideradas fixas para efeito desta análise estão alinhadas com o caso da indústria de laticínios, i.e.

Tabela 3. Padrão para análise na variação de demandas

Aplicação	W_{PLANTA} (kW) Quando fixo	$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW) Quando fixo	$M_{\text{VAPOR PROC}}$ (kg/s)	$p_{\text{VAPOR PROC}}$ (bar)
Ind. Laticínios	2300	525	2,00	5,0

5.1. Cenário de Análise A: Refrigeração por compressão “versus” absorção de simples estágio

A nível de análise exergoeconômica, serão apresentadas superposições das curvas relativas a dois parâmetros: custo total em base monetária e rendimento exergético. Estes foram dados em função da variação da demanda de eletricidade e refrigeração dos sistemas (outras demandas fixas de acordo com a Tab. 3).

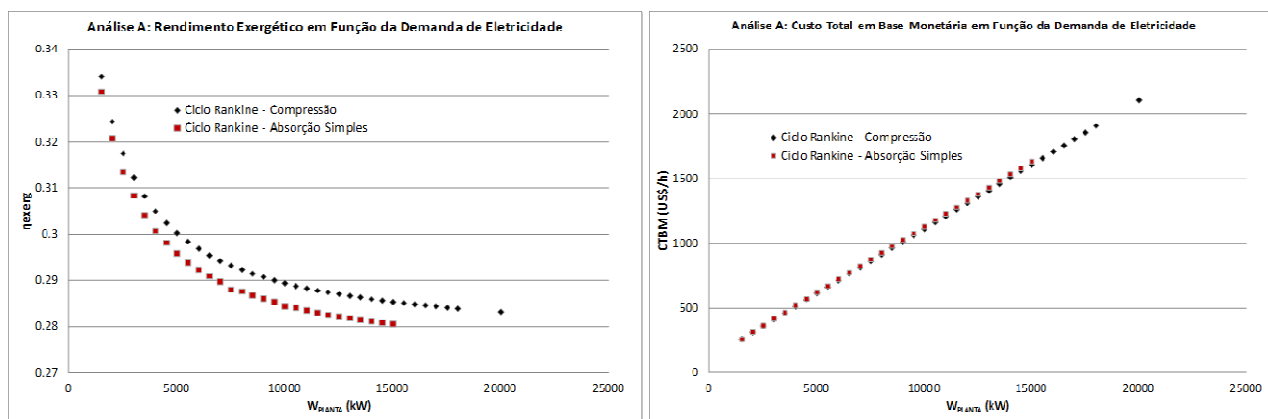


Gráfico 1. Comparação do rendimento exergético e custo total em função da eletricidade – Análise A

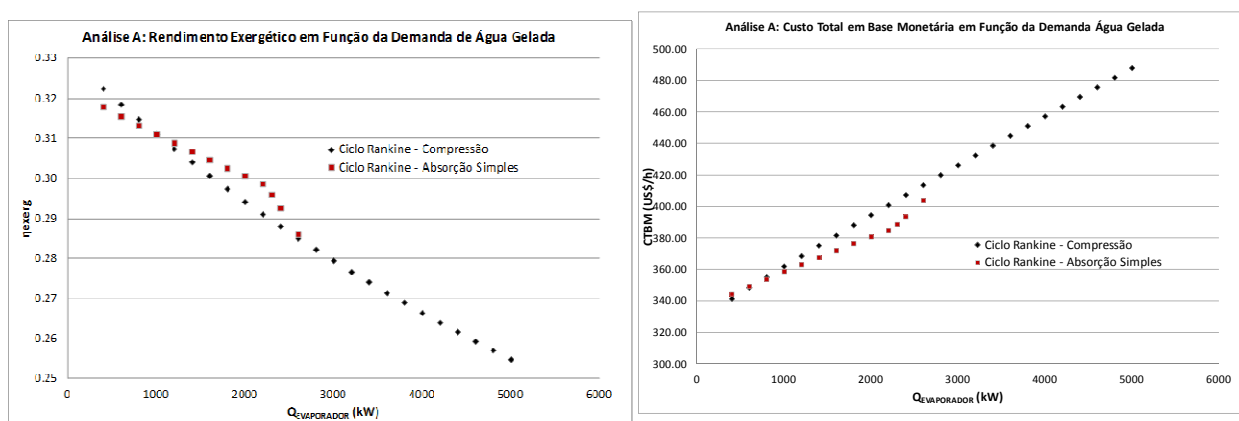


Gráfico 2. Comparação do rendimento exergético e custo total em função da refrigeração – Análise A

Como havia sido previsto pelos estudos de caso, quando se possui uma baixa demanda de água gelada em relação à de eletricidade (como apresentado pelas figs. 15.1 e 15.2), o ciclo de refrigeração por compressão possui um rendimento exergético superior, além de ser sensivelmente menos custoso em termos monetários apesar de apresentarem ambos uma mesma tendência no crescimento linear. O efeito da vantagem em termos exergéticos se dá pelo fato de que a exergia mais alta destruída pelo chiller a compressão de vapor é compensada por não haver uma extração na turbina a vapor, diminuindo assim o custo dos seus produtos. Já no caso em que se tem uma demanda substancial de água gelada, há uma inversão de papéis em torno de 1000 kW trocados no evaporador. A partir deste ponto, os custos associados ao chiller de compressão passam a ser superiores devido à alta exergia destruída pelo sistema de refrigeração. Pode-se notar que a demanda de refrigeração por absorção é limitada pela potência fornecida na turbina, pois a partir de certo ponto, o vapor que deve ser extraído da turbina não atinge as condições de extração necessárias ao alto consumo de calor do chiller.

5.2. Cenário de Análise B: Refrigeração por absorção de duplo estágio “versus” simples estágio

O chiller de absorção de duplo efeito trabalha com dois níveis de pressão para o condensador e para o gerador, havendo um trocador de calor entre o condensador de alta pressão e o gerador de baixa pressão. Em geral os chillers de duplo efeito possuem eficiências exergéticas superiores aos de simples estágio. Os custos exergéticos destas máquinas são, portanto, reduzidos. A figura abaixo representa esquematicamente a configuração deste sistema de refrigeração.

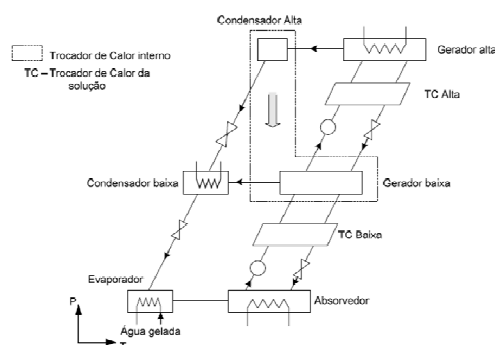


Figura 3. Chiller de absorção de duplo efeito

Os mesmos parâmetros analisados para o caso anterior são demonstrados abaixo nas figuras que seguem.

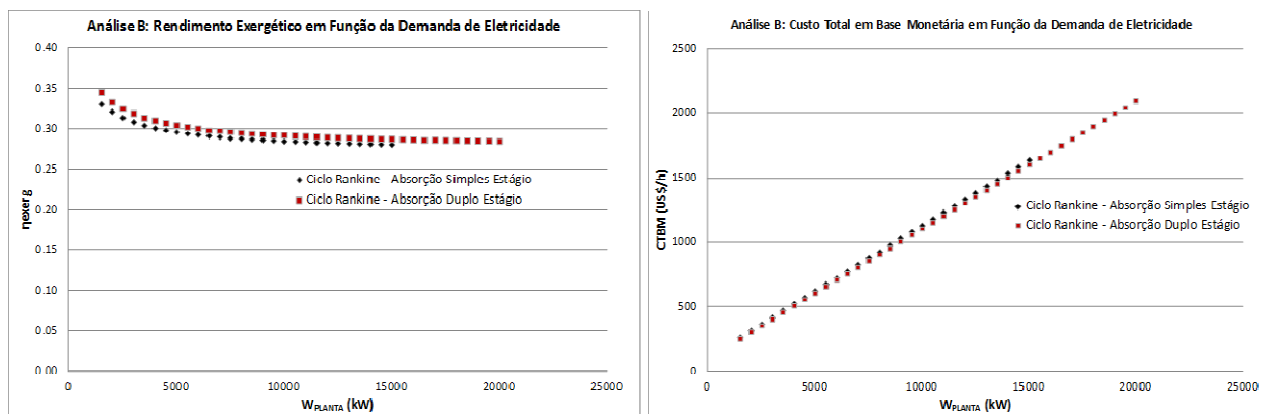


Gráfico 3. Comparação do rendimento exergético e custo total em função da eletricidade – Análise B

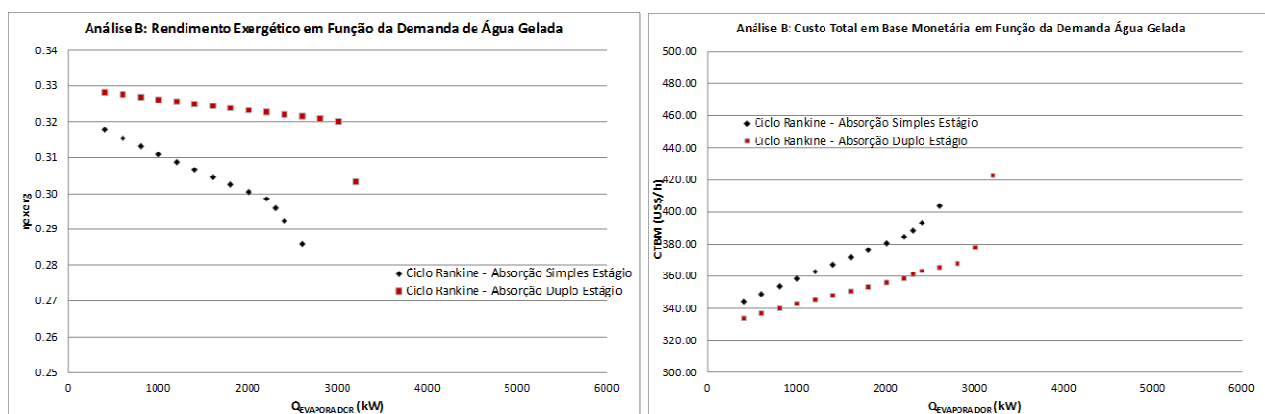


Gráfico 4. Comparação do rendimento exergético e custo total em função da refrigeração – Análise B

Como citado anteriormente, o sistema de refrigeração de duplo-estágio possui visível vantagem comparativa em relação ao de simples estágio. Esta vantagem é principalmente traduzida no caso em que se varia a demanda de água gelada. Vale salientar que, mesmo sendo um equipamento mais custoso em termos de investimento inicial, o sistema de duplo estágio se mostra superior em termos de custo na produção dos três produtos da planta ao longo de sua operação. Os sistemas são igualmente limitados à demanda de eletricidade como explicitado na seção anterior (5.1).

5.3. Cenário de Análise C: Ciclo Rankine de potência “versus” ciclo combinado

A quarta e última configuração de planta estudada a nível do trabalho de formatura é o ciclo combinado de potência com uma turbina a gás e uma turbina a vapor, com um chiller de absorção de simples estágio para efeito de refrigeração. O esquemático do sistema pode ser observado na figura abaixo.

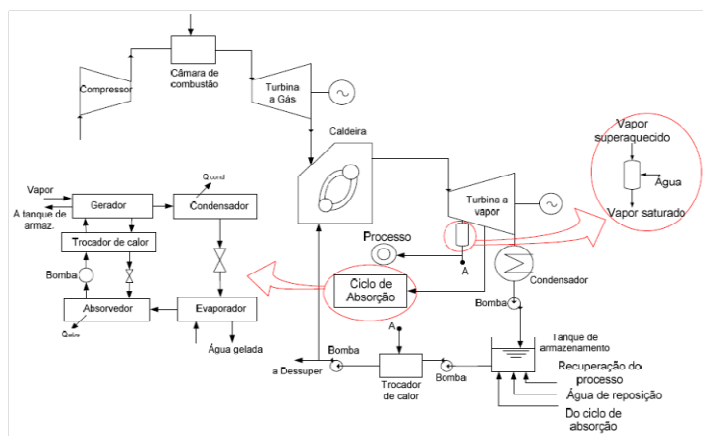


Figura 4. Ciclo combinado de potência e refrigeração por absorção.

A variação de demanda de eletricidade no caso do ciclo combinado se deu pela aplicação de quatro modelos de turbina a gás diferentes: CENTAUR50, SGT100, SGT300 e MARS90. Dado que no ciclo combinado a eletricidade

obtida pela planta depende da demanda de refrigeração, novas tomadas de dados para o ciclo Rankine tiveram de ser realizadas para que esta análise fosse tratada.

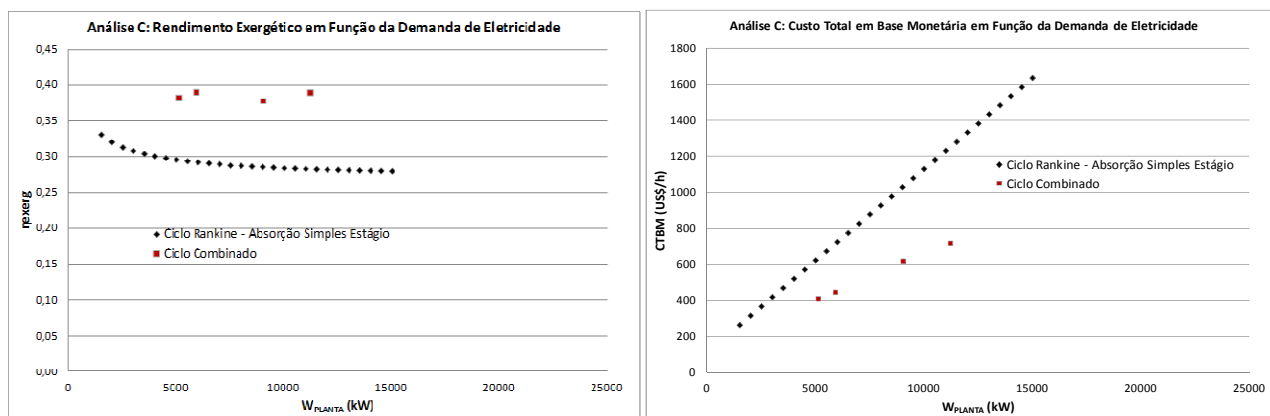


Gráfico 5. Comparação do rendimento exergético e custo total em função da eletricidade – Análise C

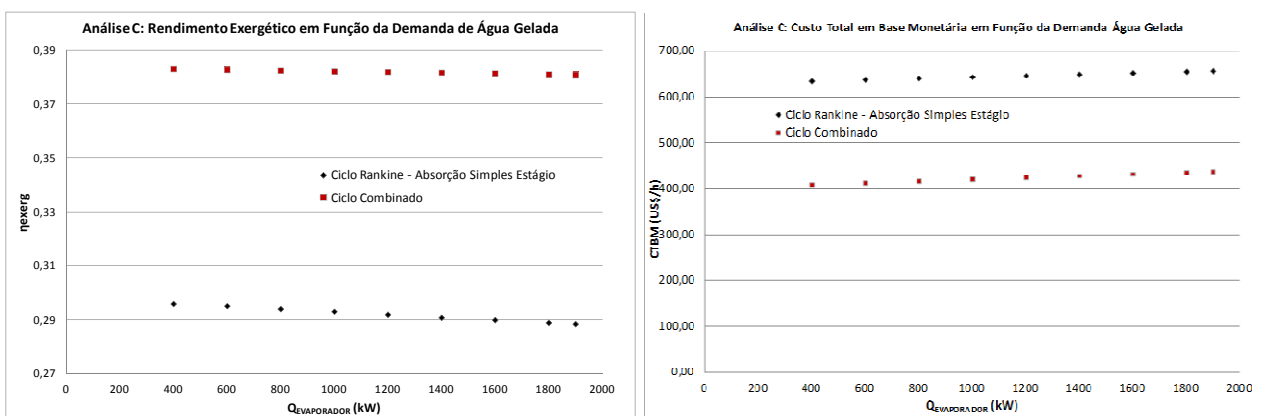


Gráfico 6. Comparação do rendimento exergético e custo total em função da refrigeração – Análise C

Apesar de a tendência decrescente não poder ter sido identificada para a eficiência do ciclo combinado na variação da demanda de eletricidade, pode-se concluir que do ponto de vista dos custos, o ciclo combinado é o que apresenta maior vantagem comparativa entre todos os ciclos estudados nas faixas de demanda consideradas.

5.4. Partição do CTBM entre produtos

Em termos comparativos à situação do mercado, é interessante a apresentação dos custos da eletricidade e da água gelada em [US\$/kWh] e [US\$/t], respectivamente. Estes dados podem servir ao investidor um critério de decisão de implementação ou não da planta, além de lhe fornecerem possibilidades de cálculo do prazo médio de retorno do investimento. As tabelas de partição do CTBM podem ser avaliadas abaixo segundo cada uma das configurações. Os exemplos considerados são os mesmos apresentados nos estudos de caso do presente trabalho adicionados ao Museu de Liverpool, que possui demanda de eletricidade de 2300 kW e demanda térmica de 2400kW dos quais 1400kW são destinados a efeito de refrigeração (Cogen Europe). O ciclo combinado foi o que apresentou maior vantagem comparativa entre os sistemas estudados, e possui a partição de custos abaixo.

Tabela 4. Partição de custos entre produtos para o ciclo combinado

Aplicação	CTBM (US\$/h)	CBM _{Eletr} (US\$/h)	CBM _{Refrig} (US\$/h)	CBM _{Vapor} (US\$/h)	Excedente (kW)	C. kWh (US\$/kWh)	C. Refr. (US\$/t)
Ind. Laticínios	410,92	280,98	15,73	114,21	2819	0,05	0,11
Hospital	427,58	282,23	56,63	88,72	2932	0,05	0,09
Ind. Bebidas	638,39	487,74	53,84	96,81	995	0,05	0,09
Museu	428,15	276,10	38,47	113,58	2747	0,05	0,10

5.5. Síntese gráfica da análise exposta

A análise comparativa descrita pode ser posta em síntese por intermédio de um único diagrama cujo eixo das abscissas representa a razão entre demanda de eletricidade e refrigeração e o eixo das ordenadas indica o custo total em base monetária. O ciclo combinado não será apresentado neste diagrama pelo fato de ter sido programado para

características fixas de potência elétrica, não permitindo a variação desta para efeito de análise, a não ser na troca de modelo de turbina como descrito em 5.3. É importante ressaltar que o custo não possui propriamente um mínimo por volta de $W/Q = 4$. O diagrama obtido é na realidade composição de duas curvas em torno desta vertical. Do lado direito o custo cresce com o aumento do trabalho elétrico extraído, sendo mantido o calor trocado no chiller. Já caminhando para a esquerda, há o aumento do calor trocado no evaporador sendo mantido fixo o trabalho elétrico extraído da planta.

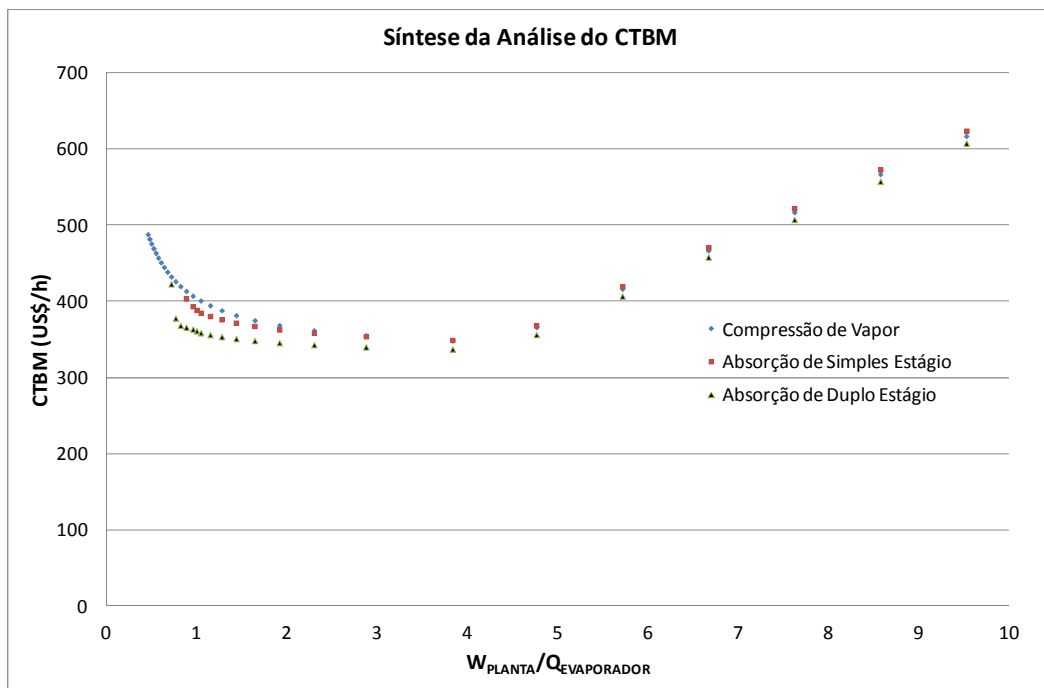


Gráfico 7. Síntese gráfica da análise para as três primeiras configurações de sistemas

Da mesma forma como discutido em 5.1, existe uma inversão da tendência na comparação entre o ciclo de refrigeração por compressão de vapor e o ciclo de refrigeração por absorção de simples estágio, no sentido em que para maiores valores de demanda relativa de refrigeração, o ciclo de absorção se apresenta menos custoso. O ciclo de absorção de duplo estágio possui custos menores para toda a faixa considerada.

6. Análise final

Não só por três estudos de caso, mas pela generalização de cenários de demanda de energia elétrica e refrigeração, diferentes sistemas de trigerção puderam ser avaliados do ponto de vista exergoeconômico, análise de extrema importância do ponto de vista da implementação dos sistemas e impactos ao meio ambiente. Os pontos de funcionamento observados para cada cenário objetivaram a minimização dos custos em termos monetários.

Todos os resultados obtidos ao longo do projeto não só foram compatíveis, como fornecem um caráter complementar ao trabalho de BURBANO (2011), como proposto inicialmente.

Para sistemas de demanda relativamente baixa com uma alta relação de consumo de eletricidade / refrigeração, sistemas de compressão possuem vantagem comparativa em termos monetários sobre sistemas de absorção por simples efeito. Quando se tem uma demanda de refrigeração importante, este último deve ser priorizado.

Os chillers de absorção de duplo estágio possuem vantagem sobre os equipamentos de simples estágio, apesar do investimento superior na implementação. Esta vantagem é amplamente evidenciada em demandas substanciais de refrigeração.

Ambos os sistemas de refrigeração por absorção, apesar de vantajosos para demandas superiores de água gelada, possuem uma limitação na refrigeração que é função da eletricidade produzida, pelo fato de que as propriedades do vapor utilizado no gerador do chiller possui propriedades que são função dos pontos de operação da turbina.

O ciclo combinado possui vantagem comparativa sobre todas as outras configurações de plantas com as quais se trabalhou. A vantagem se traduz tanto pela avaliação do rendimento exergético quanto pelo custo em termos monetários. Assim, para o investidor que busca um retorno maior no longo prazo (trabalhou-se com um horizonte de 20 anos), o ciclo combinado, apesar de seu investimento inicial sensivelmente superior, deve ser tratado para efeito de implementação.

Finalmente, por ser um trabalho bastante amplo e ambicioso, o presente projeto de formatura fornece clara abertura a um homônimo estudo de pós-graduação, tratando em termos de custo o sistema tetra-combinado e buscando, principalmente, uma abrangência mais forte de aplicações à indústria para cada caso de configuração estudado, buscando reduzir suas ineficiências e os prazos de retorno do investimento desembolsado.

7. Referências

- Garagatti Arriola, D. W., Oliveira Jr., S., 2003, "Tetra-combined Trigeneration System. Exergy and Thermoeconomic Analysis". Proceedings of the ECOS'2003 Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Vol. 1, pp. 137-144.
- Burbano, J. C., Pellegrini, L. F., Oliveira Jr. S., 2009, "Comparative exergoeconomic analysis of trigeneration systems for a dairy industry". Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Foz de Iguaçu, Vol. 4, pp. 513-524.
- Burbano, J. C., Pellegrini, L. F., Oliveira Jr. S., 2009. "Exergoeconomic Analysis of Tetra-Combined Trigeneration Systems". Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- EES, 2010, Engineering Equation Solver, Academic Professional Version 8.600, Chart Software.
- Burbano, J. C., 2011, "Otimização Exergoeconômica de Sistema Tetra-combinado de Cogeração". Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- BOEHM R. F, 1987, "Design analysis of thermal system". John Wiley & Sons Inc, New York. Vol. 1, pp. 118-167.
- COGEN Europe, 2010, "Case study factsheet - Northern region, UK: Museum of Liverpool – Public Sector".

8. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXERGONOMIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF TRIGENERATION SYSTEMS

Fábio Moraes de Oliveira

fabiomoraesdeoliveira@gmail.com

Abstract. *Different configurations allow trigeneration plants, by burning a fuel such as natural gas, to obtain three products: electricity, steam water for an industrial process and cold water from a chiller. Considering the requirements for implementation in industry, the exergoeconomic analysis provides the scale of costs involved in this process. Thus, the purpose of the present study is to define the parameters making the application feasible in terms of exergy efficiency and costs for each demand scenario. The total monetary-based costs involved were optimized for different plants, varying electricity and cooling magnitudes in such way to determine the investor's comparative advantages.*

Keywords. *Trigeneration, exergoeconomics, optimization, costs.*