

PRODUZINDO FRIO ATRAVÉS DE CALOR DE COMPRESSÃO E DE GASES DE DESCARGA DE CALDEIRA

José Carlos Felamingo¹

Resumo

O uso de chillers por absorção de simples efeito por água quente, tendo como fonte de energia o calor rejeitado de outros processos, é uma opção para a produção de água gelada e pode ser uma alternativa viável, com redução significativa no custo operacional, para os usuários de sistemas de frio que utilizam a refrigeração por compressão. A análise de viabilidade técnico-econômica do ciclo por absorção de simples efeito com água quente *versus* o ciclo por compressão é o objetivo deste trabalho. O custo-benefício, para uso de chiller por absorção de simples efeito com água quente *versus* chiller elétrico, foi calculado para uma instalação existente. O cálculo incluiu EE, COP, horas de funcionamento, investimento e manutenção. Os resultados são apresentados na forma de tabelas comparando as diferentes opções.

Palavras-chave: Refrigeração; Ar condicionado; Eficiência energética.

PRODUCING COLD FROM THE HEAT REJECTED FROM AIR COMPRESSION AND STEAM BOILER

Abstract

The use of heat rejected, as source of energy, for single effect absorption chillers, is an option to produce chilled water and can be an alternative to reduce the cost of electrical energy for “end users” of chilled water produced by compression chillers. The economical and technical analysis of hot water single effect absorption chiller *versus* compression chillers is the scope of this paper. The cost-benefit of the use of hot water single effect absorption chiller *versus* compression is estimated for one existing installation. The calculation takes into account the cost of electrical energy, COP, operation hours, investment and maintenance. Results are presented in the form of tables comparing the available options.

Key words: Refrigeration; Air conditioning; Energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi proposto para o setor de utilidades, de uma indústria instalada em São Paulo.

O estudo de viabilidade econômica envolveu os sistemas de produção de água gelada e de ar comprimido. Foram levadas em consideração as seguintes variáveis: EE consumida nos chillers, COP (coeficiente de performance), horas de funcionamento, perfil da carga térmica, consumo de água nas torres de resfriamento, custo de manutenção, vida útil dos equipamentos, e custo evitado com reforma dos equipamentos existentes.

O modelo matemático desenvolvido para este estudo, envolvendo essas variáveis, foi resolvido através do uso de planilha eletrônica, permitindo várias iterações na busca do equilíbrio técnico econômico. Os resultados são apresentados na forma de uma tabela comparativa resumida.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE CALOR

A planta industrial em questão possui, no setor de utilidades, quatro compressores de ar e uma caldeira de vapor, além de outros equipamentos. Na situação original os compressores rejeitam o calor gerado no processo de compressão diretamente para o meio externo, através de trocadores de calor “óleo-ar” (do tipo radiador).

Através de alteração do sistema de rejeição de calor desses compressores, substituindo-se o trocador “óleo-ar aletado” por trocador a “placas óleo-água”, permite-se a transferência do calor de compressão do ar comprimido para um circuito hidrônico fechado, denominado “circuito de água quente”.

¹ Eng. mecânico, 1974, FEI – São Paulo; eng. de Segurança do Trabalho, 1979 Escola Superior de Química Osvaldo Cruz - Diretor da Union Rhac Tecnologia em Eficiência Energética Ltda (jcf@unionrhac.com.br)

Na caldeira de vapor, com queima de gás natural, recupera-se o calor dos gases de escape, com um diferencial térmico de até 100°C (variação de 230°C para 130°C), sem formação de condensado corrosivo.

Os quatro compressores de ar comprimido operam em “paralelo”, sendo 90% do tempo em carga total e o tempo restante em carga parcial, porém sempre com cargas maiores do que 75% da capacidade total do sistema.

Quadro 1. Regime de operação dos compressores.

Regime de operação dos compressores	% do tempo de operação
Carga total	90
Carga parcial (75% ~ 100%)	10

Para estabilidade operacional do sistema de frio considerou-se que só três compressores deveriam trabalhar conectados ao “circuito de água quente”. Esse circuito receberá o calor recuperado desses três compressores de ar e dos gases quentes da caldeira. Esse calor será utilizado como energia motora, no ciclo de refrigeração por absorção, para a produção de frio.

Com a solução proposta, das 300 TR (toneladas de refrigeração), que antes eram totalmente produzidas por chillers por compressão consumindo energia elétrica, 40% serão agora produzidas por um chiller por absorção, movido pelo calor “rejeitado” por outros processos.

O “circuito de água quente” e o arranjo do sistema de recuperação de calor estão representados na Figura 1.

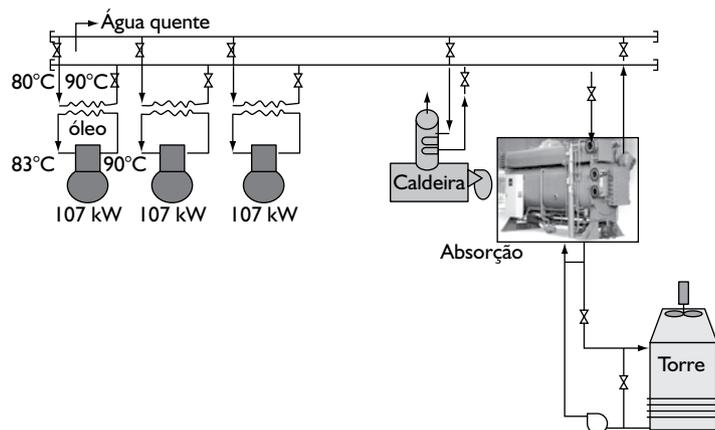


Figura 1. Fluxograma do sistema de recuperação de calor.

3 DADOS UTILIZADOS PARA O ESTUDO EM QUESTÃO

- Estudo de caso: Indústria de produtos de consumo doméstico;
- Localização: São Paulo;
- Tarifa de EE (Energia Elétrica), horosazonal azul A3;
- Capacidade instalada dos chillers por compressão: 300 TR;
- Consumo específico dos chillers por compressão: 1,1 kW/TR;
- Demanda total dos chillers por compressão: 330 kW;
- Tipo de compressor: recíproco (pistão);

- Horas de uso dos chillers: 8.700 h/ano;
- CMS (Imposto de circulação de mercadorias) da EE: 18%
- Tarifa média de EE utilizada para o estudo de caso: R\$ 198,00 / MW;
- Custo de água industrial sem esgoto: 2,00 R\$/m³;
- COP(1) (Coeficiente de Performance) do chiller por absorção de simples efeito: 0,7;
- Calor rejeitado por compressor: 107 kW, informado pelo fabricante;
- Vazão de gases da chaminé da caldeira: 2,7 kg/s;
- 1 TR = 3.024 kcal/h (TR-Tonelada de Refrigeração); e
- 1 kW = 859,75 kcal/h.

Fórmula utilizada para o cálculo da energia absorvida dos gases de exaustão da caldeira:

$$Q_{\text{rec. caldeira}} = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \cdot \eta_{\text{duto}} \quad (1)$$

onde: $Q_{\text{recuperado caldeira}}$ = calor recuperado dos gases de exaustão da caldeira, kW; m = vazão em massa: 2,6785 kg/s; C_p = calor específico do ar: 1,12 kJ / (kg.K); T_1 = temp. dos gases na saída do gerador (entrada do recuperador): 230°C; T_2 = temperatura dos gases na saída do recuperador :130°C; e η_{duto} = rendimento do duto: 0,97 (perda de calor através do isolamento do duto e em função da espessura do material utilizado).⁽²⁾

4 CÁLCULO DA ENERGIA CONSUMIDA PELOS CHILLERS POR COMPRESSÃO E POR ABSORÇÃO

$$Q_{\text{recuperado caldeira}} = 2,7 \cdot 1,12 \cdot (230 - 130) \cdot 0,97 = 293 \text{ kW}_t$$

$$Q_{\text{caldeira}} = Q_{\text{total recuperado}} = Q_{\text{compressores ar comprimido}} + Q_{\text{caldeira}} = 321 + 293 = 614 \text{ kW}_t$$

Capacidade do chiller, em TR, obtida com o “calor” recuperado:

$$TR = \frac{Q_{\text{total recuperado}} \cdot \text{COP}}{3024} = 122 \text{ TR}$$

Ou seja, 64 TR provenientes do rejeito dos compressores de ar comprimido e 58 TR provenientes do rejeito da descarga de gases da caldeira.

5 CÁLCULO DOS GASTOS COM ENERGIA ELÉTRICA

Calculamos os gastos com EE na ponta e fora de ponta, sem ICMS, para os chillers exis-

tentes por compressão e para o chiller por absorção a água quente, com o valor equivalente de 122 TR, que é a capacidade útil de frio disponível através do calor total recuperado.

Na Tabela 1, temos os gastos com EE e a economia, que se obtém com o chiller por absorção em relação ao chiller por compressão (sem ICMS).

O investimento total nos equipamentos (chiller, bomba, tubulação, etc.) e montagem do sistema é de R\$ 714.000,00.

Tabela 1. Gastos com EE nos chillers elétricos e absorção (R\$/ano).

Equipamento da CAG		Absorção	Chiller elétrico
Demanda	Ponta	12.852	57.664
	Fora Ponta	4.357	19.548
Consumo	Ponta	5.521	23.444
	Fora Ponta	28.081	113.473
Gastos Totais c/ EE s/ ICMS		50.811	214.129
Economia c/ EE s/ ICMS		-	163.318
Investimento equipamentos e instalação		714.000	-

6 RECUPERAÇÃO DO ICMS

Na indústria, o ICMS que é pago na conta de EE é recuperado, ou seja, é descontado do montante a ser pago na venda do produto manufaturado pela indústria, portanto, todo o cálculo de viabilidade econômica deve ser feito desconsiderando o ICMS da EE.

7 BALANÇO TÉRMICO E CÁLCULO DA VAZÃO DE ÁGUA DE CONDENSAÇÃO DO CHILLER POR ABSORÇÃO

Nas Figuras 2 e 3, apresentamos o balanço térmico e o cálculo da vazão de água de condensação dos chillers por compressão e por absorção. Podemos ver que o “ganho” de energia no chiller por absorção é maior do que nos chillers por compressão, para a mesma “produção” de frio, logo haverá maior rejeito de calor pelo condensador, requerendo, dessa forma, maior dissipação de calor através da torre de resfriamento.⁽³⁾

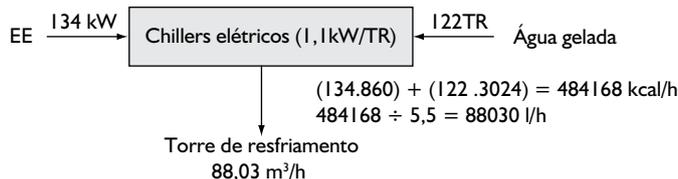


Figura 2. Balanço térmico para o chiller elétrico.

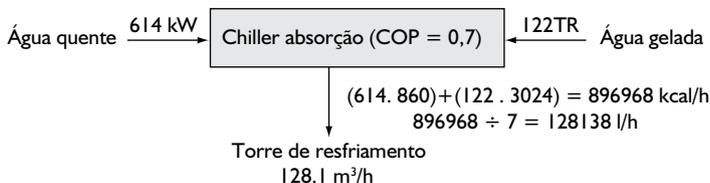


Figura 3. Balanço térmico para o chiller por absorção.

8 REDUÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA DE CONDENSAÇÃO

Visando minimizar as alterações na torre de resfriamento existente, e sabendo-se que quanto maior a diferença de temperatura menor a vazão de água na condensação, adotamos para o chiller por absorção uma diferença de temperatura maior do que o existente para os chillers por compressão. Na Tabela 2, podemos notar que, mesmo com esse recurso, a vazão do chiller por absorção ainda assim é maior do que a do chiller por compressão (elétrico). Disso resultou a necessidade de ampliação da capacidade da torre existente, visando o aumento da liberação de calor para o meio externo.

Tabela 2. Diferencial de temperatura e vazão de água de condensação.

Chiller	COP	$\Delta t_{\text{água condensação}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Vazão m^3/h
Compressão (elétrico)	3,5	5,5	88,03
Absorção	0,7	7,0	128,1

9 GRÁFICO DO BREAK-EVEN ENTRE CHILLERS POR COMPRESSÃO E ABSORÇÃO

O gráfico da Figura 4, foi feito para um período de 10 anos, levando-se em consideração os custos de: investimento inicial, energia consumida, operação, manutenção e gastos com água de reposição na torre de resfriamento, para ambos os chillers: absorção versus compressão (elétricos).

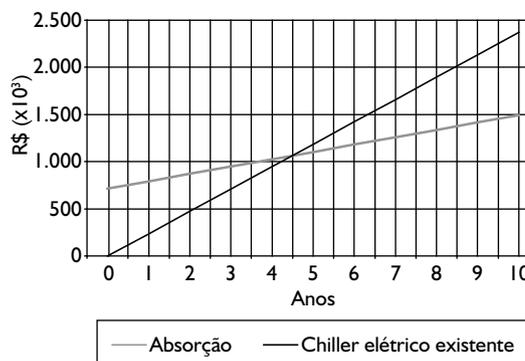


Figura 4. Gráfico do Break-Even entre chiller elétrico e por absorção.

Na elaboração do gráfico não foi considerado o ICMS pago nas contas de EE.

O ponto de equilíbrio (Break-Even) ocorre num período de 4,5 anos, o que torna viável a implantação do sistema proposto.

10 CONCLUSÕES

O uso do chiller por absorção de simples efeito, utilizando calor recuperado de processos de baixa temperatura, embora apresente COP baixo, tem aplicação econômica viável.

Na análise de viabilidade econômica entre chillers por compressão e por absorção, deve-se levar em conta o perfil de carga térmica, número de horas operacionais e os respectivos COPs dos chillers, bem como se há ou não recuperação do ICMS da EE.

A experiência desenvolvida pelo autor, em mais de uma centena de estudos similares a este, onde visou-se a substituição de

chiller por compressão por chiller por absorção, leva a conclusão que os sistemas se apresentavam viáveis a partir de 150 TR. Isso porque, tanto o custo do chiller por absorção como dos demais componentes é maior, quando a capacidade instalada está abaixo de 100TR, tornando alto o período de retorno do investimento.

No caso em questão, mesmo com capacidade instalada muito próxima a esse limite, obtivemos viabilidade econômica, pois a fonte de calor do chiller por absorção tem custo zero.

REFERÊNCIAS

- 1 LS CABLE. **Manual técnico para chillers por absorção**. Korea, 2003.
- 2 AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. HVAC systems and equipment. In: _____. **Handbook**. Atlanta, 1992. p. 7-10.
- 3 DORGAN, C.B. Application guide for absorption cooling/refrigeration using recovered heat. **Fuel and Energy Abstracts**, v. 37, n.2, p.131, March 1996.

Recebido em: 10/01/07

Aceito em: 02/07/07

Proveniente de: ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 21., 2006, Porto Alegre, SP. São Paulo: ABM, 2006.