



**COBENGE 2005**

**XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

## **EFICIÊNCIA DE UMA UNIDADE DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR**

**Janailson Oliveira Cavalcanti<sup>1</sup>** - [janailsonoliver@ig.com.br](mailto:janailsonoliver@ig.com.br)

Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio Veloso, 882 - Campus II

58109-970 - Campina Grande - PB

**Celso Rosendo Bezerra Filho<sup>2</sup>** - [celso@dem.ufcg.edu.br](mailto:celso@dem.ufcg.edu.br)

**Zaqueu Ernesto da Silva** – [zaqueu@les.ufpb.br](mailto:zaqueu@les.ufpb.br)

**Yoge Jerônimo Ramos da Costa** – [yoge@dem.ufcg.edu.br](mailto:yoge@dem.ufcg.edu.br)

***Resumo:** Este artigo tem como objetivo mostrar o cálculo da eficiência térmica de uma unidade de refrigeração por compressão de vapor que utiliza o R-12 como fluido de trabalho e como sua performance é afetada pela introdução de um trocador de calor colocado entre a saída do evaporador e a entrada do compressor. A metodologia é dividida em três etapas: a primeira consiste na apresentação das leis da termodinâmica e dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor; a segunda consiste na descrição do funcionamento da unidade laboratorial de refrigeração P. A. Hilton e a terceira na realização dos ensaios e análise dos resultados. Os coeficientes de performance baseados na potência indicada, na potência de eixo e na potência elétrica foram calculados para diferentes condições de operação da unidade com e sem a utilização do trocador de calor. Os resultados obtidos mostram que o coeficiente de performance da unidade de refrigeração (COP) está intimamente ligado às temperaturas de evaporação e condensação do fluido de trabalho. Verifica-se que os coeficientes de performance aumentam com o aumento da temperatura de saturação no evaporador (quando se mantém a pressão no condensador constante). Este fato ocorre com ou sem a utilização do trocador de calor. O aumento do COP com a introdução do trocador de calor é muito pequeno sendo verificado um maior benefício de ordem prática, ou seja, garante-se que apenas vapor no compressor e líquido na válvula de expansão.*

**Palavras - Chave:** Refrigeração, Ciclo de Refrigeração, Ciclo Termodinâmico.

### **1. INTRODUÇÃO**

O consumo e o custo da energia têm aumentado bastante nos últimos anos, o que têm provocado danos econômicos e ambientais, devido à necessidade de novos investimentos para construção de novas unidades geradoras, com o objetivo de atender a demanda crescente. Isto tem levado os engenheiros a desenvolverem máquinas cada vez mais eficientes com o objetivo de reduzir o impacto causado por este aumento do consumo de energia. Para que isto possa acontecer é necessário entender o comportamento dos equipamentos, bem como estabelecer os principais parâmetros que afetam o seu desempenho. Um dos equipamentos

mais utilizados hoje em residências e na indústria são as unidades de refrigeração, que dependendo da situação, representam uma parcela importante do consumo de energia.

Neste artigo, analisa-se de forma experimental, como o desempenho de uma unidade de refrigeração por compressão de vapor é afetado durante sua operação em diferentes regimes de trabalho. Neste sentido, uma Unidade Laboratório de Refrigeração será utilizada para realizar a investigação proposta sob diversas condições de operação. Esta unidade trabalha segundo o ciclo de refrigeração por compressão de vapor e usa o R-12 como fluido de trabalho.

O propósito deste estudo é analisar experimentalmente como a performance da referida unidade é afetada sob variadas condições de operação, bem como avaliar como sua eficiência é afetada pela introdução de um trocador de calor entre o evaporador e o compressor.

## 2. LEIS DA TERMODINÂMICA

A avaliação do coeficiente de performance da unidade laboratório de refrigeração é realizada utilizando as leis da termodinâmica aplicadas a um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Estas leis, que serão utilizadas como modelo, bem como o ciclo de refrigeração por compressão de vapor são apresentados abaixo.

### 2.1 Lei da Conservação da Massa

Um volume de controle é uma região do espaço tomada para estudo. A lei da conservação da massa para um volume de controle afirma o fluxo líquido de massa através da superfície de controle é igual à taxa de variação da massa no interior do mesmo. Matematicamente, esta lei é escrita segundo Sonntag, R. E et al (2003) como:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (1)$$

Onde:

$\sum \dot{m}_e$  é o fluxo de massa que entra no volume de controle;

$\sum \dot{m}_s$  é o do fluxo de massa que sai do volume de controle e

$\frac{dm_{vc}}{dt}$  representa a taxa de variação de massa no volume de controle.

### 2.2. Lei da Conservação da Energia

A lei da conservação da energia é conhecida como primeira lei da termodinâmica. Para um volume de controle a mesma é expressa segundo Sonntag, R. E et al (2003) da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{W}_{vc} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{Q}_{vc}$  é a taxa de transferência de calor para o volume de controle;

$\sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$  é o somatório das energias que entram no volume de controle devido aos fluxos de massa que atravessam a superfície de controle ( $h_e$  = entalpia específica,  $\frac{V_e^2}{2}$  = energia cinética específica e  $gz_e$  é a energia potencial específica nas entradas);

$\frac{dE_{vc}}{dt}$  é a taxa de variação da energia no interior do volume de controle;

$\sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$  é o somatório das energias que saem do volume de controle devido aos fluxos de massa que atravessam a superfície de controle ( $h_s$  = entalpia específica,  $\frac{V_s^2}{2}$  = energia cinética específica e  $gz_s$  é a energia potencial específica nas saídas);

$\dot{W}_{vc}$  é o trabalho por unidade de tempo realizado pelo volume de controle.

### 2.3 Segunda Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica quantifica a energia enquanto a segunda lei da termodinâmica mostra que a energia tem qualidade e que os processos ocorrem sempre no sentido da degradação da energia. A segunda lei pode ser expressa matematicamente utilizando-se uma propriedade termodinâmica denominada entropia. A expressão da segunda lei para um volume de controle é segundo Sonntag, R. E et al. (2003) dada por:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e = \sum \left( \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} \right) + \dot{S}_{ger} \quad (3)$$

Onde:

$\frac{dS_{vc}}{dt}$  é a taxa de variação de entropia no interior do volume de controle;

$\sum \dot{m}_s s_s$  e  $\sum \dot{m}_e s_e$  são respectivamente os somatórios dos fluxos de entropia que entram e saem do volume do controle devido aos fluxos de massa que atravessam a superfície de controle;

$\sum \left( \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} \right)$  é o fluxo de entropia devido a transferência de calor através da superfície de controle e

$\dot{S}_{ger}$  é a geração de entropia, que é nula para processos reversíveis e positiva para processos irreversíveis.

### 3. O Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

Uma unidade de refrigeração é um dispositivo que operando segundo um ciclo termodinâmico necessita de trabalho para que se obtenha a transferência de calor de uma região de baixa temperatura para outra de alta temperatura.

O ciclo de compressão a vapor é o mais usado nos sistemas de refrigeração. Ele consiste de quatro processos que serão apresentados.

Inicialmente apresenta-se o ciclo de refrigeração reversível e ideal estabelecido por Carnot, que permite tirar algumas conclusões que são válidas para ciclos reais.

#### 3.1 Ciclo Reversível de Carnot

Uma unidade de refrigeração ideal é representada pelo ciclo reversível de Carnot no qual o calor de uma fonte de temperatura baixa  $T_L$  (constante) é rejeitado para um reservatório de alta temperatura  $T_H$  (constante). A Figura 1 ilustra uma unidade de refrigeração ideal e a Figura 2 o seu ciclo correspondente em um diagrama temperatura-entropia (P. A. Hilton Manual).

Conforme designado na Fig. 2, o ciclo tem início com a compressão isoentrópica do vapor úmido em 1 que eleva a pressão de  $P_1$  para  $P_2$ . Em seguida, o vapor saturado em 2 passa através do condensador, onde rejeita calor a uma pressão constante para um meio de resfriamento, transformando todo o do vapor em líquido saturado em 3.

Após a condensação, o líquido saturado a alta pressão é expandido isoentropicamente de da pressão  $P_3$  para pressão  $P_4$ , no ponto 4. O vapor úmido resultante entra no evaporador no estado 4. No evaporador, o fluido refrigerante muda de fase absorvendo calor de uma fonte de baixa temperatura e atinge o ponto 1, concluindo o ciclo de refrigeração.

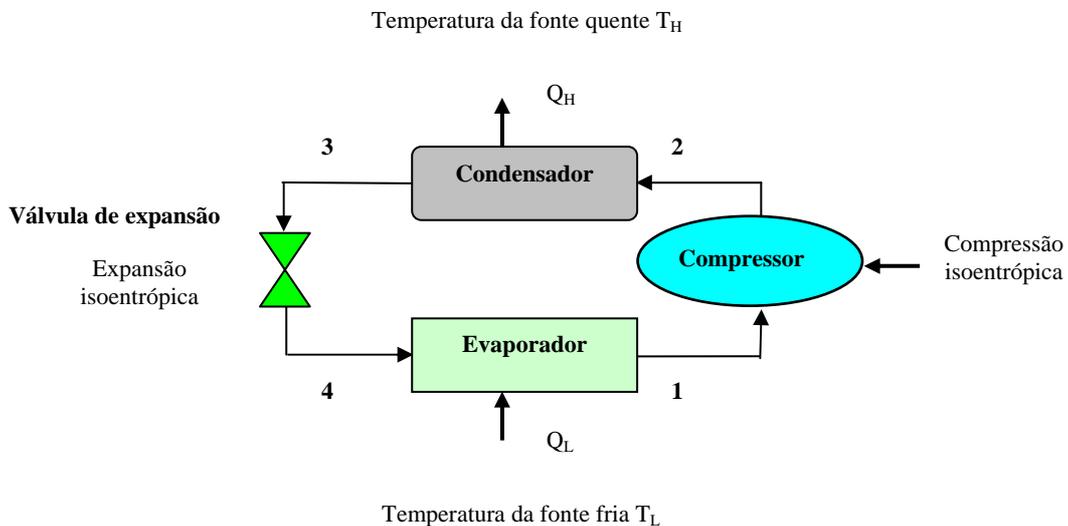


Fig. 1 – Unidade de Refrigeração.

O coeficiente de performance (COP) do refrigerador é a razão entre o calor removido da fonte fria,  $Q_e$ , e o trabalho consumido pelo mesmo, como mostra a expressão abaixo.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_e}{W} \quad (4)$$

Para um refrigerador reversível de Carnot, o COP é dado por (Stoecker et Jones, 1985):

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (5)$$

A equação (5) mostra que o coeficiente de performance COP de uma unidade de refrigeração de Carnot está intimamente ligado às temperaturas de evaporação  $T_L$  e condensação  $T_H$  do fluido de trabalho. Para uma dada temperatura  $T_H$  fixa, quanto maior  $T_L$ , maior será o  $\text{COP}_{\text{Carnot}}$ . Quanto menor  $T_H$  para uma dada  $T_L$  fixa maior será o  $\text{COP}_{\text{Carnot}}$  da unidade. Este fato ocorre também nas instalações reais.

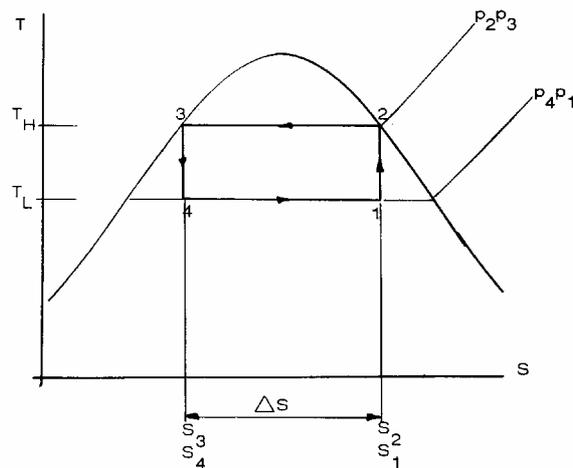


Fig. 2. - Ciclo Refrigeração Reversível de Carnot.

### 3.2 Ciclo Padrão de Compressão de Vapor

No ciclo padrão de compressão de vapor, o processo de expansão isentrópica (3-4 na Fig. 2) do ciclo reversível de Carnot é substituído por um processo de estrangulamento devido a praticidade (Stoecker et Jones, 1985).

O diagrama pressão-entalpia mostrado na Fig.3 é geralmente o mais utilizado porque em aplicações de refrigeração a entalpia é uma das propriedades mais importantes e a pressão pode ser facilmente determinada. O coeficiente de performance COP de um ciclo padrão de compressão a vapor é a razão entre a carga de refrigeração e o trabalho de compressão. O COP para um processo de estrangulamento no ciclo padrão de compressão de vapor é dado por:

$$\text{COP} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

Onde as variações de entalpia ( $h_1-h_4$ ) e ( $h_2-h_1$ ) representam respectivamente a carga de refrigeração específica e o trabalho específico de compressão da unidade de refrigeração.

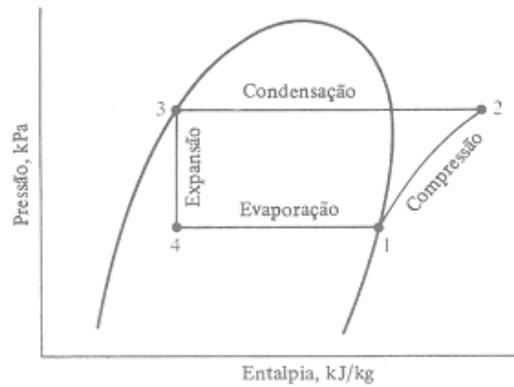


Figura 3. - Diagrama pressão-entalpia (P-h) do Ciclo Padrão. (Stoecker e Jones, 1985).

### 3.3 A Importância do Trocador de Calor

Buscando aumentar a performance do ciclo padrão, o líquido ainda aquecido que deixa o condensador pode ser resfriado pela introdução de um trocador de calor como mostra a Figura 4. Com a introdução do trocador na unidade de refrigeração, baixa a temperatura média na qual o qual é rejeitado e aumenta a temperatura média na qual o calor é absorvido do meio. Como consequência, de acordo com o acontece com a máquina de Carnot, é de se esperar um aumento do COP da unidade quando um trocador é utilizado como mostrado na Figura 4. O diagrama pressão-entalpia, P-h, fica como mostrado na Figura 5.

Apesar do incremento relativo na performance, as vantagens deste sistema são principalmente de ordem prática. Dentre estas vantagens, podem ser citadas as seguintes:

- Redução de fluxo de refrigerante para uma dada taxa de resfriamento.
- Menor chance de vaporização na linha de líquido, particularmente se esta for longa.
- Menor ganho de calor indesejado no tubo de sucção do compressor.
- Eliminação de gotas de líquido na entrada do compressor.

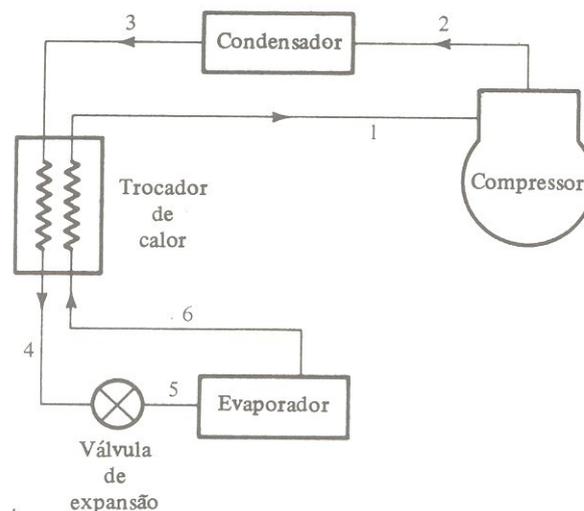


Figura 4. - Unidade de Refrigeração com Trocador de Calor (Stoecker et Jones, 1985)

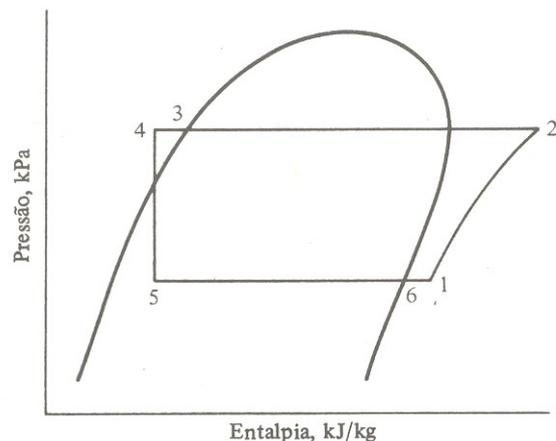


Figura 5. – Diagrama Pressão Entalpia (Stoecker e Jones, 1985)

### 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA UNIDADE DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

O dispositivo experimental que será utilizado para estudar o coeficiente de performance de uma unidade de refrigeração é ilustrado na Figura 6 que mostra os seus principais componentes.

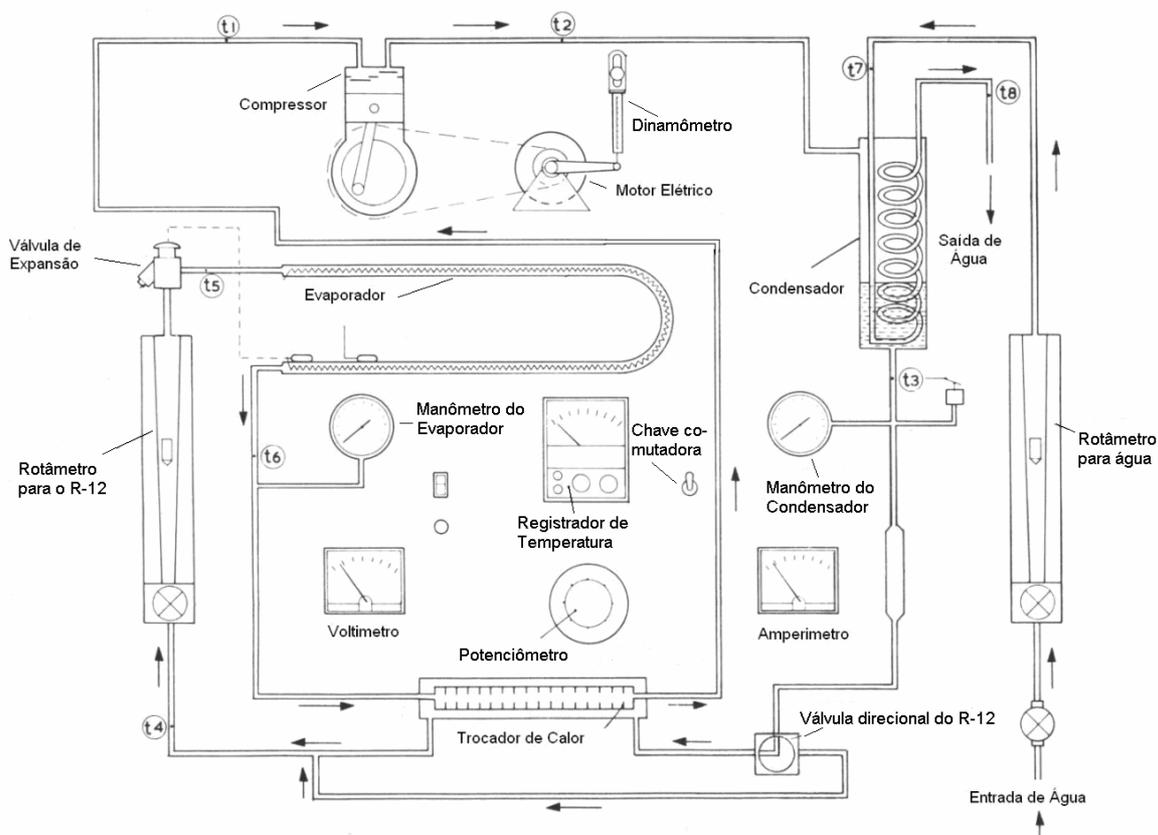


Fig.6. - Planta da Unidade de Refrigeração Hilton. (Apostila P.A. Hilton Ltd)

O dispositivo é constituído de um compressor, um condensador, um trocador de calor, uma válvula de expansão e um evaporador. Toda a tubulação da unidade é isolada com uma espuma de poliestireno. Diversos termopares estão instalados em diferentes pontos da unidade para efetuarem as medidas de temperaturas. Os pontos onde os termopares estão instalados são mostrados na Figura 6 e representados respectivamente por  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$ ,  $t_7$  e  $t_8$ . As temperaturas são indicadas no registrador de temperaturas. As pressões no evaporador e no condensador são medidas por dois manômetros posicionados nas saídas dos mesmos. O calor é fornecido a unidade através de um potenciômetro no qual se pode variar a tensão e a corrente que passam através de uma resistência elétrica que envolve o evaporador. Este calor é absorvido pelo R-12 que passa no evaporador e cuja vazão mássica de R-12 é medida por um rotâmetro instalado antes da válvula de expansão. A tensão e corrente que passam na resistência são mostradas num voltímetro e num amperímetro colocados no painel frontal da unidade, que também podem registrar a tensão e corrente que passam no motor mudando-se a posição da chave comutadora. O calor é removido no condensador da unidade através da água de resfriamento que circula no mesmo. A vazão de água é medida pelo rotâmetro mostrado na Figura 6. O compressor é acionado por um motor elétrico instalado numa balança. Um dinamômetro acoplado a um braço de alavanca preso à balança registra a força necessária para posicionar a mesma sempre na horizontal. Com a força, o comprimento do braço da alavanca e a rotação, mede-se a potência de eixo. Um trocador de calor de contra corrente é posicionado como mostrado na Figura 6 a fim de aquecer o fluido R-12 que sai do evaporador, com o R-12 que sai do condensador. Esta operação só ocorre quando uma válvula direcional de R-12 permite a passagem do fluxo através do trocador de calor.

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O objetivo dos ensaios realizados nesta unidade experimental é a determinação do coeficiente de performance, COP, em várias condições de operação, com e sem o trocador de calor. O COP é calculado baseado em três potências: a potência elétrica, a potência indicada e a potência de eixo. O procedimento adotado para atingir tal finalidade foi o seguinte:

a) Sem o trocador de calor no circuito:

1- Liga-se a unidade e escolhe-se uma pressão de condensação e verifica-se sua correspondente temperatura de saturação. Esta pressão é mantida constante durante todos os ensaios através do ajuste da vazão da água de resfriamento no condensador.

2- Seleciona-se uma tensão e corrente que vão alimentar a resistência elétrica que envolve o evaporador girando o potenciômetro.

3- Uma vez atingido o regime permanente, são lidos e registrados todos os parâmetros fornecidos pela unidade: temperatura de entrada do compressor,  $t_1$ , temperatura de saída do compressor,  $t_2$ , temperatura de saída do condensador,  $t_3$ , temperatura de entrada da válvula de expansão,  $t_4$ , temperatura de entrada do evaporador,  $t_5$ , temperatura de saída do evaporador,  $t_6$ , temperatura de entrada da água de resfriamento,  $t_7$ , temperatura de saída da água de resfriamento,  $t_8$ , pressão no condensador,  $P_c$ , pressão no evaporador,  $P_e$ , vazão mássica de R-12,  $\dot{m}_F$ , vazão mássica de água,  $\dot{m}_A$ , tensão no motor,  $V_m$ , corrente no motor,  $I_m$ , tensão na resistência elétrica,  $V_r$ , corrente na resistência elétrica,  $I_r$ , força da mola,  $F_m$ , força de atrito,  $F_a$ , velocidade de rotação do motor elétrico,  $n_m$  e velocidade de rotação da polia do compressor,  $n_c$ .

4- Depois do passo 4, altera-se a tensão e corrente da resistência para mudar o regime de operação e ajusta-se a água de resfriamento para se manter a mesma pressão no condensador. Espera-se o regime permanente ser atingido e medem-se as grandezas citadas anteriormente. Isto é feito cinco vezes.

b) Com o trocador de calor

5- Mudando a posição da válvula direcional afim de que o trocador de calor seja introduzido no circuito, realizam-se os mesmos testes anteriores com a mesma pressão selecionada no item 1.

Concluído os ensaios com e em o trocador de calor, muda-se a pressão no condensador (e consequentemente a temperatura de saturação do R-12) e realizam-se os mesmos testes.

Os COP's são então calculados através das expressões abaixo:

$$\text{CoP}_{\text{(baseado na potência elétrica)}} = \frac{\dot{Q}_e}{P_{el}} \quad (7)$$

$$\text{CoP}_{\text{(baseado na potência do eixo)}} = \frac{\dot{Q}_e}{P_s} \quad (8)$$

$$\text{CoP}_{\text{(baseado na potência indicada)}} = \frac{\dot{Q}_e}{P_i} \quad (9)$$

Onde:

$$\dot{Q}_e = V_r I_r, \quad P_s = \frac{0,30 F_m \pi n_m}{60}, \quad P_{el} = V_m I_m \cos \phi \quad (\text{o } \cos(\phi) \text{ é obtido na referência P. A. Hilton Manual)}, \quad P_a = \frac{0,30 F_a \pi n_m}{60} \text{ e } P_i = P_s - P_a$$

Os resultados obtidos são apresentados de forma gráfica nas Figuras 7 e 8 onde se verifica respectivamente o comportamento dos coeficientes de performance, COP, da unidade de refrigeração em função das temperaturas de evaporação ( $t_5$ ) para dois valores diferentes de pressões no condensador, cujas temperaturas de condensação são  $45,67^\circ\text{C}$  e  $49,38^\circ\text{C}$ . Os gráficos apresentam os resultados sem e com o trocador de calor no circuito.

A análise do gráfico da Figura 7 mostra que para uma temperatura de condensação constante (pressão no condensador constante), os COP's baseados nas potências elétrica, de eixo e indicada, com e sem trocador de calor, aumentam com o aumento da temperatura de saturação no evaporador ( $t_5$ ), apresentando um comportamento idêntico ao previsto pelo refrigerador de Carnot. Isto pode ser explicado pelo fato é equivalente ao aumento de  $T_L$  na equação (5), mantendo-se  $T_H$  constante. Os valores dos COP's calculados dependem da potência usada nos cálculos: elétrica, de eixo e indicada. A utilização do trocador no circuito melhora os COP's da unidade, quando comparado com as situações onde não se utiliza o mesmo. Isto pode ser explicado pelo fato de se aumentar a temperatura média na qual o calor é absorvido no evaporador. A análise feita aqui também vale para o gráfico da Figura 8.

Comparando os gráficos das Figuras 7 e 8 observa-se para uma dada temperatura no evaporador ( $t_5$ ) que a melhoria dos COP's quando se diminui a temperatura no condensador (pressão no condensador) é praticamente imperceptível (com e sem o trocador de calor). Observando-se a equação (5) do COP de Carnot, esperava-se que este aumento fosse observado com mais intensidade, já que uma diminuição de  $T_H$  implicaria num aumento do coeficiente de desempenho para uma mesma  $T_L$ . Na realidade, a grande vantagem da introdução do trocador de calor está nos ganhos citados no item 3.3.

### C O E F I C I E N T E D E P E R F O R M A N C E

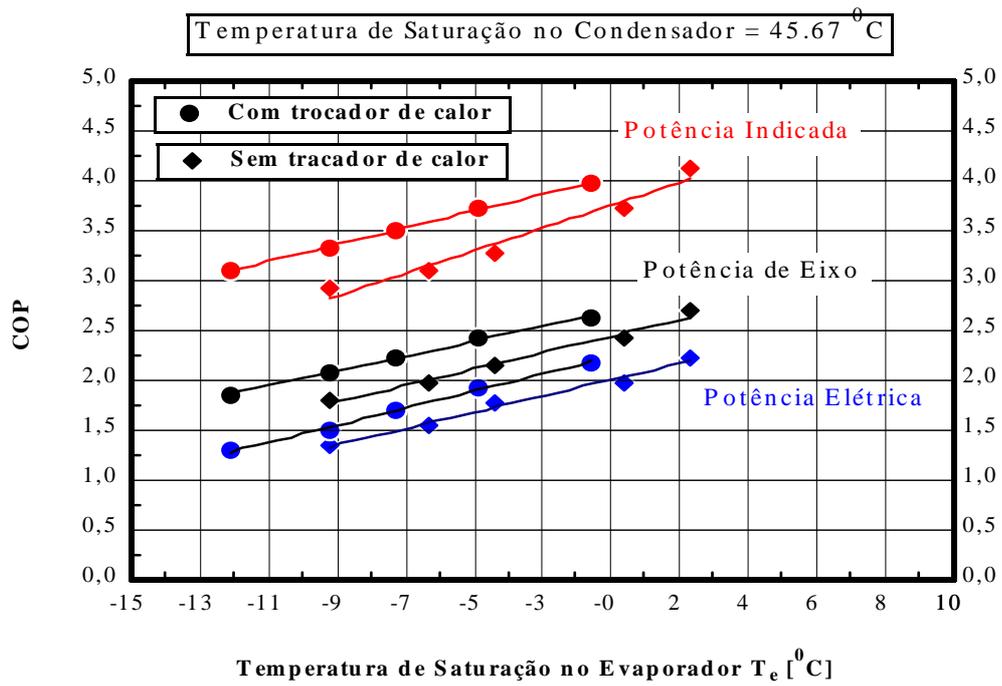


Fig. 7 - Coeficiente de Performance do Refrigerador com temperatura de condensação constante de 45,67°C.

### C O E F I C I E N T E D E P E R F O R M A N C E

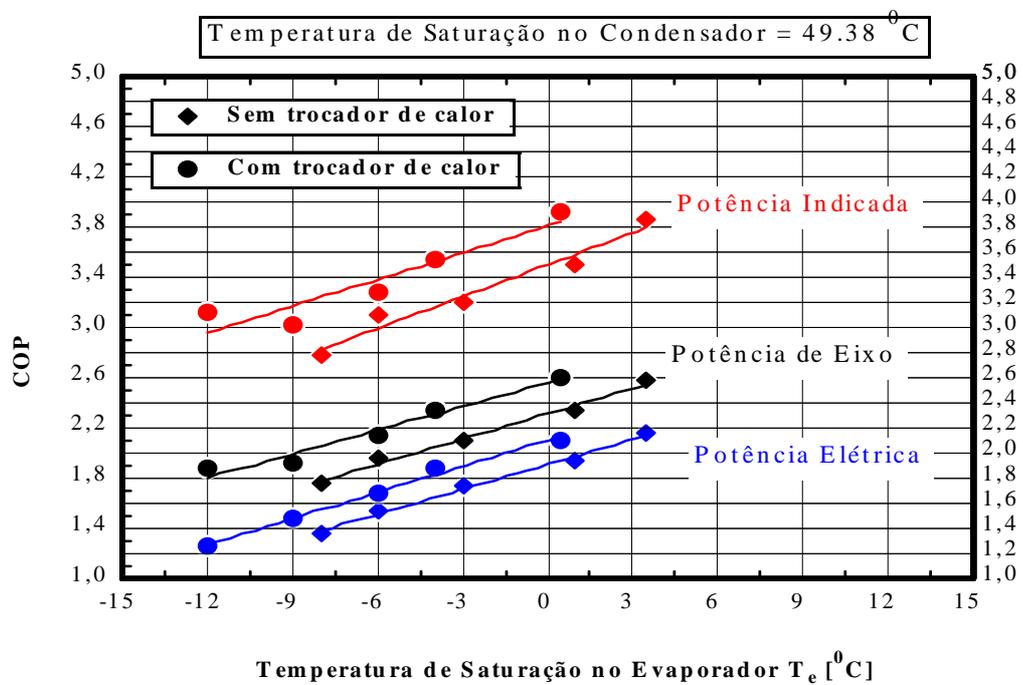


Fig. 8 - Coeficiente de Performance do Refrigerador com temperatura de condensação constante de 49,38°C.

## 5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados deste artigo permite então apresentar as conclusões abaixo apresentadas de forma resumida a seguir:

- Os valores dos COP's de uma unidade de refrigeração dependem de qual potência é utilizada como base de cálculo.
- Os COP's aumentam com a temperatura de evaporação (saturação) no evaporador quando se mantém fixa a temperatura de saturação no condensador (pressão no condensador constante).
- A utilização do trocador de calor aumenta os COP's da unidade quando se mantém fixa a pressão no condensador.
- Para uma dada pressão no evaporador constante, o aumento dos COP's quando se aumenta a pressão no condensador é imperceptível para a faixa de carga trabalhada.
- O grande benefício introduzido com a utilização do trocador de calor no circuito, além da melhoria do rendimento, é de ordem prática como citado no item 3.3.

## 5. REFERÊNCIAS

- Sonntag, R. E., Borgnakke, C. et VanWylen, G. J., 2003. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. Tradução da Sexta Edição Americana, São Paulo, Editora Edgard Blucher.
- P. A. Hilton Manual: **Refrigeration Laboratory Unit**, Experimental Data.
- Stoecker, Wilbert F. et Jones, Jerold W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. Tradução José M. Saiz Jabardo – São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1985.

## EFFICIENCY OF A REFRIGERATION UNIT FOR COMPRESSION OF VAPOR

Janailson Oliveira Cavalcanti<sup>1</sup> - [janailsonoliver@ig.com.br](mailto:janailsonoliver@ig.com.br)

Celso Rosendo Bezerra Filho<sup>2</sup> - [celso@dem.ufcg.edu.br](mailto:celso@dem.ufcg.edu.br)

<sup>1,2</sup>Universidade federal of Campina Grande

Av. Aprígio Veloso, 882 - Campus II

58109-970 - Campina Grande - PB

**Abstract:** This article has as objective to show the calculation of the thermal efficiency of a refrigeration unit for vapor compression that uses the R-12 as work fluid and as its performance is affected by the introduction of a heat exchanger placed between the exit of the evaporator and the inlet of the compressor. The methodology is divided in three stages: the first consists of the presentation of the laws of the thermodynamics and of the cycles of refrigeration for vapor compression; the second consists of the description of the operation of the refrigeration laboratorial unit P. A. Hilton and the third in the accomplishment of tests and analysis of the results. The performance coefficients based in the electric power, in the shaft power and in the indicate power were calculated for different conditions of operation of the unit with and without the use of the heat exchanger. The obtained results show that coefficient of performance of the refrigeration unit (COP) it is intimately linked to the evaporation and the condensation temperatures of the work fluid. It is verified that the coefficients of performance increase with the increase of the saturation temperature in the evaporator (when

the pressure stays constant in the condenser). This fact happens with or without the use of the heat exchanger. The increase of COP with the introduction of the heat exchanger is very small being your largest benefit verified of practical order, that is to say, this is guarantee that just vapor in the compressor.

Key-Words: Refrigeration, Cycle of Refrigeration, Thermodynamic Cycle.