



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

A NOVEL EXPERIMENTAL FACILITY FOR TEACHING REFRIGERATION BY COMPRESSION

Kamal Abdel Radi Ismail, kamal@fem.unicamp.br¹

Fátima A. M. Lino, fatimalino@fem.unicamp.br¹

Luis Cláudio Schneider, Claudio@fem.unicamp.br¹

Leandro Molon, leandro@fem.unicamp.br¹

¹Department of Thermal and Fluids Engineering – Faculty of Mechanical Engineering – State University of Campinas, UNICAMP, P.O. Box 6122, CEP 13083-970, Campinas (SP), Brazil. Tel: +55 19 35213376; fax: +55 19 32893722.

Resumo. Este artigo apresenta um novo equipamento didático para uso no ensino de graduação, pós graduação e também para pesquisas na área de refrigeração e ar condicionado sobre dispositivos de expansão, condensadores e evaporadores, compressores e novos refrigerantes. O equipamento é totalmente aberto com os instrumentos de medidas alojados num painel que permite a total visualização dos fenômenos investigados e os parâmetros medidos. O circuito tem dois compressores um convencional de paletas e o outro rotativo de tipo parafuso, instalados em paralelo permitindo assim a operação e avaliação dos parâmetros individuais de cada um. Três tipos de dispositivos de expansão convencionais são instalados no circuito, onde no terceiro tipo de tipo capilar é feita a instalação tal modo que permite o uso de capilares múltiplos. O evaporador é inserido num duto de comprimento adequado onde os parâmetros da entrada e saída do evaporador são medidos por sensores devidamente calibrados. O fluxo de ar é fornecido por um ventilador cuja velocidade é controlada por variador de frequência e assim pode ser variado o fluxo de ar e assim os coeficientes de troca de calor. O condensador também é instalado num duto similar com sistema separado de fornecimento de ar para aumentar a flexibilidade dos experimentos. As condições na entrada e saída são medidas e a vazão de fluxo de ar pode ser variada por um variador de frequência que varia a velocidade do motor do ventilador. Os experimentos que o aluno pode realizar com este equipamento incluem a determinação dos ciclos ideal e real de um sistema de refrigeração, avaliação de desempenho dos diversos componentes de sistema sobre condições variadas ale de testes de avaliação de desempenho e adequação d diversos refrigerantes.

Palavras-chaves: *Refrigeração por compressão, Dispositivos de expansão, Evaporadores, Condensadores, Compressores, Novos refrigerantes.*

1. INTRODUÇÃO

Os laboratórios didáticos representam ferramentas essenciais no ensino de graduação em todas as áreas de conhecimento onde por meio destes os fundamentos e os conceitos são demonstrados e aplicados de forma prática clara que ajuda os alunos a entender melhor estes conceitos e aprender a aplicá-los de forma consciente e correta. Deste modo o ensino de graduação sem os laboratórios apropriados é inadequado e forma profissionais carentes e deficientes deste tipo de experiência. Daí a necessidade de ter obrigatoriamente os laboratórios didáticos.

Existem três conceitos de projeto de equipamentos didáticos, um onde o equipamento é considerado como caixa fechada com entradas de parâmetros operacionais e geométricos e saídas dos dados resultantes onde o aluno aplica um conjunto de equações pré-estabelecidas para determinar os dados e curvas solicitados. O segundo conceito onde a bancada experimental é aberta e expandida com as tomadas de dados colocadas de forma aparente onde o aluno pode ver e entender porque seu posicionamento especifica com os parâmetros de entrada tanto geométricos e operacionais são fixados pelo aluno e os dados de saída são registrados manualmente com mesmo por sistemas de aquisição de dados mas com a interferência do aluno. O terceiro conceito é um pouco mais sofisticado e requer certo grau de experiência do aluno. Neste conceito o aluno tem acesso a um conjunto de peças e um conjunto de instrumentos com quais ele deve montar um experimento para verificar certo conceito, testar certos objetos ou determinar certas características, discutir e comentar os resultados. Este tipo de projeto didático deve ser posterior a um laboratório de primeiro ou segundo conceito.

Considerando os objetivos e o nível do laboratório do curso de Engenharia mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da FEM, o equipamento descrito aqui tem seu projeto baseado no segundo tipo de conceito.

Um dos objetivos principais desta bancada é de;

- 1) Estudar o ciclo de refrigeração e determinar o rendimento dos componentes deste sistema (compressor, condensador, evaporador e dispositivo de expansão),
- 1) Estudar o comportamento de um ciclo ideal de refrigeração para diferentes tipos de compressores e fluidos refrigerantes, bem como o comportamento do ciclo com mistura de refrigerantes;
- 1) Analisar o comportamento do ciclo de refrigeração com diferentes dispositivos de expansão.

Este projeto foi desenvolvido com a parceria da Tasco de Refrigeração Ltda representada pelo engenheiro Luís Cláudio Schneider.



Figura 1. Esquema geral da bancada didática de refrigeração.

2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Um dos objetivos principais desta bancada é de avaliar o desempenho de vários componentes e estudar seus efeitos sobre o ciclo de refrigeração e seu desempenho global. Tendo isto em mente, o projeto da bancada foi elaborado, construído, montado e instrumentado.

O equipamento tem dois compressores um de tipo convencional e outro de tipo parafuso que operam de forma individual no circuito de modo a permitir avaliar o desempenho comparativo dos dois compressores.

Para o dispositivo de expansão foram instalados três dispositivos em paralelo de modo que cada um pode ser operado de forma independente via registros para inclusão ou isolamento de circuito. Os três dispositivos são: válvula termostática, válvula pressostática e tubo capilar. Seguindo os objetivos da bancada com as três válvulas o aluno pode avaliar o comportamento de cada, inclusive os méritos e as desvantagens de cada.

O condensador do circuito é colocado num duto de tipo túnel de vento com ventilador numa extremidade para fornecer o ar necessário para o resfriamento do condensador. A vazão do motor é controlada por um inversor de frequência, e assim variando a velocidade de rotação do motor, varia a velocidade de rotação do ventilador que varia a vazão do ventilador. O inversor de frequência é calibrado contra a vazão do ventilador medida na saída por meio de anemômetro de fio quente. Assim, pode-se obter uma correlação entre a vazão do ventilador e a frequência do motor indicada pelo inversor de frequência. A temperatura de bulbo seco e úmido antes e depois do condensador são medidas por termopares previamente calibrados e também a pressão antes e depois é medida por manômetro diferencial digital e alimentadas para o sistema de aquisição de dados. Deste modo é possível determinar o desempenho do condensador.

Finalmente o evaporador é montado num túnel idêntico ao do condensador, com as tomadas de temperaturas de bulbos seco e úmido e tomada de pressão antes e depois do evaporador medidas e alimentadas ao sistema de aquisição de dados. Assim é possível avaliar o desempenho do evaporador.

A montagem experimental é mostrada abaixo.



Figura 2. Seção do condensador

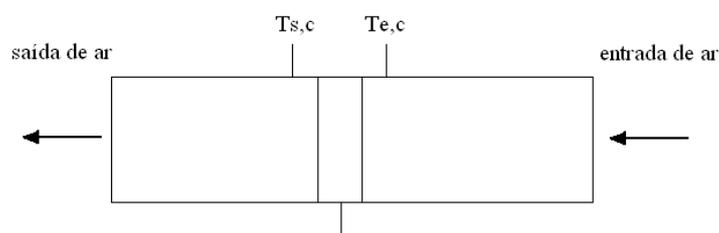


Figura 3. Seção do condensador, detalhes das medidas.

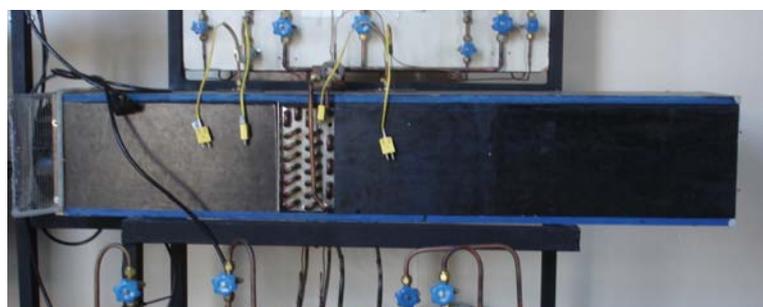


Figura 4. Seção do evaporador.

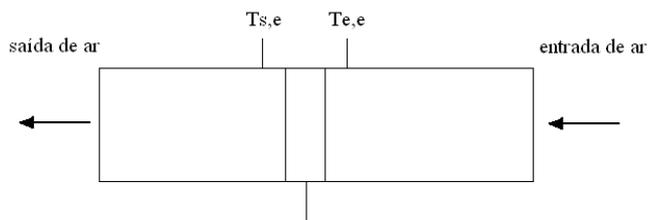


Figura 5. Seção do evaporador, detalhes das medidas.



Figura 6. Seção dos dispositivos de expansão.

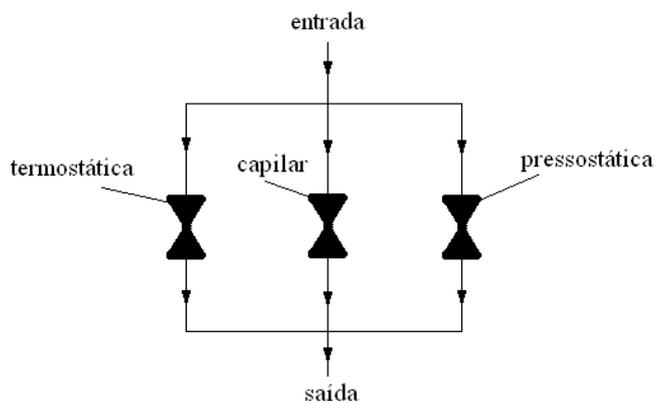


Figura 7. Seção dos dispositivos de expansão.



Figura 8. Seção de compressor.

3. O CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

3.1 Ciclo ideal de refrigeração

A refrigeração por compressão de vapor data de 1834, quando o inglês Jacob Perkins recebeu a patente de uma máquina de gelo de ciclo fechado que usava éter ou outros fluidos voláteis com refrigerantes. Um modelo funcional dessa máquina foi criado, mas nunca foi comercialmente produzido. Em 1850, Alexander Twining começou a projetar e construir máquinas de gelo por compressão de vapor usando éter etílico, que é um refrigerante utilizado comercialmente nos sistemas por compressão de vapor. Inicialmente, os sistemas de refrigeração por compressão de vapor eram grandes e usados principalmente na fabricação de gelo, em cervejarias e armazenamento a baixa temperatura. Eles não tinham controles automáticos e eram movidos por motores a vapor. Na década de 1890, as máquinas menores movidas a motor elétrico e equipadas com controles automáticos começaram a substituir as unidades mais antigas, e os sistemas de refrigeração começaram a aparecer em açougues e domicílios. Em 1930, devido ao contínuo aperfeiçoamento, foi possível obter sistemas de refrigeração por compressão de vapor relativamente eficientes, confiáveis, pequenos e baratos.

Muitas das dificuldades associadas ao ciclo de Carnot reverso podem ser eliminadas pela vaporização completa do refrigerante antes dele ser comprimido e pela substituição da turbina por um dispositivo de estrangulamento, como uma válvula de expansão ou um tubo capilar. O ciclo resultante é chamado de ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor, e é mostrado de forma esquemática no diagrama T-s, figura 9. O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o mais usado para refrigeradores, sistemas de condicionamento de ar e bombas de calor. Ele consiste em quatro processos:

- 1-2. Compressão isentrópica em um compressor
- 2-3. Rejeição de calor a pressão constante em um condensador
- 3-4. Estrangulamento em um dispositivo de expansão
- 4-1. Absorção de calor a pressão constante em um evaporador

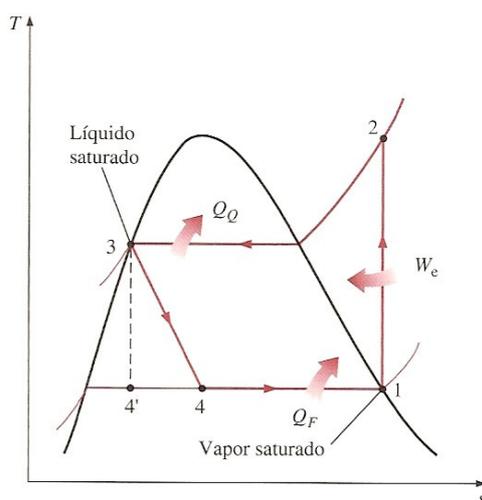


Figura 9. Representação esquemática no diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração por compressão do vapor.

Em um ciclo de refrigeração ideal por compressão de vapor o refrigerante entra no compressor no estado 1 como vapor saturado e é comprimido de forma isentrópica até a pressão do condensador. A temperatura do refrigerante aumenta durante esse processo de compressão isentrópica até bem acima da temperatura da vizinhança. Em seguida, o refrigerante entra no condensador como vapor superaquecido no estado 2 e sai como líquido saturado no estado 3 como resultado da rejeição de calor para a vizinhança. A temperatura do refrigerante nesse estado ainda está acima da temperatura da vizinhança.

O refrigerante líquido saturado no estado 3 é estrangulado até a pressão do evaporador ao passar através de uma válvula de expansão ou tubo capilar. Durante esse processo, a temperatura do refrigerante cai abaixo da temperatura do espaço refrigerado. O refrigerante entra no evaporador no estado 4 como mistura saturada com baixo título de vapor e evapora completamente pelo calor que é absorvido do espaço refrigerado. O refrigerante sai do evaporador como vapor saturado e entra novamente no compressor, completando o ciclo.

Em um refrigerador doméstico, os tubos do compartimento do congelador, no qual o calor é absorvido pelo refrigerante, servem como evaporadores. As serpentinas encontradas na parte de trás do refrigerador, onde o calor é dissipado para o ar da cozinha, servem como condensador.

A área abaixo da curva de um processo em um diagrama T-s representa a transferência de calor para os processos internamente reversíveis. A área abaixo da curva do processo 4-1 representa o calor absorvido pelo refrigerante no evaporador, e a área sob a curva do processo 2-3 representa o calor rejeitado no condensador. Uma regra prática diz que o COP melhora de 2% a 4% para cada °C de elevação da temperatura de evaporação ou para cada °C de diminuição da temperatura de condensação.

Outro diagrama muito usado na análise dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor é o diagrama P-h. Neste diagrama, três dos quatro processos aparecem como linhas retas e a transferência de calor no condensador e no evaporador é proporcional aos comprimentos das curvas dos processos correspondentes.

Observe que, ao contrário dos ciclos ideais discutidos anteriormente, o ciclo de refrigeração ideal por compressão de vapor não é um ciclo internamente reversível, uma vez que ele envolve um processo irreversível (estrangulamento). Esse processo é mantido no ciclo para que ele seja um modelo mais realista do ciclo real de refrigeração por compressão a vapor. Se o dispositivo de estrangulamento fosse substituído por uma turbina isoentrópica, o refrigerante entraria no evaporador no estado 4', e não no estado 4. Entretanto, a substituição da válvula de expansão por uma turbina não é uma solução prática, uma vez que os benefícios não justificam o custo e a complexidade adicionais.

Todos os quatro componentes associados ao ciclo de refrigeração por compressão a vapor são dispositivos com escoamento em regime permanente e, portanto, todos os quatro processos que formam o ciclo podem ser analisados como processos com escoamento em regime permanente. As variações das energias cinética e potencial do refrigerante em geral são pequenas com relação aos termos de trabalho e transferência de calor e, portanto, podem ser desprezadas. Assim, a equação de energia do escoamento em regime permanente em unidade de massa se reduz a

$$(q_e - q_s) + (w_e - w_s) = h_s - h_e \quad (1)$$

O condensador e o evaporador não envolvem trabalho e o compressor pode ser aproximado como adiabático. Em seguida, o COPs dos refrigeradores e das bombas de calor que operam no ciclo por compressão de vapor podem ser expressos por

$$COP_R = \frac{q_F}{w_{liq,e}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

$$COP_{BC} = \frac{q_Q}{w_{liq,e}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (3)$$

onde $h_1 = h_{v@P_1}$ e $h_3 = h_{l@P_{13}}$ para o caso ideal.

3.2 Ciclo real de refrigeração por compressão de vapor

Um ciclo real de refrigeração por compressão de vapor difere do ciclo ideal de várias maneiras, principalmente devido às irreversibilidades que ocorrem nos diversos componentes. Duas fontes comuns de irreversibilidade são o atrito do fluido (que causa queda de pressão) e a transferência de calor de ou para vizinhança. O diagrama T-s de um ciclo real de refrigeração por compressão de vapor é mostrado na figura 10.

No ciclo ideal, o refrigerante sai do evaporador e entra no compressor como vapor saturado. Na prática, porém, pode não ser possível controlar o estado do refrigerante de modo tão preciso. Em vez disso, é mais fácil criar o sistema para que o refrigerante fique ligeiramente superaquecido na entrada do compressor. Essa pequena segurança de projeto garante que o refrigerante esteja totalmente vaporizado quando entra no compressor. Da mesma forma, a linha que conecta o evaporador ao compressor em geral não é muito longa. Assim, a queda de pressão causada pelo atrito do fluido e pela transferência de calor da vizinhança para o refrigerante pode ser significativa. O resultado do superaquecimento (o ganho de calor na linha de conexão) e das quedas de pressão no evaporador e na linha de conexão é um aumento no volume específico e, portanto, um aumento nos requisitos de entrada de potência para o compressor, uma vez que o trabalho com escoamento em regime permanente é proporcional ao volume específico.

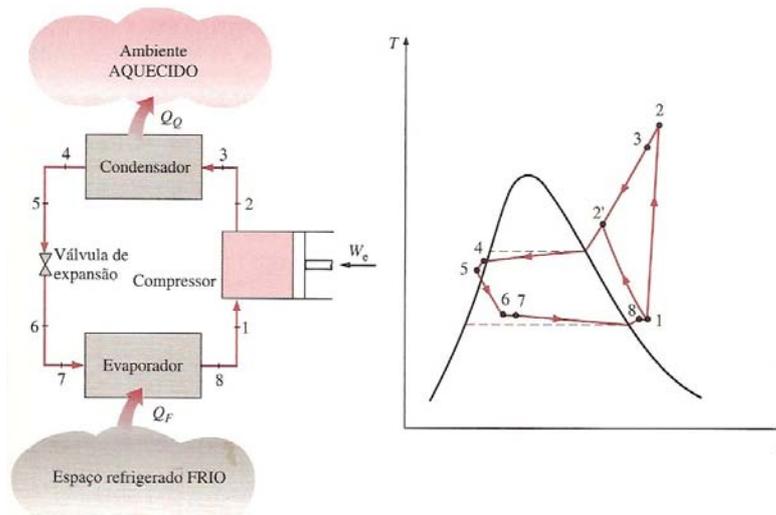


Figura 10. Representação esquemática do ciclo real de por compressão do vapor.

O processo de compressão no ciclo ideal é internamente reversível e adiabático e, portanto, é isoentrópico. Entretanto, o processo real de compressão envolve efeitos de atrito, o que aumenta a entropia e a transferência de calor, que pode aumentar ou diminuir a entropia, dependendo da direção. Dessa forma, a entropia do refrigerante pode aumentar (processo 1-2) ou diminuir (processo 1-2') durante um processo real de compressão, dependendo dos efeitos que dominam. O processo de compressão 1-2' pode ser mais desejável do que o processo de compressão isoentrópica, uma vez que o volume específico do refrigerante e, portanto, o requisito de entrada de trabalho são menores neste caso. Assim, o refrigerante deveria ser resfriado durante o processo de compressão sempre que isso fosse prático e econômico.

No caso ideal, assume-se que o refrigerante sai do condensador como líquido saturado à pressão de saída do compressor. Na realidade, porém, uma certa queda de pressão é inevitável no condensador, bem como nas linhas que conectam o condensador ao compressor e à válvula de expansão. Não é fácil executar o processo de condensação com a precisão que permita que o refrigerante seja um líquido saturado no final, e não é desejável direcionar o refrigerante para a válvula de expansão antes que este seja completamente condensado. Portanto, o refrigerante é sub-resfriado de alguma forma antes de entrar na válvula de expansão. No entanto, não nos importamos com isso, uma vez que nesse caso o refrigerante entra no evaporador com entalpia mais baixa e, portanto, pode absorver mais calor do espaço refrigerado. A válvula de expansão e o evaporador em geral se localizam muito próximos entre si e a queda de pressão na linha de conexão é pequena.

4. ANÁLISE DOS PARÂMETROS

Com as medições é possível verificar qual a influência da variação de uma grandeza em relação à outra. As grandezas as quais conseguimos identificar seja através de registros ou correlações são:

- Quantidade mássica de fluido refrigerante no sistema;
- Pressão de condensação;
- Pressão de evaporação;
- Subresfriamento ou título a montante;
- Vazão mássica de fluido refrigerante;
- Vazão e velocidade do ar no condensador;
- Vazão e velocidade do ar no evaporador;
- Temperatura do fluido refrigerante na entrada do evaporador;
- Temperatura do fluido refrigerante na entrada do compressor;
- Temperatura do fluido refrigerante na entrada do condensador;
- Temperatura do fluido refrigerante na entrada do dispositivo de expansão;
- Temperatura do ar na entrada do evaporador;
- Temperatura do ar na entrada do condensador;
- Umidade do ar na entrada do evaporador;
- Umidade do ar na entrada do condensador;

5. DETALHAMENTO DOS EXPERIMENTOS POSSÍVEIS

5.1 Avaliação do COP

Comparar o rendimento (COP) com os diferentes dispositivos de expansão “tubo capilar, válvula de expansão termostática e válvula de pressão constante” em um sistema de refrigeração para diferentes pressões de evaporação e condensação, utilizando os seguintes fluidos refrigerantes R134a e R22. Ainda podemos testar algumas misturas de fluidos refrigerantes não existentes no mercado;

5.2 Análise do rendimento isentrópico

Analisar o rendimento isoentrópico do compressor para diferentes condições de operação, bem como diferentes fluidos e tipos de compressor (alternativo de paleta e rotativo);

5.3 Avaliação dos fluxos de calor e massa nos componentes do sistema

5.3.1 Avaliar fluxo de massa e calor cedido no evaporador para um dado sistema;

5.3.2 Avaliar fluxo de massa e calor Rejeitado no condensador para um dado sistema;

5.3.3 Avaliar cada dispositivo de expansão e fazer uma análise isoentálpica de cada um deles;

5.3.4 Avaliar a influência da temperatura do ar na entrada do condensador, ou seja, para o sistema de condensação do ciclo;

5.3.5 Avaliar a entalpia na entrada e saída do ar no evaporador;

Com os estudos efetuados nesta bancada é possível melhorar a compreensão dos estudantes sobre Ciclo de Carnot. Podemos também simular vários experimentos onde é possível determinar experimentalmente os conceitos de refrigeração e ar condicionado.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

A montagem experimental proposta foi elaborada de modo de atender os objetivos e requisitos apresentados, ou seja:

- Estudar o ciclo de refrigeração e determinar o rendimento dos componentes deste sistema,
- Estudar o comportamento de um ciclo ideal de refrigeração para diferentes tipos de compressores e fluidos refrigerantes,
- Analisar o comportamento do ciclo de refrigeração com diferentes dispositivos de expansão.

Como pode ser visto o equipamento é fácil de montar e operar e permite a total compreensão do ciclo de refrigeração por compreensão.

7. AGRADECIMENTOS

Os dois primeiros autores desejam agradecer ao CNPQ pelas bolsas de PQ e de doutorado respectivamente.

8. REFERENCIAS

- 1 Ismail, K. A. R., Técnicas de Medidas e Instrumentação, Terceira edição, Cisgraf Artes Graficas Ltda, Campinas, SP, ISBN 9788590924241, 2009, p 602.
- 2 Ismail, K. A. R., Técnicas Experimentais em Fenômenos de Transferencia, Mendes Gráfica e Editora SA, Campinas, São Paulo, ISBN 85-900609-4-2, 2001, 488 p.
- 3 Yunus A.Cingel, Termodinâmica, McGraw-Hill do Brasil, 2009.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

A NOVEL EXPERIMENTAL FACILITY FOR TEACHING REFRIGERATION BY COMPRESSION

Ismail, K.A.R, Lino, F A. M., Schneider, L. C. and Molon, L.

Department of Thermal and Fluids Engineering – Faculty of Mechanical Engineering – State University of Campinas, UNICAMP, P.O. Box 6122, CEP 13083-970, Campinas (SP), Brazil. Tel: +55 19 35213376; fax: +55 19 32893722

Abstract. This novel facility for teaching refrigeration by compression allows not only under graduate teaching but also research and development of thermal expansion devices, compressors, condensers and evaporators for compression refrigeration systems as well as investigating new working fluids. The test facility is totally open and the instruments are placed in a panel permitting the student visualizing where and what the instrument is measuring. The circuit has two compressors one conventional and the other of the screw rotary type to allow testing each compressor separately and measure the power consumed. The expansion devices are placed in parallel and can be isolated individually to allow testing each separately. The expansion devices used are thermal expansion type (therm-static) pressure type (pres static) and the capillary type in the form of one or more capillary parallel tubes. The evaporator is placed in a duct with the entry and exit sections fully instrumented and the air flow over the evaporator surface is provided by a blower and controlled by a frequency inverter to vary the air flow rate and hence the heat transfer coefficients. The condenser is similarly enclosed between two ducted sections fully instrumented to enable the determination of the condenser thermal performance. The airflow is provided by another blower where its rotational speed is controlled by a frequency inverter. Among the experiments, that the students can realize on this test bed is the determination of the real refrigeration cycle and compare it with the theoretical cycle under the same conditions. Additionally they can evaluate the performance of the different components of the system such as the evaporator, the condenser, the different expansion devices. Also the equipment can be used for research end development of components such the compressor, evaporator, condenser and any capillary device of interest. The system can be used to test and evaluate the performance of different types of refrigerants and expansion devices and capillary tubes.

Keywords: Refrigeration by compression, Expansion devices, Evaporators, Condensers, Compressors, New refrigerants.