



**Eliézer Sidinei Crestani
Maurí Claudir Vallérius**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA PARA VERIFICAÇÃO
DOS CICLOS DE REFRIGERAÇÃO**

Horizontina

2013

Eliézer Sidinei Crestani
Maurí Claudir Vallérius

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA PARA VERIFICAÇÃO DOS
CICLOS DE REFRIGERAÇÃO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Ricardo Ferreira Severo, Mestre Engenharia Agrícola.

Horizontina

2013

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“Desenvolvimento de bancada para verificação dos ciclos de refrigeração”

Elaborada por:

**Eliézer Sidinei Crestani
Maurí Claudir Vallérius**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 02/12/2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Dr. Ademar Michels
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Eng^a Francine Centenaro
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2013**

DEDICATÓRIA

Aos familiares, amigos e professores que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTO

Foram muitas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Algumas, indiretamente, prestando apoio e informações técnicas, outras, de forma direta, como o colega André Geleski, disponibilizando seus conhecimentos técnicos em elétrica e eletrônica e que suportaram no desenvolvimento do projeto prático. Também, ao funcionário e amigo Schmidt, pelo suporte, incentivo e disponibilidade em todos os momentos, nas mais diversas atividades ao longo do trabalho.

Agradecemos aos orientadores Prof. Ricardo Ferreira Severo e Anderson Dal Molin, a paciente e dedicada orientação, e pelo grande papel que desempenham como professor e amigo.

Ao amigo Prof. Libino Franz, pelo incentivo e pela ajuda em alguns momentos do curso, através de suas sábias palavras.

Aos grandes amigos que conhecemos ao longo do curso, entre eles: Michel Busanello, Jonas Horn, Cristiano Eich, Ivan Borgmann, Edium Michels, pelos grandes momentos vividos e pela forte amizade conquistada ao longo da vida acadêmica, assim como, a grande parceria do grupo PF, disponibilizando-nos momentos de alegria e lazer e que de alguma forma contribuíram para nossa formação.

RESUMO

O trabalho em questão surgiu a partir da necessidade da Faculdade Horizontina – Fahor, em disponibilizar equipamentos ou bancadas que possam aliar teoria e prática referente à refrigeração e que complemente de forma adequada o processo de ensino dos acadêmicos. A partir disso, o trabalho tem como principal objetivo, o desenvolvimento de uma bancada para testes de ciclos de refrigeração, disponibilizando-a aos laboratórios da Fahor, servindo como material de apoio didático para disciplinas como: conforto térmico, transferência de calor, máquinas térmicas e termodinâmica, onde a partir de testes práticos, seja possível a realização de simulações em seus sistemas, permitindo variações de rotação no compressor. Para tal, inicialmente teve-se na metodologia um forte embasamento em referenciais teóricos que serviram de sustentação para o decorrer do trabalho, tendo na sequência um conceito e características descritivas, onde apresenta-se em forma de passo-a-passo o processo de construção da bancada, a configuração dos componentes que fazem parte do sistema e os testes práticos para obtenção dos dados, para posteriormente submetê-los aos cálculos de desempenho do sistema e seus resultados. A partir da coleta de dados, baseado nas rotinas de testes estabelecidos, foi possível verificar e analisar as variações que o sistema apresenta, onde optou-se nesse momento em variar a rotação do compressor, verificando assim os resultados de pressão e de temperatura para as linhas de alta e de baixa do sistema, que utiliza o refrigerante R134a. Com os resultados coletados, os mesmos foram submetidos aos diversos cálculos para obtenção dos efeitos e potências exigidas no sistema, resultando nos coeficientes de performance teórico e real (COP), sendo que para todos os testes, o COP real é inferior ao COP teórico, expressando assim, boa efetividade do sistema em relação ao consumo. Por fim, conclui-se que os resultados obtidos atendem as expectativas do trabalho desenvolvido, onde os resultados expressam a eficácia e funcionamento dos componentes e do sistema.

Palavras-chave: Ciclos de refrigeração. Bancada de testes. COP.

ABSTRACT

The work in question arose from the need of Faculdade Horizontina - Fahor in providing equipment or benches that can combine theory and practice about refrigeration and that complement an appropriate form the teaching process of academics. After that, the work has the main objective, the bench test development of refrigeration cycles, availabbling it to the Fahor labs, serving as a didactic support material for subjects such as: thermal comfort, heat transfer, thermal machines and thermodynamics, where from these practical tests, it's possible to perform simulations on their systems, allowing variations of the compressor rotation. For this, initially it had in methodology a strong grounding in theoretical references and that served as a support for the running of the work, having in sequence a concept and descriptive features, where present in step-by-step way for the construction process of the bench, the components configuration that are part of the system and the practical tests for obtaining the data, for subsequently submit them to the calculations of system performance and its results. After data collection, based on the routines tests established, it was possible to verify and analyze the variations that the system presents, where it was decided at that time to vary the compressor rotation, verifying the pressure results and temperature for the lines of high and low of the system, which uses R134a refrigerant. With the results collected, those ones were submitted to several calculations for obtaining the effects and powers required in the system, resulting that in the theoretical and real performance coefficients (COP), being that for all tests, the real COP is higher than the theoretical COP, expressing by that, good system effectiveness in relation to the consumption. Lastly, it's concluded that the results obtained meet the expectations of the work, where the results express the effectiveness and functioning of the components and of the system.

Keywords: Refrigeration cycles. Bench tests. COP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de condução, convecção e radiação.	5
Figura 2: Diagrama ph – Ciclo Ideal.	8
Figura 3: Transformações no ciclo de refrigeração.	9
Figura 4: Modelos de compressores para refrigeração.	13
Figura 5: Modelos de evaporadores.	14
Figura 6: Condensador com resfriamento a água e a ar.	14
Figura 7: Válvulas de expansão.	15
Figura 8: Mangueiras e conexões.	16
Figura 9: Motor elétrico.	17
Figura 10: Tipos de termômetros.	18
Figura 11: Manômetros de alta e de baixa pressão.	19
Figura 12: Tacômetro digital.	19
Figura 13: Passo-a-passo do processo.	22
Figura 14: Componentes da bancada.	23
Figura 15: Componentes da bancada.	24
Figura 16: Estrutura da bancada – mesa móvel.	25
Figura 17: Suporte para fixação de componentes.	25
Figura 18: Componentes montados no suporte.	26
Figura 19: Coifa de acrílico.	26
Figura 20: Conexões e manômetro analógico de alta e de baixa.	27
Figura 21: Esquema do circuito de refrigeração.	28
Figura 22: Medição de rotação com tacômetro.	29
Figura 23: Medição de pressão e temperatura na linha de alta.	30
Figura 24: Medição de pressão e temperatura na linha de baixa.	30
Figura 25: Volume constante no gráfico teórico.	34
Figura 26: Volume constante no gráfico Real.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	5
2.2 TERMODINÂMICA.....	6
2.3 REFRIGERAÇÃO	7
2.4 COMPONENTES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	12
2.4.1 Compressor	12
2.4.2 Evaporador	13
2.4.3 Condensador.....	14
2.4.4 Válvulas de expansão	14
2.4.5 Tubulações e mangueiras hidráulicas	15
2.4.6 Fluidos refrigerantes	16
2.4.7 Motor elétrico	16
2.5 INSTRUMENTAÇÃO.....	17
2.5.1 Temperatura.....	18
2.5.2 Pressão.....	18
2.5.3 Rotação.....	19
2.5.4 Corrente elétrica e tensão	19
3. METODOLOGIA	21
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS PARA CONSTRUÇÃO DA BANCADA	21
3.1.1 Desmontagem de componentes do trator.....	22
3.1.2 Manutenção e testes funcionais dos componentes do trator	23
3.1.3 Aquisição de componentes faltantes	23
3.1.4 Manutenção e testes funcionais dos componentes	24
3.1.5 Definição da estrutura e modelo de bancada (mesa móvel)	24
3.1.6 Preparação, ajustes e montagem do suporte para fixação dos componentes na bancada	25
3.1.7 Construção da coifa para o evaporador.....	26
3.1.8 Dimensionamento e compra de mangueiras, conectores e relógios de medição de temperatura e pressão	27
3.1.9 Instalação elétrica e testes funcionais do sistema	27
3.1.10 Carga de gás R134a	28
3.2 COLETA DE DADOS	29
3.2.1 Acionamento do sistema elétrico.....	29
3.2.2 Regulagem da rotação.....	29
3.2.3 Medição de pressão e temperatura (teórico e real) na linha de alta	30
3.2.4 Medição de pressão e temperatura (teórico e real) na linha de baixa.....	30
3.2.5 Coleta de resultados adicionais e informativos.....	31
4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 MODELO E CONCEPÇÃO DE BANCADA	32
4.2 CÁLCULOS E GRÁFICOS PARA OBTENÇÃO DO COP TEÓRICO.....	32
4.3 CÁLCULOS E GRÁFICOS PARA OBTENÇÃO DO COP REAL.....	35

4.4	ANÁLISES DOS RESULTADOS DO COP TEÓRICO X COP REAL.....	37
5.	CONCLUSÃO.....	38
6.	RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
	ANEXO A - Diagrama para refrigerante R134a.....	41
	APÊNDICE A - Bancada para testes de ciclos de refrigeração-vista frontal.	42
	APÊNDICE B - Bancada para testes de ciclos de refrigeração-vista lateral.....	43
	APÊNDICE C - Gráfico teórico para R134a.....	44
	APÊNDICE D - Gráfico teórico x real para R134a.	45
	APÊNDICE E - Resultados dos testes.	46

1. INTRODUÇÃO

A constante interação teoria e prática têm possibilitado um melhor aprendizado aos estudantes universitários e de outros segmentos, onde a relação entre as duas possibilita melhor análise e reflexão crítica do assunto, uma vez que a teoria não dita a prática, porém, serve para manter a prática ao nosso alcance, de forma a mediar e compreender de maneira crítica o conhecimento que se almeja (FREIRE,1996).

A partir disso, como forma de adequar e ampliar o grau de desenvolvimento e aprendizagem de professores e acadêmicos da Fahor, considera-se de fundamental importância a utilização de laboratórios, que possuem equipamentos que possibilitem essa interação teoria x prática.

Nesse contexto, avaliou-se a necessidade da faculdade Fahor, quanto à disponibilidade de equipamentos ou bancadas que possibilitem experimentos ou realização de testes práticos em laboratórios e que atendam os componentes curriculares de conforto térmico, transferência de calor, termodinâmica, máquinas térmicas, entre outras, percebe-se a necessidade em desenvolver uma bancada para testes de ciclos de refrigeração, capaz de realizar simulações em seus sistemas, variando a rotação, onde a partir de testes práticos os dados possam ser coletados e interpretados possibilitando assim o entendimento da correlação entre os meios.

Justifica-se este trabalho pela carência da Faculdade Fahor em disponibilizar equipamentos ou material de apoio didático referente a sistemas de refrigeração, tendo em vista sua complexidade em relação a conceitos, definições e funcionamentos, possibilitando assim, maior interação entre as partes e melhor comunicação entre o orientador e o orientando.

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver e disponibilizar a bancada de testes de ciclos de refrigeração em condições de uso para professores e estudantes, conforme as necessidades e aplicações dos componentes curriculares, a partir da definição e elaboração de procedimentos ou rotinas de testes. Entre os objetivos específicos do trabalho, pode-se citar:

- Analisar a disponibilidade e viabilidade de componentes necessários para a construção de uma bancada didática de refrigeração;
- Montar bancada de testes de ciclos de refrigeração, que possibilite a realização de experimentos práticos em laboratórios;

- Realizar testes funcionais que comprovem o funcionamento e a eficácia do equipamento e de seus sistemas;
- Criar rotinas de testes sequenciados para os ensaios práticos, baseados em material teórico;
- Oportunizar aos estudantes da Fahor, aulas práticas com equipamentos que demonstram em forma de resultados reais a teoria aplicada nas disciplinas.

Este trabalho abrange em sua fase inicial a revisão da literatura, abordando os principais conceitos de sistemas, equipamentos e instrumentações que envolvem o assunto refrigeração. Na sequência, apresenta-se a metodologia utilizada para caracterizar os passos necessários para o desenvolvimento da bancada e montagem dos componentes do sistema, assim como a coleta e avaliação dos dados de testes práticos. Para finalizar, os cálculos para obtenção dos efeitos e potências aplicadas para cada rotina de testes, resultando nos coeficientes de performance teórico e real do sistema.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura apresenta a fundamentação teórica existente nos processos de sistemas de refrigeração, bem como os principais componentes e instrumentações necessários para seu funcionamento e verificações.

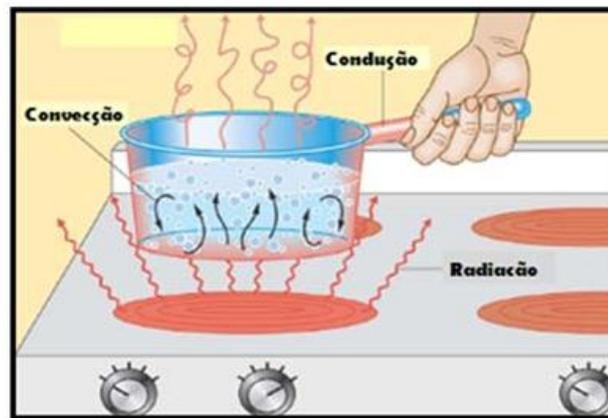
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor é basicamente, a energia que se encontra em trânsito, devido a uma diferença de temperatura existente entre corpos.

Bejan (1996) define a transferência de calor como sendo a energia transferida de um corpo para outro, devido à diferença de temperatura existente entre eles. O corpo de maior temperatura transfere o calor para o de menor temperatura, até que haja equivalência de temperatura entre eles, ou seja, um equilíbrio térmico.

Essa transferência de energia pode processar-se de três maneiras distintas: por condução, convecção ou radiação, conforme Figura1:

Figura 1: Processo de condução, convecção e radiação.



Fonte: RIBEIRO (03 jun.2010).

Para Kreith e Bohn (1977), a condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso, ou entre meios diferentes em contato físico direto. Dessa forma, pode-se dizer que a transmissão de calor por condução ocorre quando dois ou mais corpos, com temperaturas diferentes encontram-se encostados uma a outra, onde ocorre a agitação de moléculas, a partir da energia do corpo de

temperatura mais elevada, para o de mais baixa, fazendo com que a energia cinética das moléculas do corpo de baixa temperatura se eleve.

O processo de convecção, para Braga Filho (2004), são processos que envolvem a transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido, líquido ou gás. Nesse processo, a matéria aquecida se desloca, havendo assim, transporte de matéria. Em líquidos, onde existe grande mobilidade das partículas aquecidas, devido ao contato direto com a superfície sólida, as partículas tendem a se deslocar para locais de temperaturas mais baixas, ocasionado transferência de energia de uma posição para outra, o que caracteriza a transmissão de calor por convecção.

A radiação é definida como sendo um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um de menor temperatura quando os mesmos estão separados no espaço, ainda que entre eles, exista vácuo (KREITH e BOHN, 1977). Dessa forma, não é necessário que exista contato físico entre os corpos para que a energia em forma de calor seja transmitida entre eles, sendo denominado de calor radiante e é feita sob forma de ondas eletromagnéticas.

2.2 TERMODINÂMICA

Em termos gerais, a termodinâmica é a relação entre calor trocado e trabalho realizado em um determinado sistema, onde as variações de temperatura, pressão e volume serão responsáveis pelas transformações ocorridas.

Segundo Sonntag (2002), termodinâmica é a ciência que trata o calor, do trabalho e daquelas propriedades das substâncias relacionadas ao calor e ao trabalho. O calor é definido como sendo a forma de transferência de energia através da fronteira de um sistema, numa dada temperatura para outro sistema ou meio, com temperatura inferior, em virtude da diferença entre as temperaturas dos dois sistemas.

Podemos definir como trabalho um modo de transferir energia, porém, trabalho não se refere ao que está sendo transferido entre sistemas ou ao que é armazenado dentro de um sistema. Energia é transferida e armazenada quando se realiza trabalho (MORAN e SHAPIRO, 2002).

A termodinâmica possui leis básicas, conhecidas como 1° e 2° leis da termodinâmica, onde podemos dizer que:

1° Lei: Um sistema não pode criar ou consumir energia, mas apenas armazená-la ou transferi-la ao meio onde se encontra, como trabalho, ou ambas as

situações ao mesmo tempo, então, ao receber uma quantidade de calor, esta poderá realizar um trabalho e aumentar a energia interna do sistema.

As transformações que ocorrem na 1ª lei da termodinâmica são:

- Transformação Isobárica: ocorre a pressão constante, podendo variar o volume e a temperatura;
- Transformação Isotérmica: ocorre a temperatura constante, variando somente a pressão e o volume;
- Transformação Isocórica: ocorre a volume constante, variando somente pressão e temperatura;
- Transformação Adiabática: transformação gasosa onde o gás não troca calor com o meio externo, seja porque está termicamente isolado ou o processo ocorre de forma tão rápida que o calor trocado é desprezível.

2ª Lei: A segunda lei é a que tem maior aplicação na engenharia, pois trata diretamente do rendimento das máquinas térmicas. Dois enunciados ilustram a 2ª Lei da Termodinâmica, enunciado de Clausius e o enunciado de Kelvin-Planck.

- Enunciado de Clausius: O calor não pode fluir, de forma espontânea, de um corpo de temperatura menor, para outro corpo de temperatura mais alta. Tendo como consequência que o sentido natural do fluxo de calor é da temperatura mais alta para a mais baixa, e que para que o fluxo seja inverso é necessário que um agente externo realize um trabalho sobre este sistema.
- Enunciado de Kelvin-Planck: É impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho. Este enunciado diz que, não é possível que um dispositivo térmico tenha um rendimento de 100%, por menor que seja, sempre há uma quantidade de calor que não se transforma em trabalho.

2.3 REFRIGERAÇÃO

Costa (1982) define refrigeração como sendo a retirada de calor de um corpo, onde pode-se fazer as seguintes distinções:

- Arrefecimento: redução da temperatura de um corpo até a temperatura ambiente;

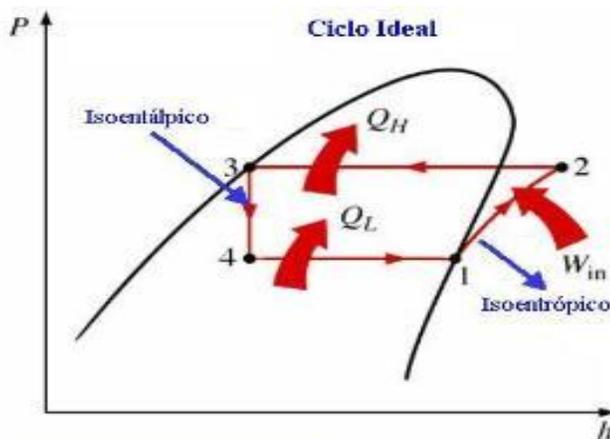
- Resfriamento: redução da temperatura de um corpo da temperatura ambiente até a temperatura de congelamento (0°C);
- Congelamento: redução da temperatura de um corpo aquém da sua temperatura de congelamento.

Ainda para Costa (1982), o termo refrigeração pode ser aplicado aos processos onde há retirada de calor dos corpos com dispêndio de energia, ou seja, o resfriamento e o congelamento. Já o arrefecimento, utiliza a tendência natural de transferência de calor, onde o calor passa de um corpo mais quente para o corpo mais frio, naturalmente.

Junior (2003) define ciclo de refrigeração, como sendo o processo onde, em um circuito fechado, o fluido refrigerante consiga sucessivamente transformar-se em líquido e vapor, absorvendo calor pela evaporação e rejeitando calor pela condensação.

Para Stoecker e Jabardo (2002), o estudo dos ciclos termodinâmicos envolve um procedimento para obtenção de refrigeração de modo contínuo. Este procedimento consiste em fazer com que o fluido refrigerante passe por uma série de processos e retorne ao seu estado inicial. Nesse processo, o ciclo de Carnot se destaca por se tratar de um ciclo ideal (reversível) operando entre dois níveis de temperatura e, portanto, o que apresenta maior eficiência. Na Figura 2, é apresentado o gráfico no diagrama **ph** de ciclo de compressão de vapor ideal.

Figura 2: Diagrama **ph** – Ciclo Ideal.



Fonte: PANESI (2001).

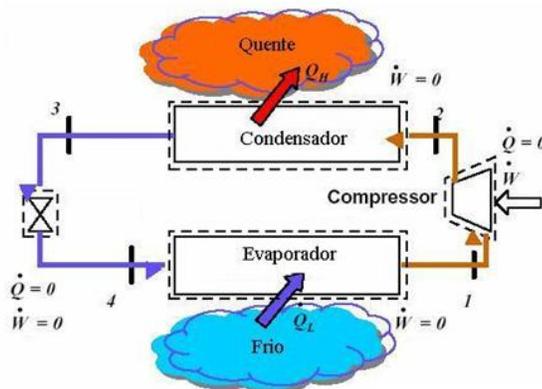
Ainda conforme Stoecker e Jabardo (2002), os gráficos dos ciclos de refrigeração são originados a partir de valores teóricos e reais dos sistemas, indicando o estado do refrigerante em cada etapa do ciclo, sendo aplicados aos diversos diagramas existentes, dependendo do refrigerante aplicado ao sistema, como por exemplo, o diagrama para refrigerante R134a, que pode ser observado no Anexo A.

Para os autores, o ciclo de refrigeração é composto por quatro transformações, conforme descrito abaixo:

- **Compressão: 1-2** Compressão isentrópica, na qual o vapor saturado ou superaquecido passa da pressão P_1 , para a pressão P_2 , até a pressão de condensação;
- **Condensação: 2-3** Passando pelo condensador, o vapor superaquecido, proveniente da compressão, é resfriado isobaricamente até a temperatura de saturação, sendo condensado isobárica-isotermicamente, perdendo calor à pressão constante;
- **Expansão: 3-4** Neste processo, ocorre a expansão isoentálpica do vapor condensado até a pressão de evaporação, passando da pressão P_2 para a pressão P_1 ;
- **Evaporação: 4-1** Passando pelo evaporador, o líquido refrigerante evapora até o estado de vapor saturado a pressão constante, retirando calor do meio a refrigerar.

Na Figura 3, podem-se visualizar as quatro transformações que ocorrem com o refrigerante durante o ciclo de refrigeração.

Figura 3: Transformações no ciclo de refrigeração.



Na refrigeração, inúmeros cálculos são necessários para obter-se um bom dimensionamento dos componentes e eficiências satisfatórias do sistema, evitando ao máximo as perdas durante seus ciclos.

Costa (1982) define os elementos de cálculos fundamentais como sendo:

Vazão Volumétrica: é a velocidade com que o fluído refrigerante escoo pela seção transversal da tubulação em determinado tempo, sendo representada pela equação:

$$Vv = Vc * Fr \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (1)$$

Onde:

$Vv = \text{Vazão Volumétrica (m}^3\text{/s)}$

$Vc = \text{Vazão do Compressor (m}^3\text{)}$

$Fr = \text{Frequência do Compressor (Hz)}$

Vazão Mássica: é a quantidade em massa de um fluído que escoo através da seção transversal da tubulação em determinado tempo, sendo representada pela equação:

$$M = Vv * V \text{ (kg/s)} \quad (2)$$

Onde:

$M = \text{Vazão Mássica (kg/s)}$

$Vv = \text{Vazão Volumétrica (m}^3\text{/s)}$

$V = \text{Volume Constante (kg/m}^3\text{)}$

Efeito Frigorífico: é a quantidade de calor retirada do meio a refrigerar, sendo representada pela equação:

$$EF = h1 - h4 \text{ (kJ/kg)} \quad (3)$$

Onde:

$EF = \text{Efeito Frigorífico (kJ/kg)}$

$h1 = \text{Entalpia no ponto 1 (kJ/kg)}$

$h4 = \text{Entalpia no ponto 4 (kJ/kg)}$

Efeito Calorífico: é a quantidade de calor cedida ao meio ambiente, sendo representada pela equação:

$$EC = h2 - h3 \text{ (kJ/kg)} \quad (4)$$

Onde:

$EC = \text{Efeito Calorífico (kJ/kg)}$

$h_2 = \text{Entalpia no ponto 2 (kJ/kg)}$

$h_3 = \text{Entalpia no ponto 3 (kJ/kg)}$

Efeito Motor: é a quantidade de calor correspondente ao trabalho mecânico realizado, sendo representada pela equação:

$$EM = h_2 - h_1 \text{ (kJ/kg)} \quad (5)$$

Onde:

$EM = \text{Efeito Motor (kJ/kg)}$

$h_2 = \text{Entalpia no ponto 2 (kJ/kg)}$

$h_1 = \text{Entalpia no ponto 1 (kJ/kg)}$

Potência Refrigerífica: é a capacidade de retirada de energia de um ambiente por unidade de tempo, sendo representada pela equação:

$$PF = M * EF \text{ (kW)} \quad (6)$$

Onde:

$PF = \text{Potência Refrigerífica (kW)}$

$M = \text{Vazão Mássica (kg/s)}$

$EF = \text{Efeito Refrigerífico (kJ/kg)}$

Potência Calorífica: é a quantidade de energia dissipada pela máquina de refrigeração para o ambiente por unidade de tempo, sendo representada pela equação:

$$PC = M * EC \text{ (kW)} \quad (7)$$

Onde:

$PC = \text{Potência Calorífica (kW)}$

$M = \text{Vazão Mássica (kg/s)}$

$EC = \text{Efeito Calorífico (kJ/kg)}$

Potência Motora: é a energia introduzida no sistema pelo compressor, sendo representada pela equação:

$$PM = M * EM \text{ (kW)} \quad (8)$$

Onde:

$PM = \text{Potência Motora (kW)}$

$M = \text{Vazão Mássica (kg/s)}$

$EM = \text{Efeito Motor (kJ/kg)}$

COP Teórico: É o coeficiente de performance teórico do sistema, onde verifica-se seu desempenho teórico, sendo representada pela equação:

$$COP \text{ Teórico} = \frac{PF}{PM} \text{ (kW)} \quad (9)$$

Onde:

$COP \text{ Teórico} = \text{Coeficiente de Performance Teórico (kW)}$

$PF = \text{Potência Frigorífica (kW)}$

$PM = \text{Potência Motora (kW)}$

COP Real: É o coeficiente de performance real do sistema, onde verifica-se seu desempenho real, sendo representada pela equação:

$$COP \text{ Real} = \frac{PF}{PM} \text{ (kW)} \quad (10)$$

Onde:

$COP \text{ Real} = \text{Coeficiente de Performance Real (kW)}$

$PF = \text{Potência Frigorífica (kW)}$

$PM = \text{Potência Motora (kW)}$

2.4 COMPONENTES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Para Garcia (1997), um sistema de refrigeração tem sua variação principalmente em função dos componentes que compõem o sistema (projeto, desempenho dos componentes, dimensionamento, etc), e dos regimes de trabalho do sistema. A seguir, estaremos apresentando os principais componentes que fazem parte do sistema de refrigeração e suas definições.

2.4.1 Compressor

O compressor é um dos principais componentes do sistema de refrigeração. Sua função é aumentar a pressão do fluido refrigerante e promover a circulação desse fluido no sistema (SILVA, 2005). Este autor define os principais tipos de

compressores utilizados, sendo eles: alternativo, centrífugo, parafusos, palhetas e scroll.

Para Costa (1982), a escolha do tipo de compressor depende, essencialmente, da capacidade da instalação, que pode ser dividida, em termos de temperatura de vaporização e do fluido refrigerante utilizado em: pequena capacidade, média capacidade e grande capacidade. Na Figura 4, têm-se exemplos de modelos de compressores de refrigeração existentes no mercado.

Figura 4: Modelos de compressores para refrigeração.



2.4.2 Evaporador

Costa (1982) define evaporadores como sendo os dispositivos das instalações de refrigeração onde o calor é retirado do meio. Nessa fase, o fluido refrigerante sofre uma mudança de estado, saindo da fase líquida para a gasosa. Esse processo de retirada de calor pode ser realizado diretamente pelo fluido refrigerante ou indiretamente, por meio de fluidos intermediários, normalmente água ou salmoura. Os evaporadores também são conhecidos como: serpentina de resfriamento, resfriador da umidade, serpentina de congelamento, congelador, etc.

Existem vários tipos de evaporadores, conforme Figura 5, onde são classificados conforme o método utilizado para controlar o refrigerante e sua interface com o meio a ser refrigerado (evaporadores de expansão seca, inundados, de tubo liso, do tipo tubo com aletas (estáticos e forçados) Roll-Bond).

Figura 5: Modelos de evaporadores.



2.4.3 Condensador

O condensador tem a finalidade de esfriar e condensar o vapor superaquecido proveniente da compressão, nas instalações de refrigeração mecânica por meio de vapores (COSTA, 1982). Esse processo é realizado transferindo-se o calor do fluido aquecido para o meio, usando para isso uma fonte de resfriamento, que pode ser a água, ar ou até mesmo ar e água em contato, conforme exemplos de condensadores da Figura 6. Quando o condensador transfere uma quantidade de ar menor do que a necessária, eleva-se a pressão de descarga, sendo ela a causa principal de falha em compressores.

Ainda para este autor, o processo de transmissão de calor em um condensador, é verificado em 3 fases distintas: dessuperaquecimento; condensação; sub-resfriamento.

Figura 6: Condensador com resfriamento a água e a ar.



2.4.4 Válvulas de expansão

Conforme Costa (1982) as válvulas de expansão são componentes utilizadas nos sistemas de refrigeração mecânicos por meio de vapores, onde provocam a

expansão do fluido refrigerante liquefeito, desde a pressão de condensação até a pressão de vaporização do ciclo. Sua principal característica é a capacidade de controlar a quantidade de refrigerante que penetra no evaporador e a alimentação de reservatórios de líquidos a baixa pressão. Na Figura 7, pode-se observar exemplos de modelos de válvulas de expansão utilizados em sistemas de refrigeração.

Figura 7: Válvulas de expansão.



2.4.5 Tubulações e mangueiras hidráulicas

As tubulações ou mangueiras de refrigeração são componentes comuns em instalações frigoríficas que apresentam como função principal o transporte do refrigerante entre os distintos componentes do sistema (STOECKER e JABARDO, 2002). Ainda conforme os autores, esse transporte do refrigerante normalmente ocorre em condições variadas e está diretamente relacionado ao estado do equipamento e de seus componentes, assim como, do estado do próprio refrigerante.

Outro fator considerável é quanto à seleção correta de mangueiras, tubulações e das conexões que fazem parte do sistema, pois as mesmas devem ser compatíveis com o fluido refrigerante que será usado. Além disso, o material empregado para confecção das mesmas deve suportar as pressões e as temperaturas de trabalho na qual o sistema estará exposto. O dimensionamento das mangueiras e das tubulações não necessitam serem calculadas, uma vez que sua função básica é transportar o refrigerante entre os distintos componentes da instalação, devendo assim, atender as necessidades do sistema, limitando ao máximo as perdas de carga (PARKER, 1999).

Na Figura 8, visualizam-se modelos de mangueiras e conexões aplicados em sistemas de refrigeração.

Figura 8: Mangueiras e conexões.



2.4.6 Flúidos refrigerantes

Para Ferraz e Gomes (2008) os flúidos refrigerantes têm como principal função absorver calor de uma substância do ambiente a ser resfriado. Normalmente, os fluidos existentes no mercado não atendem todas as necessidades e propriedades desejáveis, pois para determinados aplicações podem ou não, ser considerados ideais. O ideal, conforme o autor, é que atendam o maior número de qualidades relativas a um determinado fim ou aplicação.

Os fluidos refrigerantes com qualidade comprovada, em sua maioria, caracterizam-se por possuírem propriedades como:

- Anticorrosivos;
- Baixo volume específico, exigindo menor trabalho do compressor;
- Condensação a pressões moderadas;
- Não ser tóxico e inflamável;
- Permitir evaporação acima da pressão atmosférica, etc.

Ainda conforme Ferraz e Gomes (2008), vários são os tipos de fluidos refrigerantes disponíveis no mercado, dependendo de suas composições e aplicações. Entre eles podemos citar o R-134a, que caracteriza-se por ser um refrigerante que substitui o CFC -12 em sistemas automotivos e sistemas de refrigeração industriais, não sendo agressivo a camada de ozônio.

2.4.7 Motor elétrico

Conforme Weg (2013), os motores elétricos são máquinas de trabalho que convertem energia elétrica em energia mecânica de rotação. São considerados os mais utilizados de todos os tipos de motores existentes, apresentando grandes

vantagens, como: baixo custo de manutenção, fácil manuseio e transporte, apresentam bom desempenho e rendimento, além de serem movidos por energia elétrica. Basicamente, seu princípio de funcionamento é a partir da interação entre campos eletromagnéticos, onde há forças mecânicas conduzindo a corrente elétrica em um determinado campo magnético. Ainda conforme Weg (2013), basicamente, os motores elétricos são classificados em:

- Motores de corrente contínua;
- Motores de corrente alternada;
- Motores especiais.

Para um bom aproveitamento e desempenho dos motores elétricos, alguns cuidados são necessários, tanto na sua instalação, quanto na manutenção:

- Devem ser instalados em locais de fácil acesso para inspeção e manutenção;
- Sua fixação deve ser em local plano, isento de vibrações;
- Deve haver um perfeito alinhamento com a máquina acionada;
- Deve haver inspeções regulares, quanto a lubrificação dos rolamentos, níveis de isolamento, desgaste e elevação da temperatura.

Na Figura 9, têm-se exemplos de motores elétricos, em vista externa e vista em corte, ilustrando os componentes internos.

Figura 9: Motor elétrico.



2.5 INSTRUMENTAÇÃO

Soisson (2002) define instrumentos, como sendo ferramentas indispensáveis utilizadas para estabelecer e manter os padrões de qualidade, sendo usadas para controlar as variáveis em um processo ou sistema a fim de alcançar as especificações do produto. Eles podem ser de vários tipos e segmentos. Na

sequência, serão abordados os principais instrumentos utilizados no processo de refrigeração, sendo eles:

2.5.1 Temperatura

Para Soisson (2002), a temperatura é uma medida industrial importante, sendo exigida em locais que a aplicação de calor ou frio é necessária para o controle de operações ou processos de fabricação. A unidade básica de temperatura é o Kelvin, expressa pelo símbolo K. Sua aplicação indica se é necessário um simples visualizador ou um controlador de temperatura. Normalmente, para esses casos, são indicados termômetros, que podem ou não ser usados com registradores e dispositivos de controle. Atualmente, vários são os tipos de termômetros disponíveis no mercado, conforme mostra a Figura 10, variando sua aplicabilidade e função. Os tipos mais usuais são: termômetro bimetalico; termômetro de gás; termômetro de infravermelho; termômetro de máxima; termômetro de mínima e termômetro de mercúrio.

Figura 10: Tipos de termômetros.



2.5.2 Pressão

Medições de pressão são consideradas uma das mais importantes realizadas na indústria, principalmente em processos contínuos, como em indústrias químicas e de fabricação (SOISSON, 2002). Para o autor, o número de instrumentos usados para a medição de pressão, é o maior comparado a outros tipos de instrumentos. A pressão, que é uma força exercida sobre uma determinada área, pode ser aplicada em apenas um ponto de uma superfície qualquer, ou distribuída sobre a mesma. Podem ser representadas pelas unidades de: psi, bar, atmosfera, Pascal, etc. Essas medidas de pressão podem ser de valores considerados baixos (vácuo) até milhares

de toneladas. Para isso, se destacam os manômetros, que podem ser observados na Figura 11, como sendo os instrumentos que realizam essas medições.

Figura 11: Manômetros de alta e de baixa pressão.



2.5.3 Rotação

Para Kosow (1979), a velocidade dos motores é representada pela unidade rotação por minuto (RPM), que representa o número de voltas completas que um eixo, uma polia, ou uma engrenagem realiza em um minuto. As principais formas de medição de PMR são através de sensores de medição mecânicos, instrumentos de medição ópticos (através de feixes de luz infravermelhos) e através do método do estroboscópio. O tacômetro digital visto na Figura 12, também conhecido como conta-giros, destaca-se entre os instrumentos, por permitir a medição de RPM nas mais variadas aplicações, tendo seu funcionamento através de mira laser, o que permite resultados de alta precisão.

Figura 12: Tacômetro digital.



2.5.4 Corrente elétrica e tensão

Para Burian e Lyra (2006), a corrente elétrica é associada à movimentação ordenada de cargas elétricas, sendo uma corrente constante (medida em ampères

(A)) em um condutor por unidade de tempo, que corresponde à passagem de uma carga. O instrumento utilizado para a realização da medição de corrente elétrica é o amperímetro.

Ainda para este autor, a tensão elétrica, também conhecida como diferença de potencial ou voltagem, é relacionada com a diferença em energia elétrica potencial por unidade de carga elétrica entre dois pontos. Para medir essa tensão (medida em volts (V)) entre dois pontos, ligam-se a esses pontos os terminais de um instrumento chamado voltímetro.

3. METODOLOGIA

O objetivo desse capítulo é apresentar a metodologia empregada no desenvolvimento da bancada e na coleta de dados, apresentando um detalhamento dos métodos e procedimentos executados no desenvolvimento do trabalho.

A pesquisa iniciou-se mediante a busca de dados e informações referentes ao tema do projeto, por meio de pesquisa bibliográfica, através de consultas a obras de autores considerados referência no assunto.

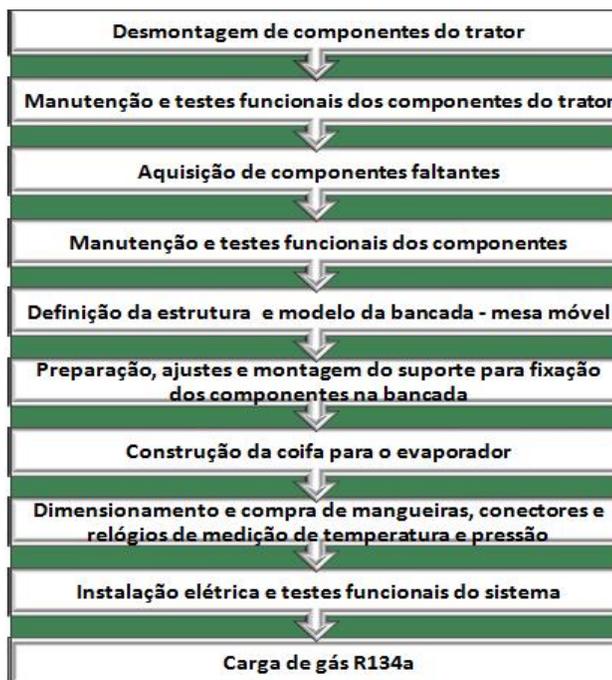
O presente trabalho pode ser definido como descritivo (quando se propõem a descrever passo-a-passo a sequência e os processos de construção da bancada para testes dos ciclos de refrigeração), uma vez que procura referir-se sistematicamente a uma área de interesse, ou fenômeno (LAKATOS; MARCONI, 2001).

Para finalizar, os procedimentos aplicados para a coleta de dados, a partir das rotinas de testes e simulações no sistema, que disponibilizarão os resultados a serem analisados na sequência.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS PARA CONSTRUÇÃO DA BANCADA

Na sequência, apresentam-se os materiais, componentes e processos utilizados para o desenvolvimento da bancada e coleta de dados, sendo sua sequência expressa em forma de passo-a-passo, conforme apresentado na Figura 13, detalhando o caminho executado em todo processo, até a conclusão da mesma.

Figura 13: Passo-a-passo do processo.



3.1.1 Desmontagem de componentes do trator

Como forma de redução de custos e aproveitamento de equipamentos e materiais para construção da bancada de testes de ciclos de refrigeração, os componentes a seguir foram desmontados da cabine de trator, modelo 7225J, disponível aos laboratórios da Fahor, sendo os mesmos reaproveitados e para compor a bancada do projeto em questão, conforme mostra a Figura 14:

- Condensador: 1 condensador automotivo;
- Evaporador: 1 evaporador de trator;
- Siroco: 1 ventilador elétrico Siroco, de 12V;
- Secador: 1 filtro secador;
- Válvula expansão: 1 válvula de expansão.

Figura 14: Componentes da bancada.



3.1.2 Manutenção e testes funcionais dos componentes do trator

Após a retirada dos componentes do trator citados acima, os mesmos foram submetidos a testes funcionais, não apresentando defeitos, sendo considerados aptos a integrarem o sistema da bancada.

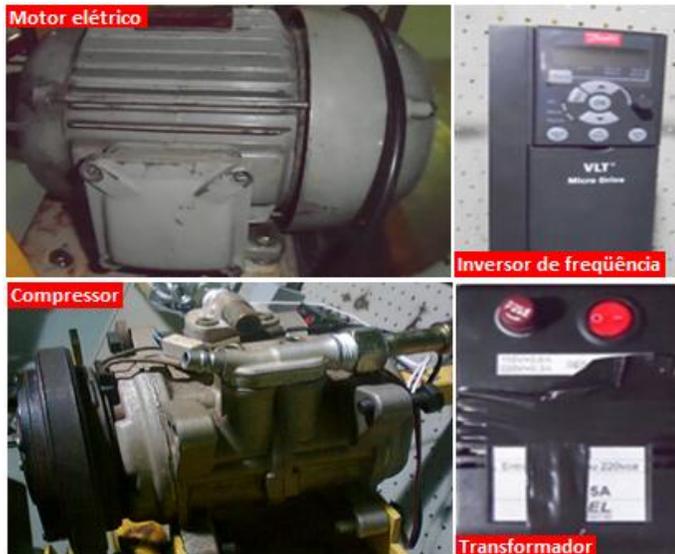
3.1.3 Aquisição de componentes faltantes

Nessa fase, foram providenciados e adquiridos os componentes faltantes, necessários para a montagem e funcionamento do sistema de refrigeração da bancada, como:

- Motor: 1 motor elétrico Eberle, trifásico, 5 cv, 380/660v, 3450 rpm (alta), disponibilizado pelos laboratórios da Fahor;
- Compressor: 1 compressor, modelo Denso 6P 148 - John Deere, para fluido R134a, disponibilizado pelos laboratórios da Fahor;
- Inversor de frequência: 1 inversor de frequência, modelo Danfoss VLT 5000 Series, 50/60 Hz, 380V, até 12,4 A, comprado em loja especializada;
- Transformador: 1 transformador de voltagem, de 380V para 12V

A Figura 15 apresenta os componentes citados acima.

Figura 15: Componentes da bancada.



3.1.4 Manutenção e testes funcionais dos componentes

Para os componentes acima citados, necessitou-se a realização dos seguintes serviços de manutenção:

- Motor: ajustes e substituição de componentes internos, que apresentavam problemas de funcionamento e testes funcionais.
- Compressor: submetido a processo de limpeza interna dos componentes e realizado testes de compressibilidade.

Os serviços de manutenção acima citados, foram realizados por técnicos especializados.

3.1.5 Definição da estrutura e modelo de bancada (mesa móvel)

A estrutura da bancada utilizada para fixação dos componentes e suportes foi disponibilizada pela Fahor, conforme observa-se na Figura 16, tendo como principal característica seu design, que possibilita a montagem de todos os componentes do sistema na área frontal, possibilitando acessibilidade aos componentes e a visibilidade do funcionamento do sistema como um todo. Ajustes pontuais foram realizados, possibilitando assim melhor acomodação dos componentes.

Figura 16: Estrutura da bancada – mesa móvel.



3.1.6 Preparação, ajustes e montagem do suporte para fixação dos componentes na bancada

Para fixação dos componentes como: compressor, motor e condensador, utilizou-se um suporte de testes de trator já existente, sendo necessário alterá-lo e adaptá-lo as necessidades da bancada para testes de refrigeração, submetendo-o a processos de corte, esmerilhamento, furação, nivelamento, solda, etc, conforme pode-se observar na Figura 17, a fim de possibilitar a perfeita montagem dos componentes.

Figura 17: Suporte para fixação de componentes.



Após a conclusão do suporte, o mesmo foi soldado na parte frontal direita da bancada (mesa móvel).

Na sequência, realizou-se a montagem dos componentes junto ao suporte, sendo necessários ajustes que garantissem o nivelamento, rigidez e sincronismo dos componentes movidos por correia e que formam o sistema, conforme mostra a Figura 18.

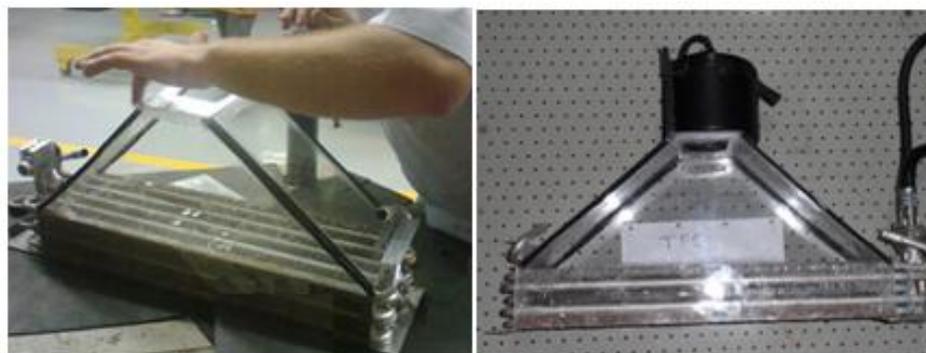
Figura 18: Componentes montados no suporte.



3.1.7 Construção da coifa para o evaporador

Como forma de direcionar e centralizar o ar frio que é expelido pelo evaporador, construiu-se uma coifa de acrílico em volta do evaporador, direcionando a saída de ar por um orifício ao ventilador elétrico. A Figura 19 mostra o processo de montagem e colagem do acrílico ao evaporador e o ventilador Siroco montado no topo da coifa.

Figura 19: Coifa de acrílico.



3.1.8 Dimensionamento e compra de mangueiras, conectores e relógios de medição de temperatura e pressão

Nessa etapa, após a montagem dos componentes na bancada, partiu-se para o dimensionamento e compra das mangueiras, conectores e medidores de pressão e de temperatura do sistema.

O dimensionamento das mangueiras foi baseado no espaçamento entre os componentes, como: compressor, condensador, válvulas de expansão e evaporador, deixando os componentes distribuídos de forma que facilitasse a visualização e compreensão de cada componente no sistema. Os conectores foram escolhidos de forma que atendessem as bitolas das mangueiras e das conexões existentes em cada componente. Para a medição de pressão e temperatura, definiu-se pela compra de manômetros analógicos, conforme mostra a Figura 20, para refrigerante R134a, onde é possível visualizar a pressão (kPa e psi) e a temperatura (°C) de trabalho, conforme especificação abaixo:

- 2 manômetros de alta, na cor vermelha, com pressão de 0 a 3500 kPa / 0 a 500 psi e temperatura de -40 a 88°C;
- 1 manômetro de baixa, na cor azul, com pressão de 0 a 800 kPa / 0 a 120 psi e temperatura de -50 a 36°C.

Figura 20: Conexões e manômetro analógico de alta e de baixa.



3.1.9 Instalação elétrica e testes funcionais do sistema

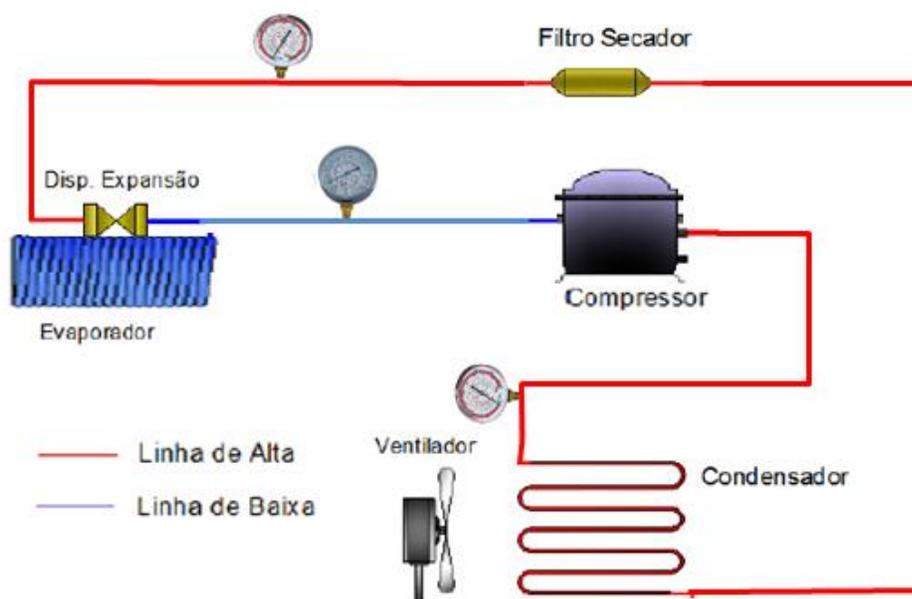
Nessa etapa, após a aquisição e montagem de todos os componentes do sistema na bancada, iniciaram-se as instalações elétricas entre os componentes, assim como os testes funcionais de cada componente e testes do sistema como um

todo. Para essa etapa, contratou-se os serviços de técnico especializado para realização da atividade.

3.1.10 Carga de gás R134a

Após a conclusão da etapa anterior, onde todos os componentes, assim como o sistema completo apresentavam condições de trabalho, adicionou-se carga de gás refrigerante R134a, no circuito de refrigeração, conforme apresentado no esquema da Figura 21, possibilitando assim, o início dos testes práticos dos ciclos de refrigeração, conforme proposto nesse trabalho.

Figura 21: Esquema do circuito de refrigeração.



3.2 COLETA DE DADOS

Após finalizada a etapa de montagem e testes funcionais dos componentes e do sistema de refrigeração, iniciou-se a etapa de testes e coleta de dados do sistema em funcionamento, sendo essa, considerada a última etapa prática do projeto.

Para tal, definiram-se rotinas de testes, que apresentamos resultados dos valores teóricos e reais de pressão e temperatura do sistema, seguindo a ordem dos passos a seguir:

3.2.1 Acionamento do sistema elétrico

Inicialmente, realizou-se a ligação da flecha/extensão trifásica na energia elétrica, habilitando o acionamento da chave geral do sistema. Na sequência, ligou-se o motor elétrico, sendo que o mesmo é acionado através do painel de controle do inversor de frequência e posteriormente, acionado o compressor e o ventilador elétrico Siroco, através da chave liga/desliga do transformador.

3.2.2 Regulagem da rotação

A regulagem da rotação do compressor é baseada na relação entre a rotação da árvore do motor elétrico e o inversor de frequência, sendo controlado através de regulagem no painel do inversor de frequência. Um exemplo de relação entre os componentes é: 30 Hz, correspondem a 1747 rpm no eixo do motor elétrico e 1298 rpm no compressor. Para cada teste, definiu-se uma relação com intervalo de 5 Hz entre os testes. A medição da rotação no compressor foi realizada através de tacômetro, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22: Medição de rotação com tacômetro.



3.2.3 Medição de pressão e temperatura (teórico e real) na linha de alta

Com o sistema estabilizado e trabalhando na rotação do compressor, conforme definido para cada teste, foi realizada a coleta de informações quanto à pressão e temperatura teórica, na linha de alta do sistema, realizando a leitura junto ao manômetro.

Na sequência, foi coletado o valor da temperatura real para a linha de alta do sistema, sendo a medição realizada no tubo de entrada do condensador, através de termômetro infravermelho, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23: Medição de pressão e temperatura na linha de alta.



3.2.4 Medição de pressão e temperatura (teórico e real) na linha de baixa

Para a pressão e temperatura teórica, na linha de baixa do sistema, os valores igualmente foram coletados realizando a leitura junto ao manômetro.

Para o resultado da temperatura real na linha de baixa do sistema, a medição foi realizada através de termômetro infravermelho, sendo a mesma realizada no tubo após a válvula de expansão, conforme pode-se visualizar na Figura 24.

Figura 24: Medição de pressão e temperatura na linha de baixa.



3.2.5 Coleta de resultados adicionais e informativos

Para fins de análises e informações adicionais das temperaturas reais que compõem o sistema, foram realizadas medições junto à saída do ventilador elétrico, no evaporador e no condensador.

Após a conclusão do processo de coleta dos dados a partir das rotinas de testes práticos, agrupou-se as informações em planilha, seguindo a ordem das coletas realizadas, referentes à rotação, pressão e temperatura do sistema, conforme apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 – Resultados das rotinas de testes práticos.

Planilha de coleta de dados						
Temperatura ambiente	°C	22	22	22	22	22
Horário do teste	Horas	21:03	21:08	21:13	21:18	21:23
Umidade do ar	%	69	69	69	69	69
	Unidade	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Frequência no inversor	Hz	20	25	30	35	40
Rotação no eixo do compressor	RPM	854	1072	1298	1524	1747
Pressão de alta no manômetro - teórico e real	kPa	825	800	775	775	775
Temperatura de alta no manômetro - teórico	°C	36	34	33	33	33
Temperatura de alta no infravermelho - real	°C	46	48	49	51	51
Pressão de baixa no manômetro - teórico e real	kPa	105	75	50	40	30
Temperatura de baixa no manômetro - teórico	°C	-9	-12	-16	-18	-20
Temperatura de baixa no infravermelho - real	°C	-3	-5	-5	-5	-6
Temperatura externa no evaporador - real	°C	7	6	5	6	6
Temperatura externa no condensador - real	°C	24	24	23	24	23
Temperatura de saída do Siroco - real	°C	10	9	9	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O quadro acima contempla os resultados de rotinas de testes para 20, 25, 30, 35 e 40 Hz, assim como os valores referentes à rotação do compressor, pressão e temperatura teórica e real do sistema.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados o modelo e concepção de bancada desenvolvida e os resultados dos cálculos do sistema de refrigeração, a partir da aplicação dos dados coletados nas rotinas de testes realizadas.

4.1 MODELO E CONCEPÇÃO DE BANCADA

A partir de componentes do sistema de refrigeração retirados de uma cabine de trator, construiu-se uma bancada de testes contemplando o ciclo de refrigeração, conforme proposto nesse trabalho. A disponibilidade de alguns componentes, como: condensador, evaporador, motor elétrico, compressor e mesa-móvel, facilitaram no processo de construção da mesma, aliando a isso, a aquisição dos componentes faltantes, como: mangueiras e conexões, inversor de frequência, manômetros, etc. O modelo físico da bancada surgiu a partir da escolha da mesa-móvel, onde diversas alterações e adaptações fizeram-se necessárias ao longo do processo de construção, tanto na estrutura de fixação dos componentes, como na posição das linhas de alta e baixa pressão e temperatura do sistema. Verificou-se também, a necessidade de construção de uma coifa sobre o evaporador, que possibilite o direcionamento e passagem do ar para o ventilador elétrico.

Com as atividades descritas acima finalizadas, a bancada para testes de ciclos de refrigeração é apresentada, conforme mostram os Apêndices A e B, contemplando todos os componentes do sistema e circuitos elétricos necessários para seu funcionamento, permitindo fácil acesso para manuseio dos componentes e visibilidade de seu funcionamento.

4.2 CÁLCULOS E GRÁFICOS PARA OBTENÇÃO DO COP TEÓRICO

Para simulação dos cálculos a seguir, optou-se por utilizar os resultados teóricos do teste 2, conforme apresentado no Quadro 1, de coleta de dados dos testes práticos realizados.

Sendo:

- Frequência no inversor: 25Hz;
- Rotação no eixo do compressor: 1072 RPM;
- Pressão de alta no manômetro (Teórico e Real): 800 kPa;
- Temperatura de alta no manômetro (Teórico): 34°C;
- Pressão de baixa no manômetro (Teórico e Real): 75 kPa;

- Temperatura de baixa no manômetro (Teórico): -12°C .

A partir dos valores teóricos para temperatura e pressão acima, plotou-se o gráfico teórico no diagrama para refrigerante R134a, conforme ilustrado no Apêndice C. Com base no gráfico do Apêndice C, obteve-se os valores referentes à entalpia, nos pontos:

- $h_1 = 395 \text{ kJ/kg}$;
- $h_2 = 420 \text{ kJ/kg}$;
- $h_3 = 245 \text{ kJ/kg}$;
- $h_4 = 235 \text{ kJ/kg}$.

Após elaborado o gráfico, realizou-se os seguintes cálculos e transformações de unidades dos valores:

Transformação de RPM para Hz, sendo:

$$Fr = 1072 \text{ rpm (no compressor)} = 1072 \text{ rpm} \div 60 = \mathbf{Fr = 17,86 \text{ Hz}}$$

Cálculos para vazões do compressor:

V_c (Vazão do Compressor) – Dados do Fabricante = $148 \text{ cm}^3/2\pi \text{ rad}$

Transformando de cm^3 para m^3 : $V_c = 148 \text{ cm}^3/2\pi \text{ rad} \div 1000000$

$$\mathbf{V_c = 1,48 * 10^{-4} \text{ m}^3}$$

Com base nos valores de vazão do compressor, obtemos a Vazão volumétrica, sendo:

$$Vv = V_c * Fr$$

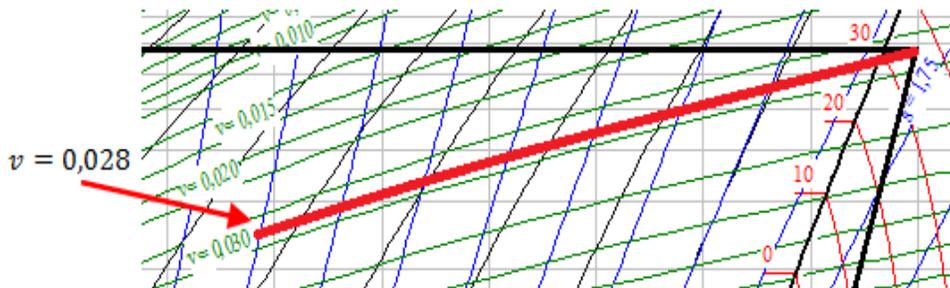
$$Vv = (1,48 * 10^{-4} \text{ m}^3) * (17,86 \text{ Hz}) = \mathbf{Vv = 2,64 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}$$

Obs.: o resultado da vazão volumétrica será utilizado também para o cálculo do COP real.

Cálculo para volume constante:

Para obtenção do valor de volume constante, verifica-se o ponto h_2 no gráfico teórico, conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25: Volume constante no gráfico teórico.



Sendo Volume Constante:

$$V = 0,028 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Transformando de m^3/kg para kg/m^3 : $V = 0,028 \text{ m}^3/\text{kg} = 1/0,028 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$V = 35,71 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Cálculo da Vazão Mássica:

Utilizando-se as informações de vazões anteriores, calcula-se a Vazão Mássica, sendo:

$$M = Vv * V$$

$$M = (2,64 * 10^{-3} \text{ m}^3) * (35,71 \text{ kg}/\text{m}^3) = 0,094 \text{ kg}/\text{s}$$

Cálculo do Efeito Frigorífico:

$$EF = h1 - h4$$

$$EF = 395 \text{ kJ}/\text{kg} - 235 \text{ kJ}/\text{kg} = 160 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Cálculo do Efeito Calorífico:

$$EC = h2 - h3$$

$$EC = 420 \text{ kJ}/\text{kg} - 245 \text{ kJ}/\text{kg} = 175 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Cálculo do Efeito Motor:

$$EM = h2 - h1$$

$$EM = 420 \text{ kJ}/\text{kg} - 395 \text{ kJ}/\text{kg} = 25 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Cálculo da Potência Frigorífica:

$$PF = M * EF$$

$$PF = 0,094 \text{ kg}/\text{s} * 160 \text{ kJ}/\text{kg} = 15,04 \text{ kW}$$

Cálculo da Potência Calorífica:

$$PC = M * EC$$

$$PC = 0,094 \text{ Kg/s} * 175 \text{ kJ/kg} = \mathbf{16,45 \text{ kW}}$$

Cálculo da Potência Motora:

$$PM = M * EM$$

$$PM = 0,094 \text{ kg/s} * 25 \text{ kJ/kg} = \mathbf{2,35 \text{ kW}}$$

Cálculo do COP Teórico:

$$COP \text{ Teórico} = PF/PM$$

$$COP \text{ Teórico} = 15,04 \text{ kW} / 2,35 \text{ kW} = \mathbf{6,4 \text{ kW}}$$

4.3 CÁLCULOS E GRÁFICOS PARA OBTENÇÃO DO COP REAL

Para simulação dos cálculos a seguir, utilizou-se os resultados reais do teste 2, conforme apresentado no Quadro 1, de coleta de dados dos testes práticos realizados.

Sendo:

- Frequência no inversor: 25Hz;
- Rotação no eixo do compressor: 1072 RPM;
- Pressão de alta no manômetro (Teórico e Real): 800 kPa;
- Temperatura de alta no infravermelho (Real): 48° c;
- Pressão de baixa no manômetro (Teórico e Real): 75 kPa;
- Temperatura de baixa no Infravermelho (Real): -5° c.

A partir dos valores reais para temperatura e pressão acima, elaborou-se o gráfico real no diagrama para refrigerante R134a, conforme Apêndice D.

Com base no gráfico do Apêndice D, obteve-se os valores referentes à entalpia, nos pontos:

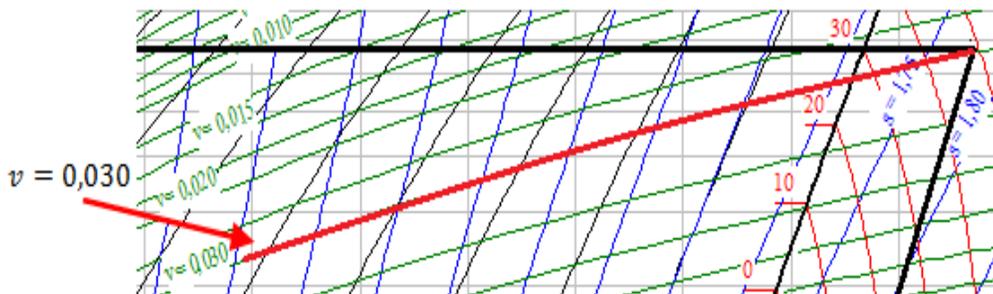
- h1= 400 kJ/kg;
- h2= 433 kJ/kg;
- h3= 245 kJ/kg;
- h4= 235 kJ/kg.

Após elaborado o gráfico, realizou-se os seguintes cálculos e transformações de unidades dos valores:

Cálculos para volume constante:

Para obtenção do valor de volume constante, verifica-se o ponto h2 no gráfico real, conforme pode ser observado na Figura 26.

Figura 26: Volume constante no gráfico Real.



Sendo Volume Constante:

$$V = 0,030 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Transformando de } \text{m}^3/\text{kg} \text{ para } \text{kg}/\text{m}^3: V = 0,030 \text{ m}^3/\text{kg} = 1/0,030 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V = 33,33 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Cálculos da Vazão Mássica:

Utilizando-se as informações de vazões anteriores, calculou-se a Vazão Mássica, sendo:

$$M = Vv * V$$

$$M = (2,64 * 10^{-3} \text{ m}^3) * (33,33 \text{ kg}/\text{m}^3) = 0,088 \text{ kg}/\text{s}$$

Cálculo do Efeito Frigorífico:

$$EF = h1 - h4$$

$$EF = 400 \text{ kJ}/\text{kg} - 235 \text{ kJ}/\text{kg} = 165 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Cálculo do Efeito Calorífico:

$$EC = h2 - h3$$

$$EC = 433 \text{ kJ}/\text{kg} - 245 \text{ kJ}/\text{kg} = 188 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Cálculo do Efeito Motor:

$$EM = h_2 - h_1$$

$$EM = 433 \text{ kJ/kg} - 400 \text{ kJ/kg} = \mathbf{33 \text{ kJ/kg}}$$

Cálculo da Potência Frigorífica:

$$PF = M * EF$$

$$PF = 0,088 \text{ kg/s} * 165 \text{ kJ/kg} = \mathbf{14,52 \text{ kW}}$$

Cálculo da Potência Calorífica:

$$PC = M * EC$$

$$PC = 0,088 \text{ Kg/s} * 188 \text{ kJ/kg} = \mathbf{16,54 \text{ kW}}$$

Cálculo da Potência Motora:

$$PM = M * EM$$

$$PM = 0,088 \text{ kg/s} * 33 \text{ kJ/kg} = \mathbf{2,904 \text{ kW}}$$

Cálculo do COP Real:

$$COP \text{ Real} = PF/PM$$

$$COP \text{ Real} = 14,52 \text{ kW}/2,904 \text{ kW} = \mathbf{5,0 \text{ kW}}$$

4.4 ANÁLISES DOS RESULTADOS DO COP TEÓRICO X COP REAL

Analisando os resultados obtidos pelo COP teórico e pelo COP real é possível perceber o bom resultado que o sistema apresenta, pois o COP real é de 5,00 kW, indicando o quanto de calor está sendo retirado do meio em relação a potência consumida pelo compressor, que é de 2,904 kW. Isso demonstra uma efetividade de 72,18% do sistema em relação ao consumo.

Podemos também, comprovar a veracidade dos resultados, pois as mesmas respeitam a 2ª lei da termodinâmica, onde o COP teórico é sempre maior que o COP real.

Para análise geral dos resultados obtidos através dos testes realizados, conforme definido para cada rotina, o Apêndice E apresenta todos os resultados dos cálculos de efeitos, potências e de COP teórico e real obtidos para cada teste.

5. CONCLUSÃO

A área de refrigeração industrial possui inúmeras aplicações nos mais diversos ramos de atuação. O presente trabalho apresenta uma explicação sucinta sobre a funcionalidade do equipamento e do sistema, trazendo em seu interior os principais componentes do sistema e as equações para os cálculos dos ciclos de refrigeração, remetendo-nos a uma análise entre o COP Teórico e o COP Real.

Conforme os objetivos apresentados construiu-se uma bancada para testes contemplando o ciclo de refrigeração, a partir de componentes do sistema de refrigeração retirados de uma cabine de trator.

Conclui-se, que a vazão mássica do sistema apresenta um aumento a cada incremento de rotação no compressor o que pode ser visualizado nos resultados dos cálculos. Também, os resultados mostram que o COP do sistema diminui à medida que se aumenta as rotações do compressor, logo se pode dizer que menores rotações do compressor implicam em melhores rendimentos. O efeito da potência do sistema aumenta quando o compressor sofre incremento de rotação, chegando a consumos de potência até 5,28 kW a 1747 RPM, sendo esse o valor máximo de rotação nos testes realizados.

6. RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEJAN, A. **Transferência de Calor**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1996.
- BRAGA FILHO, W. **Transmissão de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- BURIAN Jr., Y. ; LYRA, A. C. C. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.
- CHIARELLI, A. **Thermophysical Properties of Fluids**. Disponível em: <<http://fluidproperties.blogspot.com.br/2012/02/r134a-diagrams.html>>. Acesso em: 13 out. 2013.
- COSTA, E. C. Da. **Refrigeração**. 3ª Edição. São Paulo: Blucher, 1982.
- FERRAZ, F.: GOMES, M. **Fluídos Refrigerantes**. Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia (CEFET), Santo Amaro, BA, ago. 2008. Disponível em: <<http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/ref1.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2013.
- FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: Saberes necessários à prática educativa**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1996.
- GARCIA, C. **Modelagem de Sistemas Eletromecânicos e Processos Industriais**. São Paulo, EDUSP, 1997.
- JUNIOR, L. C. M., **Refrigeração**. Disponível em: <www.ebah.com.br/content/ABAAAHeoAI/apostila-refrigeracao>. Acesso em: 20 de abr. 2013.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Brasil. Editora Globo, 1979.
- KREITH, F.; BOHN, MS. **Princípios de Transferência de Calor**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, p. 1 a 21, 1977.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2001.
- MEDEIROS. **Condicionamento de ar & Refrigeração**. UNIP, 2001. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfwwIAE/condicionamento-ar-refrigeracao>>. Acesso em: 20 de out. 2013.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.
- PANESI, A. **Termodinâmica**. Curso de Engenharia de Produção. 2001. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAE23oAI/termodinamica?part=3>> Acesso em: 30 out. 2013.

PARKER. **Tecnologia Hidráulica Industrial**. Apostila M2001-1 BR Julho 1999. Disponível em: <http://unedserra-ehp.tripod.com/m_2001_1.pdf>. Acesso em: 10 out. 2013.

RIBEIRO, L. **Absorção e Emissão de Radiação**. Escola E.B. 2,3 /S de Vilar Formoso. 03 jun. 2010. Disponível em: <http://www.notapositiva.com/pt/trbestbs/fisica/10_absorcao_emissao_radiacao.htm>. Acesso em: 31 ago. 2013.

SILVA, M. N. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS / PROCEL, 2005.

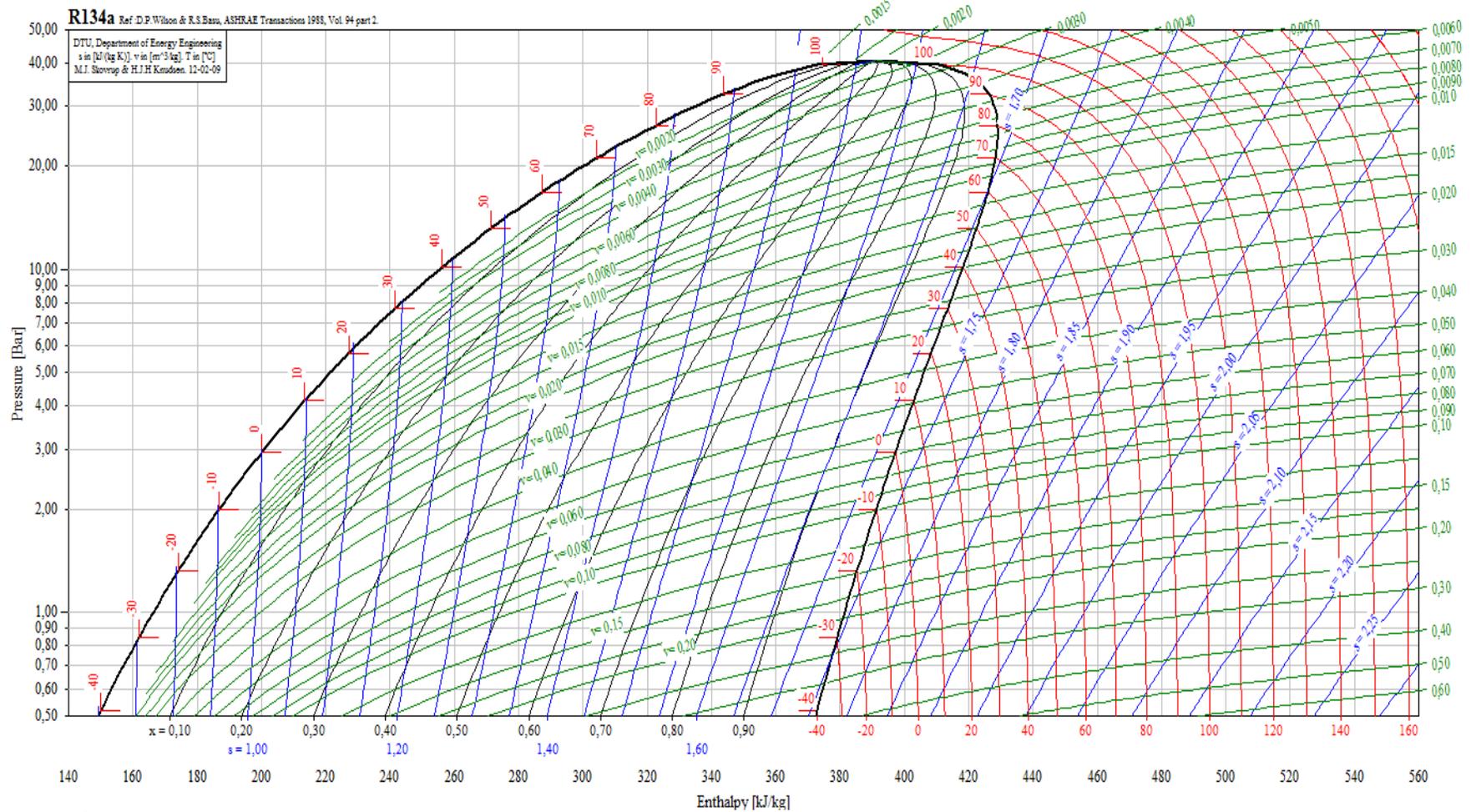
SOISSON, H. E. **Instrumentação Industrial**. 2. ed. São Paulo, SP. Ed: Helmus, 2002.

SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 5ª. Ed.: São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

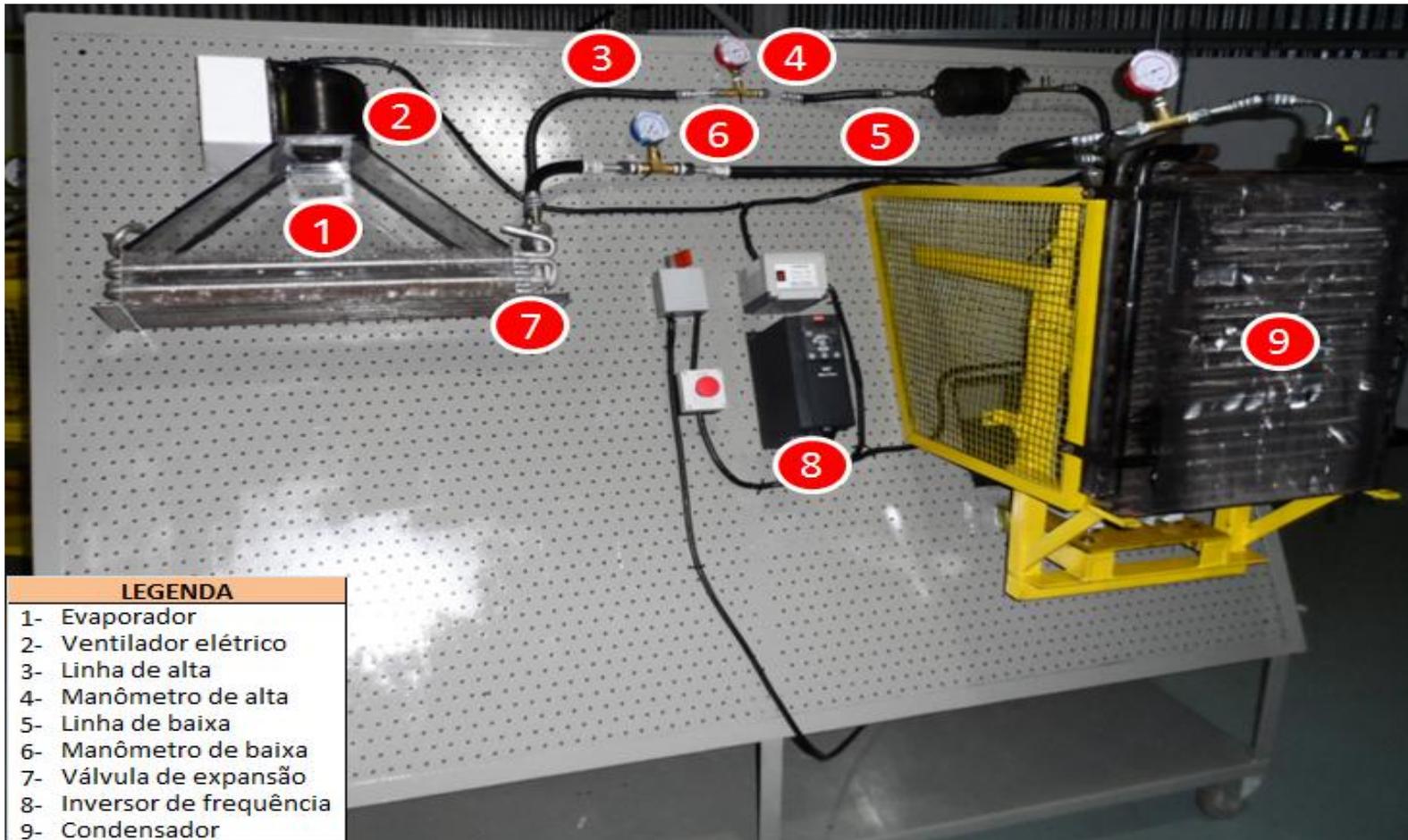
STOECKER, W. F. ; SAIZ JABARDO J. M. **Refrigeração Industrial**. 2º Edição. São Paulo: Blucher, 2002.

WEG. **Motores Elétricos**. Guia de especificação. Grupo WEG - Unidade Motores, Jaraguá do Sul, SC, ago. 2013. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2013.

ANEXO A - Diagrama para refrigerante R134a.



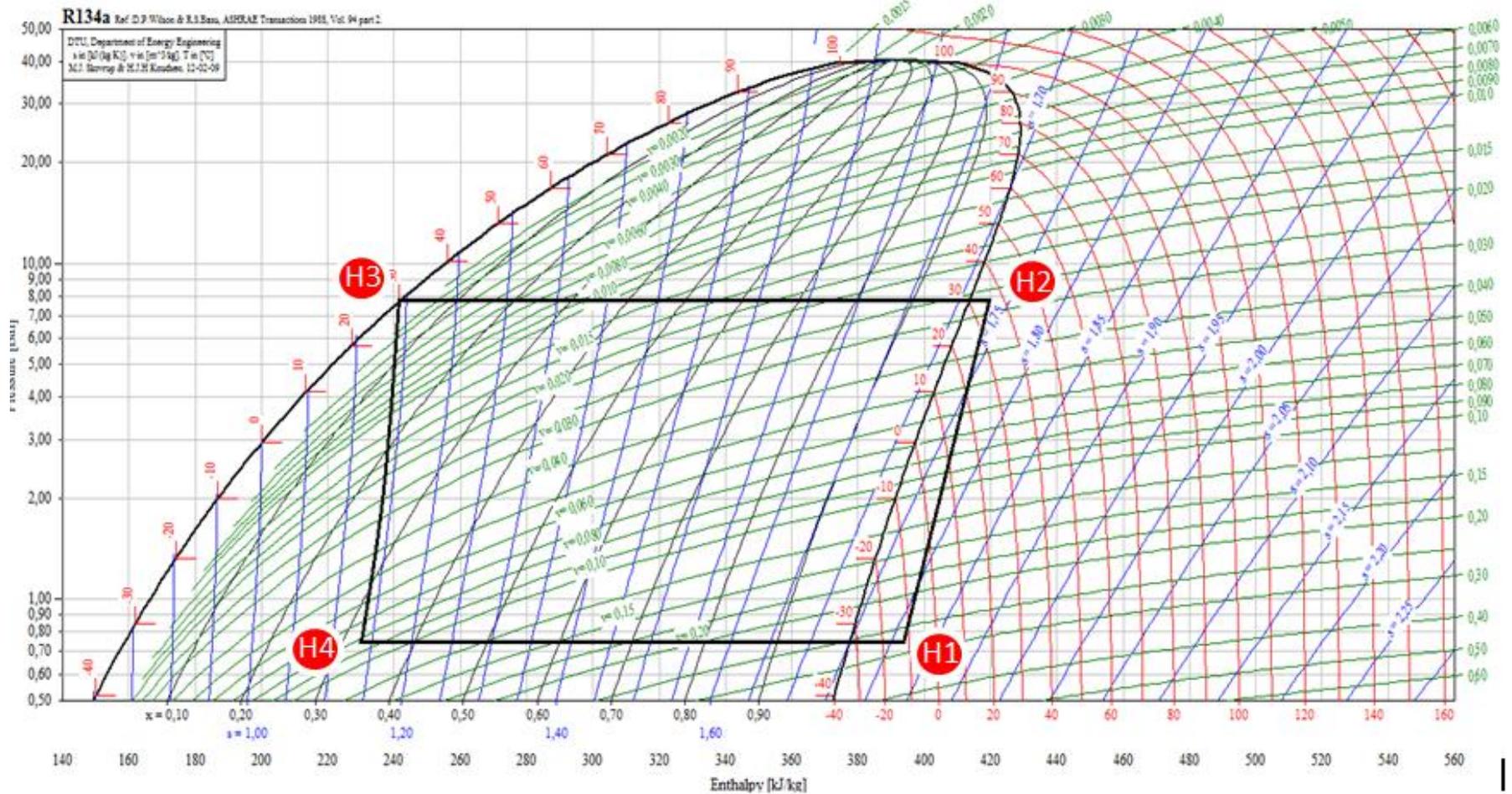
APÊNDICE A - Bancada para testes de ciclos de refrigeração-vista frontal.



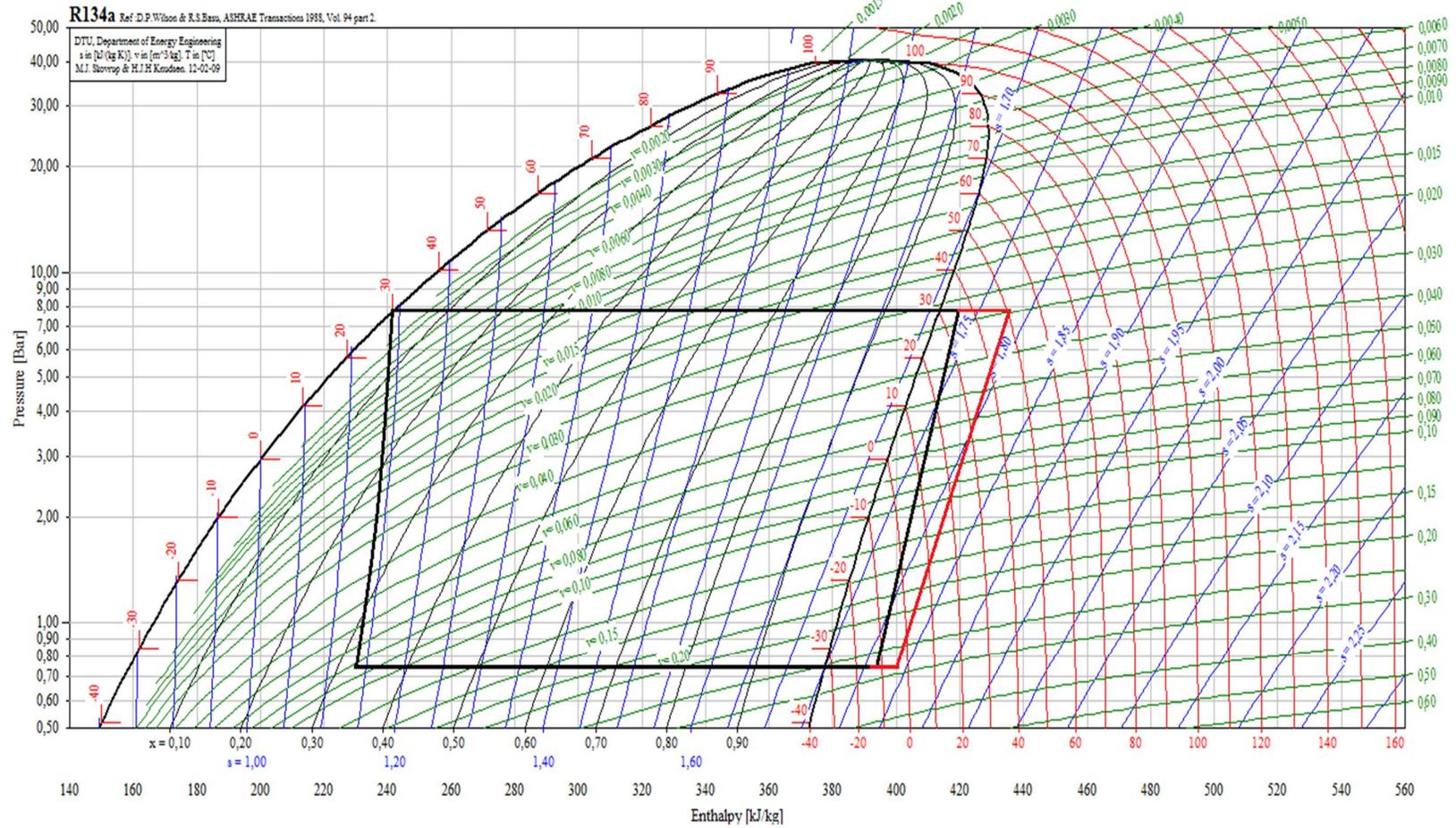
APÊNDICE B - Bancada para testes de ciclos de refrigeração-vista lateral.



APÊNDICE C - Gráfico teórico para R134a.



APÊNDICE D - Gráfico teórico x real para R134a.



APÊNDICE E - Resultados dos testes.

Planilha de resultados dos testes											
	Unidade	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4		Teste 5	
		Teórico	Real								
Frequência no inversor (Fr inv.)	Hz	20	20	25	25	30	30	35	35	40	40
RPM no eixo do compressor	RPM	854	854	1072	1072	1298	1298	1524	1524	1747	1747
Vazão volumétrica (Vv)	m³/s	0,00211	0,00211	0,00264	0,00264	0,00320	0,00320	0,00376	0,00376	0,00431	0,00431
Vazão Mássica (Ḣ)	kg/s	0,081	0,078	0,094	0,088	0,114	0,107	0,134	0,121	0,154	0,139
Efeito Refrigerante (EF)	KJ/Kg	160	165	160	165	165	173	164	174	162	174
Efeito Calorífico (EC)	KJ/Kg	176,000	187	175	188	176	194	176	195	176	195
Efeito Motor (EM)	KJ/Kg	22	28	25	33	26	36	28	37	31	38
Potência Refrigerante (PF)	KW	12,963	12,87	15,11	14,54	18,87	18,46	22,02	21,10	24,93	24,19
Potência Calorífica (PC)	KW	14,26	14,59	16,53	16,57	20,13	20,70	23,63	23,65	27,09	27,11
Potência Motora (PM)	KW	1,782	2,18	2,36	2,91	2,97	3,84	3,76	4,49	4,77	5,28
COP	KW	7,27273	5,89	6,4	5,00	6,34615	4,81	5,85714	4,70	5,22581	4,58