

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Departamento Acadêmico de Alimentos

Curso de Engenharia de Alimentos

CAROLINA DE CAMPOS

**MÓDULO PRÁTICO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO
MECÂNICA POR COMPRESSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

CAROLINA DE CAMPOS

**MÓDULO PRÁTICO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO
MECÂNICA POR COMPRESSÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia de Alimentos – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira.

Orientadora: Karla Silva

Co-orientadora: Mirela Vanin dos Santos Lima

CAMPO MOURÃO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Alimentos



TERMO DE APROVAÇÃO

MÓDULO PRÁTICO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO MECÂNICA POR COMPRESSÃO

POR

CAROLINA DE CAMPOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado em 06 de Julho de 2015 às 10:30h como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos. A candidata foi argüida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof.^a. Dr.^a. Karla Silva
Orientadora

Prof.^a. Dr.^a. Stéphani Caroline Beneti
Membro da banca

Prof. Dr. Evandro Bona
Membro da banca

Nota: O documento original e assinado pela Banca Examinadora encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos da UTFPR *Campus* Campo Mourão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado a benção de conviver com pessoas maravilhosas durante todos esses anos em que estive na universidade. Agradeço aos meus amigos, todos sem exceção, aos que fiz desde o primeiro dia de aula, aqueles que se foram por estarem desanimados e aos que conquistei ao longo da vida acadêmica.

Em especial agradeço a minha colega de residência Bruna Vieira pelo companheirismo. A Monise, Sara, Tatiane, Eduardo e Juliana pela amizade e conselhos reconfortantes em momentos difíceis.

A minha família por ter confiado em mim e me dado a oportunidade de desfrutar de novas experiências longe dos que amo. Também aos meus sogros pela ajuda para a realização deste trabalho. A todos meus professores que me deram todo o conhecimento para a elaboração do projeto.

A professora orientadora Karla Silva, minha eterna gratidão, por ter me dado a oportunidade de trabalhar durante esse período ao seu lado e também por sua paciência e conselhos em alguns momentos, assim como a minha co-orientadora professora Mirela V. dos S. Lima.

Por fim, não menos importante, ao meu noivo Arthur Machado, por toda a sua dedicação durante todo o período de graduação, por estar ao meu lado em bons e maus momentos, e principalmente por ter sido o maior motivador desde o início sem permitir que eu desistisse.

Muito obrigada!

“...Eu não preciso de ti. Tu não precisas de mim.

Mas se tu me cativas, e se eu te cativar...

Ambos precisaremos um do outro.

A gente só conhece bem aquilo que cativou.

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas.”

Antoine de Saint-Exupéry

O pequeno príncipe

RESUMO

CAMPOS, C. **Módulo Prático para Estudos de Sistemas de Refrigeração Mecânica por Compressão**. 2015. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Alimentos), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

Os sistemas de refrigeração industrial são pouco estudados devido à sua complexidade, principalmente no meio acadêmico. A dificuldade dos alunos do curso de Engenharia de Alimentos da UTFPR de Campo Mourão em entender o funcionamento e disposição do circuito se deve ao fato de não conseguirem visualizar a teoria aplicada à prática. O presente trabalho teve como objetivo, montar um módulo prático de um sistema de refrigeração mecânica por compressão, possibilitando o contato com os equipamentos e operação dos mesmos, além do reconhecimento das propriedades termodinâmicas características. São especificadas as considerações necessárias ao projeto e construção de um sistema de refrigeração industrial, desde os cálculos até a seleção dos equipamentos. A execução do projeto foi norteadada por limites econômicos (custos de equipamentos, acessórios, mão de obra ou módulos didáticos prontos) e físicos (espaço disponível para as práticas, dimensões possíveis e viáveis do módulo e existência de mão de obra qualificada). Optou-se pelo reaproveitamento de peças, acarretando na necessidade de *Retrofit* (processo de substituição de um fluido refrigerante por outro com as mesmas propriedades termodinâmicas) do sistema de refrigeração mecânica por compressão para pequenas cargas térmicas obtidas. Redigiu-se um manual de referência do módulo, possibilitando realização de práticas prevendo identificação e avaliação dos componentes e medições das pressões e temperaturas em diversos pontos do sistema. O módulo possibilitará ainda análises críticas com possibilidade de inferências para otimização do processo de refrigeração. Esse módulo servirá ainda para que os futuros alunos da disciplina de refrigeração industrial possam se transformar em profissionais qualificados no mercado de trabalho. Concluindo, o módulo foi submetido à apreciação dos acadêmicos do curso de Engenharia de Alimentos, comprovando sua eficácia para síntese do conhecimento aplicado à Refrigeração Industrial.

Palavras-chaves: refrigeração, compressor, evaporador, condensador, dispositivo de expansão e fluido refrigerante.

ABSTRACT

CAMPOS, C. **Practical module to study the compression mechanical refrigeration system.** 2015.76f. Final project (Food Engineering), Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2014.

Industrial cooling systems are understudied due to its complexity, especially in the academic environment. The difficulty of UTFPR Food Engineering students in understanding the operation and circuit layout is because they cannot see the theory applied to practice. This study aimed to assemble the practical module of a compression mechanical refrigeration system, enabling contact with the equipment, and operation, in addition to recognizing its thermodynamic properties. All the essential considerations to build the project and install the industrial refrigeration system are specified in this paper, since the calculus to the equipment selection. The execution of the project was guided by economic limits (cost of equipment, accessories, labor and commercial teaching modules) and physical limits (space available for practice, feasible module dimensions and existence of skilled labor). We opted for the reuse of parts, resulting in the need of retrofit (replacement of a refrigerant fluid by another that has the same thermodynamic properties) of the compression mechanical refrigeration system for small thermal loads. We wrote a module manual, enabling practices predicting identification and evaluation of components, and measurements of pressures and temperatures at different points of the system. The module will enable critical analysis with the possibility of observations to optimize the cooling process. Also, this module will help future students of industrial refrigeration to become qualified professionals in the market. In conclusion, the module was presented to Food Engineering students, proving its effectiveness for synthesis of knowledge applied to Industrial Refrigeration.

Keywords: refrigeration, compressor, evaporator, condenser, expansion device and refrigerant fluid.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de componentes utilizados na construção do módulo de refrigeração mecânica por compressão.....	33
Tabela 2: Dimensões da câmara fria.....	35
Tabela 3: Calor específico.....	35
Tabela 4: Massas a serem resfriadas e/ou congeladas.....	35
Tabela 5: Temperaturas.....	36
Tabela 6: Umidade relativa.....	36
Tabela 7: Graus Celsius a acrescentar ao diferencial normal de temperatura	36
Tabela 8: Carga Térmica.....	47
Tabela 9: Especificações do compressor.....	48
Tabela 10: Comparação do ciclo teórico CFC-12 com Suva MP32 (R-401a).....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes básicos de um sistema de refrigeração.....	16
Figura 2: Esquema de fluxos e taxas de calor dentro de uma câmara fria	17
Figura 3: Sistema doméstico de refrigeração mecânica por compressão.....	18
Figura 4: Sistema industrial de refrigeração mecânica por compressão	19
Figura 5: Imagem e desenho esquemático de um compressor tipo pistão hermético.....	20
Figura 6: Funcionamento de um compressor alternativo	21
Figura 7: Esquema de compressor rotativo	22
Figura 8: Condensadores típicos aletados, resfriados por convecção: a) natural b) forçada	23
Figura 9: Condensador industrial	23
Figura 10: Condensador resfriado a água	24
Figura 11: Condensadores evaporativos	24
Figura 12: Tubo capilar de cobre	25
Figura 13: Válvula de expansão automática (VEA)	26
Figura 14: Válvula de expansão termostática (VET)	26
Figura 15: Filtro de secagem de cobre	26
Figura 16: Evaporador	27
Figura 17: Evaporadores de placas	28
Figura 18: Evaporador seco de superfície primária	28
Figura 19: Evaporadores inundados com recirculação de líquidos (por bomba)	29

Figura 20: Evaporadores para líquidos tipo tubo carcaça	30
Figura 21: Termostato.....	32
Figura 22: Espaço físico para acomodação do módulo.....	34
Figura 23: Dimensões do evaporador.....	34
Figura 24: Dimensões da estrutura metálica do módulo.....	37
Figura 25: Câmara fria.....	37
Figura 26: Compressor acoplado no módulo.....	38
Figura 27: Condensador acoplado no módulo.....	38
Figura 28: Evaporador fixado na câmara fria.....	38
Figura 29: Manômetros de alta e baixa pressão.....	39
Figura 30: Controlador de temperatura.....	39
Figura 31: Termostato ligado ao compressor.....	39
Figura 32: Módulo para estudos práticos de sistemas de refrigeração mecânica por compressão.....	40
Figura 33: Pontos de medição de temperatura e pressão no módulo.....	40
Figura 34: Resultados do questionário aplicado para os alunos da UTFPR-CM	41
Figura 35: Gráfico de distribuição de carga térmica.....	48
Figura 36: Circuito de Refrigeração do módulo disposto no gráfico pressão por entalpia.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

A: Área

cp: calor específico

°C: Graus Celsius

ρ : Densidade

h: entalpia

kcal: quilocalorias

kg: quilogramas

K: Kelvin

m: massa

m: metros

n: Número de pessoas

%: Porcentagem

P: Potência

q: Fluxo de calor

Q: Taxa de calor

W: Trabalho

ΔT : Diferencial de temperatura

T: Temperatura

t: tempo

U: Coeficiente Global de Troca Térmica

v: Volume

SUMÁRIO

1. Introdução	14
2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 HISTÓRICO	16
3.2 CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO	17
3.3 COMPRESSORES	19
3.4 CONDENSADOR	22
3.5 TUBOS CAPILARES	25
3.6 FILTROS DE SECAGEM	26
3.7 EVAPORADORES	27
3.8 FLUIDOS REFRIGERANTES	30
3.9 MANÔMETROS	31
3.10 TERMOSTATO.....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO	32
4.1.1 PROJETO	32
4.1.1.1 Pesquisa de Campo	32
4.1.1.2 Desenvolvimento do Projeto	34
4.1.1.2.1 Cálculo de Carga Térmica	35
4.1.2 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO	36
4.1.3 APLICAÇÃO	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA	43
5.2 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	48
5.3 FLUIDO REFRIGERANTE R-401 a.	49
6. CONCLUSÃO	51
7. SUGESTÕES	52
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO A: Manual Teórico e de Práticas no Módulo de Refrigeração Mecânica por Compressão	57

ANEXO B: Questionário sobre a Aplicabilidade do Módulo Prático para Estudos de Sistemas de Refrigeração Mecânica por Compressão 75

1. INTRODUÇÃO

A refrigeração é determinante na indústria de alimentos tanto como método de processamento, como tratamento e, principalmente, na manutenção da vida útil de diversos gêneros alimentícios. Isso faz com que seja imprescindível ao engenheiro de alimentos a união dos conhecimentos tecnológicos dos alimentos com a sistemática de funcionamento do sistema refrigerado.

Durante a graduação na área das engenharias, os alunos adquirem em sala de aula os conhecimentos teóricos repassados pelos professores. As universidades tecnológicas são caracterizadas pela utilização de experimentos em laboratórios ou no campo, aliando prática com a teoria e melhorando assim a capacidade do aluno no desenvolvimento e aplicação do conhecimento no mercado após sua formação, permitindo que este seja um profissional apto e capaz de compreender, interpretar e solucionar problemas em sua profissão.

Nesse contexto, trazemos a necessidade de se desenvolver um módulo de refrigeração para espaço refrigerado de pequeno porte, através da montagem de um sistema refrigeração por compressão: um evaporador, um compressor, um condensador e um dispositivo de expansão.

O projeto auxiliará os alunos durante as aulas na compreensão dos conceitos teóricos passados na disciplina de refrigeração, além de possibilitar sínteses dos conhecimentos aplicados de Termodinâmica, Operações Unitárias, Fenômenos de Transporte, Instrumentação e Controle de Processos. Além de ser uma ferramenta para pesquisas (verificação do efeito das alterações das variáveis de processo no ciclo e/ou no produto refrigerado) e/ou extensão (treinamento de profissionais atuantes na refrigeração).

2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

2.1. Objetivo geral

Desenvolvimento de um módulo para estudos da refrigeração mecânica por compressão, possibilitando variação das operações e utilidades inerentes a esse sistema e conferindo habilidades práticas aos acadêmicos, pesquisadores ou outros interessados nesse conhecimento.

2.2. Objetivos específicos

- Levantamento de modelos de bancadas construídas;
- Estimava de custos para a compra da bancada de refrigeração pronta e dos componentes necessários e suficientes para sua montagem;
- Definição dos componentes mínimos, suficientes e possíveis para estabelecimento de diferentes rotinas no ciclo (possibilidades de alteração nos componentes, para ampliação dos estudos até o máximo possível);
- Demonstração do funcionamento prático e limitante para ciclo de refrigeração mecânica por compressão;
- Descrição didática e ilustrativa das possibilidades nas etapas básicas do sistema de refrigeração industrial, e impacto nas variáveis do processo;
- Síntese do conhecimento aplicado de Refrigeração, habilitando os alunos de engenharia de alimentos a propostas de alterações, em sistemas de refrigeração industrial, para eficiência do processo;
- Compreensão da relação entre as variáveis de processos e o bom funcionamento: possibilitar trabalhos no limite de segurança, evitando falhas sistêmicas;
- Fazer a Interdisciplinaridade: Termodinâmica, Refrigeração Industrial, Instrumentação e Controle de Processos;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO

Desde as civilizações mais antigas o homem busca uma forma de conservar os alimentos a baixas temperaturas. Um dos métodos mais antigos foi o uso de gelo natural coletados das montanhas e encostas de rios (ADIERS et al., 2011).

Oliver Evans foi idealizador da união das técnicas de evaporação e compressão como criação de um sistema cíclico, mas a primeira máquina cíclica de refrigeração foi elaborada e patenteada por Jacob Perkins, que operava segundo princípio de compressão de vapor, ilustrado na Figura 1 (ADIERS *et al.* 2011). A partir de então, surgiram várias propostas de disposição de equipamentos em operação que possibilitassem um ciclo termodinâmico para refrigeração.

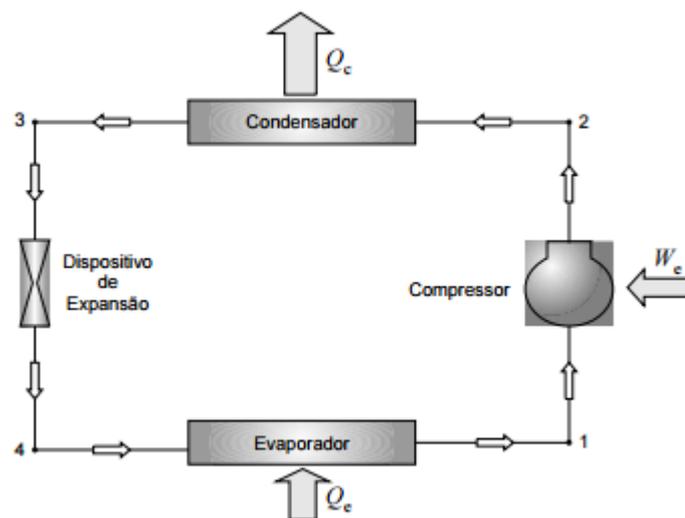


Figura 1: Componentes básicos de um sistema de refrigeração.

Fonte: Pereira, 2006.

No dispositivo proposto por Perkins (Figura 1), o caminho de 4 a 1 ilustra um fluido volátil (fluido refrigerante) que ao evaporar irá retirar calor do ambiente ou objeto desejado (Q_c), devido ao contato térmico com o evaporador. O vapor é então succionado pelo compressor tendo sua pressão elevada a pressão de condensação, graças ao trabalho (W_c) introduzido nesse processo que possibilita essa trajetória 1-2. No condensador o fluido deverá rejeitar o calor recebido no processo (Q_c) e condensará, cumprindo o trajeto 2-3 do ciclo. Na seqüência, a pressão do fluido será

reduzida em um dispositivo de expansão (válvula de expansão ou tubo capilar). Finalmente, o fluido é conduzido novamente ao evaporador reiniciando o ciclo.

O projeto de um sistema frigorífico fundamenta-se no cálculo da Carga Térmica, que é definida como o calor total a ser removido do espaço refrigerado para que o produto, a partir da temperatura inicial, atinja a baixa temperatura de interesse. Assim, esse valor será numericamente igual à soma de calor que usualmente se desprende de várias fontes, definindo a capacidade do sistema frigorífico. O montante do valor a ser calculado está tradicionalmente em quatro cargas separadas:

- a) Carga cedida pelas paredes, pisos e teto;
- b) Carga de mudança/infiltração de ar;
- c) Carga do produto (resfriamento ou respiração);
- d) Mistura de carga suplementar (pessoas, iluminação, empilhadeira, etc.)

Uma câmara frigorífica deverá ser capaz, portanto, de reduzir ou manter o produto na temperatura desejada, a despeito de eventuais acréscimos de temperatura sofridas pelo sistema devido a, por exemplo: respiração do produto, iluminação da câmara, motores (ventiladores, empilhadeiras), infiltrações de ar quente devido à abertura da porta, movimentação de pessoas, fluxo de calor através das paredes, pisos e teto. Para fins de quantificação, essas fontes de calor são mensuradas em forma de taxas (energia por tempo) e fluxo (energia por tempo por unidade de área) conforme esquematizado na Figura 2.

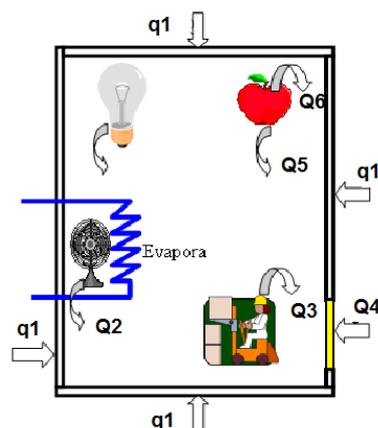


Figura 2: Esquema de fluxos e taxas de calor dentro de uma câmara fria.

Onde:

q_1 = Fluxo de Calor por Condução (6 faces);

Q_2 = Taxa de Dissipação de Calor por Equipamentos

Q_3 = Taxa de Dissipação de Calor por Pessoas

Q_4 = Taxa de Calor por Troca de Ar Frio por Quente

Q_5 = Taxa de Dissipação de Calor pelo Produto/embalagem

Q_6 = Taxa de Dissipação de Calor de Respiração de Frutas

Q_7 = Taxa de Dissipação de Calor pela Iluminação

3.2 CIRCUITO BÁSICO DE REFRIGERAÇÃO MECÂNICA POR COMPRESSÃO

Segundo Laund (1999), um sistema de refrigeração mecânica por compressão é composto pela união de cinco elementos básicos: condensador, compressor, evaporador, válvula de expansão e o fluido refrigerante. A Figura 3 mostra um sistema de refrigeração doméstico, enquanto a Figura 4 mostra um sistema de refrigeração industrial com circulação de ar forçada, o que ajuda a melhorar a dissipação de calor do ambiente a ser refrigerado, diminuindo o gradiente de temperatura dentro das câmaras frigoríficas.

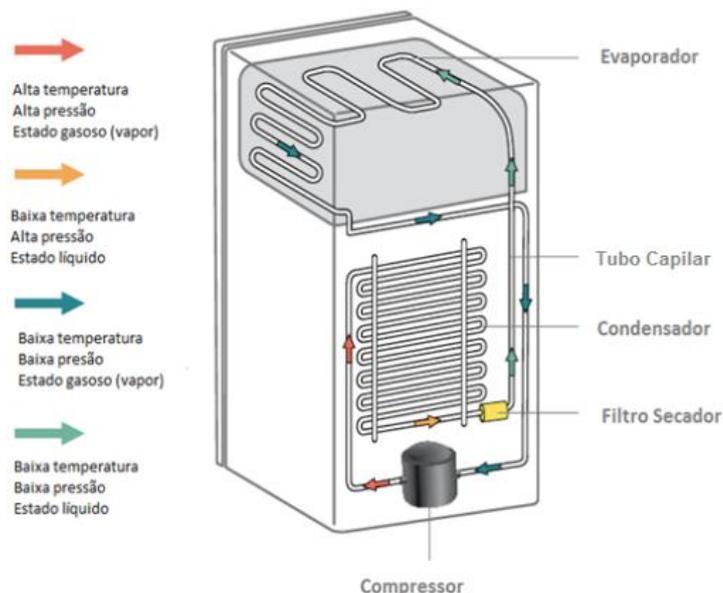


Figura 3: Sistema doméstico de refrigeração mecânica por compressão.

Fonte: www.clubdarefrigeracao.com. BR

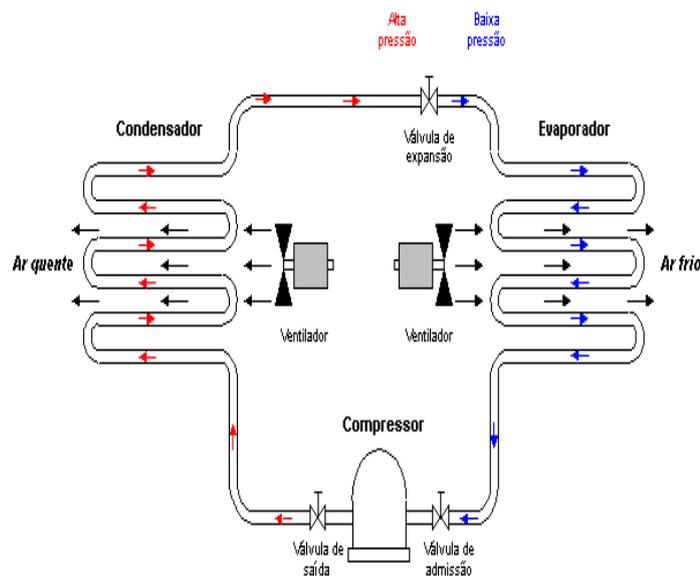


Figura 4: Sistema industrial de refrigeração mecânica por compressão.
Fonte: Vargas, 2010.

O fluido refrigerante usado nesses sistemas de refrigeração passa por um dispositivo de expansão, conhecido como tubo capilar, para diminuição da pressão até a pressão de evaporação. Após essa expansão o fluido passará a ser uma mistura bifásica em baixa pressão do processo, sendo conduzido ao evaporador com o objetivo de absorver calor.

A passagem do fluido refrigerante pelo evaporador deve implicar no máximo aproveitamento do calor latente exatamente para a retirada de calor desejado. A partir daí o refrigerante é succionado pelo compressor tendo sua pressão elevada à pressão de trabalho do condensador.

O ciclo de refrigeração após a condensação, momento em que o fluido entrará no dispositivo de expansão (tubo capilar), terá sua pressão reduzida novamente, para ser encaminhado ao evaporador e repetir o ciclo.

3.3 COMPRESSORES

O compressor tem como função, retirar o vapor formado no evaporador de forma a manter as condições de pressão ou temperatura desejadas, comprimindo-o a uma determinada pressão deslocando-o no interior do circuito de refrigeração. A

Figura 5 mostra um compressor hermético e um esquema que ilustra o equipamento por dentro.

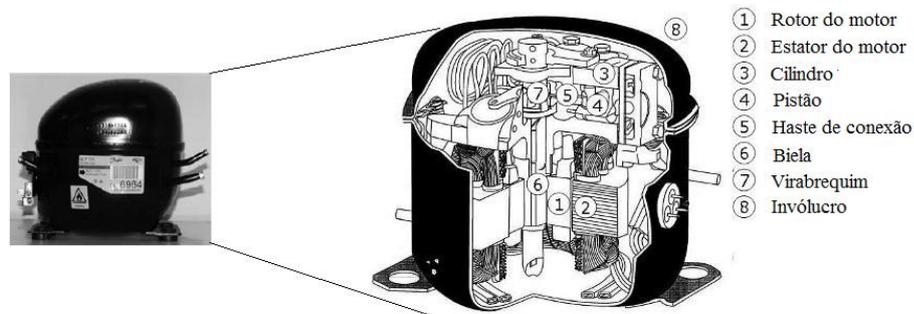


Figura 5: Imagem e desenho esquemático de um compressor tipo pistão hermético
 Fonte: Adaptado de Estupiñan e Santos, 2009.

Para que os compressores sejam acionados são utilizados motores, cuja montagem oferece uma divisão dos compressores em abertos, semi-herméticos e herméticos. Os compressores ainda podem ser classificados de acordo com o seu princípio de funcionamento, como os alternativos e os rotativos.

O conjunto motor-compressor aberto são os mais utilizados em grandes e médias instalações, sendo operado por um motor independente acoplado diretamente ou por meio de correias e polias. Sua grande difusão está ligada ao fato de ter uma fácil manutenção e possibilitar o emprego de motores elétricos, além da implantação de sistemas de acionamento super dimensionados, capazes de trabalhar sob condições severas, porém com um maior consumo de energia. A retirada deste conjunto motor-compressor não causará ação alguma no sistema que contém o refrigerante, porém esse conjunto possui a desvantagem de com o tempo de uso possibilitar o vazamento de fluido no ambiente.

Os compressores semi-herméticos são mais usados quando há a exigência de serviços mais pesados. Em seu interior o motor elétrico já vem incorporado ao compressor, montado dentro de uma caixa selada, tendo um acoplamento especial e hermético de tal forma que permita a desmontagem do compressor.

Os compressores herméticos, ao contrário dos abertos, não permitem que o fluido refrigerante vaze para o ambiente. São os mais usados em sistemas de refrigeração doméstica por ser de baixo custo e ocuparem menor espaço. Esses compressores não admitem grandes variações nas tensões elétricas, quando ocorre a queima do motor é necessária a troca de toda a unidade. A vantagem desse conjunto está na maior eficiência e ser relativamente silencioso. Nos dois últimos casos de conjunto motor-compressor há grandes desvantagens quanto a incompatibilidade do fluido refrigerante com os materiais do motor.

Os compressores alternativos baseiam-se na movimentação de um pistão no interior do cilindro, possuindo uma válvula de descarga e outra de sucção. Esse pistão executa movimentos de desce e sobe ou vai e vem. Durante o movimento de descida o pistão aciona a válvula de sucção e provoca o fechamento da válvula de descarga, neste momento a pressão no interior do cilindro é menor que a da linha de sucção, fazendo com que o fluido entre no cilindro. Quando o pistão sobe ocorre uma movimentação contrária, a válvula de descarga é acionada e a de sucção é fechada, agora a pressão no interior do cilindro é maior que a da linha de descarga, forçando o fluido a sair de seu interior.

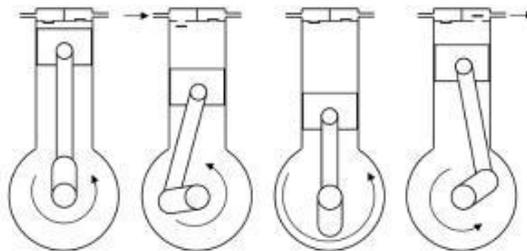


Figura 6: Funcionamento de um compressor alternativo.

Fonte: www.clubdarefrigeracao.com.br

O acionamento deste pistão é feito por um conjunto biela-girabrequim que é instalado no interior do carter onde há uma quantidade de óleo lubrificante. O girabrequim gira, e tendo o auxílio da biela provoca a movimentação do pistão no interior do cilindro, causando movimentos alternados, por isso o nome compressor alternativo, Figura 6.

A categoria de compressores rotativos possui um eixo que gira excêntrica no interior de uma carcaça, contendo uma série de pás (simples ou

de múltiplas palhetas), onde o fluido refrigerante é comprimido pelo movimento do eixo e ação, Figura 7.

Nesses compressores, quando o rotor realiza movimentos giratórios reduzindo o espaço de compressão, onde o fluido refrigerante ficará preso entre as palhetas e comprimido, sendo forçado posteriormente a seguir para a tubulação de descarga. Esses compressores apresentam como vantagem uma menor vibração durante seu funcionamento sendo os mais utilizados, sendo fundamental que esses ruídos estejam em níveis baixos (SILVA, 2004).

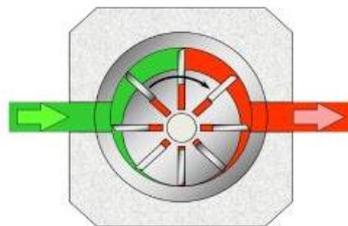


Figura 7: Esquema de compressor rotativo.

Fonte: www.clubdarefrigeracao.com.br

Outra vantagem, segundo Silva (2007), dos compressores rotativos em relação aos alternativos, é que estes apresentam uma maior temperatura devido ao seu sistema de compressão excêntrico.

3.4 CONDENSADOR

Um condensador é um equipamento que tem a função de retirar calor absorvido pelo evaporador, provocando a condensação do fluido refrigerante, que está no estado gasoso para o estado líquido, ficando disponível para uma nova evaporação.

Segundo Laund (1999), o condensador serve basicamente para liquefazer os vapores formados no evaporador, através do processo de ebulição, sendo constituído por várias serpentinas que atravessam uma malha de ferro que melhorará a dissipação do calor, conforme a Figura 8.

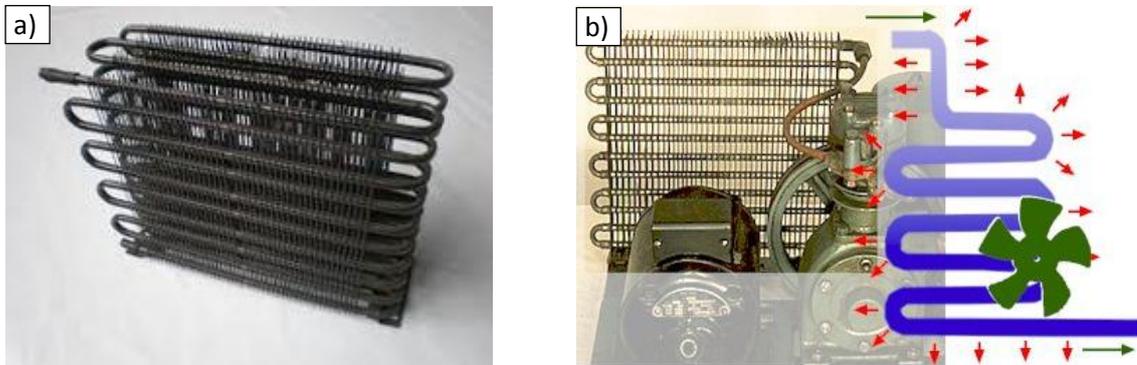


Figura 8: Condensadores típicos aletados, resfriados por convecção: a) Natural; b) Forçada.

A maioria das linhas de refrigeração residencial utiliza compressores com circulação natural do ar, ou seja, convecção natural. Já as linhas industriais, ar condicionado e câmaras frigoríficas, utilizam condensadores que recebem uma circulação forçada provocada por ventiladores, convecção forçada. As aletas utilizadas nos condensadores servem para melhorar a transferência de calor entre o fluido refrigerante e o meio em que está instalado, o ar do ambiente (SILVA, 2007).

Nos sistemas de refrigeração industrial, existem três tipos de condensadores, os resfriados a ar (Figura 9) que podem ser de convecção forçada ou natural, os resfriados a água (Figura 10) e os condensadores evaporativos (Figura 11).



Figura 9: Condensador industrial.

Fonte: <http://www.grupomevbrasil.com.br>



Figura 10: Condensador resfriado a água.

Fonte: www.nei.com.br



Figura 11: Condensadores evaporativos.

Fonte: <http://www.solinderg.com>

A vantagem dos condensadores resfriados a ar é que esses tem um menor custo inicial e um custo reduzido de manutenção. Enquanto os condensadores resfriados a água trabalham com uma menor temperatura de condensação que os de ar, e é mais vantajoso quando o compressor e condensador estão longe. Os condensadores evaporativos são mais compactos e permite operar com uma menor temperatura de condensação em relação aos outros consumindo, assim, menos energia e operando com temperaturas de descarga menores, esses condensadores podem trazer alguns inconvenientes devido a dificuldade de manutenção, já que esses são usados em médias e grandes instalações.

3.5 DISPOSITIVOS DE EXPANSÃO

Os dispositivos de expansão mais conhecidos são os de área restrita (tubos capilares), válvulas de expansão automáticas, válvula de expansão termostática, e as válvulas de expansão eletrônica.

Os tubos capilares têm a função de reduzir a pressão do fluido refrigerante, vindo do condensador (pressão de condensação), para a pressão do evaporador sendo considerado o mais simples dispositivo de expansão, conforme a Figura 12. Portanto, o tubo capilar tem como função garantir que o refrigerante chegue ao evaporador à pressão e temperatura desejada.

Segundo Laund (1999), um capilar constituído de cobre e com diâmetro pequeno, tem seu comprimento dimensionado conforme o sistema do refrigerador, sendo que o diâmetro utilizado irá depender da temperatura que deseja atingir.



Figura 12: Tubo capilar de cobre.

Alguns cuidados devem ser tomados durante a instalação desses componentes em um circuito de refrigeração, como garantir que nesses capilares não haja a presença de umidade e partículas em seu interior, para que não obstrua a passagem do fluido refrigerante durante o estrangulamento.

Os outros dispositivos de expansão mais atuais e mais eficientes no mercado como (por exemplo, as válvulas termostática) regulam o fluxo de refrigerante que chega ao evaporador, mantendo sempre certo grau de superaquecimento do fluido, conforme a Figura 13 e 14 ilustra.



Figura 13: Válvula de expansão automática (VEA).

Fonte: www.clubdarefrigeracao.com.br



Figura 14: Válvula de expansão termostática (VET).

Fonte: www.clubdarefrigeracao.com.br

3.6 FILTROS DE SECAGEM

Dentro dos sistemas de refrigeração esses filtros têm como função, garantir que o fluido refrigerante não seja obstruído dentro do tubo capilar, Figura 15. Portanto, ele irá reter partículas e absorver toda a umidade do fluido.

Seu interior é constituído por duas malhas, uma grossa localizada na entrada do fluido e outra fina na saída, entre as malhas são usadas partículas dessecantes que irão absorver a umidade, podendo ser sílica gel.



Figura 15: Filtro de secagem de cobre.

3.7 EVAPORADORES

Segundo Gomes (2008), o evaporador (Figura 16) tem a função de evaporar o fluido refrigerante dentro de um sistema de refrigeração com o calor necessário retirado do ambiente do processo, podendo ser construído de alumínio ou ferro, funcionando como um trocador de calor.

Para Ferraz e Gomes (2008), o evaporador tem papel fundamental nos sistemas de refrigeração, com a finalidade de extrair o calor do meio a ser resfriado, fazendo com que o fluido refrigerante mude de estado, saindo da fase líquida para a fase gasosa. Esses componentes do sistema também são conhecidos como serpentina de congelamento, já que fica localizada na parte superior dos refrigeradores domésticos onde os alimentos são congelados.

Ainda Ferraz e Gomes (2008), dizem que a eficiência de um evaporador depende de três requisitos principais. Primeiro a superfície deve ter tamanho suficiente para poder absorver a carga de calor desejada, segundo, deve apresentar espaço suficiente para que o fluido refrigerante possa estar em seus dois estados, líquido e gasoso, e por fim, ter espaço suficiente para a passagem do fluido sem queda de pressão excessiva, na entrada e saída do evaporador.



Figura 16: Evaporador.

Fonte: www.intersam.es

Em alguns sistemas, como em câmaras frigoríficas, são utilizados ventiladores (convecção forçada) para uma melhor dissipação do ar frio dentro das câmaras. Ainda podem ser usadas aletas ou placas de metal que são instaladas sobre as serpentinas (Figura 17), que irão servir como superfície secundária

absorvendo uma maior quantidade de calor, aumentando a eficiência do processo, conforme Laund (1999). Dossat (1999) observa ainda que nessa aletas pode haver o acúmulo de gelo, o que implicará na diminuição da pressão normal e temperatura de trabalho do evaporador, diminuindo sua eficiência.

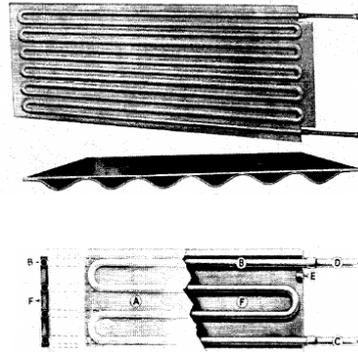


Figura 17: Evaporadores de placas.

Fonte: Dossat, 1961.

Os evaporadores podem ser classificados ainda quanto ao tipo de alimentação (inundado ou seco) e quanto ao tipo de fluidos a resfriar (ar, água, de contato).

Nos evaporadores secos ou de expansão direta o fluido refrigerante entra no evaporador pela válvula de expansão, onde é completamente vaporizado e superaquecido ao ganhar calor no interior dos tubos por onde passa, conforme a Figura 18. Esses evaporadores, geralmente, usam fluidos refrigerantes halogenados, por serem instalados em locais onde sua capacidade não é muito elevada. Esses evaporadores possuem a desvantagem de ter seu coeficiente global de transferência de calor baixo, o que resulta na dificuldade de manter a tubulação molhada com fluido refrigerante, retardando o processo de refrigeração (STOECKER, 2002).

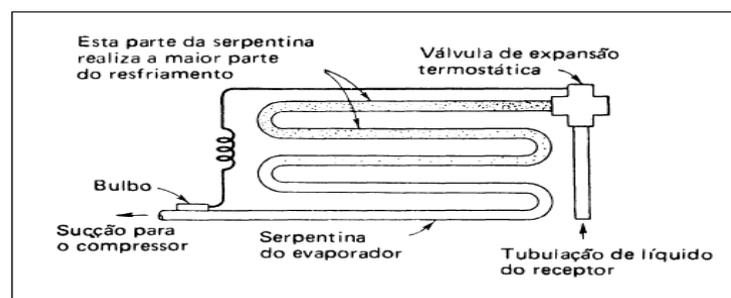


Figura 18: Evaporador seco de superfície primária.

Fonte: Martinelli Jr., 2009.

Em evaporadores do tipo inundado, o fluido refrigerante passa pela válvula de expansão, após escoar pela serpentina onde remove o calor a ser absorvido. Nesse processo uma parte do refrigerante evapora, formando uma mistura de vapor e líquido. Em seguida, a mistura é conduzida a um separador de líquidos, que tem a função de separar o fluido em estado de vapor do fluido em estado de líquido. O fluido vaporizado é succionado pelo compressor, quanto o fluido líquido retorna ao evaporador, Figura 19. A diferença desse tipo de evaporador com o de expansão direta, é que como no inundado sempre há fluido molhando a tubulação, esse tipo de evaporador usa de forma efetiva a sua superfície de transferência, o que resulta em um maior coeficiente de transferência de calor (STOECKER, 2002).

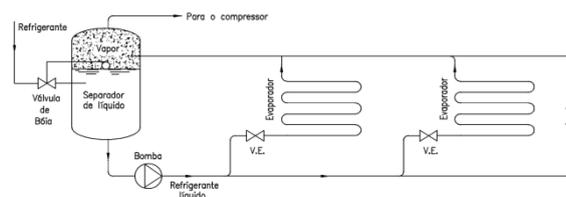


Figura 19: Evaporadores inundados com recirculação de líquidos (por bomba).
Fonte: Castro, 2005.

Os evaporadores que são classificados quanto a sua finalidade de resfriar o ar, o fluido frigorífico contido no interior da tubulação vai resfriar diretamente o que escoar pela superfície externa do trocador de calor (evaporador). Logo o ar frio, resultante deste processo, é utilizado para resfriar os produtos contidos nas câmaras frigoríficas (STOECKER, 1985). Com relação à circulação de ar, esses evaporadores podem ser subdivididos em evaporadores com convecção natural, ou evaporadores com convecção forçada (ao se usar ventiladores que auxiliarão na dissipação do ar frio na câmara).

Os evaporadores usados para resfriar líquidos podem ser subdivididos em carcaça e tubo (Shell and tube), carcaça e serpentina (Shell andcoil), cascata ou Baudelot e evaporadores de placas. Nesses evaporadores o fluido refrigerante é usado para resfriar o líquido até uma determinada temperatura sendo em seguida bombeado para outros equipamentos, como as serpentinas de câmaras frigoríficas,

onde será usado para resfriar outros meios ou produtos (STOECKER, 2002), conforme a Figura 20.

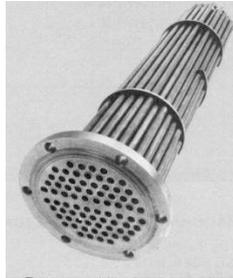


Figura 20: Evaporadores para líquidos tipo tubo carcaça.

Fonte: Dossat, 1961.

Por último, os evaporadores de contato, que são atualmente constituídos de chapas de alumínio (no passado de cobre e aço). São muito usados para congelar produtos sólidos, pastosos ou líquidos. Sua alimentação é feita por gravidade, recirculação por bomba ou expansão direta.

3.8 FLUIDOS REFRIGERANTES

O fluido refrigerante é o responsável por absorver o calor do ambiente a ser refrigerado. De acordo com Ferraz e Gomes (2008), esses fluidos refrigerantes não podem ser utilizados para outras finalidades a não ser para os sistemas de refrigeração, já que não existem fluidos que reúnem todas as propriedades desejáveis para quaisquer processos.

De forma geral, esses fluidos refrigerantes devem conter algumas propriedades que se enquadrem nos processos de refrigeração como a capacidade de condensação a pressões moderadas, e a evaporação em pressão atmosférica, ainda devem trabalhar com volume específico reduzido, exigindo pequenos esforços do compressor e não ser corrosivo, tóxico ou inflamável.

Junto à evolução dos sistemas de refrigeração, veio a evolução e substituição dos fluidos refrigerantes usados nesses sistemas. Até os anos de 1930 os refrigerantes usados nos ciclos de refrigeração eram todos de origem tóxica e explosiva como amônia (NH_3), butano (C_4H_{10}), isobutano [$\text{HC}(\text{CH}_3)_3$], propano (C_3H_8), dióxido de enxofre (SO_2) e cloreto de metil (CH_3Cl).

Em 1970, chegaram os fluidos CFCs, ou seja, clorofluorcarbonetos, que eram por sua vez, incolores e inodoros, não tóxicos, nem inflamáveis e nem corrosivos. Esses fluidos ficaram conhecidos como: R-11 (CCl_3F), R-12 (CCl_2F_2), R-22 (CHClF_2) e R-502 (48,8% de CHClF com 51,2% de CClF). Porém, esses fluidos refrigerantes agrediam o meio ambiente, e no ano de 1986 foi criado o Protocolo de Montreal, que estabeleceu a substituição dos CFCs, por refrigerantes menos agressivos ao meio ambiente até o ano de 2010.

Junto com o Protocolo de Montreal, houve a revolução na indústria de refrigeração, com a extinção do cloro antes usado nos fluidos refrigerantes. A partir daí, foi lançada a linha de substitutos dos CFCs, como: CFC -12 (CCl_2F_2 ou R-12) substituído pelo HFC -134a ($\text{CH}_2\text{F.CF}_3$ ou R-134a). Nos últimos dez anos, a empresa DuPont (maior produtora de refrigerantes do país) vem inovando inúmeros fluidos que são usados para substituir os CFCs, sendo esses os halogenados puros, misturas binárias, misturas ternárias, os refrigerantes naturais (CO_2 , GNP) e a amônia que está sendo adotada em instalações industriais recentemente.

Ao processo de substituição de um fluido refrigerante por outros em um mesmo sistema de refrigeração, ou seja, nos mesmos equipamentos, se dá o nome de Retrofit, que a substituição por propriedades físicas e termodinâmicas semelhantes, como por exemplo, a substituição do R-12 usado em refrigeradores antigos, pelo R-401a quando são reparados.

3.9 MANÔMETROS

Esses instrumentos são conhecidos por terem a capacidade de medir pressões de fluidos contidos em sistemas que estão acima da pressão atmosférica (HALLIDAY, 1996).

Em circuitos de refrigeração eles são empregados para medir as pressões de alta e baixa do sistema. Na parte de alta pressão, o fluido refrigerante é descarregado, condensado e se torna líquido. Essa pressão nesse sistema é conhecida como pressão de condensação ou pressão de descarga. Na linha de baixa pressão está localizado o evaporador e o tubo capilar, é neste momento em que o fluido refrigerante absorve o calor do ambiente a ser refrigerado e se torna

vapor. Essa pressão é conhecida como pressão de vaporização ou pressão do evaporador.

3.10 TERMOSTATO

São instrumentos que se baseiam no fenômeno de dilatação sofrida pelos corpos quando aquecidos (SILVA, 2007). Em um sistema de refrigeração os termostatos são usados para ligar ou desligar o compressor ao atingir a temperatura desejada dentro da câmara fria, Figura 21.



Figura 21: Termostatos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO

O desenvolvimento do módulo, do ponto de vista estrutural do trabalho, foi dividido em três etapas básicas: projeto, construção e avaliação.

4.1.1 PROJETO

4.1.1.1 Pesquisa de Campo

Durante os primeiros meses foram feitos alguns levantamentos de módulos ou bancadas práticas de refrigeração industrial em empresas relacionadas com o tema e em universidades.

Na cidade de Campo Mourão, Paraná, foi encontrado um módulo construído pelo dono da empresa Refricampo, que fornece serviços, máquinas e equipamentos para sistemas de refrigeração em comércios alimentícios. Outros dois módulos encontrados estavam localizados na cidade de Medianeira, Paraná, na UTFPR, este foi desenvolvido por alunos do curso Tecnologia em Eletromecânica e Tecnologia em Manutenção Industrial, sendo que um deles testava a aplicabilidade de compressores e dispositivos de expansão diferentes e o outro trabalhava com um sistema de refrigeração por absorção. Todos esses módulos serviram como exemplo ao desenvolvimento do projeto.

O custo total de construção de um módulo de refrigeração mecânica por compressão atualmente no mercado é de seis mil reais em média, porém o custo estimado para a construção do módulo desenvolvido no presente trabalho e em outros trabalhos desenvolvidos por outras universidades foi de mil reais em média.

Após foram realizados os levantamentos de equipamentos disponíveis no campus da universidade para construção do módulo. Infelizmente, a universidade não dispunha de algumas peças que seriam importantes para a confecção do projeto. Tais equipamentos foram orçados em empresas do estado. A relação de componentes utilizados para a construção do módulo está na tabela 1.

Tabela 1: Relação de componentes utilizados na construção do módulo de Refrigeração Mecânica por Compressão.

Item	Componente	Quantidade	Valor
1	Compressor	01	R\$20,00
2	Condensador	01	R\$20,00
3	Evaporador	01	R\$20,00
4	Tubo Capilar	01	R\$20,00
5	Manômetro de baixa pressão	01	R\$75,00
6	Manômetro de alta pressão	02	R\$150,00
7	Controlador de Temperatura	01	R\$215,00
8	Filtro	01	R\$10,00
9	Isolamento	01 metro ²	R\$ 3,00
10	Tubo de cobre	01 metro	R\$25,00
11	Termostato	01	R\$55,00
12	Controlador on/off	01	R\$10,00
13	Fluido refrigerante R-401 ^a	01 carga	R\$200,00
TOTAL			R\$ 823,00

4.1.1.2 Desenvolvimento do Projeto

Para a elaboração do projeto, primeiro houve uma procura por um local onde o módulo seria acomodado, focando em um grande espaço, por se tratar de um equipamento grande e que não seria movido facilmente. Identificou-se um laboratório com tamanho suficiente para acomodá-lo no bloco C, segundo piso da UTFPR, conforme mostra a Figura 22.



Figura 22: Espaço físico para acomodação do módulo.

As dimensões do módulo foram determinadas aleatoriamente, conforme os tamanhos dos equipamentos que compõem o ciclo de refrigeração. As dimensões da câmara fria foram determinadas através do tamanho do evaporador (Figura 23), retirado de uma geladeira para a construção do módulo.

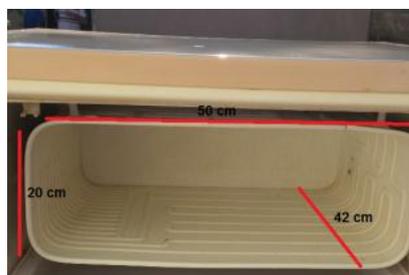


Figura 23: Dimensões do evaporador.

Portanto, a câmara terá aproximadamente 1 m³ de capacidade, paredes claras. Usou-se isopor para o isolamento da câmara, devido sua facilidade de compra, além de ser acessível aos alunos.

4.1.1.2.1 Cálculo de Carga Térmica

O cálculo de carga térmica foi utilizado para definir a capacidade frigorífica do sistema de refrigeração, sendo a soma de todo o calor que se desprende de várias fontes, no caso do módulo, o calor transmitido pelas paredes, infiltração do ar externo e a abertura da porta de acesso.

Nas Tabelas de 2 a 6 a seguir, estão apresentados os parâmetros necessários ao cálculo das cargas térmicas da câmaras frigorífica do módulo.

Tabela 2: Dimensões da câmara refrigerada

	Câmara I
Dimensões	(m)
Altura	1,0
Comprimento	1,0
Largura	1,0

Tabela 3: Calor específico

Calor Específico (c_p)	(kcal/k.kg)
c_p do polietileno/polipropileno	0,40631
c_p produto antes congelamento	0,91
c_p produto depois do congelamento	0,46

Tabela 4: Massas a serem resfriadas e/ ou congeladas

Massa	(kg)
Embalagem (kg)	0,015
Produto (Kg)	0,985
Total (Kg)	1,0

Tabela 5: Temperaturas

Temperatura	(°C)
Entrada do produto	30
Congelamento do produto	-2,2
Final do produto	-14
Interna da câmara	-20
Externa da câmara	35

Tabela 6: Umidade Relativa

UR	%
Ar externo	55
Ar interno	90

Tabela 7: Graus Celsius a acrescentar ao diferença normal de temperatura.

Tipo de Superfície	Orientação			
	Leste	Oeste	Norte	Telhado
Cor escura (ardósia, asfalto, tinta preta)	5	5	3	11
Cor média (madeira, tijolos, pintura vermelha, verde, cinza ou verde)	4	4	3	8
Cor clara (pedras brancas, cimento claro, pintura branca)	2	2	1	5

4.1.2 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO

Foi elaborada uma estrutura de base metálica para que esses componentes fossem fixados posteriormente, conforme a Figura 24.

Em seguida, foram colocadas placas de madeira a estrutura metálica de um centímetro, a fim de fixar os componentes do ciclo de refrigeração. Para finalizar, toda a estrutura do módulo foi pintada, a parte metálica com tinta preta e a madeira com tinta branca.

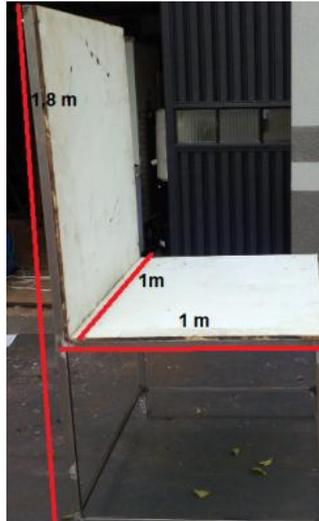


Figura 24: Dimensões da estrutura metálica do módulo.

Ainda nesta primeira etapa, foi confeccionada uma câmara fria de metal, cujas dimensões estão na Tabela 4, que foi posteriormente fixada na estrutura, conforme a Figura 25.



Figura 25: Câmara fria.

Foi utilizada uma geladeira da marca Consul com capacidade de 280 litros para a retirada de alguns dos componentes do módulo, como o evaporador, o compressor, o tubo capilar, o condensador e o termostato. Para a retirada desses componentes, primeiro foi esvaziado todo o fluido refrigerante contido no sistema. Em seguida foi realizada a limpeza desses componentes e também passada uma camada de tinta, já que os mesmos eram muito antigos e se encontravam empoeirados e com traços de ferrugem.



Figura 26: Compressor acoplado no módulo.

O compressor foi posicionado na parte de cima da estrutura e também fixado com parafusos (Figura 26) para que não haja trepidações quanto estiver funcionando. O mesmo ocorreu com o condensador, que ficou fixado na parte de trás do módulo, Figura 27. O evaporador foi posicionado e fixado com parafusos dentro da câmara fria, Figura 28.



Figura 27: Condensador acoplado ao módulo.



Figura 28: Evaporador fixado na câmara fria.

Após a fixação dos componentes, foram feitas as ligações entre eles com a tubulação de cobre, onde foram soldados junto ao tubo capilar e os manômetros.

Esses manômetros foram fixados na saída do compressor, entrada do tubo capilar e na saída do evaporador, Figura 29.



Figura 29: Manômetros de alta e baixa pressão do módulo.

Por fim foram instalados o termostato e o controlador de temperatura dentro da câmara fria, conforme as Figuras 30 e 31. Esses dois componentes possuem a mesma função, ao atingir a temperatura desejável no interior da câmara, eles irão desligar o compressor e manter essa temperatura, o contrário também acontece, o compressor será ligado quando a temperatura aumentar.



Figura 30: Controlador de temperatura.

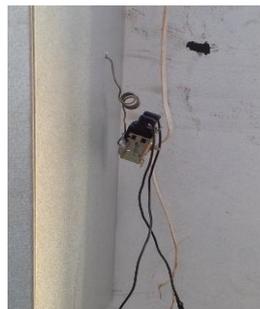


Figura 31: Termostato ligado ao compressor.

Nesse módulo o termostato foi conectado ao compressor e ao botão on/off, porém o controlador de temperatura foi conectado apenas ao botão on/off, tem somente a função de medir a temperatura dentro da câmara como um termômetro digital. Enquanto os outros relés foram feitas as ligações entre o compressor e uma corrente elétrica para que o módulo pudesse operar.

A tensão usada foi de 110V, já que o aparelho de refrigeração era antigo e todos seus componentes trabalhavam sob essa tensão.

Para o funcionamento do módulo foi aplicada uma carga de fluido refrigerante usado comercialmente, o R-401a da fabricante DuPont.

O módulo acabado está ilustrado na Figura 32.



Figura 32: Módulo para estudos práticos de sistemas de refrigeração mecânica por compressão.

Para ativar o módulo é só conectá-lo a uma fonte de energia, com a tensão apropriada, e acionar o botão on/off, esperar o sistema se estabilizar e assim realizar as medições no módulo.

Para a realização das experiências sobre o módulo foram definidos alguns pontos de medição, conforme a figura 33.

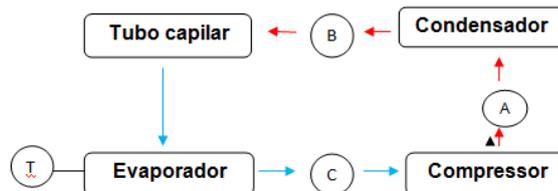


Figura 33: Pontos de medição de temperatura e pressão no módulo.

Nos pontos A e B estão instalados os manômetros de alta pressão, ou seja, linha de alta, e no ponto C está instalada o manômetro de baixa pressão, linha de baixa. E o medidor de temperatura está instalado no evaporador.

4.1.3 APLICAÇÃO

Após testes realizados durante a construção do módulo, foi elaborado um Manual de Práticas de Sistemas de Refrigeração por Compressão, onde os alunos serão submetidos a práticas nos próximos semestres.

A primeira experiência consiste na identificação dos componentes do módulo e sua localização. Em seguida, os alunos farão a medição das pressões nas linhas de alta e de baixa, além da medição da temperatura dentro da câmara.

Com algumas informações como as médias anuais de temperatura da cidade de Campo Mourão, os alunos poderão fazer o cálculo de carga térmica, ou seja, sua capacidade de refrigeração. Isso permitirá aos alunos trabalhar com outros tipos de evaporadores, compressores e isolantes.

Outra prática a qual os alunos serão submetidos será a identificação de falhas no módulo, e a sugestão de melhorias.

A Figura 34 mostra o resultado da pesquisa realizada para saber qual o nível de aplicabilidade do módulo na rotina dos alunos durante a graduação. A nota global atribuída pelos alunos sobre o módulo foi 8.42, indicando a grande importância de se ter equipamentos como esses na disciplina de refrigeração industrial.

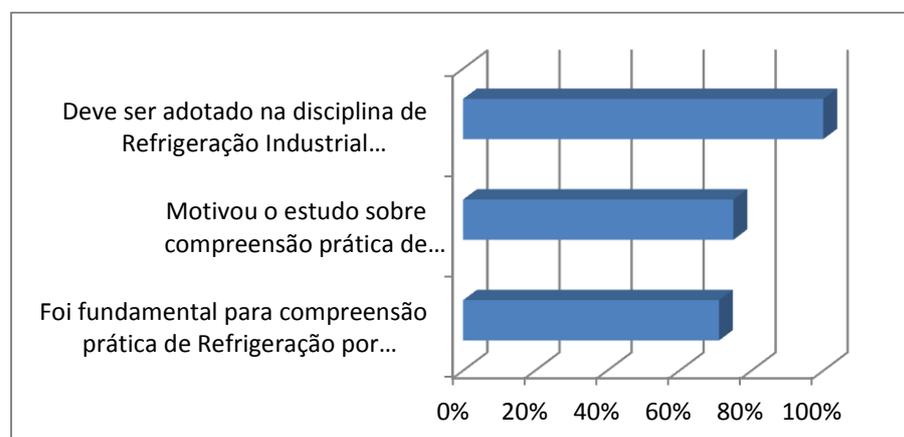


Figura 34: Resultados do questionário aplicado para os alunos da UTFPR-CM.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

O cálculo de carga térmica foi utilizado para definir a capacidade frigorífica do sistema de refrigeração a ser montado, sendo a soma do calor que se desprende de várias fontes. No trabalho em questão, essas fontes de calor são, por transmissão (paredes, piso e teto), infiltração (ar quente externo), pessoas, produto, embalagem e iluminação.

Para calcular a carga térmica por transmissão das paredes, teto e piso da câmara, usou-se a Eq. (1), onde são considerados o coeficiente global de transmissão de calor por cada parede (U), a área da câmara (A) e o diferencial de temperatura das paredes (ΔT), para compensar o efeito da irradiação solar foi considerado no cálculo de carga térmica de cada parede o adicional de graus Celsius em cada diferencial normal de temperatura presente na Tabela 7. Logo:

- **Cálculo para determinação da perda de carga por transmissão:**

$$Q_{transmissão} = U \cdot A \cdot (\Delta T) \quad (1)$$

Parede Norte:

$$Q_{transmissão} = 0,099 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot ^\circ C} \cdot 1,0m^2 \cdot (35 - (-18) + 0)^\circ C$$

$$Q_{transmissão} = \frac{5,247 kcal}{24 h}$$

Parede Sul:

$$Q_{transmissão} = 0,099 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot ^\circ C} \cdot 1,0m^2 \cdot (35 - (-18) + 1)^\circ C$$

$$Q_{transmissão} = \frac{5,346 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

Parede Leste:

$$Q_{transmissão} = 0,099 \frac{\text{kcal}}{\text{m.h.}^\circ\text{C}} \cdot 1,0\text{m}^2 \cdot (35 - (-18) + 2)^\circ\text{C}$$

$$Q_{transmissão} = \frac{5,445 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

Parede Oeste:

$$Q_{transmissão} = 0,099 \frac{\text{kcal}}{\text{m.h.}^\circ\text{C}} \cdot 1,0 \text{ m}^2 \cdot (35 - (-18) + 2)^\circ\text{C}$$

$$Q_{transmissão} = \frac{5,445 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

Teto:

$$Q_{transmissão} = 0,099 \frac{\text{kcal}}{\text{m.h.}^\circ\text{C}} \cdot 1,0\text{m}^2 \cdot (35 - (-18) + 5)^\circ\text{C}$$

$$Q_{transmissão} = \frac{5,742 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

Chão:

$$Q_{transmissão} = 0,099 \frac{\text{kcal}}{\text{m.h.}^\circ\text{C}} \cdot 1,0\text{m}^2 \cdot (35 - (-18) + 5)^\circ\text{C}$$

$$Q_{transmissão} = \frac{5,742 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

Total da carga térmica de transmissão:

$$Q_{transmissão \text{ total}} = \frac{5,247 + 5,346 + 5,445 + 5,445 + 5,742 + 5,742 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

$$Q_{transmissão \text{ total}} = \frac{32,967 \text{ kcal}}{24 \text{ h}}$$

- **Cálculo para de terminação da perda de carga por Infiltração:**

A perda de carga por infiltração significa o número de vezes em que a câmara foi aberta. É difícil dizer com absoluta certeza, o número de vezes em que a porta de uma câmara frigorífica será aberta durante 24 horas, logo se estima uma carga térmica em função do volume da câmara. O cálculo da carga térmica por infiltração é expresso pela Eq. (2), e foram considerados o volume específico do ar na câmara (v), o volume da câmara (V), o número de vezes em que a porta da câmara é aberta (n) e as entalpias de entrada (h_e) e saída (h_s) do ar. Logo:

$$Q_{infiltração} = \frac{V}{v} \cdot n \cdot (h_e - h_s) \quad (2)$$

$$Q_{infiltração} = \frac{1,0 \text{ m}^3}{\frac{0,90 \text{ m}^3}{\text{kg}}} \cdot 4,5 \cdot (7,416 - (-1,194)) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Q_{infiltração} = 43,05 \frac{\text{kcal}}{24h}$$

A carga térmica do produto é composta pelo calor removido antes e após o congelamento. A quantificação do calor a ser removido do produto estão expressos na Eq. (3).

- **Cálculo para determinação da perda de carga do produto:**

A carga térmica do produto é composta pelo calor removido antes e após o congelamento. A quantificação do calor a ser removido do produto estão expressos na Eq. (3), onde foram considerados o calor específico do produto (c_p), a massa de produto a ser congelada ou resfriada (m) e o diferencial de temperatura (ΔT).

Vamos considerar que o produto será congelado. Consideraremos o congelamento de 1 kg de um produto qualquer que o ponto de congelamento ocorre

em $-2,2^{\circ}\text{C}$, sendo que este processo ocorrerá em duas etapas, antes do congelamento e após o congelamento ($Q_{\text{produto } i}$ e $Q_{\text{produto } f}$). Logo:

$$Q_{\text{produto}} = m \cdot cp \cdot \Delta T \quad (3)$$

Carga antes do congelamento:

$$Q_{\text{produto } i} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{0,91 \text{ kcal}}{\text{kg K}} \cdot (-2,2 - 18)$$

$$Q_{\text{produto } i} = -18,382 \frac{\text{kcal}}{24\text{h}}$$

Carga depois do congelamento:

$$Q_{\text{produto } f} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{0,46 \text{ kcal}}{\text{kg K}} \cdot (-2,2 - 18)$$

$$Q_{\text{produto } f} = -9,292 \frac{\text{kcal}}{24\text{h}}$$

$$Q_{\text{produto total}} = -27,674 \frac{\text{kcal}}{24 \text{ h}}$$

- **Cálculo para determinação das embalagens:**

A embalagem é utilizada nos alimentos com o intuito de protegê-los de agentes contaminantes. Essas embalagens também devem entrar no cálculo de carga térmica, conforme a Eq. (4), onde são considerados o calor específico da embalagem (cp), a massa da embalagem (m) e o diferencial de temperatura (ΔT). Logo,

$$Q_{\text{embalagem}} = m \cdot cp \cdot (\Delta T) \cdot 24\text{h} \quad (4)$$

$$Q_{\text{embalagem}} = 0,1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{kg k}} \cdot (-18 - 25) \cdot 24\text{h}$$

$$Q_{\text{embalagem}} = -103,2 \frac{\text{kcal}}{24 \text{ h}}$$

- **Cálculo para determinação da iluminação:**

Durante o cálculo da carga térmica, a iluminação é um fator de extrema importância, pois quanto maior a intensidade da lâmpada que penetra no interior da câmara, maior será a carga térmica a ser considerada. Para a quantificação do calor a ser removido pela iluminação, usou-se a Eq. (5), onde foram considerados a área da câmara (A) a potência da lâmpada usada (P) e o tempo em que os produtos serão submetidos a iluminação (t). Logo:

$$Q_{iluminação} = A \cdot P \cdot 0,86 \cdot t$$

$$Q_{iluminação} = 1 \left(1,0m^2 \cdot \frac{1,5W}{m^2} \cdot \frac{0,86 \text{ kcal}}{h \cdot w} \cdot 3h \right)$$

$$Q_{iluminação} = 3,87 \frac{\text{kcal}}{24 \text{ h}}$$

- **Cálculo para ocupação:**

O calor proveniente da movimentação de pessoas no interior da câmara é considerado durante o cálculo de carga térmica por ocupação, Eq. (6). Como no caso do nosso módulo na câmara não cabe uma pessoa inteira, vamos considerar que apenas alguns membros da pessoa possam adentrar, como mãos e braços.

$$Q_{pessoa} = n \cdot qe \cdot t$$

$$Q_{pessoa} = 0,5 \cdot \frac{338 \text{ kcal}}{h} \cdot 3h$$

$$Q_{pessoa} = 507 \frac{\text{kcal}}{24 \text{ h}}$$

A Tabela 8 apresenta a carga térmica total a ser considerada na construção do módulo. E a Figura 35 apresenta a porcentagem de cada fator que foi considerado no cálculo de carga térmica. A figura ainda mostra que a maior porcentagem de calor a ser removido está concentrada na embalagem que protege o produto e no próprio produto, respectivamente, enquanto os outros fatores quase não interferem na totalidade da carga.

Tabela 8: Carga térmica.

	Carga Térmica Parcial (kcal/24h)	Porcentagem
Transmissão	32, 967	4,6
Infiltração	43,05	6
Produto	27,674	3,92
Embalagem	103,2	14,3
Iluminação	3,87	0,54
Pessoa	507	70,64
TOTAL	717,761	100

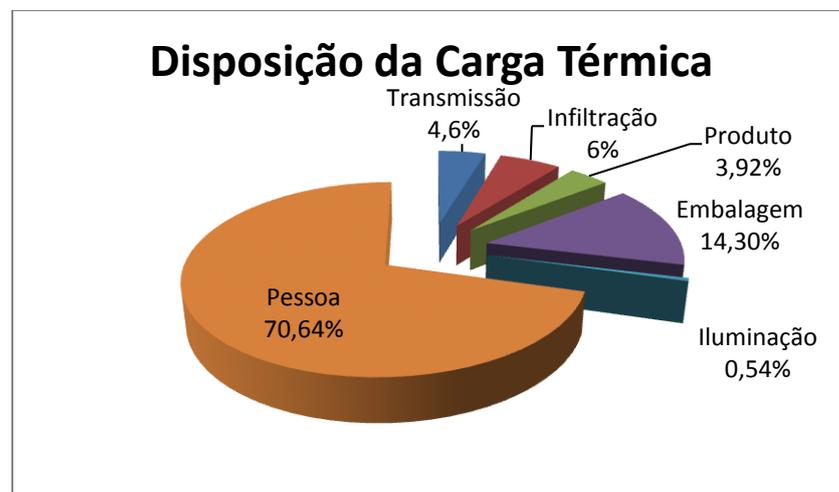


Figura 35: Gráfico de distribuição de carga térmica.

5.2 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS USADOS

O compressor, condensador e evaporador que foram utilizados foram todos definidos através do cálculo de carga térmica. A eficiência desses equipamentos em retirar calor teria que ser compatível com a carga térmica total, ou seja, o calor total a ser retirado durante o processo de refrigeração.

Como no projeto dependeu-se de doações de equipamentos, optou-se pela escolha de um compressor Embraco usado em uma geladeira da marca Consul com capacidade de 280 litros, com especificações compatíveis com a carga térmica, como mostra a Tabela 9 mostra essas especificações.

A Figura 36 mostra o ciclo de refrigeração proposto pelo módulo no diagrama de pressão por entalpia do fluido refrigerante R 401a, que foi usado como substituto do R-12. Na linha de alta pressão, aproximadamente 150 psi, encontram-se o

condensador e na linhas de baixa pressão 20 psi encontra-se o evaporador e como elementos que irão fazer com que ocorra a mudança de pressão, estão também presentes no diagrama o compressor e o dispositivo de expansão usado no módulo.

Tabela 9: Especificações técnicas do compressor.

Aplicação	
Temperatura ambiente máxima	32°C
Dispositivo de expansão	Tubo Capilar
Resfriamento	Estático
Dados Mecânicos	
Lista de engenharia	513200888
Torque de partida	Baixo torque de partida
Diâmetro do pistão	22,50 mm
Curso	8,50 mm
Peso	11,42 Kg

Fonte: Adaptado de Embraco.

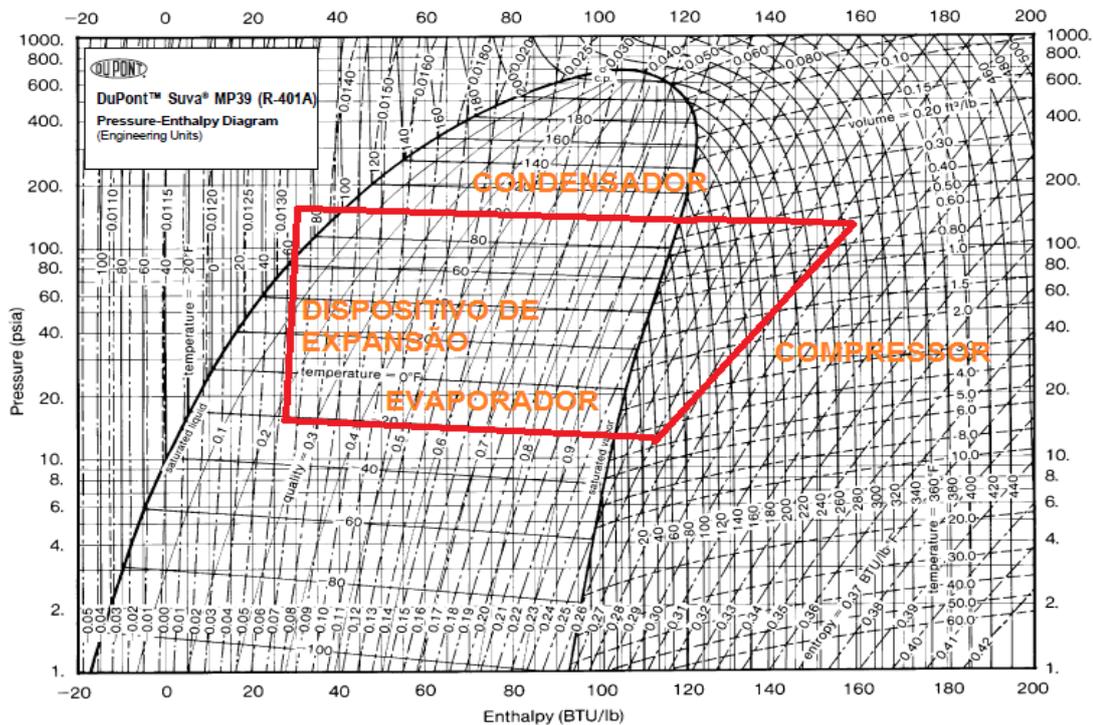


Figura 36: Circuito de Refrigeração do módulo disposto no gráfico pressão por entalpia.

5.3 FLUIDO REFRIGERANTE R-401a.

Ainda durante a construção do módulo teve uma mudança no tipo de fluido refrigerante usado originalmente no refrigerador. Com a progressiva substituição de

fluidos refrigerantes no mercado da refrigeração comercial e industrial, o R-12 teve seu uso proibido por órgãos reguladores, devido a sua toxicidade a pessoas e ao meio ambiente. Com a eliminação dos CFC's, a indústria de Refrigeração se deparou com a necessidade de substituir os antigos fluidos refrigerantes usados, que eram prejudiciais a camada de ozônio, por fluidos alternativos (como o R-401a), que proporcionam igual ou melhor performance, a custos competitivos e que são ambientalmente aceitáveis, (DuPont, 2015). O uso do R-12 foi permitido até o ano de 2000, atualmente, ele foi substituído pelo fluido refrigerante R-401a, que foi utilizado no sistema de refrigeração do presente trabalho. A Tabela 10 apresenta as vantagens teóricas que o R-401a oferece em relação ao R12, sendo que as capacidades de refrigeração de ambas são relativas.

Tabela 10: Comparação do ciclo teórico CFC-12 com R-401a.

CFC 12	R-401^a	
1,00	1,09	Capacidade de refrigeração
1,72	1,58	Coeficiente de Performance
10,19	13,03	Taxa de Compressão
<u>COMPRESSOR</u>		
130	149	Temperatura de descarga, °C
266	300	Temperatura de descarga, °F
1344	1662	Pressão de descarga, Kpa
195	241	Pressão de descarga, psia

O R-401a trabalha dentro da faixa de operação do R-12, apresentando melhor capacidade de refrigeração quando a temperatura de evaporação estiver acima de -26°C. Além de não ser inflável, em caso de Retrofit não será necessária a troca do óleo lubrificante do compressor e a troca do dispositivo de expansão (DuPont, 2015), como ocorreu no módulo ao se fazer a substituição dos refrigerantes. O R-401a apresenta-se ligeiramente uma maior eficiência na capacidade de refrigeração, com um coeficiente de desempenho equivalente ao R-12. Muitos equipamentos de refrigeração estão sendo vertidos para o R-401a, que lhes proporciona uma redução no consumo de energia e aumento na capacidade do equipamento.

6. CONCLUSÃO

O objetivo geral proposto pelo trabalho foi alcançado, a construção de um módulo prático para estudos de refrigeração mecânica por compressão mostrou-se uma ferramenta importante para que os alunos de Engenharia de Alimentos da UTFPR-CM possam aprimorar seus conhecimentos, tornando-se profissionais aptos e proativos quando ingressarem no mercado de trabalho, mais especificamente no setor de refrigeração industrial.

Com o levantamento dos modelos de bancadas já existentes nas universidades e em algumas empresas, pode-se ter uma noção de custos para a montagem de módulos e quanto tudo isso custaria para a universidade caso a mesma quisesse adquirir um módulo desses já prontos. Além de proporcionar a acadêmica que desenvolveu o projeto um profundo conhecimento na área da refrigeração industrial.

Durante a pesquisa de campo, o projeto e o desenvolvimento do módulo, uma das maiores dificuldades foi a disponibilidade no mercado de fluido refrigerante, já que a geladeira usada no projeto é muito antiga e a Consul não fabrica mais esse tipo de refrigerador. Então, foi necessário usar outro tipo de fluido refrigerante que seria compatível com o óleo lubrificante do compressor, no caso o R-401a.

Outra dificuldade encontrada foi em relação a situação do refrigerador usado no projeto. Por ser um equipamento muito antigo, encontra-se em alguns pontos oxidado, o que dificultaria durante o processo de refrigeração.

A utilização do módulo para sistemas de refrigeração mecânica por compressão, junto ao desenvolvimento do projeto e de sua construção, mostrou-se uma ferramenta de ótimo entendimento aos alunos do curso de Engenharia de Alimentos da UTFPR de Campo Mourão. Sendo que uma de suas maiores dificuldades era a interpretação de quais eram os componentes do ciclo de refrigeração na prática.

Logo as práticas realizadas no módulo por futuros alunos da UTFPR será de grande ajuda na formação de profissionais mais capacitados a área, através do estudo de fenômenos físicos que envolvem o processo de refrigeração, permitindo que esses alunos dominem o assunto em questão.

7. SUGESTÕES

Para projetos futuros com o módulo recomenda-se que os alunos façam a utilização de outros equipamentos como: compressores herméticos e semi-herméticos, utilização de ventiladores para fazer a circulação forçada do ar no evaporador e no compressor. Também a utilização de outros tipos de trocadores de calor (evaporadores e condensadores) que ajudariam a melhorar a performance do equipamento.

A utilização de termômetros nas linhas de alta e baixa pressão, para se fazer a medição das temperaturas nesses pontos.

Estudos no sistema de refrigeração quanto ao consumo de energia elétrica em relação aos sistemas mais atuais que se encontram no mercado. Além da utilização de outras fontes de energia para avaliar o desempenho do sistema, assim como a sua viabilidade econômica.

A utilização de diferentes isolantes, para que se possa melhorar a capacidade de refrigeração do módulo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIERS, Anderson; REOLON. Evandro Augusto, MARCANTE, Luan Gregory. **Bancada didática para comprar os efeitos de diferentes compressores e dispositivos de expansão de um sistema de refrigeração.**2011. 42 p. Trabalho de Diplomação (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

CAMPO MOURÃO, Prefeitura Municipal. **Clima.** 2015. Disponível em: <<http://campomourao.pr.gov.br/cidade/clima.php>>. Acesso em 10 de junho de 2015.

CASTRO, J. **Apostila: Refrigeração.** Curso de Engenharia Mecânica, Univasf. Petrolina, PE. Pernambuco, 2005.

CONSTRUCLIMA. **Tabela de condutividade térmica dos materiais.** Disponível em: <<http://www.construclima.com.br/pdf/02.pdf>>. Acesso em 13 de junho de 2015.

COSTA, E. C.; **Refrigeração.** Editora Edgard Bülcher Ltda. São Paulo, 1982.

DOSSAT, Roy J. **Princípios da refrigeração:** teoria, prática, exemplos, problemas, soluções. São Paulo: Hemus 1999. 884 p.

DuPont, Suava® Fluidos Refrigerantes. **Linha Suva® de Fluidos Refrigerantes.** Disponível em:<http://www2.dupont.com/Refrigerants/pt_BR/assets/downloads/guia_fluidos.pdf> . Acesso em 15 de junho de 2015.

ESTUPIÑAN, E. A.; SANTOS, I. F. **Modelling Hermetic Compressors Using Different Constraint Equations to Accommodate Multibody Dynamics and Hydrodynamic Lubrication.**Technical University of Denmark – Departament of Mechanical Engineering Nils KoppelsAllé.Lyngby, Dinamarca. 2009.

FERRAZ, Fábio. **Apostila de refrigeração.** Bahia: CEFET, 2008. 74 p.

FERRAZ, Fábio; GOMES, Marcio. **O histórico da Refrigeração: Fluidos Refrigerantes Ozônio/Destruição Sistemas de Refrigeração Componentes de um Sistema de Refrigeração**, Bahia: CEFET, 2008. 74 p.

GERNER, V. R.; Coeficiente Global de Transmissão de Calor (U). Senai. 2012. Disponível em: <http://www.sp.senai.br/portal/refrigeracao/conteudo/coficienteglobaltransmiss%C3%A3ocalor_u.pdf>. Acesso em 13 de junho de 2015.

GOMES JR, Edson. **Automação do painel de controle de um sistema de refrigeração industrial**.2009. 35 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

HALLIDAY,D.,RESNICK,R.,WALKER,J. **Física** - Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.

MARTINELLI Jr., L. C.;**Refrigeração e ar condicionado, Parte II: Ciclo de Compressão, Balanço de Energia Trocadores de Calor, Dispositivos de Expansão** – DeTEC, 2009. Disponível em <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/imagens/b/bb/RAC_II.pdf> acesso em 17 de novembro de 2014.

LAUAND, Carlos Antonio. **Manual Prático de Geladeiras**, Refrigeração Industrial e Domiciliar. São Paulo, Hermus, 1999, 245 p.

LOESCH, Alexandro Vammes; SANTOS, Andrei dos; GARCIA, Marciano Emanuel. **Bancada didática para testes de falhas de sistemas de refrigeração**.2012. 72 p. Trabalho de Diplomação (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2012.

MENEGHETTI, C. R.; **Estratégias de controle em câmara de refrigeração por compressão de vapor**. Campinas, 2009. Dissertação de mestrado, Universidade

Estadual de Campinas.

PEREIRA, M. V. A.; **Análise exergética experimental de uma unidade de refrigeração por absorção de 5 TR movida a gás liquefeito de petróleo (GLP) e/ou gases de exaustão.** Paraná, 2006. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.

QUEIROZ, Márcio Henrique Bastos. **Bancada didática para sistema de refrigeração por absorção.** 2013. 33 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2013.

REFRIGERAÇÃO, Portal da. **História da refrigeração.** 2011. Disponível em: <www.refrigeracao.net>. Acesso em 02 de abril de 2015.

REFRIGERAÇÃO, Club da. **Sistema de Refrigeração.** 2015. Disponível em: <www.clubdarefrigeracao.com.br>. Acesso em 18 de março de 2015.

SILVA, F. V. DA.; **Comparação do desempenho de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, controlado a diferentes modos de controle.** Campinas, 2003. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.

SILVA, J.C, CASTRO, A.C. **Refrigeração e climatização para técnicos e engenheiros** – Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda. 2007.

SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização.** São Paulo: Artliber, 2004. 219 p.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M.; **Refrigeração Industrial.** Editora Edgard Bülcher Ltda. São Paulo, 2002.

STOECKER, W. F., JONES, J, W.; **Refrigeração e Ar Condicionado.** Editora Mcgraw-Hill do Brasil. São Paulo, 1985.

VARGAS, L. C. P.; BARBOSA, C. R. F.; FONTES, F. A. O.; ALMEIDA, I. M.G.; **Projeto do ejetor de um sistema de refrigeração por jato compressão de vapor. IV Congresso de pesquisa e inovação da rede norte e nordeste de educação tecnológica.** Belém- PA, 2009. Disponível em: <<http://www.connepi2009.ifpa.edu.br/>>. Acesso em 02 de abril de 2015.

VARGAS, L. C. P.; **Análise teórico-experimental do coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por jato-compressão.** Natal, 2010. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

**ANEXO A – MANUAL TEÓRICO E DE PRÁTICAS NO MÓDULO DE
REFRIGERAÇÃO MECÂNICA POR COMPRESSÃO**

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CAMPO MOURÃO - PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**MANUAL TEÓRICO E DE PRÁTICAS NO MÓDULO DE REFRIGERAÇÃO
MECÂNICA POR COMPRESSÃO**

Aluna: Carolina de Campos

Professora orientadora: Dr^a. Karla Silva

CAMPO MOURÃO

2015

1. INTRODUÇÃO

A refrigeração é determinante na indústria de alimentos tanto como método de processamento, como tratamento e, principalmente, na manutenção da vida útil de diversos gêneros alimentícios. Isso faz com que seja imprescindível ao engenheiro de alimentos a união dos conhecimentos tecnológicos dos alimentos com a sistemática de funcionamento do sistema refrigerado.

Desde as civilizações mais antigas o homem busca uma forma de conservar os alimentos a baixas temperaturas. Um dos métodos mais antigos foi o uso de gelo natural coletados das montanhas e encostas de rios (ADIERS *et al.*, 2011). A dificuldade de obtenção do gelo artificial e nos primeiros sistemas de refrigeração fechados (LOESCH *et al.*, 2012).

Oliver Evans foi idealizador da união das técnicas de evaporação e compressão como criação de um sistema cíclico, mas a primeira máquina cíclica de refrigeração foi elaborada e patenteada por Jacob Perkins, que operava segundo princípio de compressão de vapor, ilustrado na figura 1 (ADIERS *et al.*, 2011). A partir daí, surgiram várias propostas de disposição de equipamentos em operação que possibilitassem um ciclo termodinâmico para refrigeração.

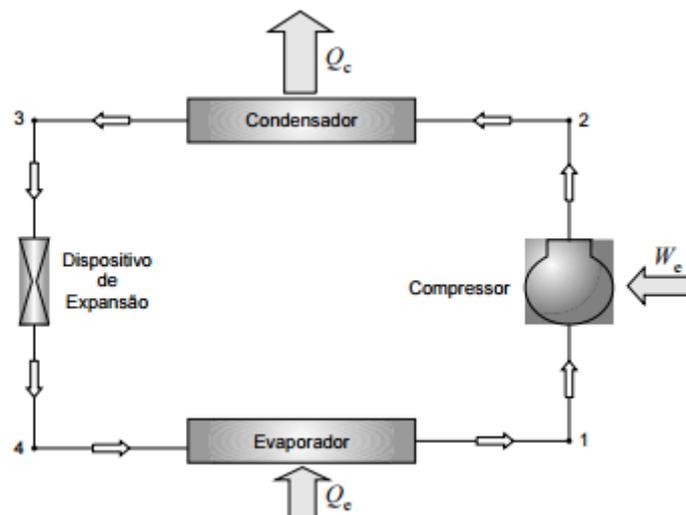


Figura 1: Componentes básicos de um sistema de refrigeração.

Fonte: Pereira, 2006.

No dispositivo proposto por Perkins, um fluido volátil (fluido refrigerante) ao evaporar irá retirar calor do ambiente ou objeto desejado, devido ao contato térmico

com o evaporador, localizado dentro de uma câmara. O vapor é então succionado pelo compressor tendo sua pressão elevada a pressão de condensação, aonde o fluido irá rejeitará calor e condensará. Após a pressão do fluido será reduzida ao passar por uma restrição (válvula de retenção ou tubo capilar) sendo conduzido novamente ao evaporador (PEREIRA, 2006).

Na indústria de alimentos, esses sistemas frigoríficos têm como objetivo fornecer as temperaturas necessárias às etapas de estocagem dos produtos.

Existem três tipos de sistemas de refrigeração, sendo: sistemas por absorção, os sistemas por efeitos termoelétricos e os sistemas por compressão de vapor. Este último é o mais utilizado na refrigeração doméstica e comercial. O objetivo deste módulo e do manual é expor os alunos da disciplina de Refrigeração Industrial à praticas e aplicação dos conhecimentos adquiridos em sala.

2. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

2.1 Ciclo Teórico de Refrigeração por Compressão de Vapor

Um ciclo teórico de refrigeração é constituído da aspiração de fluido refrigerante, como vapor saturado, do evaporador, sua compressão, seguida da condensação do fluido no condensador. Em seguida, o refrigerante passa pelo controle de líquido como saturado que irá servir de alimentação novamente pelo evaporador a baixa pressão. O ciclo ideal de refrigeração está representado pela figura 1.

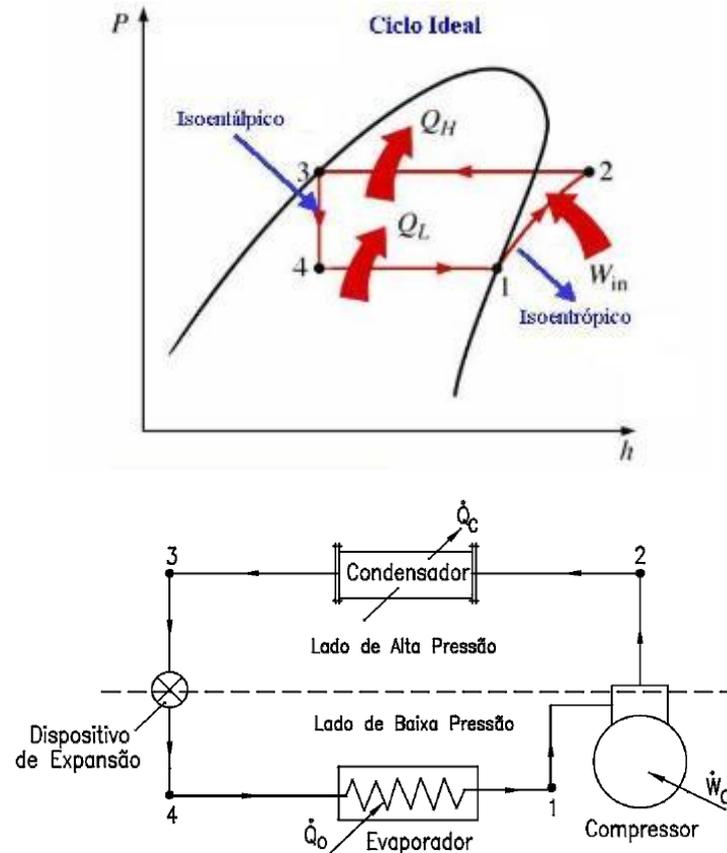


Figura 1: Representação e esquema de um ciclo ideal de refrigeração.

Fonte: Vargas, 2010.

Portanto, tem-se:

- A evaporação do fluido refrigerante no lado de baixa pressão, entre os pontos (4) e (1), um processo que ocorre no evaporador a uma pressão P_0 . O fluido, que está em estado líquido, recebe calor do ambiente onde está localizado o evaporador, passando então para o estado vapor, onde o efeito frigorífico por Kg de refrigerante é dado por:

$$Q_0 = h_1 - h_4 \quad (1)$$

- A compressão do vapor aspirado do evaporador é feita no compressor, entre os pontos (1) e (2). Essa compressão é isoentrópica e o calor de compressão por Kg de refrigerante é dado por:

$$Q = h_2 - h_1 \quad (2)$$

- No condensador ocorre a retirada de calor do fluido refrigerante, agora no estado vapor superaquecido (2) à pressão de descarga do compressor (3) até que passe ao estado líquido, na linha de alta pressão. O calor retirado do refrigerante por Kg é dado por:

$$Q_c = h_2 - h_3 \quad (3)$$

- a expansão do fluido refrigerante, em estado líquido, nos pontos (3) e (4), ocorre com o objetivo de reduzir sua pressão. esse é uma fenômeno isoentrópico, portanto:

$$h_4 = h_3 \quad (4)$$

2.2 Ciclo Real de Refrigeração por Compressão de Vapor

As principais diferenças entre um ciclo real de refrigeração e um ciclo teórico estão mostradas na figura 2, que em seguida serão descritas. Sabe-se que no escoamento de um fluido ocorre uma queda de pressão provocada pelo atrito do fluido contra as paredes da tubulação. Isso é o que ocorre na linha de sucção, assim como no evaporador e no condensador. Essas perdas de carga ΔP_d e ΔP_s .

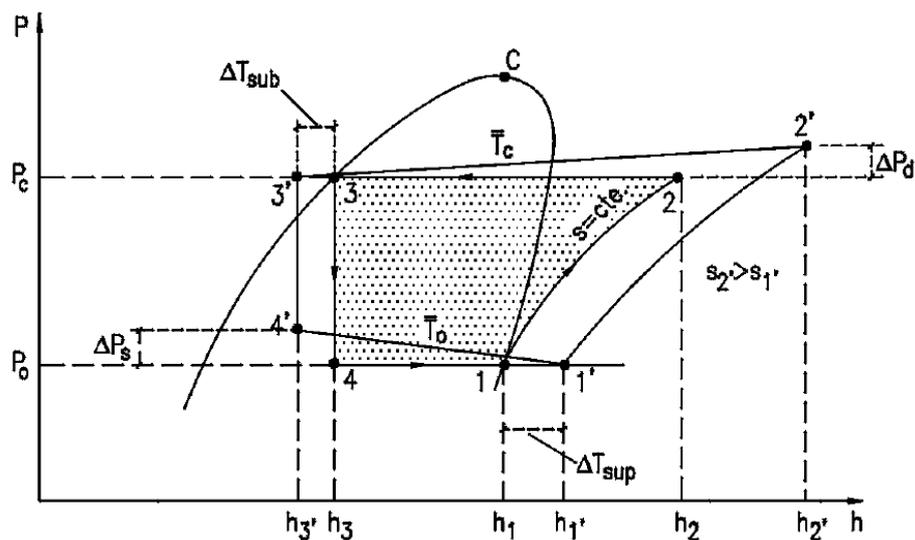


Figura 2: Diferenças entre o ciclo real e o ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.

Fonte: Vargas, 2010.

A tubulação de descarga permite uma troca térmica e perda de pressão tanto na linha de descarga como no condensador, válvulas, controles, entre outros, este processo localiza-se entre os pontos 2' e 3'. O mesmo ocorre na linha de sucção entre os pontos 4' e 1'. Também ocorre um deslocamento da linha entre os pontos 3 e 4, devido ao atrito na válvula de expansão, dando origem a linha 3' e 4'.

Outra diferença importante é o sub-resfriamento do fluido refrigerante na saída do condensador e o superaquecimento na sucção do compressor, sendo que o superaquecimento tem como finalidade garantir que não entre refrigerante líquido no compressor. Outra diferença é em relação ao processo de compressão, que no ciclo teórico ele é isentrópico ($S_1 = S_2$), e o ciclo real é politrópico ($S_1 \neq S_2$).

2.3 Balanço de Energia para o Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor.

2.3.1 Capacidade Frigorífica

A capacidade frigorífica de um ciclo de refrigeração é a quantidade de calor absorvido pelo evaporador, por unidade de tempo, durante o processo.

Considerações: o ciclo opera em regime permanente, desprezar as variações de energia cinética e potencial (ΔE_c e ΔE_p), a Primeira Lei da Termodinâmica.

O processo de transferência de calor que ocorre no evaporador está indicado na figura 3. Através do volume de controle indicado na figura tem-se a Eq. (5).

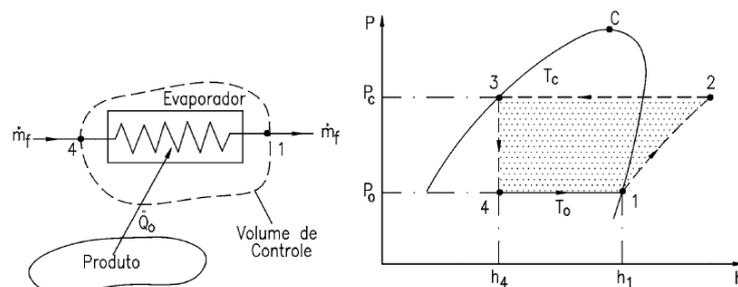


Figura 3: Processo de transferência de calor do evaporador.

Fonte: Vargas, 2010.

Logo tem-se que,

$$Q = \dot{m}_f (h_1 - h_2) \quad (5)$$

Também é através da Eq. (5) que pode-se determinar a quantidade de fluido refrigerante a ser utilizada durante o processo de refrigeração.

A quantidade de calor retirado do meio a ser refrigerado por unidade de massa de refrigerante no evaporador é conhecida como Efeito Frigorífico (EF), sendo ele quem pode definir o tipo de fluido refrigerante que poderá ser usado no ciclo de refrigeração, Eq. (6).

$$EF = h_1 - h_4 \quad (6)$$

2.3.2 Potência do Compressor

É a quantidade de energia, por unidade de tempo, fornecida ao fluido refrigerante pelo compressor, para que se possa elevar a pressão, quantidade suficiente para que se alcance a pressão de condensação, conforme a figura 4.

Considerações: processo adiabático e reversível, não há perda de carga pelo atrito, Primeira Lei da Termodinâmica, regime permanente e desprezando as variações de energia (ΔE_c e ΔE_p). Tem-se a Eq. (7) do volume de controle.

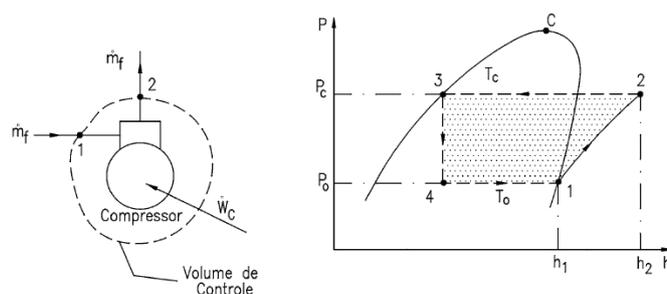


Figura 4: processo de compressão adiabática reversível no compressor.

Fonte: Vargas, 2010.

$$\dot{W}_c = \dot{m}_f (h_2 - h_1) \quad (7)$$

2.3.3 Calor Rejeitado pelo Condensador

Após o calor do meio a ser refrigerado ser absorvido pelo fluido refrigerante no evaporador, ele irá rejeitá-lo no meio de resfriamento do condensador, podendo ser água ou ar. A quantidade de calor a ser rejeitada, por unidade de massa de refrigerante, pode ser determinada através do volume de controle, figura 5 e pela Eq. (8).

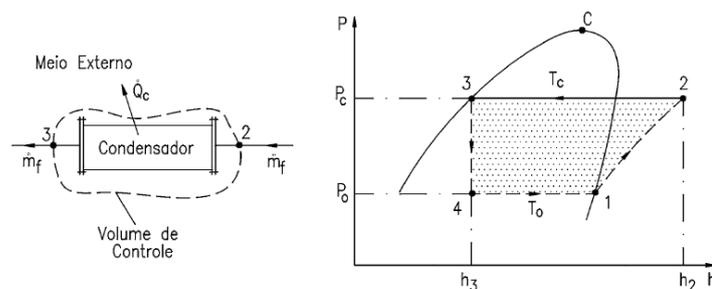


Figura 5: Processo de rejeição de calor pelo condensador.
Fonte: Vargas, 2010.

$$Q_c = \dot{m}_f (h_2 - h_3) \quad (8)$$

Através da Eq. (8) pode-se determinar o tipo de condensador a ser utilizado no sistema de refrigeração, o qual irá depender da carga térmica desse sistema e a potência de acionamento do compressor.

2.3.4 Dispositivo de Expansão

Esses dispositivos podem ser de vários tipos, entre eles conforme ilustrado no módulo, o tubo capilar. A figura 6 mostra o volume de controle de um dispositivo de expansão. Pela Eq. (4), vê-se que não há absorção ou rejeição de calor e nem energia operando neste dispositivo.

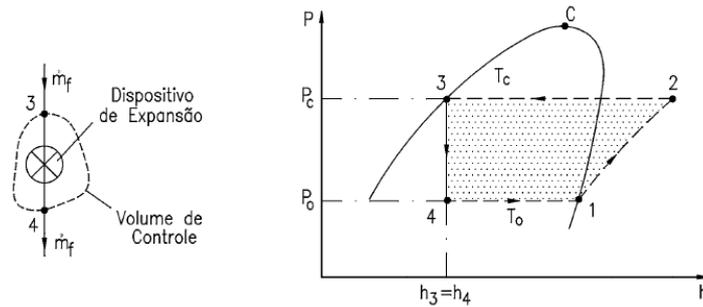


Figura 6: Dispositivo de Expansão

Fonte: Vargas, 2010.

2.3.5 Coeficiente de Performance

Também conhecido como Coeficiente de Desempenho, é um dos parâmetros de importância durante as análises de instalação de um sistema de refrigeração. O COP é definido por:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energia Util}}{\text{Energia Gasta}} = \frac{Q}{W} \quad (9)$$

3. CARGA TÉRMICA

A carga térmica é utilizada para definir a capacidade frigorífica do sistema de refrigeração, sendo a soma do calor que se desprende de várias fontes. Todo projeto frigorífico fundamenta-se na carga térmica calculada. Essa fonte se divide em quatro cargas separadas:

- Carga térmica devido a transmissão de calor das paredes, pisos e teto;
- Carga térmica devido aos produtos contidos na câmara frigorífica;
- Carga térmica devido à infiltração de ar externo quanto à abertura e fechamento de portas de acesso a câmara;
- Carga térmica devido a luzes, pessoas e outras fontes de calor no interior da câmara.

Algumas das considerações a serem tomadas durante o cálculo da carga térmica são:

- Em relação ao clima: as temperaturas médias e máximas do mês mais quente do ano, a umidade relativa média do ambiente;
- Disponibilidade de água e energia;
- Em relação ao produto: qual o tipo e quantidade de produtos, tipo de embalagem, a movimentação desses produtos diariamente dentro da câmara;
- Em relação as instalações: localização e dimensões;
- Das condições do local, o projeto a ser executado;

Para se fazer o cálculo de carga térmica usa-se as equações:

- *Carga térmica por transmissão*

$$Q_{\text{transmissão}} = U.A.(\Delta T + T_i) \quad (10)$$

Onde:

Q: calor transmitido através das paredes, piso ou teto, kcal/24h

A: área da superfície externa da parede, piso ou teto, m²

U: coeficiente total de transmissão de calor, Kcal/(m.°C.h)

ΔT : Diferença da temperatura externa da câmara frigorífica e da temperatura interna da câmara frigorífica, °C

T_i : acréscimo de temperatura devido à insolação °C, como mostra a tabela 1.

Tabela 1: Insolação para câmaras frias.

Graus Celsius a acrescentar à diferença normal de temperatura usada no cálculo de dispersão para compensar o efeito da irradiação Solar - Não usar em projetos de Condic. Ar				
Superfície	Parede Leste	Parede Sul	Parede Oeste	Teto/Chão
Piso escuro, ardósia, superfícies escuras	4,5°C	3°C	4,5°C	11°C
Superf. entre o escuro e o claro, madeira, cimento escuro	3,5°C	2°C	3,5°C	8°
Superfícies claras, pedras claras, cimento claro, pintura branca.	2°C	1°C	2°C	5°C

TIPO DE SUPERFÍCIE	ORIENTAÇÃO			
	LESTE	NORTE	OESTE	TELHADO
cor escura (ardósia, asfalto, tinta preta)	5	3	5	11
cor média (madeira, tijolos, cimento, pintura vermelha, cinza ou verde)	4	3	4	8
cor clara (pedras brancas, cimento claro, pintura branca)	2	1	2	5

- *Cálculo da carga térmica por infiltração*

$$Q_i = V_i \times n \times (h_e - h_i) / \varphi \quad (11)$$

Q_i : calor devido à infiltração; kJ/24h

V_i : volume interno da câmara frigorífica;

N : número de aberturas da porta;

h_e : entalpia do ar externo pela carta psicrométrica;

h_i : entalpia do ar interno da câmara frigorífica pela carta psicrométrica;

φ : específico;

- *Cálculo da carga térmica do produto*

$$Q_{\text{produto}} = m \cdot c_p \cdot (\Delta T) \quad (12)$$

Onde:

m : quantidade de produto;

c_p : calor específico do produto;

- *Cálculo da carga térmica da iluminação*

$$Q_{\text{iluminação}} = A \cdot P \cdot 0,86 \cdot t \quad (13)$$

A : área da câmara;

P: potência da lâmpada;

T: tempo;

- *Cálculo da carga térmica por pessoa*

$$Q_{\text{pessoa}} = n \cdot q_e \cdot t \quad (14)$$

Onde:

N: número de pessoas na câmara;

T: tempo que passam por horas;

Q_e: calor equivalente por pessoa, tabela 2;

Tabela 2: Calor de ocupação.

Temperatura da Câmara (°C)	Calor equivalente por pessoa (Kcal/h)
10	181
5	208
0	233
-5	258
-10	279
-15	313
-20	338
-25	358

O cálculo total da carga térmica é dado pela somatória de todas as cargas térmicas: paredes, pisos, teto; pessoas; iluminação; infiltração e produto.

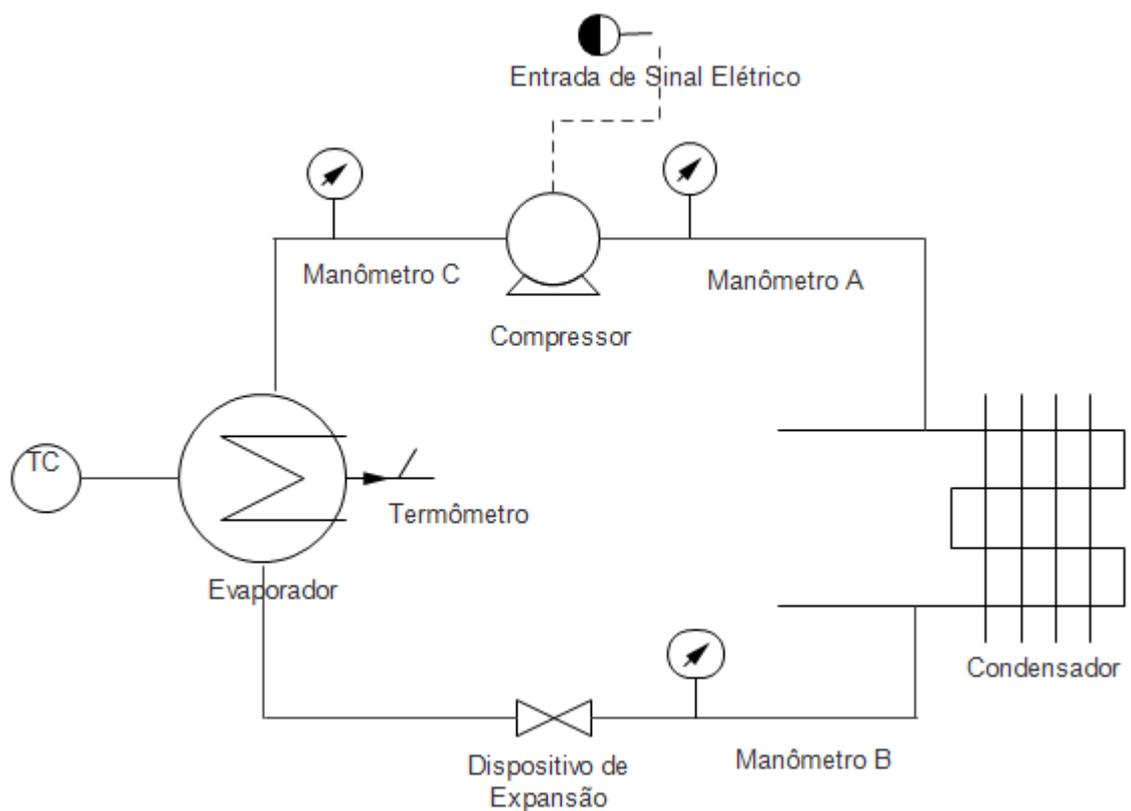
4. PRÁTICAS

REFRIGERAÇÃO

Ciclo Frigorífico por Compressão

Em um ciclo de refrigeração, refrigerante líquido a alta pressão passa através de um tubo capilar que irá reduzir a pressão. O refrigerante, agora a baixa pressão, troca de estado no evaporador, removendo calor do ar circulado.

O vapor formado é aspirado pelo compressor, comprimido e circula no interior de outro trocador de calor (condensador), onde é resfriado e condensado pela passagem de um fluxo de ar. O refrigerante é então conduzido ao tubo capilar, tendo sua pressão novamente reduzida, e o ciclo é repetido.



1) Experimento

Durante a prática os alunos deverão obter os seguintes valores com o sistema instalado no Laboratório de Refrigeração:

- a) Evaporador
 - Pressão

- b) Compressor
 - Voltagem e Amperagem
 - Pressão
- c) Condensador
 - Pressão
- d) Câmara frigorífica
 - temperatura

2) Cálculos:

- a) Assumindo que as pressões permanecem constantes no condensador e evaporador, represente o ciclo de refrigeração nos gráficos T-S e P-H para o R-401a.
- b) Esquematize um ciclo Carnot considerando as mesmas temperaturas de alta e baixa, calculando o rendimento teórico do ciclo.
- c) Calcule da energia consumida pelo motor do compressor.
- d) Calcule a massa de refrigerante necessária para uma tonelada de refrigeração (TR).
- e) Calcule o volume de refrigerante a ser deslocado por TR.
- f) Calcule a potência teórica em kW requerida por kW de capacidade de refrigeração.

3) Relatório:

Este relatório deverá conter os objetivos do experimento, a descrição do sistema frigorífico utilizado, o que foi executado, os cálculos feitos e a discussão dos resultados experimentais e teóricos.

4) Referências:

DOSSAT, R.J. (1980) "Princípios da Refrigeração". Cap. 1,2,3,4,5,6 e 7. Ed. Hermus, São Paulo, SP.

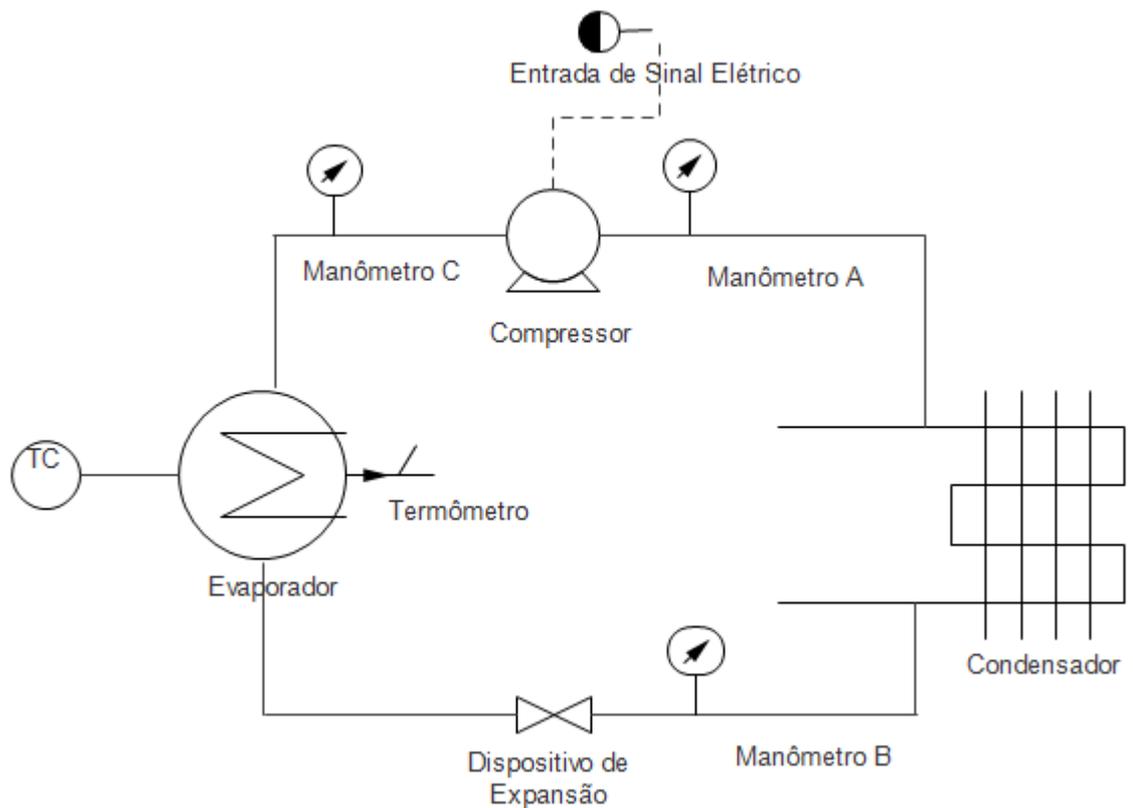
REFRIGERAÇÃO

Estudo de um Equipamento Frigorífico por Compressão

Tratamento do Ar

Utilizando-se do sistema abaixo indicado, estudados algumas condições de operação do equipamento assim como analisado o tratamento de ar.

Desta forma, tem-se no condensador um processo de aquecimento e, no evaporador, o resfriamento de desumidificação do ar circulado. Este fluxo de ar, em contato com as superfícies dos trocadores de calor citados irão trocar calor, cuja intensidade será determinada por meio de propriedades psicrométricas.



1) Experimento:

Obter os seguintes valores durante o experimento com o sistema instalado no Laboratório de Refrigeração:

- a) Temperaturas de bulbo seco e úmido do ar:

- Ambiente;
 - Saída do evaporador;
 - Saída do condensador;
- b) Evaporador:**
- Pressão;
 - Temperatura;
 - Área de troca térmica;
 - Dimensões;
 - Velocidade do ar na área de face;
- c) Condensador:**
- Pressão;
 - Temperatura;
 - Área de troca térmica;
 - Dimensões;
 - Velocidade na área de face;
- d) Compressor:**
- Voltagem e amperagem;
 - Temperatura de sucção e descarga;
- e) Motores:**
- Voltagem;
 - Amperagem;
- 2) Cálculos:**
- a)** Assumindo que as pressões permanecem constantes no condensador e evaporador, represente o ciclo de refrigeração no gráfico P-h para o R-401a;
- b)** Calcule a energia consumida pelos motores do compressor;
- c)** Com o auxílio de um psicrométrico, represente os processos ocorridos com o ar no evaporador e no condensador;
- d)** Determine o fator de derivação e o fator de calor sensível da serpentina;
- e)** Calcule a massa de vapor de refrigerante condensado no evaporador;
- f)** Calcule a carga térmica trocada no evaporador e no condensador quantificando o calor sensível e o calor latente;

- g) Calcule a massa de refrigerante deslocado;
- h) Calcule o coeficiente de performance do sistema;

3) Relatório:

Prepare o relatório indicando os objetivos do experimento, a descrição do sistema frigorífico utilizando, o que foi executado, os cálculos feitos e a discussão dos resultados experimentais e teóricos.

4) Referências:

DOSSAT, R.J. (1980) "Princípios da Refrigeração". Cap. 1,2,3,4,5,6 e 7. Ed. Hermus, São Paulo, SP.

**ANEXO B – QUESTIONÁRIO SOBRE A APLICABILIDADE DO MÓDULO
PRÁTICO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO MECÂNICA
POR COMPRESSÃO.**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Alimentos



**QUESTIONÁRIO SOBRE A APLICABILIDADE DO MÓDULO PRÁTICO
PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO MECÂNICA POR
COMPRESSÃO**

Sobre o módulo de refrigeração visto assinale o que achar mais pertinente:

- () Foi fundamental para compreensão prática de Refrigeração por Compressão;
- () Ajudou na compreensão prática de Refrigeração por Compressão;
- () Motivou o estudo sobre compreensão prática de Refrigeração por Compressão;
- () Desmotivou o estudo sobre compreensão prática de Refrigeração por Compressão;
- () Deve ser adotado na disciplina de Refrigeração Industrial obrigatoriamente;
- () Deve ser adotado na disciplina de Refrigeração Industrial eventualmente;
- () Não deve ser adotado na disciplina de Refrigeração Industrial;

Nota atribuída ao módulo: _____