

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
BRUNO DA SILVA LISBOA**

**UTILIZAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA MELHORIA DO
COEFICIENTE DE PERFORMANCE EM UMA BANCADA DE REFRIGERAÇÃO
POR COMPRESSÃO DE VAPOR**

**CASCABEL
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
BRUNO DA SILVA LISBOA**

**UTILIZAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA MELHORIA DO
COEFICIENTE DE PERFORMANCE EM UMA BANCADA DE REFRIGERAÇÃO
POR COMPRESSÃO DE VAPOR**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Esp. Rogério Luiz Ludgero

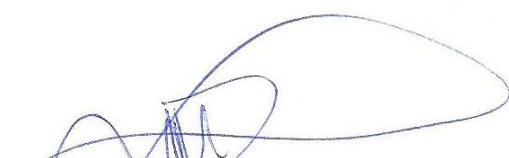
**CASCADEL
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ - FAG
BRUNO DA SILVA LISBOA

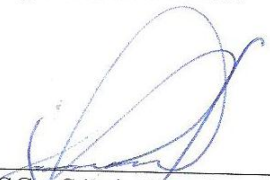
**UTILIZAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA MELHORIA DO
COEFICIENTE DE PERFORMANCE EM UMA BANCADA DE
REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR.**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, da FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Rogério Luiz Ludgero.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof^º Rogério Luiz Ludgero
Faculdade Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico



Avaliador Prof^º. MScs. Sérgio Henrique Rodrigues Mota
Faculdade Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico



Avaliador Prof^º Me. Roberson Roberto Parizotto
Faculdade Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 04 de Dezembro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e minha namorada,
pelo amor infinito e compreensão, fontes de minha extrema motivação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela força divina em minha vida.

A minha família por entender minha ausência diária durante esta longa caminhada.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo, identificar se possui uma melhoria significativa no coeficiente de performance de um sistema de refrigeração por compressão à vapor, através do uso de um trocador de calor. Este sistema consiste em estudar o comportamento de um sistema de refrigeração que foi instalado um trocador de calor conhecido como condensador refrigerado a água, localizado no sistema de refrigeração antes do condensador refrigerado a ar, utilizado convencionalmente para mudar o estado do fluido refrigerante e por consequência reduzir também a temperatura do mesmo. No entanto se consideramos o uso deste trocador de calor refrigerado a água, é cabível considerar um possível aumento de rendimento do sistema de refrigeração devido a capacidade de troca de calor que a água tem em relação ao ar, e ainda, poder aquecer uma determinada quantidade de água que poderá ser usada para muitos fins, como por exemplo, aquecer a água de entrada de uma caldeira. Por outro lado, este sistema precisa de água para seu devido funcionamento, o que hoje é um recurso natural que é limitado e essencial para a vida do ser humano. No Centro Universitário Assis Gurgacz foi realizado um comparativo em um sistema de refrigeração por compressão de vapor no qual o objetivo foi identificar se possui uma melhoria significativa no coeficiente de performance do equipamento, e através das medições que foram realizadas antes e após o trocador de calor refrigerado a água no sistema de refrigeração por compressão a vapor, no laboratório de refrigeração, foi possível identificar das medições realizadas e determinar através dos cálculos o coeficiente de performance do sistema de refrigeração, antes e a após o uso do trocador de calor com água. Através dos resultados obtidos foi possível constatar que há um aumento no coeficiente de performance do equipamento utilizando um trocador de calor refrigerado a água em relação ao equipamento utilizando um trocador de calor refrigerado a ar.

Palavras chave: Refrigeração, Trocador de calor e Rendimento.

ABSTRACT

This assignment aims to identify a significant improvement in the performance coefficient of a refrigeration system by steam compression, through the use of a heat exchanger. This system consists of studying the behavior of a refrigeration system that has been installed a heat exchanger known as a water cooled condenser conventionally used to change the state of the refrigerant and consequently also reduce the temperature of it. However, if we consider the use of this water-cooled heat exchanger, it is possible to consider a possible increase in the efficiency of the cooling system due to the heat exchange capacity of the water in relation to the air, and to be able to heat a certain quantity of water that can be used for many purposes, such as heating the incoming water of a boiler. On the other hand, this system needs water for its proper functioning, which today is a natural resource that is limited and essential to the life of the human being. At the Assis Gurgacz University Center, a comparative study was carried out in a steam compression refrigeration system in which the objective was to identify if it had a significant improvement in the equipment performance coefficient and through the measurements that were performed before and after the heat exchanger water cooled in the refrigeration system by means of compression in the refrigeration laboratory, it was possible to identify the measurements carried out and to determine through the calculations the coefficient of performance of the refrigeration system, before and after the use of the heat exchanger with water. Through the results obtained it was possible to verify that there is an increase in the performance coefficient of the equipment using a water cooled heat exchanger in relation to the equipment using an air cooled heat exchanger.

Key words: Refrigeration, Heat exchanger and proceeds.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do fluido refrigerante no condensador	45
Tabela 2 – Entalpia de entrada do condensador.....	46
Tabela 3 – Entalpia de saída do condensador, estado 3.....	46
Tabela 4 – Interpolação da entalpia do estado 1 – Entrada Compressor.....	47
Tabela 5 – Interpolação da entalpia do estado 2 – Saída Compressor.....	47
Tabela 6 – Interpolação da entalpia do Condensador.....	48
Tabela 7 – Interpolação da entalpia da entrada do compressor.....	49
Tabela 8 – Interpolação da entalpia de saída do condensador.....	49
Tabela 9 – Tabela dos estados termodinâmicos sem o trocador de calor.....	49
Tabela 10 – Tabela dos estados termodinâmicos com o uso do trocador de calor.....	50

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Princípio da conservação de energia.....	18
Equação 2 – Definição de trabalho.....	18
Equação 3 – Equação da entalpia.....	19
Equação 4 – Equação da entalpia por unidade de massa.....	19
Equação 5 – Equação da continuidade.....	19
Equação 6 – Equação da energia.....	19
Equação 7 – Simplificação da equação da energia.....	19
Equação 8 – Equação calor recebido.....	23
Equação 9 – Equação fluxo de calor do evaporador.....	25
Equação 10 – Equação trabalho do compressor.....	30
Equação 11 – Equação do cálculo do coeficiente de desempenho.....	34
Equação 12 – Equação do coeficiente de performance real.....	34
Equação 13 – Equação da interpolação.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de refrigeração baseado em 4 processos.....	20
Figura 2 - Ciclo de refrigeração.....	20
Figura 3 - Bancada do sistema de refrigeração da FAG.....	21
Figura 4 - Condensador Refrigerado a Ar.....	22
Figura 5 - Trocador de calor modelo duplo tubo.....	23
Figura 6 - Evaporador de resfriamento de ar.....	24
Figura 7 - Trocador de calor casco tubo.....	25
Figura 8 - Trocador de calor de placas.....	26
Figura 9 - Compressores de Refrigeração.....	27
Figura 10 - Compressor Alternativo.....	27
Figura 11 - Compressor Rotativo Alternativo.....	28
Figura 12 - Compressor rotativo de palhetas.....	28
Figura 13 - Compressor centrífugo.....	29
Figura 14 - Compressor scroll.....	29
Figura 15 - Válvula de expansão manual.....	31
Figura 16 - Válvula de expansão automática.....	31
Figura 17 - Válvula Elétrica.....	32
Figura 18 - Válvula de expansão termostática.....	32
Figura 19 - Válvula de expansão de boia.....	33
Figura 20 - Tanque de líquido refrigerante.....	35
Figura 21 - Filtro secador do sistema de refrigeração.....	36
Figura 22 - Bujão de fluido refrigerante R22.....	36
Figura 23 - Trocador de calor refrigerado a água em funcionamento.....	37
Figura 24 - Imagem das mangueiras instaladas no trocador de calor.....	38
Figura 25 - Representatividade do fluxo paralelo e contracorrente.....	38
Figura 26 - Identificação da Bomba de água.....	39
Figura 27 - Foto da identificação do compressor.....	40
Figura 28 - Foto da especificação do tanque de líquido.....	40
Figura 29 - Filtro secador do sistema de refrigeração.....	41
Figura 30 - Interface homem máquina montado com controlador digital de temperatura.....	43
Figura 31 - Recipiente de água e bomba d`água.....	44
Figura 32 - Pressão de alta do sistema.....	44

Figura 33 - Pressão de baixa do sistema de refrigeração.....	45
Figura 34 - Ciclo real do comparativo dos trocadores de calor.....	47
Figura 35 - Interface homem máquina sistema funcionando com o trocador de calor.....	48
Figura 36 - Interface homem máquina sistema funcionando com o trocador de calor.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1.1 CONCEITOS BÁSICOS DA TERMODINÂMICA	17
2.1.2 REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR.	19
2.1.3 CONDENSADORES.....	21
2.1.4 EVAPORADOR	24
2.1.5 TROCADORES DE CALOR	25
2.1.7 VÁLVULAS DE EXPANSÃO.....	30
2.1.8 RENDIMENTO	33
2.1.9 TANQUE DE LÍQUIDO	35
2.1.10 FILTRO SECADOR COM NÚCLEO SÓLIDO.....	35
2.1.11 FLUÍDO REFRIGERANTE	36
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 MATERIAIS.....	37
3.2 FASES DA PESQUISA	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
5.1 TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

Atualmente com o desenvolvimento econômico acelerado, as indústrias das mais diversas áreas de atuação buscam cada vez mais melhorar seus sistemas de refrigeração e também em todos os outros sistemas a fim de proporcionar um aumento na eficiência e eficácia de seus processos e reduzir seus custos.

A indústria do setor frigorífico, tem mudado ao longo dos anos, com o desenvolvimento de componentes como evaporadores, compressores, válvulas, condensadores, e todos os demais, cada vez mais eficientes com relação ao custo benefício do sistema de refrigeração, fazendo com que estes equipamentos entreguem uma maior produção de trabalho e menor consumo energético.

Isso é cada vez mais impulsionado atualmente, principalmente com mudanças não só nos equipamentos, mas também nos operadores, colaboradores e engenheiros que passaram a adotar uma postura de maior cuidado com os equipamentos principalmente com a manutenção desses, para garantir a disponibilidade e confiabilidade do conjunto como um todo.

Esta pesquisa tem relevância para aprimorar um ou mais setores da indústria, seja ela frigorífica, alimentícia ou que necessite de um sistema de refrigeração por compressão de vapor. Além de aprimorar o sistema de refrigeração ela também pode contribuir para outro setor que precise de água aquecida para realizar algum processo.

Ao longo deste trabalho, será descrito os componentes de um sistema de refrigeração, e também será utilizada uma bancada para verificar através de testes e provar através do método científico se irá aumentar ou diminuir a performance do equipamento de refrigeração.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

Calcular o rendimento do sistema de refrigeração antes e após a utilização do trocador de calor.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados de pressão de alta do sistema de refrigeração;
- Coletar dados de pressão de baixa do sistema de refrigeração;

- Instalar os componentes necessários para funcionar o condensador refrigerado a água;
- Calcular a eficiência do sistema atual sem água no regenerador;
- Calcular a eficiência do sistema utilizando água no regenerador;

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o aumento da população brasileira, "conforme estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2050, a população brasileira será de aproximadamente 259,8 milhões de pessoas" (Cerqueira, 2010 - Brasil Escola), portanto é notável também um aumento no consumo de energia elétrica, "a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) informou que o consumo de energia no Brasil em 2017 cresceu 0,8% em relação ao ano anterior" (Polito, R., 2018, p. 1).

Com isso, cada vez mais a sociedade precisará consumir energia elétrica de maneira eficiente, ou seja, utilizar a eficiência energética.

"A Eficiência energética é uma atividade que procura melhorar o uso das fontes de energia. A utilização racional de energia, às vezes chamada simplesmente de eficiência energética, consiste em usar de modo eficiente a energia para se obter um determinado resultado. Por definição, a eficiência energética consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização." (Abesco, 2017, p. 1).

O estudo em questão é um equipamento de refrigeração por compressão de vapor no qual o mesmo funciona através dos seguintes componentes:

Compressor: função principal de pressurizar o fluido refrigerante no sistema, fazendo com que o mesmo circule e troque calor com os outros componentes.

Condensador: tem como função principal "condensar" o fluido refrigerante, ou seja, fazer com que o fluido mude de estado físico de vapor superaquecido para líquido saturado.

Válvula de expansão: é um dispositivo que controla a pressão de fluido refrigerante liberado para o evaporador.

Evaporador: tem como função retirar o calor do ambiente e transmiti-la ao fluido refrigerante e liberar o mesmo para o compressor novamente no estado de vapor saturado. A refrigeração do ar acontece quando o ar entra em contato com a tubulação do fluido refrigerante fazendo uma troca de calor do ar para o fluido refrigerante, refrigerando assim o ar ambiente uma vez que este ar é expelido pelo evaporador.

O componente em estudo é um trocador de calor refrigerado a água, também conhecido como regenerador, que instalado logo após o compressor tem a função de reduzir a temperatura do fluido refrigerante para que o sistema tenha seus possíveis resultados com relação a eficiência energética.

Deve-se considerar que será necessário fazer com que esta água circule por este trocador, necessitando assim de uma bomba de água. Porém em uma indústria que tem caldeira, também possui uma bomba de água, e nesse caso a água de entrada por exemplo, pode ser utilizada para este trocador de calor, o que por sua vez proporcionará um rendimento maior para o equipamento de refrigeração, como também para a caldeira que por sua vez precisa de água quente.

O trabalho tem o intuito de promover melhorias inicialmente na bancada de refrigeração, e depois se caso for viável economicamente dentro das indústrias, neste contexto dessas melhorias podemos destacar a economia de energia elétrica, que não só beneficiara a própria indústria, mas também o meio onde está inserida.

No contexto acadêmico traz um olhar para esta problemática, fazendo com que gere novas produções científicas pensando na economia não só em eficiência energética como também financeira.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Em virtude do equipamento de refrigeração por compressão de vapor apresentar um considerável rendimento, e cabendo a possibilidade de poder aumentar esse coeficiente, deve ser realizado uma análise do equipamento em dois ângulos diferentes para verificar se é possível a utilização da substituição do condensador refrigerado a ar pelo condensador refrigerado a água.

O primeiro ponto a ser analisado é a vida útil do equipamento de refrigeração, pois uma vez que o equipamento esteja no final de sua vida útil, não se torna vantajoso fazer este tipo de investimento.

O segundo ponto para análise crítica é o saber quantificar o tamanho do trocador de calor a ser utilizado em relação ao equipamento de refrigeração, pois uma vez que o condensador não atinja sua capacidade mínima necessária, o sistema entra em colapso.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a principal limitação encontrada foi a de estabelecer as condições mínimas para fazer com que o trocador de calor entrasse em funcionamento, no qual para tal feito, é necessário haver uma corrente contínua de água passando pelo trocador de calor. Para realizar o ensaio na bancada de refrigeração foram necessários componentes como mangueiras de 1 polegada de diâmetro para conectar ao reservatório de água e uma bomba de água para fazer com que a água circule em um recipiente fechado.

O principal motivo de optar pelo sistema fechado e limitado de água, é de que a quantidade gasta de água é pequena em relação ao utilizar um sistema de vazão com renovação contínua de água, pois em uma situação prática o sistema de refrigeração pode ficar ligado por horas, no entanto, se houver um consumidor de água como uma caldeira por exemplo, podemos considerar um ideal para ambos os lados, pois a caldeira precisa de água quente e o trocador precisa de água ambiente ou fria.

Outro fator importante é de que o sistema de refrigeração deve estar em equilíbrio para que as coletas das pressões não sejam enganosas, pois uma vez ligado, a válvula de expansão modula a pressão de acordo com a necessidade do sistema de refrigeração. Portanto para que haja um dado relevante, é necessário esperar o sistema atingir a temperatura requerida, então antes do compressor desligar, pode-se então colher os dados requeridos.

Toda a pesquisa ocorreu no laboratório de refrigeração do Centro Universitário Assis Gurgacz, teve início dia 22 de agosto e fim no dia 29 outubro de 2018.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 CONCEITOS BÁSICOS DA TERMODINÂMICA

A Termodinâmica é a ciência que estuda os comportamentos de determinados ciclos e elementos, sua origem se deu através da equação da conservação de energia.

“Essa conservação de energia acontece sob as formas de calor e de trabalho. Ela faz com que um sistema possa conservar e transferir energia, ou seja, a energia pode sofrer aumento, diminuição ou permanecer constante.” (TODA, 2018, p. 1).

“Um sistema termodinâmico é um dispositivo ou conjunto de dispositivos que contém uma quantidade de matéria que está sendo estudada. Para uma definição mais precisa, um volume de controle é escolhido de tal modo que contenha a matéria e os dispositivos dentro de uma superfície de controle.” (WYLEN, 2013, p. 23).

“A 1ª lei da termodinâmica é essencialmente a declaração do princípio da conservação da energia para sistemas termodinâmicos. Como tal, pode ser expressa declarando que a variação na energia de um sistema durante qualquer transformação é igual ao montante de energia que o sistema recebe do ambiente. A fim de dar um significado preciso para essa declaração, é necessário definir as expressões “energia do sistema” e “energia que o sistema recebe do ambiente durante a transformação.”” (FERMI, 1936, p. 12).

O autor abaixo explica que o é sistema, fronteira e vizinhança que são termos retratados nesta pesquisa, para melhor compreensão dos processos.

“A definição de sistema é comum a outras ciências – é uma porção do espaço considerada como objeto de estudo. O limite do sistema é chamado de fronteira, e vizinhança é a região do espaço que faz fronteira com o sistema. As fronteiras podem ser rígidas ou móveis, adiabáticas ou diatérmicas (ou, eventualmente, algo entre os dois). Uma fronteira pode corresponder a uma barreira física (por exemplo, um recipiente fechado) ou pode eventualmente ser imaginária, concebida para efeitos de descrição de fenômenos.” (USP, 2009, p. 1).

A classificação das propriedades termodinâmicas pode ser dividida em duas partes gerais intensivas e extensivas.

“Uma propriedade intensiva é independente da massa e o valor de uma propriedade extensiva varia diretamente com a massa. Como exemplos de propriedades intensivas podemos citar temperatura, a pressão e a massa específica. A massa e o volume total são exemplos de propriedades extensivas.” (WYLEN, 2013, p. 25).

A pressão é uma propriedade que serve para comparar a relação de força e área em cada ponto de um determinado espaço.

“A definição de pressão diz que essa grandeza é dada pela razão de uma força aplicada perpendicularmente sobre uma superfície e a área da superfície. Pressão e área são grandezas

inversamente proporcionais. Alguns exemplos de situações cotidianas podem ajudar na compreensão do conceito de pressão. Para começar, podemos citar o ato de afiar facas. O objetivo de se amolar uma faca é fazer com que a área de contato da lâmina com o objeto a ser cortado seja a menor possível. Assim sendo, não será necessário aplicar uma força sobre o cabo da faca muito grande.” (ESCOLA, 2018, p.1).

Energia é uma propriedade que está ligada diretamente ao conceito de termodinâmica, uma vez que faz parte do seu conceito. O autor do livro Van Wylen explica de forma clara as formas de energia.

“Uma quantidade de massa macroscópica pode possuir energia na forma de energia interna, inerente a sua estrutura interna, energia cinética, em decorrência de seu movimento e energia potencial, associada às forças externas que atuam sobre ela. A energia total pode ser escrita como:

$$E = \text{Interna} + \text{Cinética} + \text{Potencial} = U + EC + EP \quad (1)$$

A energia interna na escala macroscópica tem um conjunto de energias similares associado com o movimento microscópico das moléculas individuais.” (WYLEN, 2013, p.34).

A Lei Zero da termodinâmica é uma condição que deve ser respeitada de acordo com o seu conceito. “O equilíbrio térmico entre corpos materiais só é atingido quando os mesmos se encontram na mesma temperatura. Dessa definição pode ser concluída a Lei Zero da Termodinâmica” (INFO, 2016, p.1).

A definição clássica de trabalho é o trabalho mecânico definido como uma força agindo em um deslocamento x , conforme o autor define:

“A forma mais intuitiva e prática de se introduzir o trabalho é através da mecânica utilizando-se uma força F , agindo sobre uma partícula quando ela se desloca de uma quantidade infinitesimal ds : o trabalho infinitesimal, dW , realizado por essa força F é dado pelo produto escalar entre a força e o deslocamento.” (SAVI, 2010, p. 54).

$$\partial W \, d = F \, s \quad (2)$$

“O calor é definido como sendo a forma de transferência de energia através da fronteira de um sistema, em uma dada temperatura, para outro sistema (ou ambiente), que apresenta uma temperatura inferior, em virtude da diferença em as temperaturas dos dois sistemas.” (WYLEN, 2013, p. 102).

O autor continua explicando que o calor em si, só pode ser identificado quando atravessa a fronteira, ou seja, é um fenômeno em trânsito. A definição de calor segundo Savi é de que:

“Calor é definido como qualquer fluxo espontâneo de energia de um corpo a outro devido a uma diferença de temperatura entre eles. O mecanismo pode ser diferente para cada

situação, mas em cada um desses processos a energia transferida é chamada calor. Por exemplo, o calor transferido por condução se dá através de contato molecular: partículas que se movem rapidamente colidem com aquelas de baixas velocidades, dando-lhes certa quantidade de energia no processo. Através da convecção, o movimento de certa quantidade de massa de um gás ou líquido com temperatura maior, expande e ascende em um campo gravitacional. E, finalmente, o processo chamado radiação que consiste na emissão de ondas eletromagnéticas, principalmente na região do infravermelho para objetos a temperatura ambiente, mas inclui também a luz visível para corpos mais quentes como o filamento de uma lâmpada ou a superfície solar.” (SAVI, 2010, p. 66).

Para explicar o que é entalpia é necessário fazer uma analogia entre o seguinte exemplo:

“Considerando um sistema quase estático a pressão constante, que não haja variações de energia cinética e potencial que o trabalho seja associado ao movimento da fronteira. Consideramos que para este caso, a transferência de calor durante o processo é igual a variação da quantidade $U + PV$ entre os estados inicial e final. Como todos os elementos dessa expressão são propriedades termodinâmicas.” (WYLEN, 2013, p.111).

“Torna-se, portanto, conveniente definir uma nova propriedade extensiva, a entalpia,

$$H = U + PV \quad (3)$$

ou por unidade de massa,

$$h = u + Pv \quad (4) \text{ (WYLEN, 2013, p.111).}$$

A equação da Continuidade:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \quad (5)$$

A equação da Energia:

$$\dot{Q}_{vc} + \Sigma \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) = \Sigma \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{vc} \quad (6)$$

Simplificando esta equação temos:

$$q + h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e = h_s + \frac{v_s^2}{2} + gZ_s + w \quad (7)$$

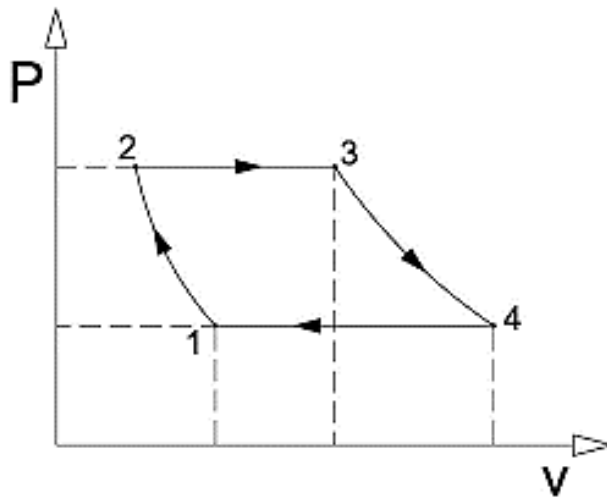
2.1.2 REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR.

Conforme a figura abaixo o autor do livro Refrigeração explica que o sistema consiste:

“A refrigeração mecânica por meio de vapores consiste na produção contínua de líquido frigorífero, o qual, por vaporização, nos fornece a desejada retirada de calor do meio a refrigerar. A diferença fundamental entre esse processo e o da refrigeração por meio de gases reside no fato de que, tanto o calor cedido pelo fluído em evolução a fonte quente como o retirado pelo mesmo da fonte fria são calores latentes.” (COSTA, 1982, p.28).

“Para conseguirmos a vaporização de um líquido, é necessário que a tensão de seu vapor (função da temperatura) seja superior à pressão a que está submetida. Assim, quanto mais baixa for a pressão, mais baixa poderá ser a temperatura de vaporização e, portanto, mais baixa a temperatura conseguida no meio a refrigerar.” (COSTA, 1982, p.28).

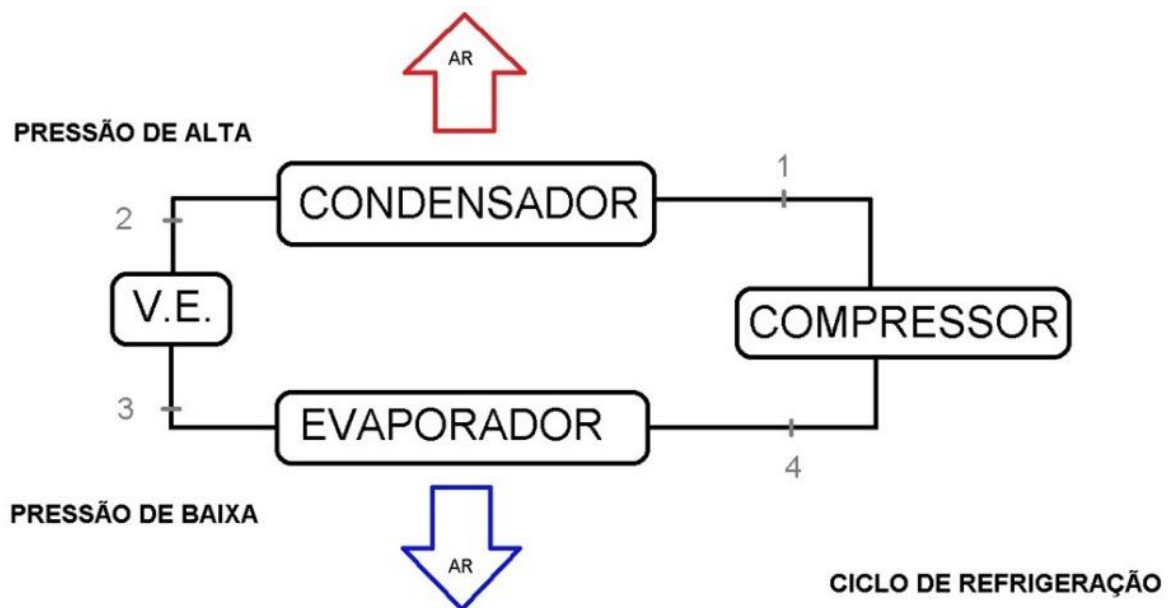
Figura 1 – Ciclo de refrigeração baseado em 4 processos.



Fonte: Van Wylen (2009)

"Refrigeração por compressão de vapor é um sistema de arrefecimento que utiliza um líquido circulante de refrigerante para absorver e remover o calor de um espaço que necessita de arrefecimento. Em qualquer processo de refrigeração, o calor é transferido de uma região a outra com a ajuda de um agente externo" (MSPC, 2017, p. 1).

Figura 2 – Ciclo de refrigeração.



Fonte: Autor (2018)

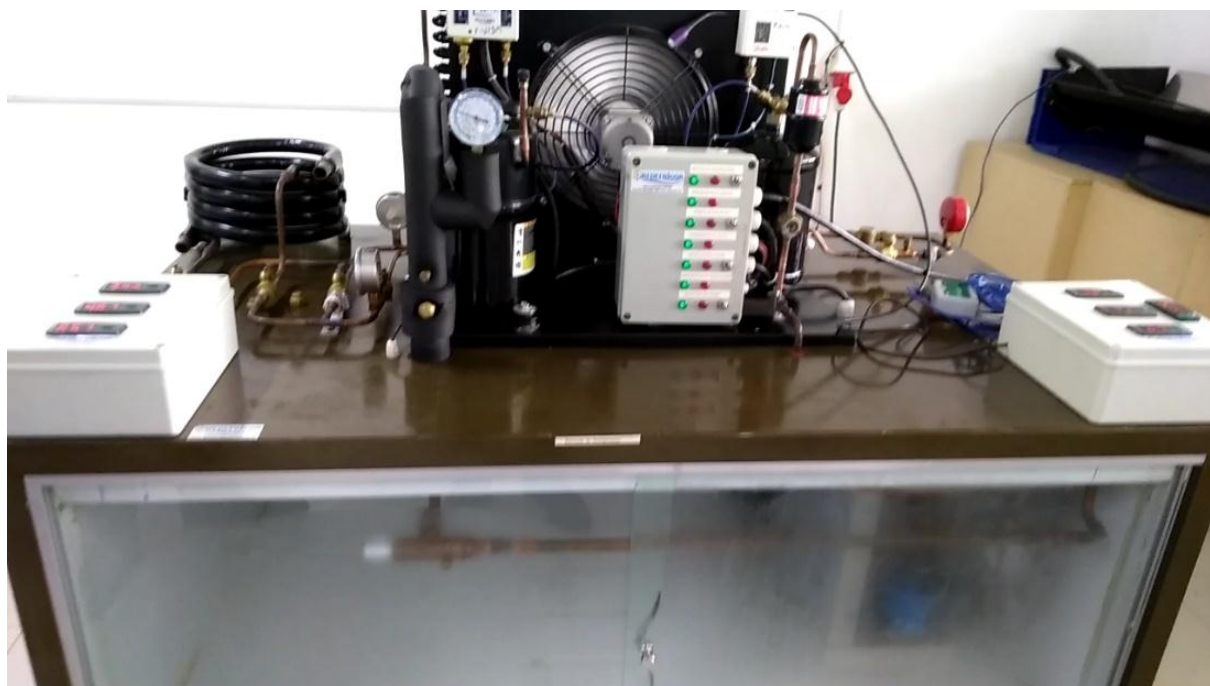
"Neste ciclo, um refrigerante em circulação entra no compressor sob a forma de vapor. O vapor é comprimido a uma entropia constante e sai superaquecido do compressor. O vapor superaquecido desloca-se então através do condensador que primeiro o arrefece removendo o superaquecimento e depois condensa-o, transformando-o em líquido através da remoção do calor adicional, a uma pressão e temperatura constantes. O líquido refrigerante passa então por uma válvula de expansão, onde a sua pressão decai abruptamente, causando a sua evaporação parcial e a auto refrigeração de normalmente menos de metade do líquido." (MSPC, 2017, p. 2).

E logo em seguida o autor finaliza explicando:

"Daí, resulta uma mistura de líquido e vapor a uma temperatura e pressão inferiores. A mistura líquido-vapor fria desloca-se então através da serpentina do evaporador e evapora-se completamente, arrefecendo o ar que a atravessa, o qual é impulsionado através da serpentina por um ventilador. O vapor refrigerante resultante volta então ao compressor para completar o ciclo termodinâmico." (MSPC, 2017, p. 2).

O sistema de refrigeração por compressão de vapor é atualmente um dos sistemas mais usuais no mercado, em muitos ramos como por exemplo: Indústria de frigoríficos, ar condicionado de automóveis, refrigeração industrial (processos de congelamento e câmara frigorífica), entre outros. Segue abaixo a na Figura 3, o sistema de refrigeração que foi usado como base para realização deste trabalho.

Figura 3 – Bancada do sistema de refrigeração da FAG.



Fonte: Autor (2018)

2.1.3 CONDENSADORES

Os condensadores são trocadores de calor que tem a função de transformar o estado do fluido refrigerante de vapor para líquido, através do processo de condensação. Segue abaixo algumas definições de trocador de calor e condensador.

"Um trocador de calor ou permutador de calor é um dispositivo para transferência de calor eficiente de um meio para outro. Tem a finalidade de transferir calor de um fluido para o outro, encontrando-se estes a temperaturas diferentes" (CEFET, 2008, p. 1).

"O objetivo do trocador de calor é o de aumentar a capacidade global e a eficiência do sistema". (MILLER, 2008, p. 302). No sistema de refrigeração, temos basicamente dois trocadores de calor, o condensador e o evaporador.

"O condensador é um dispositivo de transferência de calor. Ele é utilizado para remover calor do vapor de refrigerante quente. Usando algum método de resfriamento, o condensador transforma o vapor em líquido". (MILLER, 2008, p. 214).

O autor ainda explica os tipos de condensadores: "O método utilizado para resfriar o refrigerante e retorná-lo ao estado líquido serve para categorizar os dois tipos de condensadores: resfriado a ar e resfriado a água." (MILLER, 2008, p. 217).

O sistema de refrigeração que faz parte desta pesquisa, possui um condensador resfriado a ar, e o alvo da pesquisa é usar um condensador resfriado a água para saber qual a diferença de rendimento do sistema antes e depois do ciclo de refrigeração. Condensador refrigerado a ar:

"O condensador possui um ventilador de lâminas grandes que impele o ar através das aletas do condensador. As aletas são fixadas as serpentinas de tubos de cobre ou de alumínio. Os tubos abrigam o líquido e os vapores gasosos. Quando o ar soprado entra em contato com as aletas, ele as resfria." (MILLER, 2008, p. 214).

Figura 4 - Condensador Refrigerado a Ar.



Fonte: Spauto (2008)

Para os condensadores resfriados a água, o autor descreve como o sistema funciona de duas formas:

"Água é utilizada para resfriar condensadores. Um método é resfriar os condensadores com água da rede hidráulica e depois descarta-la no esgoto após ela ter sido utilizada para resfriar o refrigerante. Este método pode ser caro e, em alguns casos, não é permitido por lei." (MILLER, 2008, p. 217).

Suas limitações devido a utilização de água potável pode ser um fator crítico para utilizar o condensador refrigerado a água. É citado ainda uma outra forma de utilização:

" O uso de recirculação para resfriar a água para reutilização é mais prático. Porém, na recirculação a potência requerida para bombear a água até o local de resfriamento torna-se parte dos custos de operação da unidade." (MILLER, 2008, p. 217).

" O condensador duplo tubo consiste em dois tubos, um dentro do outro. A água é conduzida através do tubo interno. O refrigerante é conduzido através do tubo que envolve o tubo interno." (MILLER, 2008, p. 217).

Figura 5 - Trocador de calor modelo duplo tubo.



Fonte: HP Aquecedores (2018)

Para realizar o cálculo de ganho de calor do o evaporador segundo o livro Van Wylen, é utilizada a seguinte equação:

$$Ql = m (hs - he) \quad (8)$$

Ql = Fluxo de calor perdido para o ambiente (Kw ou Kj/s);

m = Fluxo mássico de fluído refrigerante (Kg/s);

he = Entalpia de entrada (Kj/Kg);

hs = Entalpia de saída (Kj/Kg);

2.1.4 EVAPORADOR

“Evaporador é a parte do sistema de refrigeração onde o fluido refrigerante sofre uma mudança de estado, saindo da fase líquida para a fase gasosa.” (Martinelli, 2003, p. 96).

“O evaporador é alimentado com fluido refrigerante, que chega da válvula de expansão ou do capilar. O refrigerante, que na entrada do evaporador é uma mistura de líquido e vapor a baixa pressão, evapora no interior do evaporador subtraindo o calor necessário à sua transformação de líquido em vapor. Então, o refrigerante deixa o evaporador sob forma de vapor saturado. Esse processo acontece na mesma temperatura e pressão que se desencadeou o processo de evaporação.” (Ambiente, 2007, p.1).

“O evaporador é o agente direto de resfriamento, constituindo a interface entre o processo e o circuito frigorífico. Com exceção daquelas aplicações onde ocorre o resfriamento direto do produto, como no caso dos congeladores de placa, a maioria dos evaporadores resfria ar ou líquidos como água, salmouras, etc., os quais serão os agentes de resfriamento no processo.” (Stoecker, 2002, p.112).

Isso faz com que o evaporador seja o principal componente do sistema de refrigeração, pois nele que ocorre a principal função de todo o conjunto de refrigeração, que é a de absorver calor do ambiente. Para a elaboração desta pesquisa foi utilizado um evaporador conforme na figura abaixo.

Figura 6 – Evaporador de Resfriamento de Ar.



Fonte: Polipartes (2011)

Para realizar o cálculo de ganho de calor do o evaporador segundo o livro Van Wylen, é utilizada a seguinte equação:

$$Qh = m (hs - he) \quad (9)$$

Qh = Fluxo de calor ganho do ambiente (Kw ou Kj/s);

m = Fluxo mássico de fluído refrigerante (Kg/s);

he = Entalpia de entrada (Kj/Kg);

hs = Entalpia de saída (Kj/Kg);

2.1.5 TROCADORES DE CALOR

De maneira simples e objetiva, o trocador de calor é um disposto para trocar calor de um meio para outro seja liquido, sólido, gasoso. Sua eficiência depende principalmente do tipo de material de fabricação do trocador de calor e também do tipo de fluído utilizado e seu coeficiente de condutibilidade térmica, e pôr fim a característica geométrica do trocador de calor e o fluxo utilizado no mesmo.

Dentre os vários modelos de trocadores de calor, os principais tipos do sistema de refrigeração estudado nesta pesquisa são os condensadores e evaporadores, porém existem uma série de modelos que compõem outros sistemas:

Casco tubo: consiste em um trocador de calor formado por vários tubos no qual são aquecidos ou resfriados através do fluído que detém os tubos e realizando a troca térmica com o fluído do casco do trocador de calor.

Figura 7 – Trocador de calor Casco Tubo.



Fonte: Maze (2014)

Trocador de calor de placas:

“Os trocadores de calor são geralmente construídos de placas delgadas. As placas podem ser lisas ou onduladas. Já que a geometria da placa não pode suportar pressões ou diferenças de temperaturas tão altas quanto um tubo cilíndrico.” (Essel, 2017, p.31).

Figura 8 – Trocador de calor de placas.



Fonte: Manutrol (2018)

2.1.6 COMPRESSORES

O compressor do sistema de refrigeração é responsável por bombear o fluido refrigerante através dos seus respectivos componentes, sendo assim um componente vital para que o sistema funcione.

“O compressor é o coração do sistema de compressão de vapor. É usado por uma única razão: recuperar o líquido expandido para que ele possa tornar a ser usado inúmeras vezes (fechando o ciclo).” (Martinelli, 2003, p. 93).

Figura 9 – Compressores de Refrigeração.



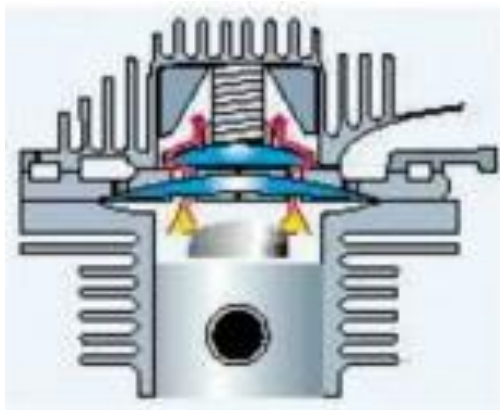
Fonte: Danfoss (2014)

Entretanto existem alguns tipos de compressores:

- Compressor Alternativo:

“Os compressores alternativos baseiam-se no movimento de um pistão dentro de um cilindro. Quando o pistão desloca-se do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), o vapor entra no cilindro através de uma válvula de sucção, que se abre automaticamente pela diferença de pressão. Nesse deslocamento, o volume do cilindro é quase que totalmente preenchido pelo vapor do refrigerante.” (Unisinos, 2015, p. 3).

Figura 10 – Compressor Alternativo.



Fonte: Web Ar condicionado (2015)

- Compressor Rotativo a parafuso: Também funciona através de deslocamento positivo:

“Basicamente ele consiste em duas engrenagens helicoidais ajustadas entre si, sendo uma delas macho e a outra fêmea, num invólucro estacionário com aberturas de sucção e descarga. Para tornar estanques as roscas, na maioria dos projetos é bombeado óleo através do compressor, junto com o refrigerante.” (Martinelli, 2003, p. 96).

Figura 11 – Compressor Rotativo Alternativo.

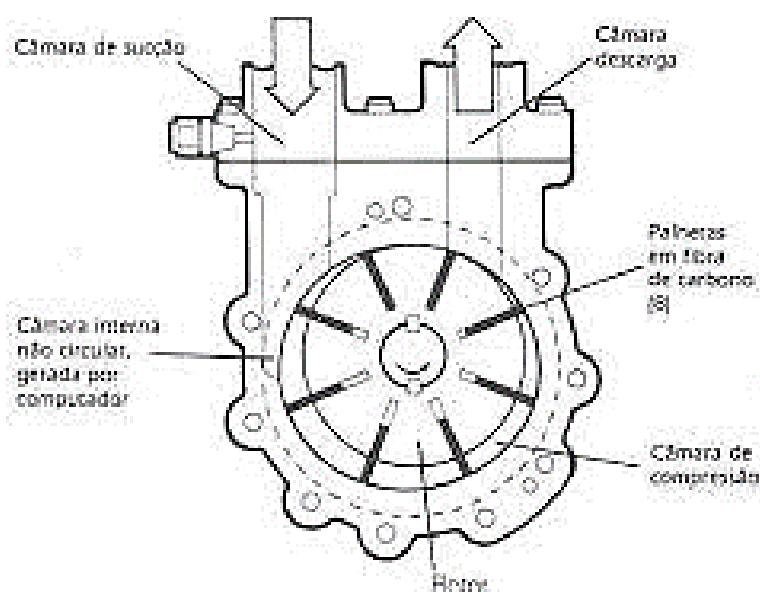


Fonte: Cere (2016)

- Compressor Rotativo de palhetas deslizantes: O autor explica tecnicamente da seguinte forma.

“O compressor aprisiona o gás em volume determinado, comprime-o girando dentro de um cilindro, com palhetas deslizantes forçadas contra a parede de cilindro. Quando o espaço entre duas das paletas passa em frente à abertura de sucção, o volume de gás aprisionado é grande. À medida que se desloca em torno do cilindro, este espaço vai se tornando menor, sendo assim o gás comprimido até a pressão máxima, quando é descarregado do cilindro pela tubulação de descarga.” (Martinelli, 2003, p. 96).

Figura 12 – Compressor rotativo de palhetas.



Fonte: UFPR (2017)

- Compressor centrífugo: “o gás passa sucessivamente por cilindros, conferindo-lhe estágios, necessários para aumentos parciais de pressão até atingir a pressão de descarga requerida” (Martinelli, 2003, p. 96).

Figura 13 – Compressor Centrífugo.



Fonte: Carrier (2013)

- Compressor scroll:

“o gás passa por entre duas espirais, sendo uma fixa e outra móvel. De acordo que a espiral se movimenta o gás aprisionado é levado para o centro das espirais, aumentando gradativamente a sua pressão até a saída.” (Martinelli, 2003, p. 96).

Figura 14 – Compressor scroll.



Fonte: Web Ar condicionado (2015)

Para realizar o cálculo de do trabalho exercido pelo compressor segundo o livro Van Wylen, é utilizada a seguinte equação:

$$W_{\text{Compressor}} = m (h_e - h_s) \quad (10)$$

$W_{\text{compressor}}$ = Trabalho exercido pelo compressor (Kw ou Kj/s);

m = Fluxo mássico de fluído refrigerante (Kg/s);

h_e = entalpia de entrada (Kj/Kg);

h_s = entalpia de saída (Kj/Kg);

2.1.7 VÁLVULAS DE EXPANSÃO

Como o próprio nome é uma válvula que controla de maneira exata a quantidade necessária de fluido refrigerante que vai para o evaporador, uma vez desregulado pode danificar os componentes pois se for muito pode fazer com que o evaporador não consiga evaporar todo liquido, e se for insuficiente o sistema não irá atender a carga térmica requerida para a refrigeração.

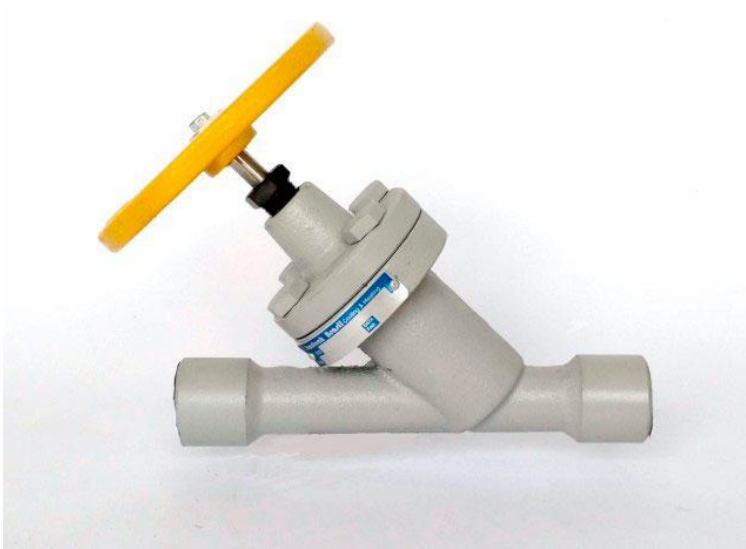
Ainda temos um dispositivo chamado tubo capilar, que faz a mesma função da válvula, porem a desvantagem é que sua regulagem fica estrita ao diâmetro do tubo, ou seja, o mesmo não possui regulagem, a única coisa que pode fazer com que o mesmo aumente a vazão, seria aumentar a pressão do sistema. Dentre os vários modelos de válvulas que existem no mercado, será citado abaixo os principais modelos:

- Válvula de expansão manual;
- Válvula de expansão automática;
- Válvula elétrica;
- Válvula Termostática;
- Válvula de expansão de bóia;

Válvula de expansão manual:

“São válvulas de agulha acionadas a mão. A quantidade de refrigerante que passa através do orifício da válvula depende da abertura da válvula que é ajustável manualmente. Sua maior vantagem é a simplicidade e baixo preço e a sua maior desvantagem é a sua inflexibilidade.” (Martinelli, 2003, p. 87).

Figura 15 – Válvula de expansão manual.



Fonte: Hantech (2009)

Válvula de expansão automática:

“Funcionam da seguinte maneira: quando o compressor começa a trabalhar, diminui a pressão do refrigerante no evaporador. Isso faz com que a agulha da válvula se abra, permitindo a entrada de refrigerante no evaporador. Enquanto o compressor está funcionando, a válvula automática mantém uma pressão constante no evaporador.” (Martinelli, 2003, p. 88).

Figura 16 – Válvula de expansão automática.



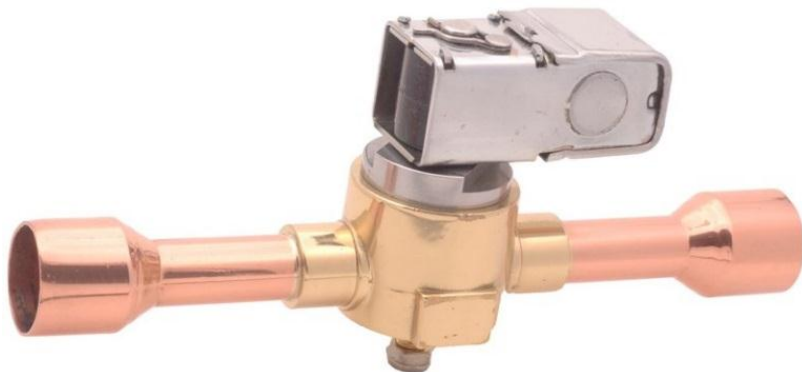
Fonte: Fenshen (2015)

Válvula elétrica:

“A válvula de expansão elétrica, utiliza um termistor para detectar a presença de refrigerante líquido na saída do evaporador. Quando não ocorre a presença de líquido, a temperatura do termistor se eleva, o que reduz sua resistência elétrica, permitindo uma corrente

maior pelo aquecedor instalado na válvula. A válvula é assim aberta, permitindo um maior fluxo de refrigerante.” (Martinelli, 2003, p. 90).

Figura 17 – Válvula Elétrica.



Fonte: Mecânica Industrial (2018)

Válvula termostática:

“A válvula de Expansão Termostática (também conhecida por Válvula de Expansão Térmica e Válvula de Superaquecimento) é, basicamente, uma válvula de expansão automática com a característica adicional de ter um dispositivo que corrige a quantidade de líquido a ser evaporado na serpentina de modo que esta corresponda à carga no evaporador” (Martinelli, 2003, p. 91).

Figura 18 – Válvula de Expansão Termostática.



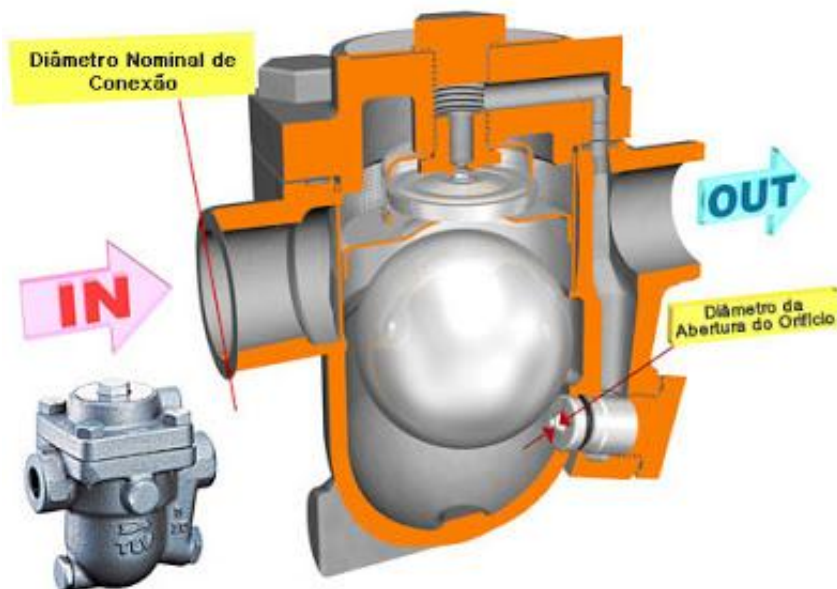
Fonte: Multi Frio (2018)

Válvula de expansão de boia:

“As válvulas de boia devem ser escolhidas em função do refrigerante específico que vai ser usado, devido à diferença de densidade entre os diversos refrigerantes. Uma válvula dimensionada para um dos refrigerantes mais pesados, como R-12 ou R-22, precisaria ter uma

boia menor e mais pesada do que a de uma válvula construída para amônia. Além disso, as pressões no sistema durante o descongelamento têm que ser consideradas, pois altas pressões podem levar à implosão da própria boia.” (Martinelli, 2003, p. 89).

Figura 19 – Válvula de expansão de boia.



Fonte: Mecânica Fácil (2015)

O seu funcionamento se dá através de um tubo de sucção que é regulado sua vazão conforme a boia se movimenta, por isso a cada válvula deve ser posicionada de acordo com o fluido refrigerante de cada sistema de refrigeração.

2.1.8 RENDIMENTO

O significado de rendimento do ponto de comparação físico é a "relação entre a energia útil ou disponível e a energia fornecida ao dispositivo transformador, em qualquer transformação de energia." (DICIO, 2015, p. 1).

Sua função principal é de medir a quantidade de transformação de energia que o equipamento comporta fazer.

No caso da refrigeração o rendimento do sistema é chamado de COP, Coeficiente de Performance, que é fundamental para o diagnóstico e análise em sistemas de refrigeração.

"O COP é a sigla de "Coefficient Of Performance" e significa "Coeficiente de Desempenho". Esse termo representa a relação entre a energia térmica fornecida por uma bomba de calor e a energia elétrica consumida pelo sistema. Assim como o EER, quanto maior for o COP, mais eficiente é o equipamento." (WEBAR, p. 1, 2015).

Para realizar o cálculo do coeficiente de desempenho do ciclo de refrigeração segundo o autor do livro Van Wylen, é utilizada a seguinte equação:

$$\beta_{Ref} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (11)$$

B ref = Coeficiente de desempenho para o ciclo de refrigeração;

T_L = Temperatura do ambiente refrigerado;

T_H = Temperatura do ambiente aquecido;

Para encontrar o coeficiente de desempenho real do ciclo de refrigeração, o autor do livro Van Wylen, é utilizada a seguinte equação:

$$\beta = \frac{Q_{evaporador}}{W_{compressor}} \quad (12)$$

B = Coeficiente de desempenho para o ciclo de refrigeração;

Q evaporador = Entalpia de saída – Entalpia de entrada do evaporador;

W compressor = Entalpia de entrada – Entalpia de saída do compressor;

Para determinar as entalpias é necessário buscar nas tabelas do livro Fundamentos da Termodinâmica, onde para encontrar os dados tabelados é necessário realizar a interpolação. A interpolação é um método matemático utilizado para fazer aproximação de valores. A formula utilizada para realizar a interpolação pode ser descrita abaixo:

$$Y = y_1 + \left\{ \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \times (y_2 - y_1) \right\} \quad (13)$$

Y = Valor correspondente a x para a ser encontrado;

Y₀ e Y₁ = Valores aproximados da tabela;

X₀ e X₁ = Valores aproximados da tabela;

X = Valor correspondente exato entre os parâmetros x₀ e x₁;

2.1.9 TANQUE DE LÍQUIDO

O tanque de líquido da bancada de refrigeração da instituição de ensino, está localizado logo após o condensador, e tem a função de armazenar fluido refrigerante na forma líquida, funcionando como uma espécie de “pulmão” para o sistema de refrigeração, primeiramente por garantir que não chegue vapor na válvula de expansão e segundo por ajudar a equilibrar o sistema de refrigeração em uma eventual carga térmica elevada.

“Usado para armazenar temporariamente o fluido refrigerante liquefeito no condensador e para recolher o refrigerante quando houver necessidade de reparos no sistema. São instalados depois do condensador e antes da válvula de expansão.” (UFPR, p.128, 2015).

Figura 20 – Tanque de líquido refrigerante.



Fonte: Marechal (2017)

2.1.10 FILTRO SECADOR COM NÚCLEO SÓLIDO

O filtro secador é um dispositivo de segurança que protege o sistema de refrigeração, evitando o desgaste prematuro do sistema, segundo seu fabricante Danfoss, o mesmo possui capacidade de trabalhar com pressões até 42 bar, e além de evitar a humidade no sistema reduz a capacidade de formação de ácido no fluido refrigerante, o filtro utilizado no sistema de refrigeração da bancada é o modelo DML-0835. Segue a ilustração de um modelo de filtro secador com núcleo sólido na figura abaixo.

Figura 21 – Filtro secador do sistema de refrigeração.



Fonte: Danfoss (2018)

2.1.11 FLUÍDO REFRIGERANTE

O fluído refrigerante é utilizado em diversos sistemas de refrigeração como, geladeiras, refrigeradores, ar condicionado, câmaras frigoríficas, entre outros. Nesta pesquisa o fluído utilizado na bancada de refrigeração foi o R-22, conhecido como clorodifluorometano, mas também existem outros modelos de fluídos como R-12, R-134, R-404 dentre outros.

Para a determinação do de cada modelo de fluído refrigerante é necessário verificar os parâmetros de funcionamento do aparelho de refrigeração, geralmente os fabricantes trazem em seu manual ou identificado, e assim determinar qual o melhor fluido a ser aplicado. Cada fluído possui uma temperatura de evaporação, pressões de trabalho e capacidade volumétrica diferentes segundo o autor do livro MILLER.

Figura 22 – Bujão de fluído refrigerante R22



Fonte: Mercado Livre (2018)

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

O principal equipamento para a realização deste trabalho é um sistema de refrigeração por compressão de vapor citado na figura 3, no qual o Centro Universitário Assis Gurgacz disponibilizou o laboratório de refrigeração e os demais componentes necessários, sendo eles:

- 2 Mangueiras transparentes de água, diâmetro de 1 polegada e comprimento de 1 metro;
- 1 Reservatório de metal de capacidade de 15 litros com tampa;
- 1 Bomba de água, marca Rotoplast, modelo Rp-1, potência 370W;
- 2 Abraçadeiras de aço de 1 polegada;

As ferramentas necessárias para promover a instalação dos componentes, a instituição também forneceu para realização da pesquisa, dentre os quais são:

- 1 chave Philips;
- 1 alicate universal;

Após a instalação dos componentes foi ligado a bomba, para verificar se havia vazamentos, e logo em seguida foi ligado então o sistema de refrigeração para coletar as pressões e temperaturas, assim que a temperatura da câmara refrigerada chegasse a -10 C.

Figura 23 – Trocador de calor refrigerado a água em funcionamento.



Fonte: Autor (2018)

Figura 24 – Imagem das mangueiras instaladas no trocador de calor.



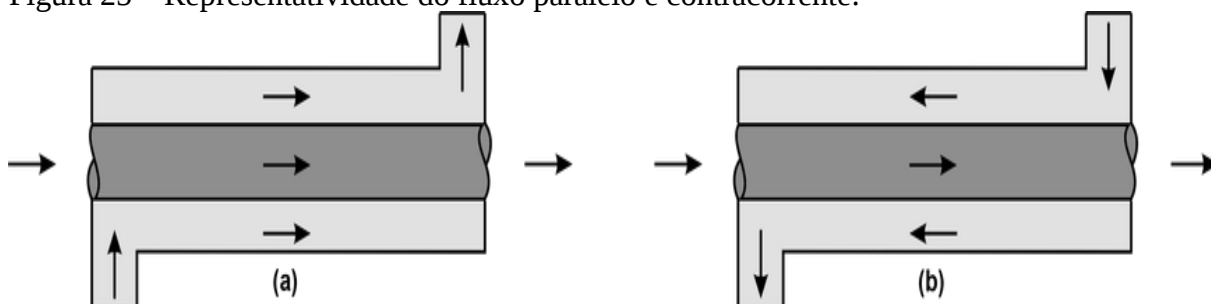
Fonte: Autor (2018)

A bancada de refrigeração do laboratório da instituição é composta dos seguintes itens: Compressor, condensador refrigerado a ar, ventilador, Interfaces medidoras de temperatura, válvula de expansão, evaporador, relógios de medição de pressão, tanque de líquido, sensor de temperatura de água, condensador refrigerado a água e fluido refrigerante.

Para proporcionar um melhor desempenho no fluxo de calor entre a água e o trocador de calor e o fluido refrigerante, foi optado por realizar o fluxo de contracorrente, que consiste em deixar os fluidos em sentidos opostos na entrada e saída do trocador de calor.

Conforme mostrado na figura 24, a seta azul representa a entrada de água, e a seta vermelha representa a saída de água, que por sua vez sai a uma temperatura maior com relação a entrada, uma vez que a água está a temperatura ambiente e o fluido refrigerante a mais de 70 °C.

Figura 25 – Representatividade do fluxo paralelo e contracorrente.



Fonte: Autor (2018)

Conforme a figura da letra A, o trocador de calor está configurado em paralelo pois os fluídos que trocam calor estão entrando e saindo do sistema no mesmo sentido. Já na figura B, o trocador de calor está configurado em contracorrente, pois os fluídos que trocam calor estão entrando e saindo do sistema em sentidos opostos.

Os componentes da bancada de refrigeração já encontrava-se em pleno funcionamento, não havendo qualquer necessidade de alteração ou de instalação, pois o trocador de calor refrigerado a água já estava instalado no sistema de refrigeração, e o principal mecanismo de isolamento deste trocador de calor também já estava completamente instalado com válvulas de retenção de escoamento para isolar o trocador de calor quando necessário.

Foi utilizado uma bomba de água que por sua vez tem uma potência de 370W, vazão de 40 L/m, alcança uma altura de até 6,5 m, segundo seu fabricante Rotoplast. Segue abaixo a figura da bomba:

Figura 26 – Identificação da Bomba de água.



Fonte: Autor (2018)

O modelo de compressor utilizado no sistema de refrigeração desta pesquisa, é um compressor alternativo, da marca Copeland modelo RS70C1-TFC-501, o tanque de líquido marca Parker modelo P331014 e o filtro secador DML-0835 da conforme nas figuras 27, 28 e 29 logo abaixo:

Figura 27 – Foto da identificação do compressor.



Fonte: Autor (2018)

Figura 28 – Foto da especificação do tanque de liquido.



Fonte: Autor (2018)

Figura 29 – Filtro secador do sistema de refrigeração.



Fonte: Autor (2018)

3.2 FASES DA PESQUISA

Primeiramente é necessário ressaltar que para a aplicabilidade desta pesquisa na prática, é necessário verificar as condições mínimas para realização do teste, que por sua vez consiste em saber se na empresa ou local onde está o sistema de refrigeração possui uma corrente de água contínua que seja utilizada no trocador de calor refrigerado a água, para garantir uma melhor eficiência de todo o conjunto.

Outro fator importante a ser considerado é a verificação da vida útil do sistema de refrigeração, pois essas modificações implicam em um determinado custo, que por sua vez deve ser analisado para que traga resultados positivos.

Caso seja optado por realizar utilizando o mesmo método desta pesquisa, que consiste em uma quantidade limitada de água em um recipiente, é necessário ter conhecimento que o seu sistema ficará limitado a um determinado tempo de operação, pois uma vez que o sistema entra em funcionamento, ele começa a aquecer a água do trocador de calor, que por sua vez consequentemente aquece toda a água do reservatório.

Há um fator de diferença de temperatura, que é a perda de calor pela tubulação do sistema de refrigeração entre a saída do compressor e a entrada do condensador, assim como também após o condensador para o tanque de líquido e o evaporador, que não será analisado neste trabalho.

Para que os cálculos da pesquisa tenham resultados satisfatórios, com relação a precisão, é necessário coletar cada dado corretamente com o sistema de refrigeração funcionando de forma estabilizada. Conforme recomendado pelo orientador deste trabalho, as medições foram realizadas antes do sistema desligar o compressor e abrir a válvula de expansão, que corresponde quando a temperatura da câmara de refrigeração está a -10°C . Essa temperatura da câmara devido ao sistema ser projetado trabalhar no laboratório.

No dia 28 de setembro de 2018, foi realizada a primeira das medições de temperatura do fluido, pressão de alta e pressão de baixa, do sistema de refrigeração no laboratório de refrigeração da Fundação Assis Gurgacz, das 16:00 às 17:00 horas.

E no dia 22 de outubro de 2018, foi realizada novamente as medições com a supervisão do professor orientador desta pesquisa, para determinar com exatidão os dados coletados e então realizar a montagem necessária conforme está descrito abaixo, para funcionar o condensador refrigerado a água, no sistema de refrigeração estudado no laboratório da instituição.

O primeiro dado a ser coletado foi a temperatura e pressão de entrada e saída do compressor, especificamente do fluido refrigerante. Logo após foi coletada da mesma forma as demais temperaturas e pressões no evaporador e condensador para determinar assim e o coeficiente de performance.

Em seguida, após serem instaladas as mangueiras do reservatório de água ao trocador de calor conforme mostrada na figura 23. O trocador de calor entrou em operação da seguinte maneira: na linha de fluido refrigerante a temperatura registrada foi de 67°C e saiu do trocador de calor com o fluido refrigerante a $36,2^{\circ}\text{C}$, a linha de água entra a temperatura ambiente e sai "quente". A temperatura da água não foi coletada neste trabalho em virtude do objetivo da pesquisa.

Figura 30 – Interface homem máquina montado com controlador digital de temperatura.



Fonte: Autor (2018)

O sistema de refrigeração estudado nesta pesquisa, provem de equipamentos eletrônicos para realizar as medições de temperaturas e demais dados, que por sua vez possui dois sistemas de Interface homem máquina, montados cada um com três controladores de temperatura digital, modelo TIC-17RGT, da marca Full Gauge.

Este trocador de calor duplo tubo em estudo do foi ligado em série com o condensador refrigerado a ar, pois para remover o condensador refrigerado a ar seria necessário substituir o gás do sistema, o que implicaria em custos, com a reposição do fluído refrigerante.

A seguir, será citado os cinco procedimentos para realização deste trabalho.

Primeiro procedimento: Foi ligado o sistema de refrigeração e então coletados todos os dados do equipamento de refrigeração sem estar ligado com o trocador de calor, e exatamente na temperatura de -10°C dentro da câmara, foi coletado todos os dados para analisar seu respectivo coeficiente de performance.

Segundo procedimento: Instalar os componentes para que possa circular a água do condensador. Os componentes são: Bomba recirculatória, Mangueiras e recipiente para circulação de água.

Figura 31 – Recipiente de água e bomba de água.



Fonte: Autor (2018)

Terceiro procedimento: Em seguida após ligar o sistema de refrigeração, foi ligado a bomba para circular a água pelo trocador de calor e iniciar a troca térmica do sistema.

Quarto procedimento: Verificou-se que a temperatura da câmara chegou a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, e então foi coletado novamente as pressões e temperaturas em todos os pontos, para analisar seu respectivo coeficiente de performance.

Figura 32 – Pressão de Alta do sistema.



Fonte: Autor (2018)

Repare que esta pressão está a 1100 kpa, é manométrica e sua medição para cálculos foi considerada a pressão absoluta.

O principal ponto a ser retratado é de que a pressão se manteve constante e de que a pressão de alta do sistema de refrigeração diminuiu com um uso do trocador de calor duplo tubo, de 1250 kPa para 1100 kPa.

Figura 33 – Pressão de Baixa do sistema de refrigeração.



Fonte: Autor (2018)

Quinto procedimento: calcular os dados obtidos, analisar se houve ou não o aumento no coeficiente de performance do equipamento de refrigeração.

Dados do sistema de refrigeração sem o uso do trocador de calor:

Tabela 1: Propriedades do fluido refrigerante no condensador.

Fluido refrigerante: R22	Entrada do condensador	Saída do condensador
Pressão absoluta:	1350 kpa	1350 kpa
Temperatura:	64,1 °C	31,3 °C
Massa:	0,02 kg/s	0,02 kg/s
Entalpia:		

Fonte: Autor (2018)

Para encontrar as entalpias de entrada e saída é necessário buscar os dados na tabela do livro de Fundamentos da Termodinâmica, no qual os dados deverão ser interpolados os demais dados á seguir para que se tenha uma maior precisão nos cálculos.

Segundo a tabela de dados do fluído refrigerante R-22, no estado superaquecido temos a seguinte interpolação, onde temos a seguinte equação, onde comparados com a tabela 2 temos os valores ao lado de cada dado:

$$Y = y1 + \left\{ \left(\frac{x-x1}{x2-x1} \right) \times (y2 - y1) \right\} \quad (13)$$

Tabela 2: Entalpia de entrada do condensador.

Pressão (kpa)	Temperatura (°C)		Entalpia (Kj/Kg)	
1.350	60	X1	282,1165	Y1
1.350	64,1	X	285,5526	Y
1.350	70	X2	290,49725	Y2

Fonte: Autor (2018)

Esta entalpia pode ser coletada apenas para cálculo do fluxo de calor do condensador, uma vez que a temperatura de saída do compressor é 73°C, em um ciclo teórico seria usado 73°C, mas como esse cálculo se trata do real, a temperatura deve ser exata, de acordo com a Figura 29. Conforme na fórmula abaixo segue novamente o mesmo processo para todas as interpolações, conforme segue abaixo:

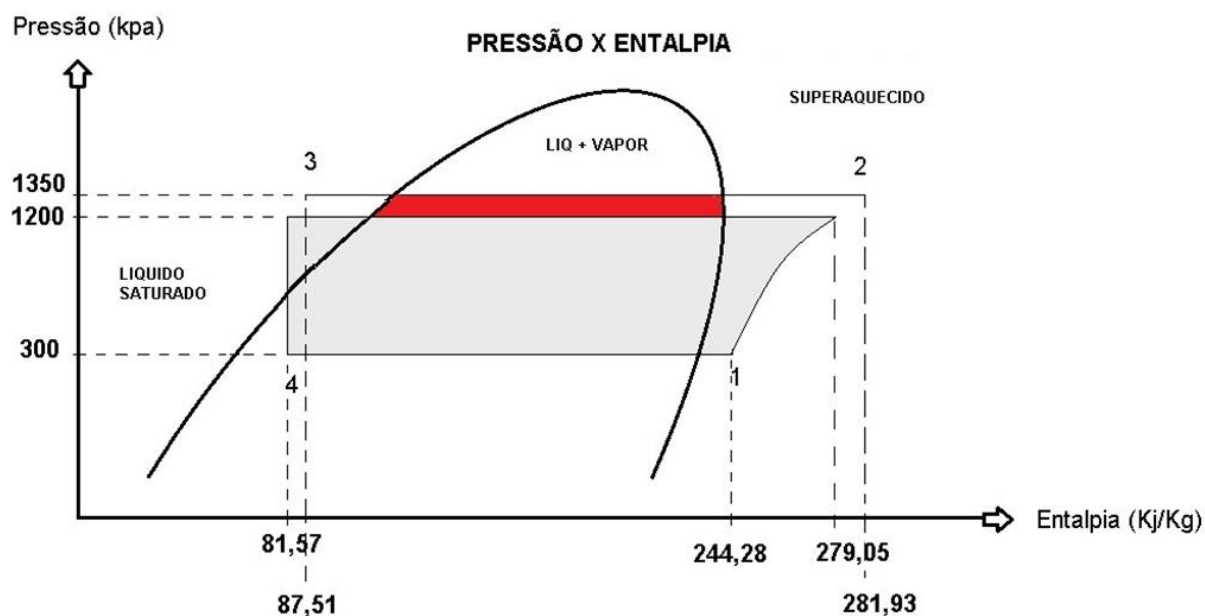
$$Y = y1 + \left\{ \left(\frac{x-x1}{x2-x1} \right) \times (y2 - y1) \right\} \quad (13)$$

Tabela 3: Entalpia de saída do Condensador estado 3.

Pressão (kpa)		Entalpia (Kj/Kg)	
1.191,9	X1	81,25	Y1
1.350	X	87,51	Y
1.354,8	X2	87,7	Y2

Fonte: Autor (2018)

Figura 34 – Ciclo real do comparativo dos trocadores de calor



Fonte: Autor (2018)

Tabela 4: Interpolação da entalpia do estado 1 – Entrada Compressor.

Pressão (kpa)	Entalpia (Kj/Kg)	Entropia (Kj/Kg k)
295,7	244,132	0,9505
300	244,28	0,9498
354,3	246,144	0,9422

Fonte: Autor (2018)

Tabela 5: Interpolação da entalpia do estado 2 – Saída compressor.

Pressão (kpa)	Entalpia (Kj/Kg)	Entropia (Kj/Kg k)
1.200	279,05	0,9498
1.350	281,93	0,9498
1.400	282,89	0,9498

Fonte: Autor (2018)

Figura 35 – Interface homem máquina sistema funcionando com o trocador de calor



Fonte: Autor (2018)

Figura 36 – Interface homem máquina sistema funcionando com o trocador de calor.



Fonte: Autor (2018)

Tabela 6: Interpolação da entalpia da entrada do Condensador.

Entalpia (Kj/Kg)	Temperatura (°C)	Pressão (kpa)
268,3588	40,9	1.200
265,5866	40,9	1.350
264,6625	40,9	1.400

Fonte: Autor (2018)

Esta entalpia será coletada apenas para cálculo do fluxo de calor do condensador, uma vez que a temperatura de saída do compressor agora é 67,2 °C, em um ciclo teórico seria usado 67,2°C, mas como esse cálculo se trata do real, a temperatura deve ser exata, de acordo com a Figura 28 que é de 40,9 °C.

Tabela 7: Interpolação da entalpia da entrada do compressor.

Entalpia (Kj/Kg)	Entropia (Kj/Kg k)
276,011	0,9405
279,05	0,9498
284,263	0,9657

Fonte: Autor (2018)

Tabela 8: Interpolação da entalpia de saída do condensador.

Pressão (kpa)		Entalpia (Kj/Kg)	
1.1919	X1	81,25	Y1
1.2	X	81,57	Y
1.3548	X2	87,7	Y2

Fonte: Autor (2018)

Tabela 9 – Tabela dos estados termodinâmicos sem o trocador de calor

Propriedades	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
Volume de controle na entrada:	Compressor	Condensador	Válvula de expansão	Evaporador
Temperatura (C)	-2,8	73	31,3	-7,4
Pressão (kpa) abs.	300	1350	1350	300
Título	1	€	0,275	0
Entalpia (Kj/Kg)	244,28	281,93	87,51	87,51
Entropia (Kj/Kg k)	0,9498	0,9498		

Fonte: Autor (2018)

Tabela 10 – Tabela dos estados termodinâmicos com o uso do trocador de calor

Propriedades	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
Volume de controle na entrada:	Compressor	Condensador	Válvula de expansão	Evaporador
Temperatura (C)	-3.1	67,2	32	-8,4
Pressão (kpa) abs.	300	1200	1200	300
Título	1	€	0,247	0
Entalpia (Kj/Kg)	244,28	279,05	81,57	81,57
Entropia (Kj/Kg k)	0,9498	0,9498		

Fonte: Autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das informações coletadas, através dos procedimentos citados, abaixo segue os cálculos finais desta pesquisa para determinar cientificamente, se há um resultado positivo ou negativo com a utilização do trocador de calor refrigerado a água.

Cálculo do sistema Ideal com condensador refrigerado a ar:

$$\begin{aligned}\beta_{Ref} &= \frac{TL}{T_H - TL} \\ \beta_{Ref} &= \frac{(273,15 - 10)K}{(273,15 + 33,1)K - (273,15 - 10)K} \\ \beta_{Ref} &= \frac{263,15}{43,10} \\ \beta_{Ref} &= 6,106\end{aligned}$$

Cálculo do sistema Ideal com condensador refrigerado a água:

$$\begin{aligned}\beta_{Ref} &= \frac{TL}{T_H - TL} \\ \beta_{Ref} &= \frac{(273,15 - 10) K}{(273,15 + 25)K - (273,15 - 10)K} \\ \beta_{Ref} &= \frac{263,15 K}{298,15 K - 263,15 K} \\ \beta_{Ref} &= 7,518\end{aligned}$$

Cálculo do sistema Real de refrigeração analisando com condensador refrigerado a ar:

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{Q_{evaporador}}{W_{compressor}} \\ \beta &= \frac{(h_s - h_e)}{(h_e - h_s)} \\ \beta &= \frac{(244,28 - 87,51)Kj/Kg}{(281,93 - 244,28)Kj/Kg} \\ \beta &= 4,16\end{aligned}$$

Cálculo do sistema Real de refrigeração analisando com condensador refrigerado a água:

$$\beta = \frac{Q_{\text{evaporador}}}{W_{\text{compressor}}}$$

$$\beta = \frac{(h_s - h_e)}{(h_e - h_s)}$$

$$\beta = \frac{(244,28 - 81,57)Kj/Kg}{(279,05 - 244,28)Kj/Kg}$$

$$\beta = 4,67$$

A partir da observação dos resultados obtidos, nota-se que logo no cálculo ideal o trocador de calor já possui um maior coeficiente de performance, logo conclui-se, que o no real também ocorre a mesma coisa, porém com uma margem de diferença menor no caso real. Essa perda de porcentagem do sistema ideal para o real, ocorre porque o sistema real possui alguns fatores dos quais seguem abaixo:

- Perdas de carga pela tubulação do sistema de refrigeração;
- Ganho de calor pela tubulação do evaporador ao compressor;
- Irreversibilidade que faz com que haja uma pequena diferença de entropia, principalmente devido ao ganho de calor na fase de compressão;
- Outro fator externo que pode afetar o sistema de refrigeração como a temperatura ambiente muito alta, que pode fazer com que o condensador refrigerado a ar, perca eficiência de troca térmica;

Apesar de essas perdas serem relevantes para o estudo do sistema de refrigeração por compressão de vapor, também existem fatores que contribuem significativamente para um pequeno aumento do coeficiente de performance do equipamento de refrigeração, sendo eles:

- Perda de calor do fluido refrigerante para as vizinhanças, na tubulação do compressor ao condensador;
- Perda de calor do fluido refrigerante para as vizinhanças, na tubulação do condensador à válvula de expansão;
- Isolamento da tubulação do evaporador até o compressor;
- O uso do condensador refrigerado a água no sistema de refrigeração;

Atualmente existem diversas configurações para sistemas de refrigeração, que são ideal para cada tipo de situação e cada necessidade presente, como por exemplo, um sistema em cascata com dois compressores e dois condensadores, que dá uma possibilidade de aumento no coeficiente de performance em casos de diferença muito alta entre temperatura externa e temperatura da câmara frigorífica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com as medidas captadas do sistema de refrigeração, operando com e sem o condensador refrigerado a água, foi possível concluir através deste comparativo que o sistema de refrigeração tem um melhor coeficiente de performance operando com o condensador refrigerado a água.

Através desta melhoria podemos aumentar a quantidade de produto a ser armazenado, melhorando assim a quantidade de produto em relação ao equipamento utilizado.

As principais vantagens deste sistema de refrigeração, são as seguintes:

- Melhor eficiência do equipamento de refrigeração

A porcentagem de aumento através do cálculo ideal entre o sistema utilizando condensador refrigerado a ar para água é de 23,12%.

A porcentagem de aumento através do cálculo real entre o sistema utilizando condensador refrigerado a ar para água é de 12,26%.

- Melhor desempenho do sistema em funcionamento.

Através da redução na pressão de trabalho do compressor de 1250 kpa para 1.100 kpa no manômetro do sistema de refrigeração, conclui-se que o sistema trabalha menos, portanto, logo sua vida útil tende-se a se prolongar. Outro quesito a ser citado é de que o mesmo continua atendendo uma mesma carga térmica, e como houve uma redução da pressão de trabalho, o mesmo passa a reduzir o consumo elétrico.

- Aumento da folga em relação a carga do equipamento.

Como a carga térmica continua a mesma, e o consumo de energia diminuiu, logo tem-se duas opções. A primeira é deixar o sistema como está, portanto, assim vai economizar energia elétrica e atender a mesma carga térmica. A segunda opção consiste em aumentar a carga térmica, ou seja, se houver espaço pode-se armazenar mais produtos na câmara.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Um fator que deve ser analisado futuramente, é a quantidade mínima de água necessária para atender a capacidade térmica exigida pelo sistema de refrigeração, para que seja desnecessário o uso do condensador refrigerado a ar.

Para a realização desta pesquisa, foi utilizada água em um recipiente, que por sua vez não trocava a água do sistema ao longo do tempo, ou seja, após alguns minutos que o sistema estava ligado, o condensador refrigerado a ar entrou em funcionamento. Isso significa que como

a temperatura da água aumentou, a capacidade de troca térmica diminuiu a ponto de o sistema necessitar da refrigeração do fluido refrigerante através do condensador refrigerado a ar. Por isso a necessidade de realizar uma pesquisa, agora direcionada a quantidade de água necessária e sua respectiva vazão.

Este sistema também precisa de uma avaliação em seu custo financeiro para saber qual dos sistemas tem um melhor custo benefício em relação a necessidade requerida de cada situação proposta. Calcular a diferença entre a energia gasta pelo ventilador do trocador de calor refrigerado a ar e a bomba de água durante um determinado tempo para aplicabilidade do custo financeiro.

Realizar um comparativo entre a energia gasta pelo compressor, calcular o rendimento térmico, e por fim calcular a carga térmica antes e depois da utilização do trocador de calor refrigerado a água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGNAKKE, C; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**: Série Van Wylen. 8 ed. São Paulo: Blucher, 2013.

COSTA, Ê. C. **Refrigeração**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 1982.

ESCOLA, B. **O que é pressão ?**. Disponível em < <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-pressao.htm> >. Acesso em 2 de Outubro de 2018.

ESSEL, C. **Equipamentos de troca térmica**. Disponível em <<http://essel.com.br/cursos/material/03/CAP2.pdf>>. Acesso em 27 de setembro de 2018.

FERMI, E. **Termodinâmica**. Londres: Prentice-Hall, 1956.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueria e. "**Crescimento da população brasileira**", **Brasil Escola**. Disponível em <<https://brasilescola.uol.com.br/brasil/o-crescimento-da-populacao-brasileira.htm>>. Acesso em 08 de abril de 2018.

INFOPÉDIA, D. **Rendimento**. Disponível em <<https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/rendimento>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.

INFO, E. **Lei Zero da Termodinâmica**. Disponível em <<https://www.infoescola.com/fisica/lei-zero-da-termodinamica/>>. Acesso em 18 de outubro de 2018.

JABARDO, J. M. S; STOECKER, W. F. **Refrigeração Industrial**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2002.

MILLER, R; MILLER, M. R. **Refrigeração e Ar condicionado**. 1 ed. São Paulo: Livros Técnicos Científicos (LTC), 2008.

MSPC. **Refrigeração I: ciclo, fluido, processo de compressão**. Disponível em < https://www.mspc.eng.br/dirA0_ndx.php >. Acesso em 08 de abril de 2018.

POLITO, R. **Consumo de energia no brasil aumenta 1,5% em 2017 segundo ONS**. Disponível em <<http://www.valor.com.br/brasil/5303555/consumo-de-energia-no-brasil-aumenta-15-em-2017-segundo-ons>>. Acesso em 10 de abril de 2018.

PRADO, I.N; CECATO, U.; LIMA, A. C. B. R; SOUZA, L. A. **Termodinâmica**. 1 ed. Maringa: UEM, 2010.

TODA, G. **Primeira Lei da Termodinâmica**. Disponível em <<https://www.todamateria.com.br/primeira-lei-da-termodinamica/>>. Acesso em 22 de setembro de 2018.

UNISINOS. **Compressores**. Disponível em <http://www.professor.unisinos.br/mhmac/Refrigeracao/Compressores_2015_v1.pdf >. Acesso em 21 de outubro de 2018.

UFPR. **Acessórios do ciclo de refrigeração.** Disponível em <https://docs.ufpr.br/~rudmar/refri/material/10_ACESSORIOS.pdf>. Acesso em 12 de outubro de 2018.

USP. **Primeira lei da termodinâmica.** Disponível em <sites.poli.usp.br/d/pqi5821/PQI5821-aula-01.pdf>. Acesso em 09 de setembro de 2018.

WEB, A. C. **COP.** Disponível em <<http://www.webarcondicionado.com.br/entenda-o-que-e-cop-e-eer-e-saiba-como-calculas>>. Acesso em 25 de abril de 2018.