UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME JOSÉ BARBOSA SOUZA

ANÁLISE ENERGÉTICA DO REAPROVEITAMENTO TÉRMICO DE COMPRESSORES EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

Recife
2023

GUILHERME JOSÉ BARBOSA SOUZA

ANÁLISE ENERGÉTICA DO REAPROVEITAMENTO TÉRMICO DE COMPRESSORES EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Souza, Guilherme José Barbosa.
Análise do reaproveitamento térmico de compressores em sistemas de refrigeração por absorção / Guilherme José Barbosa Souza. - Recife, 2023.
44 p : il., tab.

Orientador(a): Flávio Augusto Bueno Figueiredo
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

1. Compressor. 2. Absorção. 3. Reaproveitamento. 4. Energético. 5. Sustentabilidade. I. Figueiredo, Flávio Augusto Bueno. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP

DEMEC

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 05° dia do mês de maio do ano de dois mil e vinte e três, às 10:00 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Análise energética do reaproveitamento térmico de compressores em sistemas de refrigeração por absorção**, elaborado pelo aluno **Guilherme José Barbosa Souza**, matrícula 098.584.144/39, composta pelos avaliadores Prof. **Flávio Augusto Bueno Figueiredo** (orientador), Prof. **José Claudino de Lira Júnior** (avaliador) e Profa. **Janaina Moreira de Meneses** (avaliadora). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua aprovação, atribuindo-lhe a média 8,0 (oito), julgando-o apto(X) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador:	Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo	Nota: 8,0 (oito)
Assinatura	_____	
Avaliadora Interna:	Profa. Janaina Moreira de Meneses	Nota: 8,0 (oito)
Assinatura	_____	
Avaliador Interno:	Prof. José Claudino de Lira Júnior	Nota: 8,0 (oito)
Assinatura	_____	

Recife, 05 de maio de 2023.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico este trabalho em homenagem especialmente a meus pais, Edicleide Bezerra Barbosa de Souza e Roberto Antonio de Souza, e à minha esposa Maria Eduarda Silva. Ensinaram-me a sempre buscar meus objetivos com perseverança.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido sempre com o apoio de diversas pessoas, dentre as quais agradeço:

Ao meu orientador Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo por todo o auxílio na realização da pesquisa.

Aos meus pais e familiares por sempre estarem me incentivando para concluir esta graduação.

Á minha companheira, Maria Eduarda, por todo o apoio e compreensão durante o curso.

Aos meus grandes amigos, por toda ajuda e momentos de descontração que tivemos durante nossa formação.

Agradeço também à universidade e as empresas as quais estagiei durante o desenvolvimento deste trabalho, pelo auxílio à pesquisa.

RESUMO

Para o bom funcionamento de um compressor de ar, se faz necessário o controle de temperatura, e consequentemente a liberação de calor. Este processo apesar de ter baixa temperatura de saída, libera uma grande quantidade de calor ao ambiente que pode ser reaproveitada para outros fins. Neste trabalho, é realizado a análise energética da transferência de energia que pode ser utilizada para alimentar sistemas de refrigeração por absorção, que pode ser utilizado na climatização de diversos ambientes, objetivo este que será abordado por meio de cálculos baseados na termodinâmica. O desenvolvimento foi feito com simulações em regime permanente, utilizando dados de problemas demonstrados em literaturas e folhas de engenharia dos compressores. Os resultados mostram que, para o sistema de compressores considerado, é possível gerar aproximadamente 100 TR de capacidade refrigerativa, tendo economia anual em torno de R$ 200.000,00, mostrando que a adaptação para reaproveitamento do calor liberado pelo óleo de refrigeração dos compressores é uma ótima alternativa para aumentar a eficiência global do sistema, além de contribuir com a sustentabilidade e oferecer retorno financeiro com a economia no consumo de energia para climatização em geral.

Palavras-chave: compressor; absorção; reaproveitamento; energético; sustentabilidade, chiller.

ABSTRACT

For the proper functioning of an air compressor, temperature control is necessary, and consequently the release of heat. This process, despite having a low output temperature, releases a large amount of heat to the environment that can be reused for other purposes. In this work, the energy analysis of the transfer of energy that can be used to feed absorption refrigeration systems, which can be used in the air conditioning of different environments, is carried out, an objective that will be approached through calculations based on thermodynamics. The development was done with steady-state simulations, using data from problems demonstrated in literature and compressor engineering sheets. The results show that adapting to reuse the heat released by compressors is a great alternative to increase the overall efficiency of the system, in addition to contributing to sustainability and offering financial return with savings in energy consumption for air conditioning in general.

Keywords: compressor; absorption; energy reuse; sustainability, chiller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de refrigeração por compressão. 17
Figura 2 – Sistema de refrigeração por absorção. 18
Figura 3 – Sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito. 20
Figura 4 – Ciclo real de um sistema de refrigeração por compressão 21
Figura 5 – Comparativo entre temperatura e COP de ciclo ideal e real 22
Figura 6 – Diagrama de pressão, temperatura e concentração da mistura. 23
Figura 7 – Vista interna do compressor. 24
Figura 8 – Absorvedor 26
Figura 9 – Gerador 26
Figura 10 – Condensador 27
Figura 11 – Evaporador 27
Figura 12 – Balanço de Massa 29
Figura 13 – Definição dos estágios 30
Figura 14 – Sistema do gerador 31
Figura 15 – Sistema do condensador 32
Figura 16 – Sistema do evaporador 32
Figura 17 – Sistema do absorvedor 33
Figura 18 – Sistema do trocador de calor 34
Figura 19 – Válvula de expansão da saída do condensador 35
Figura 20 – Válvula de expansão no retorno ao absorvedor 35
Figura 21 – Bomba 36
Figura 22 – Fluxograma de cálculos 37
Figura 23 – Sistema sem trocador de calor 38
Figura 24 – Dados dos estágios do sistema sem trocador 39
Figura 25 – Resultados do sistema com trocador 39
Figura 26 – Sistema com trocador de calor 40
Figura 27 – Dados dos estágios do sistema com trocador 40
Figura 28 – Resultados do sistema com trocador 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média dos coeficientes de performance por tipo de sistema de refrigeração. . 17
Tabela 2 – Coeficiente de performance de sistemas de absorção multiefeito. 19

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EES	Engineering Equation Solver
COP	Coeficiente de performance
TR	Tonelada de refrigeração

LISTA DE SÍMBOLOS

W_C	Trabalho mecânico do compressor de refrigeração (W)
COP	Coeficiente de performance
Q_R	Calor perdido pelo refrigerante (J)
Q_L	Calor absorvido pelo refrigerante no sistema por compressão (J)
h	Entalpia (J)
$\dot{Q}_{evap}$	Taxa de calor absorvida no evaporador (W)
$\dot{Q}_{gera}$	Taxa de calor fornecida no gerador (W)
$\dot{Q}_{gera1}$	Taxa de calor fornecida no gerador 1 em sistema de duplo efeito (W)
$\dot{Q}_{gera2}$	Taxa de calor fornecida no gerador 2 em sistema de duplo efeito (W)
$\sum \dot{m_{in}}$	Somatório das vazões mássicas de entrada (kg/s)
$\sum \dot{m_{out}}$	Somatório das vazões mássicas de saída (kg/s)
$x_{entrada}$	Conservação química de entrada
x_{sada}	Conservação química de saída
$\dot{Q}$	Taxa de calor (W)
$\dot{W}$	Trabalho (W)
V_{out}	Velocidade de saída (m/s)
V_{in}	Velocidade de entrada (m/s)
g	Gravidade (m/s^2)
Z	Altura (m)
$\dot{m}$	Vazão mássica (kg/s)
$\dot{Q}_c$	Taxa de calor fornecida ao gerador (W)
$\dot{m_{oleo}}$	Vazão mássica do óleo refrigerante (kg/s)
C_{oleo}	Coeficiente calorífico do óleo (cal/gC)
T	Temperatura (C)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 13

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16
3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO 16
3.1.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO 16
3.1.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO 17
3.1.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO 19
3.1.4 COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO 20
3.1.5 SOLUÇÃO BINÁRIA 22
3.1.6 MISTURA ÁGUA-BROMETO DE LÍTIO 22
3.2 COMPRESSORES DE AR COMPRIMIDO 23
3.3 CHILLERS 24
3.4 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO 25
3.4.1 ABSORVEDOR 25
3.4.2 BOMBA 25
3.4.3 GERADOR 26
3.4.4 CONDENSADOR 26
3.4.5 VÁLVULA DE EXPANSÃO 27
3.4.6 EVAPORADOR 27

4 METODOLOGIA 28
4.1 PESQUISA DOCUMENTAL 28
4.2 RESOLUÇÃO DO MODELO 28
4.2.1 Balanço de massa 29
4.2.2 Balanço químico 29
4.2.3 Balanço de energia 29
4.3 ANÁLISE DE MASSA E ENERGIA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO 30
4.3.1 GERADOR 31
4.3.1.1 Balanço de massa do gerador 31
4.3.1.2 Balanço de energia do gerador 31
4.3.2 CONDENSADOR 31
4.3.2.1 Balanço de massa do condensador 32
4.3.2.2 Balanço de energia do condensador 32
4.3.3 EVAPORADOR 32

4.3.3.1 Balanço de massa do evaporador 33
4.3.3.2 Balanço de energia do evaporador 33
4.3.4 ABSORVEDOR 33
4.3.4.1 Balanço de massa do absorvedor 33
4.3.4.2 Balanço de energia do absorvedor 34
4.3.5 TROCADOR DE CALOR DO SISTEMA DE ABSORÇÃO 34
4.3.5.1 Balanço de massa do trocador de calor 34
4.3.5.2 Balanço de massa do trocador de calor 35
4.3.5.3 Balanço de energia do trocador de calor 35
4.3.6 DISPOSITIVOS REDUTORES DE PRESSÃO E BOMBA 35
4.3.6.1 Balanço de energia da bomba 36

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
5.1 SIMULAÇÃO COM SOFTWARE EES 37
5.1.1 Simulação do ciclo sem trocador de calor 38
5.1.2 Simulação do ciclo com trocador de calor 39
5.2 REAPROVEITAMENTO TÉRMICO DOS COMPRESSORES 41
5.3 RETORNO FINANCEIRO 42

6 CONCLUSÕES 43

REFERÊNCIAS 44

1 INTRODUÇÃO

A descoberta da energia elétrica trouxe inúmeros avanços tecnológicos para a nossa civilização, e a cada dia que passa nos tornamos ainda mais dependentes da utilização deste tipo de energia. A busca por fontes alternativas que não comprometam o meio ambiente, mas que sejam eficientes, tem se itensificado nos últimos tempos, bem como estudos que procuram formas de reduzir as perdas no consumo de eletricidade ou de reaproveitar em processos secundários, aumentando assim a eficiência global do sistema.

A Associação dos Grandes Consumidores Industriais de Energia e Consumidores Livres(ABRACE) mostrou em pesquisa que nos últimos 5 anos, o preço da conta de energia subiu cerca de 47%, e que o Brasil é o segundo país da América Latina com energia elétrica mais cara. O setor industrial, de acordo com a EPE(Empresa de Pesquisa Energética) consome cerca de 30% de toda energia produzida no Brasil, sendo o 2° setor que mais consome energia elétrica. Este fato em conjunto da crescente elevação de preços da energia, evidênciam que o custo relacionado à eletricidade deve ser levado em consideração na elaboração dos gastos de uma indústria.

Em pesquisa divulgada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, cerca de 10% da energia elétrica consumida em uma indústria está relacionada ao funcionamento dos compressores de ar comprimido. Outro fator importante é que cerca de 70% da energia consumida, por estes compressores, é liberada em forma de calor, sendo desperdiçada ao ambiente.

O conceito de funcionamento dos compressores de ar se baseia na transformação de energia elétrica em energia cinética, ocasionando o aumento de pressão do fluido, e durante esta conversão a maior parte da energia que alimenta o compressor é transformada em forma de calor. Para suportar este calor, é necessário ter um ótimo sistema de lubrificação e refrigeração, que no presente estudo é baseado na corrente de um fluído refrigerante que percorre todo o sistema do compressor absorvendo calor, e liberando-o em uma serpentina na qual um fluxo de ar externo é forçado a passar, semelhante a um radiador veicular.

Como o compressor é um equipamento que consome bastante energia elétrica, onde grande parte é convertida em calor, mas que também deve manter uma temperatura de funcionamento baixa, em sua exaustão é possível medir uma alta taxa de calor que é liberada ao ambiente, a qual, apesar de estar em baixa temperatura, pode ser reaproveitada em processos secundários que funcionem a partir do consumo de calor.

Devido a estes fatos, este trabalho busca apresentar o estudo de uma alternativa para reaproveitar parte da energia consumida nos compressores, que é perdida em forma de calor. Para isso é necessário a utilização de um sistema que use o calor para gerar trabalho, que neste estudo será um chiller funcionando a partir de um sistema de refrigeração por absorção. Outro ponto importante é que além de reaproveitar calor, também será possível ter economia a partir do desligamento de outro equipamento de refrigeração, que terá seu papel desempenhado pelo chiller de absorção, que neste trabalho será avaliado a capacidade de alimentação dos compressores de ar comprimido e se é viável, do ponto de vista em economia real, a utilização

do calor perdido para alimentar um sistema de refrigeração por absorção.

Os dados utilizados como base para este estudo foram retirados de literatura, por apresentarem valores estudados em problemas reais e já praticados em equipamentos, tendo em vista que este estudo é bibliográfico e não foi testado em realidade.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral:

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade do reaproveitamento energético do calor presente no óleo refrigerante dos compressores de ar, não utilizados no sistema de refrigeração, para alimentar um sistema de refrigeração por absorção.

Objetivos específicos:

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar revisão bibliográfica sobre a capacidade de geração de calor de compressores e de aproveitamento deste calor em sistemas de refrigeração por absorção.
- Analisar um sistema hipotético de reaproveitamento de calor do óleo refrigerante de compressores.
- Simular coeficiente de performance do sistema de refrigeração em regime permanente com dados de literatura para entrada e saída dos estágios.
- Desenvolver programação númerica, utilizando software, para o sistema de refrigeração por absorção.
- Quantificar custo de economia com o reaproveitamento deste calor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O modelo de sistemas de refrigeração por absorção é considerado um dos meios mais antigos estudados. Os trabalhos desenvolvidos pelo entusiasta do sistema de absorção Ferdinand E. Carré que o permitiram realizar a primeira patente de uma máquina de refrigeração por absorção (STOECKER, 1985), a qual foi amplamente utilizada na Alemanha, França e Inglaterra (STEPHAN, 1983) até o inicio do desenvolvimento do sistema de refrigeração por compressão a vapor, momento o qual os sistemas de absorção começaram a ter menos visibilidade. Com a dificuldade de produção energética no final da primeira guerra mundial, os sistemas de absorção começaram a serem novamente utilizados em larga escala, além de gerar a preocupação em diminuir o desperdício de energia, criando a necessidade de desenvolver sistemas de aproveitamento de rejeitos, dando continuidade aos estudos de sistemas de cogeração.

Em 1824, Faraday propôs o desenvolvimento de um sistema de refrigeraçao por meio de uma reação química entre cloreto de prata e vapores de amônia, onde neste caso o vapor de amônia é absorvido pelo cloreto de prata, mistura a qual adicionada calor se torna líquida, e ao retirar a fonte de calor, ocorre a evaporação da amônia, retirando calor do ambiente. Devido a isso, outros conjuntos foram estudados afim de conseguir obter uma melhor eficiência térmica.

Os conjuntos mais utilizados atualmente são as duplas Amônia-água e Água-Brometo de lítio, pares que não agridem o meio ambiente, o que torna atrativo, do ponto de vista sustentável, o seu uso. O par H_20-LiBr teve como um dos desenvolvedores em 1945 a empresa Carrier, a qual utilizava o conjunto em grande escala para refrigerar grandes edifícios (L.A.B. MüHLE I.N., 1994). O primeiro sistema de absorção de duplo efeito, trabalhando com H_20-LiBr, foi construído na década de 50, por J.S Swearinger e E.P Whitlow e em 1985 o ciclo de triplo efeito foi desenvolvido e patenteado pela empresa Hitachi. O atual interesse em sistemas de absorção se refere a utilização a partir do reaproveitamento de resíduos térmicos à baixas temperaturas. Alguns desses sistemas, a base de Água - Amônia já foram montados e testados Sun Wei Han (2013).

Devido a facilidade de recuperar calor de praticamente qualquer sistema, além de apresentarem baixíssimo custo de manutenção, longa vida útil e dissipar pouco calor residual durante sua operação, o sistema de refrigeração por absorção está presente em 3 a cada 5 sistemas de refrigeração acionado termicamente na região da europa (HENNING, 2007). Mas apesar destes pontos positivos, o sistema de absorção quando comparado ao de compressão a vapor, possui baixo coeficiente de perfomance (COP), fator o qual somado à facilidade de acesso a energia elétrica, torna o sistema de refrigeração por compressão o mais utilizado quando se trata de climatização de ambientes.

Contudo, o uso de calor reaproveitado de outros processos industriais, como no caso deste trabalho, os gases de refrigeração de um compressor de ar, torna o sistema de absorção atrativo do ponto de vista científico, com vários trabalhos buscando formas de melhorar seu COP e sua capacidade de refrigeração. Segundo (NIKBAKHTI XIAOLIN WANG, 2020) quanto

maior o número de efeitos de um sistema de absorção, maior será sua eficiência energética, porém, a capacidade térmica necessária a ser fornecida aos geradores também se torna maior, sendo importante avaliar qual a melhor aplicabilidade de acordo com a quantidade de calor a ser utilizada como reuso.

Mesmo não sendo tão fácil quantificar exatamente o valor de energia gasto com perdas térmicas residuais, de acordo com (SIMEONE, 2018) cerca de 25% a 50% da energia consumida é perdida como calor residual. Enquanto (PERRY, 2014) demonstra que os compressores de ar, equipamentos de uso intensivo de energia, tem um dos maiores gastos, com cerca de 80% a 93% da energia elétrica sendo convertida em energia térmica, a qual pode ter 80% à 96%, de todo o desperdício, recuperado.

Os pontos de vista econômico e socioambiental estão fortementes ligados a eficiência dos processos indústriais, por essa razão a alta demanda de energia elétrica em diversos processos produtivos se torna inevitável, ocasionando um elevado consumo principalmente no setor industrial.

> A recuperação do calor residual auxilia na redução acentuada do consumo e das emissões de resíduos industriais. (A.TASSOU, 2018)."

Segundo a EPE (Empresa de pesquisa energética) o setor industrial correspondeu a 35,77% de todo o consumo energético no Brasil, no período de 2018 à 2021. A dependência deste setor relacionada a eletricidade, torna evidente a importância econômica de reaproveitar ao máximo os resursos disponíveis, e com o aumento do preço da energia elétrica e o resultado das emissões dos refrigerantes, os sistemas de absorção, utilizando como base de alimentação o reaproveitamento energético de resíduos térmicos, se tornam alternativas bem atrativas para auxiliar na redução de custos que as indústrias possuem com energia elétrica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho engloba múltiplos assuntos, e é importante conhecer os conceitos básicos do problema para o melhor entendimento sobre a análise e seus resultados. Nos próximos tópicos estarão sendo abordados a transmissão de calor, balanço de massa, balanço de energia, coeficiente de performance, estágios termodinâmicos e como estes pontos estão correlacionados com o sistema de absorção.

3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Os sistemas de refrigeração consistem basicamente em uma malha fechada, na qual um determinado fluido refrigerante em fase líquida ao perder pressão, durante seu processo de evaporação, absorve calor do ambiente a ser refrigerado, e depois libera todo o calor adquirido deste ambiente para um outro meio externo quando está em estado de vapor superaquecido.

Existem diversos meios possíveis para refrigerar um ambiente, todos os quais necessitam do consumo de energia para funcionarem, como por exemplo: refrigeração por compressão a vapor e refrigeração por absorção. Segundo (STOECKER, 1985) estes dois meios, que serão explicados mais a frente, são os mais utilizados, diferenciando-se no modo que o fluido refrigerante é deslocado durante o processo, onde no ciclo por compressão o fluido ao sair do evaporador entra no compressor, mudando de estado por meio do trabalho realizado e transformando-se em vapor superaquecido, enquanto que no ciclo por absorção, no lugar do compressor, temos o absorvedor, uma bomba e o gerador de vapor.

3.1.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO

O sistema de refrigeração por compressão é o meio mais utilizado para resfriar ambientes de diversas aplicações e dimensões. Este ciclo além de obter excelentes resultados de performance, conforme Tabela 1, é construído de modo simples e que ocupa pouco espaço e seguindo a Figura 2.

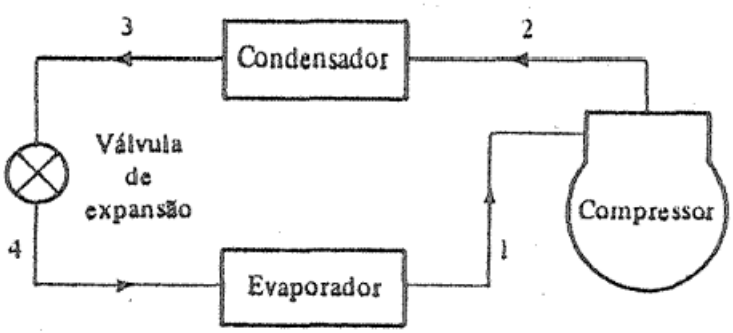
O funcionamento do processo da Figura 1 é da seguinte maneira: O compressor, por meio de trabalho mecânico W_C, aumenta a pressão, a temperatura e entalpia do fluido refrigerante, do estágio 1 ao 2, após este processo, o fluido passa para o condensador em estado de vapor superaquecido. Do estágio 2 ao 3, o refrigerante perderá calor Q_R para um meio externo, transformando-se em estado líquido e diminuindo sua entalpia, após este processo, o líquido se desloca para a válvula de expansão, e durante a mudança de estágio 3 ao 4, sua pressão é reduzida, ocasionando a diminuição de temperatura, de forma isentálpica. Na última transição de estágio, do 4 ao 1, que ocorre no evaporador, o líquido com temperatura mais baixa que a do ambiente a ser refrigerado absorve calor Q_L, consequentemente sua temperatura e entalpia aumentam, transformando o líquido em vapor na saída do evaporador e entrada do compressor.

Tabela 1 – Média dos coeficientes de performance por tipo de sistema de refrigeração.

Refrigeração	Fluido	COP
Absorção de simples efeito	LiBr/Água	0.7
Absorção de simples efeito	Amônia/Água	0.6
Absorção de duplo efeito	LiBr/Água	1.2
Absorção de duplo efeito	Amônia/Água	0.8
Compressão mecânica	R134a	3.8
Compressão mecânica	R410a	5.3

Fonte: Herold K. E.; Radermacher (1996)

Figura 1 – Sistema de refrigeração por compressão.



Fonte: Stoecker (1985)

A performance do ciclo é definida a partir do trabalho desempenhado pelo compressor W_C relacionado ao calor retirado do ambiente pelo evaporador Q_L, divisão a qual temos o resultado como COP (Coeficiente de performance):

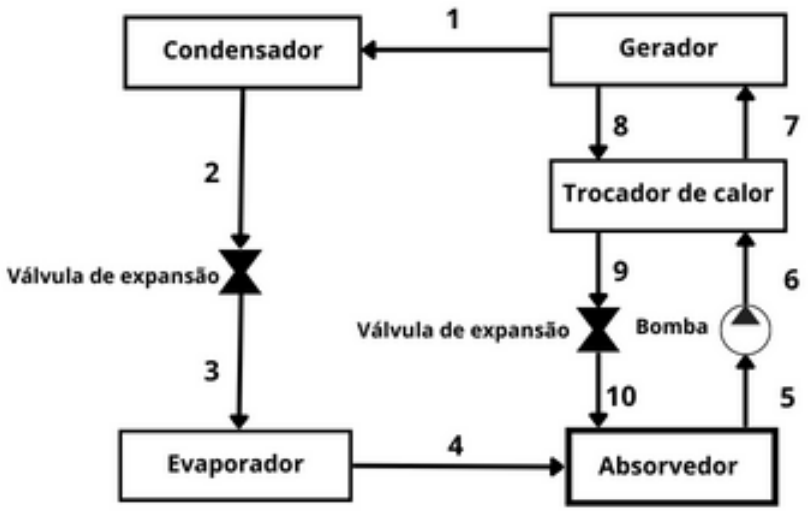
$$COP = \frac{Q_L}{W_C} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \tag{3.1}$$

3.1.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

Segundo alguns estudos, o sistema de refrigeração por absorção foi um dos primeiros a serem desenvolvidos e ser amplamente utilizado, mas com o a criação da energia elétrica, os sistemas por compressão a vapor se tornaram a grande maioria no quesito de refrigerar ambientes, deixando os sistemas por absorção para casos específicos. Contudo, com a busca de fontes renováveis de energia e o aumento da preocupação para o mínimo gasto energético, os sistemas por absorção voltaram a ter atenção, devido a alta demanda elétrica dos compressores de vapor.

O ciclo por absorção tem por base a utilização de uma solução binária, podendo ser Amônia-Água ou Água-Brometo de lítio, a qual é submetida a alguns processos com objetivo de refrigerar ambientes. Este sistema de refrigeração, assim como o de compressão a vapor, opera com duas pressões, a maior operando no gerador e condensador, e a menor no evaporador e absorverdor.

Figura 2 – Sistema de refrigeração por absorção.



Fonte: Autor

O funcionamento do processo da Figura 2 funciona da seguinte maneira: A solução binária em estado líquido e a alta pressão, neste caso Água-Brometo de lítio, recebe calor no gerador vinda de uma fonte externa, com o aumento da temperatura, o refrigerante (Água) evapora, se desprendendo da solução e se deslocando para o condensador, enquanto o absorvente (Brometo de lítio) retorna ao absorvedor por meio de uma válvula redutora de pressão, juntando-se a uma mistura forte. No condensador, o refrigerante perde calor para um meio externo e se condensa. Após a condensação, o refrigerante se desloca para a válvula de expansão, na qual por meio da queda abrupta de pressão e de um processo isoentálpico, tem sua temperatura reduzida. O fluido ao entrar no evaporador começa a ganhar calor oriundo do ambiente a ser refrigerado, ao sair, com o calor adquirido, o refrigerante está em estado de vapor saturado. Ao sair do evaporador, o refrigerante entra no absorvedor, onde já existe o absorvente em uma mistura altamente concentrada, ao entrarem em contato, o refrigerante é absorvido, criando uma mistura fraca, em estado líquido e com alta concentração de fluido refrigerante. A mistura é então bombeada, elevando sua pressão e se encaminhando para o gerador, iniciando o ciclo novamente.

A solução binária mais utilizada em processos por absorção é Amônia-Água, onde o refrigerante é a amônia e o absorvedor é a água. Mas a diferença entre este ciclo e o de Água-Brometo de lítio, se dá na adição de mais um componente, o retificador, para condensar a parcela

de água que evaporou junto da amônia, chamado de "vapor úmido". O par Água-Brometo de lítio não requer a utilização do retificador, pois como a temperatura de ebulição do Brometo de lítio ser 1265°C, a água evapora sem o sal brometo de lítio no gerador. Entretanto, pode ocorrer a precipitação do sal, formando cristais que podem barrar o fluxo e impedir o funcionamento, caso a concentração tenha sua solubilidade ultrapassada (FONSECA, 2013).

A avaliação da performance dos sistemas de refrigeração por absorção, chamada de COP (Coeficiente de performance), é definido como a razão da taxa de calor que é retirada no evaporador $\dot{Q}_{evap}$ sobre a taxa de adição de calor que é fornecida pelo gerador $\dot{Q}_{gera}$:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gera}} \tag{3.2}$$

O trabalho realizado pela bomba, quando comparado à energia térmica utilizada no gerador, possui valor bem mais baixo, tornando-se desprezível na consideração dos cálculos para obtenção do coeficiente de performance.

3.1.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO

Como já sabemos, o coeficiente de performance para sistemas de refrigeração por absorção apresenta um valor abaixo da média quando comparado a outros sistemas de refrigeração, e com o objetivo de melhorar o desempenho deste ciclo, algumas alterações podem ser realizadas, como por exemplo aumentar o número de geradores. Este ciclo é denominado como sistema de absorção multiefeito, tendo sua nomenclatura e funcionamento variado de acordo com o número de geradores do sistema.

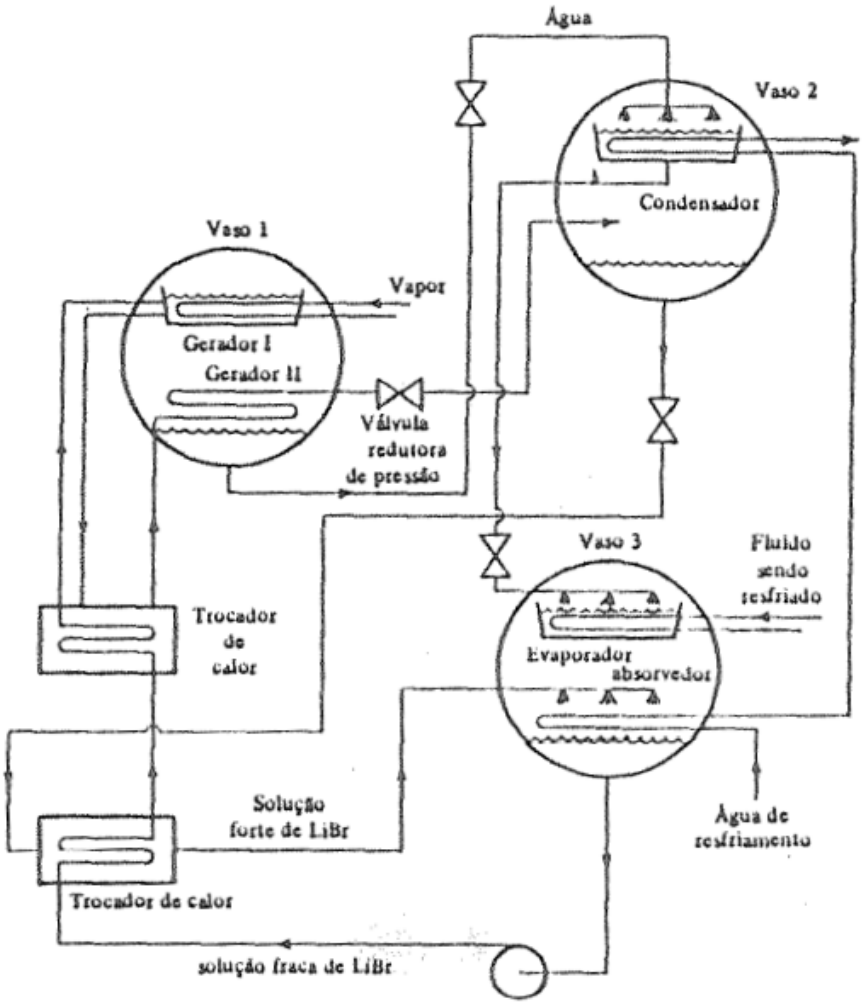
Tabela 2 – Coeficiente de performance de sistemas de absorção multiefeito.

Sistema	Quente (°C)	Frio (°C)	Solução binária	Cap. Refrigerar (TR)	COP
Simples efeito	80-110	5-10	LiBr/Água	10-100	0,5-0,8
Simples efeito	120-150	<0	Água/Amônia	3-25	0,5
Duplo efeito	120-150	5-10	LiBr/Água	>1000	0,8-1,2
Duplo efeito	120-150	<0	Água/Amônia	>1000	0,8-1,2
Triplo efeito	190-225	5-10	LiBr/Água	100-1000	1,8

Fonte: Siddiqui (2015)

O sistema por absorção de multiefeito tem por base o mesmo ciclo, alterando o número de componentes, outros também utilizam trocadores de calor entre o absorvedor e gerador, com objetivo de reaproveitar o calor da solução forte que retorna do gerador ao absorvedor, aumentando a temperatura da mistura que entra no gerador. Como exemplo deste ciclo segue o esquema da Figura 3 que representa um sistema de duplo efeito:

Figura 3 – Sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito.



Fonte: Stoecker (1985)

O COP (Coeficiente de performance) deste sistema, neste caso, é definido como a razão da taxa de calor que é retirada no evaporador $\dot{Q}_{evap}$ sobre a taxa de adição de calor que é fornecida pelos geradores $\dot{Q}_{gera1}$ e $\dot{Q}_{gera2}$:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gera1} + \dot{Q}_{gera2}} \tag{3.3}$$

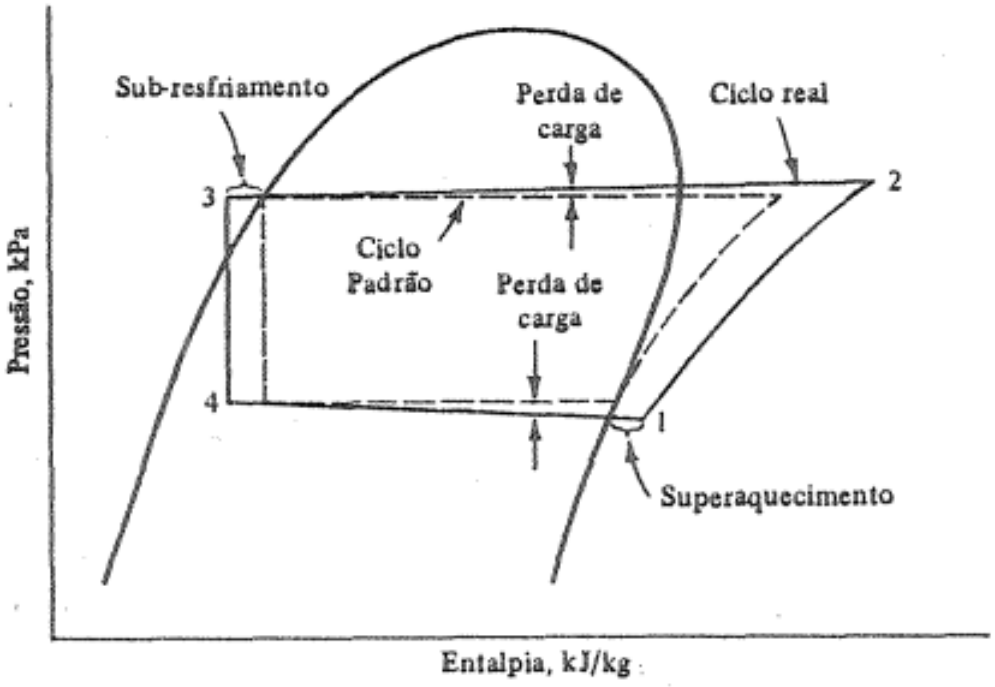
3.1.4 COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Existem algumas diferenças entre os sistemas de refrigeração por compressão a vapor e por absorção, a principal é a de que no ciclo por compressão existe o consumo de energia elétrica por parte do compressor, enquanto que no ciclo de absorção é necessário o fornecimento de energia térmica ao gerador. Realizar a comparação entre os coeficientes de performance dos

dois sistemas é inviável, visto que o trabalho utilizado no compressor para elevar a pressão do refrigerante é bem mais significativo quando comparado a uma bomba.

Além de se diferenciar os ciclos por tipo de refrigeração, também se faz necessário distinguir o ciclo ideal do ciclo real, onde no primeiro são feitas algumas considerações com objetivo de maximizar seu desempenho, como por exemplo não considerar as perdas de temperatura que ocorrem nas transições do fluido entre os equipamentos, a perda de carga durante o escoamento do fluxo nas tubulações, considerações que tornam mais fácil o desenvolvimento do ciclo teórico, mas que trazem um resultado bastante diferente do ciclo real. Um exemplo de como estas considerações podem afetar no valor final do COP pode ser visto no gráfico de pressão x entalpia abaixo:

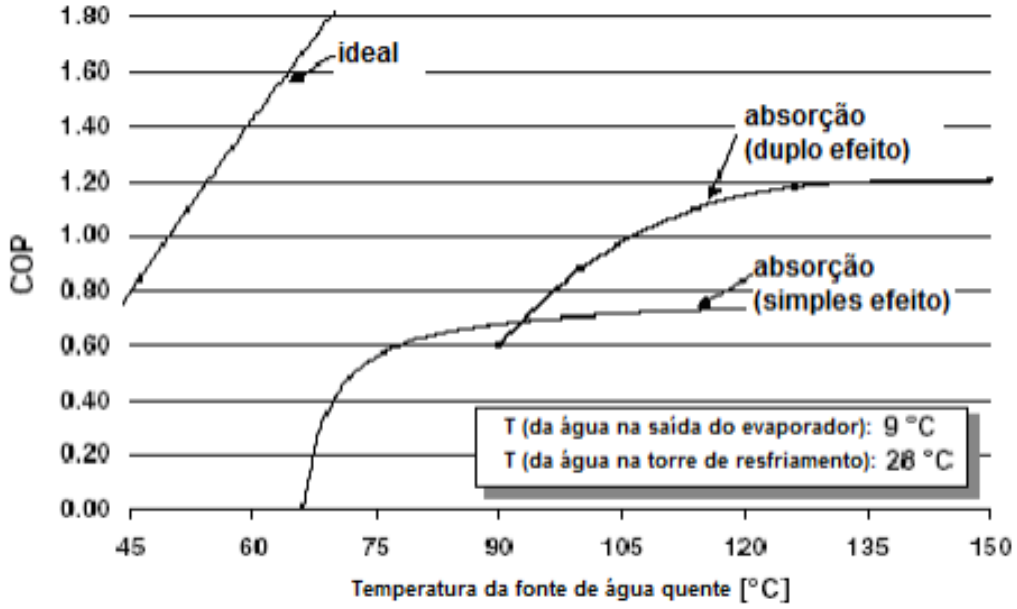
Figura 4 – Ciclo real de um sistema de refrigeração por compressão



Fonte: Stoecker (1985)

A comparação, se realizada entre o sistema de refrigeração por absorção real, simples e duplo efeito, e um ciclo ideal proposto por carnot, também é possível notar a diferença entre os coeficientes de performance, onde a variação do COP de um ciclo ideal é linear e crescente, além de ser maior que o de simples e de duplo efeito. Esta situação ocorre por conta das irreversibilidades entre o sistema e o meio. No caso do sistema de duplo efeito, por possuir dois geradores e ter um melhor desempenho energético, é possível obter uma menor irreversibilidade, desde que tenha uma temperatura maior na fonte quente quando comparado ao de duplo efeito.

Figura 5 – Comparativo entre temperatura e COP de ciclo ideal e real



Fonte: MENDONÇA (2008)

3.1.5 SOLUÇÃO BINÁRIA

O principal agente que influência no desempenho do ciclo de refrigeração é a mistura de fluidos utilizada nestes sistemas. Todas as variáveis termodinâmicas estão correlacionadas às características desta solução, e para um bom resultado é necessário devenvolver um estudo para identificar as melhores propriedades desta mistura e dos seus pares individuais, fluido absorvedor e fluido refrigerante. A pressão, assim como outras váriaveis que estão correlacionadas como temperatura, entalpia, volume, vazão mássica, entropia, são fatores que definem a concentração da mistura, que é dada pela equação abaixo:

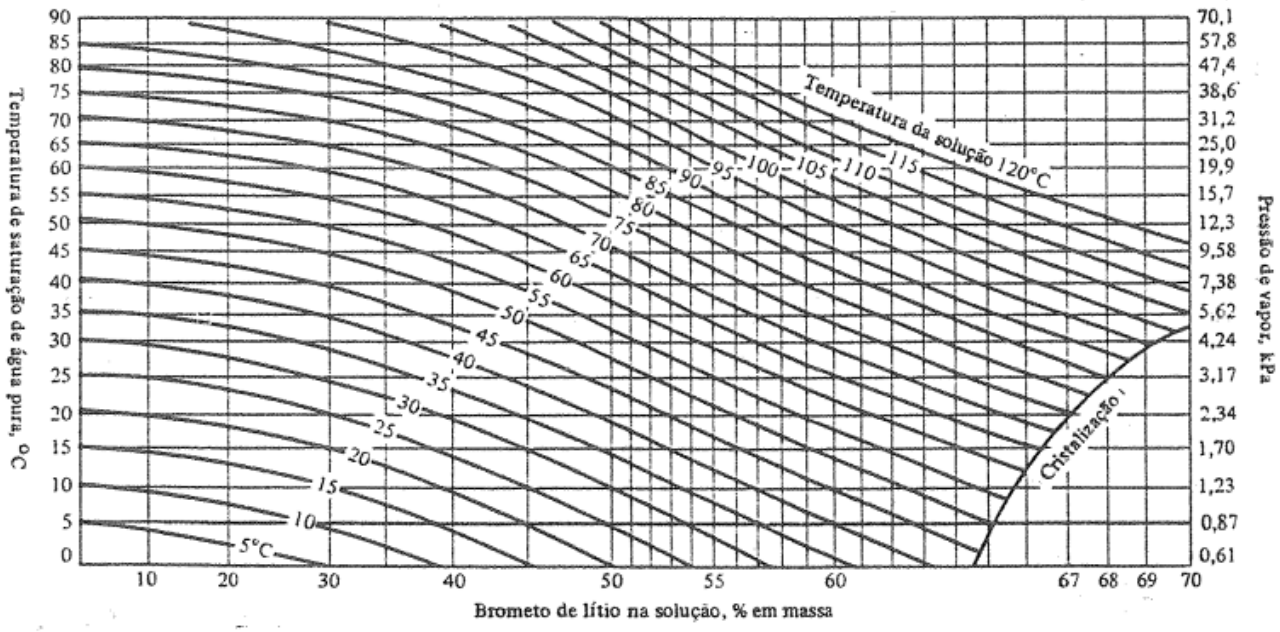
$$\text{x (Concentração da mistura)} = \frac{\text{Massa de um componente (kg)}}{\text{Massa da mistura (kg)}} \tag{3.4}$$

3.1.6 MISTURA ÁGUA-BROMETO DE LÍTIO

A solução a ser utilizada como base de estudo para este trabalho será água-brometo de lítio, na qual a água é o refrigerante e o brometo de lítio é o absorvedor, que por ser um sal, possui ótima capacidade de absorver o vapor de água que sai do evaporador, criando uma queda de pressão interna no absorvedor. Enquanto a água é um refrigerante natural altamente utilizado, por sua compatibilidade e sua capacidade calorífica de ser resfriada a baixas temperaturas em pressões negativas (próxima do vácuo).

Dessa forma a mistura se torna uma excelente opção para utilizar em sistemas de refrigeração por absorção, desde que operem a temperatura acima dos 0°C, ideal para condicionamento de ar de ambientes que é o foco deste trabalho. Porém, existem algumas desvantagens de utilização desta solução, dentre as quais o sal brometo de lítio pode cristalizar em temperaturas mais baixas que seu limite de solubilidade, criando a necessidade de resfriamento suficientemente baixo no absorvedor, pois em baixas temperaturas este sal possui maior capacidade de absorção, tornando possível uma solução mais fraca, e também diminuindo o risco de precipitação. O gráfico abaixo indica a região de cristalização do sal, de acordo com a concentração da mistura, pressão e temperatura de saturação da água:

Figura 6 – Diagrama de pressão, temperatura e concentração da mistura.



Fonte: Stoecker (1985)

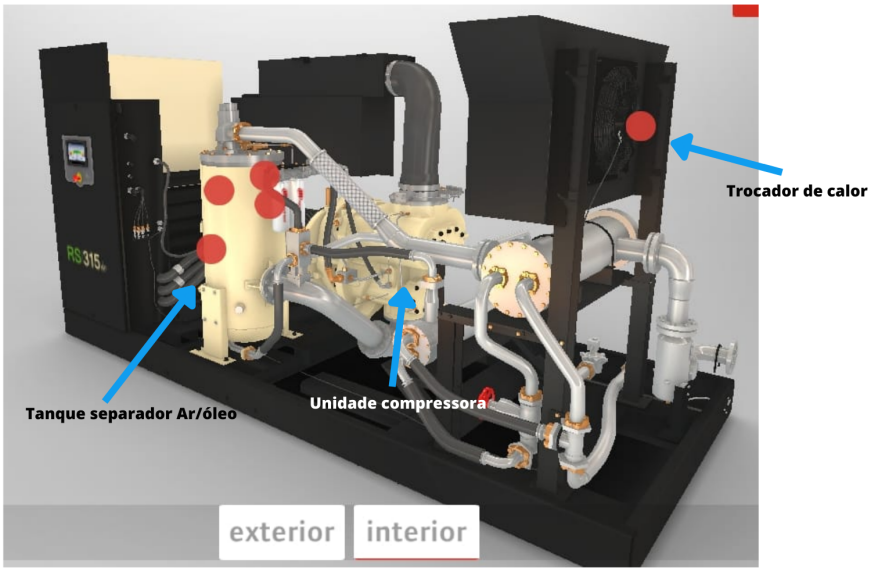
Outro ponto é que esta solução opera abaixo da pressão atmosférica, exigindo que todo o sistema seja bem isolado do ambiente externo para não haver infiltrações de oxigênio, que junto da mistura água-brometo de lítio, tem alto poder de corrosão. Mesmo com estes fatos, este par ainda se mantém como uma boa escolha para utilização em sistemas de absorção.

3.2 COMPRESSORES DE AR COMPRIMIDO

A área de utilidades é uma das áreas de uma indústria que tem mais importância para o pleno funcionamento, pois é neste setor que o ar comprimido e a água utilizada nas fábricas são tratados e distribuidos, além de ser responsável por um dos maiores consumos energéticos. No caso do ar comprimido, sua geração vem do compressor de ar, equipamento de alto consumo elétrico e de geração de resíduo térmico, que terá foco no reaproveitamento neste trabalho.

O funcionamento de um compressor de ar industrial parte de um sistema onde na entrada possui um filtro de ar, após este filtro há a unidade compressora, componente que acionado via motor elétrico por acoplamento, gera um movimento interno dos seus rotores criando uma zona de baixa pressão, forçando o fluxo de ar para a sua parte interna. A compressão se dá na diferença de volume causada pelo formato de seus rotores, e o ar ao sair segue o fluxo para o separador, equipamento que fará a separação entre o ar comprimido e o óleo refrigerante, utilizado para lubrificar os rotores e retirar parte do calor adquirido pelo ar durante seu aumento de pressão, após separado do óleo, o ar segue para um trocador de calor, tipo serpentina, com objetivo de diminuir sua temperatura, afim de abaixar a quantidade de vapor de água que é mandado pra linha. A figura abaixo representa o esquema de funcionamento de um compressor.

Figura 7 – Vista interna do compressor.



Fonte: Ingersoll Rand

Existem diversos tipos de compressores de ar no mercado, mas o equipamento que terá foco neste estudo será com unidade compressora do tipo parafuso e de velocidade fixa, que são os mais utilizados para alimentaçao de redes pneumáticas indústriais.

3.3 CHILLERS

Os chillers são equipamentos utilizados na refrigeração de grandes espaços, como shoppings por exemplo, e neste trabalho será utilizado para refrigerar alguns espaços da indústria automotiva, como escritórios, laboratórios de testes entre outros. Os chillers resfriam uma corrente de água, tornando-a gelada, e um sistema de bombeamento força este fluxo a passar por serpentinas em Fan Coils que ficam localizados em ambientes internos ao escritório, semelhante

aos condicionadores de ar que são amplamente utilizados em residências e ambientes menores, nestes espaços ocorre a troca de calor e o fluxo de água retorna para o chiller, onde novamente será resfriada e continuará o ciclo de refrigeração.

Estes equipamentos trabalham com o conceito de refrigeração por compressão, onde um determinado fluído refrigerante é comprimido e posteriormente resfriado, sem diminuir sua pressão, e depois é expandido, diminuindo drásticamente sua temperatura, permitindo a troca de calor com o água que será utilizada para resfriar os espaços dentro da indústria. Estes chillers consomem energia elétrica para seu funcionamento, porém, também existe no mercado equipamentos que funcionam a partir de refrigeração por absorção, método este que permite que o calor possa ser utilizado como fonte de alimentação para o funcionamento.

O sistema de refrigeração por absorção possui várias semelhanças com um de compressão, contudo, a diferença está em como o fluído refrigerante é comprimido. Em um chiller por absorção o refrigerante após ter trocado calor com a água, retorna em formato de vapor para um equipamento denomidado de Absorvedor, onde um produto absorvente se mistura com o refrigerante, resultando em um líquido que é bombeado até outro equipamento, chamado de Gerador, no qual a mistura é aquecida, com objetivo de realizar a separação do absorvente e o refrigerante, que após esta separação é deslocado para um condensador e o absorvente retorna para o absorvedor.

A energia utilizada no gerador pode ser oriunda de várias fontes, a mais comumente é a energia elétrica, mas também há equipamentos que funcionem a partir do fornecimento de calor, o qual pode ser reaproveitado partindo de um compressor de ar, permitindo o reaproveitamento energético que seria desperdiçado para o ambiente.

3.4 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

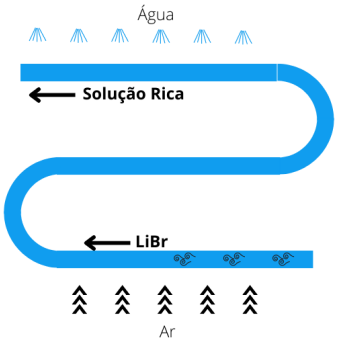
3.4.1 ABSORVEDOR

A absorção do fluído refrigerante, a baixa pressão e na fase vapor, ocorre no absorvedor, Figura 8, devido a mistura rica composta majoritariamente pelo absorvente, resultando em uma mistura equilibrada que será deslocada com aumento de pressão por meio de uma bomba em direção ao gerador.

3.4.2 BOMBA

No sistema de refrigeração por absorção, o deslocamento do fluído e seu aumento de pressão é desenvolvido pela bomba, enquanto que no sistema por compressão, este papel é dado pelo compressor. Porém, como a bomba requer uma menor quantidade de trabalho no eixo para desenvolver a mesma tarefa, o seu consumo energético diminui, tornando bem significativa e vantajosa a diferença entre as energias consumidas pelos dois sistemas de refrigeração.

Figura 8 – Absorvedor

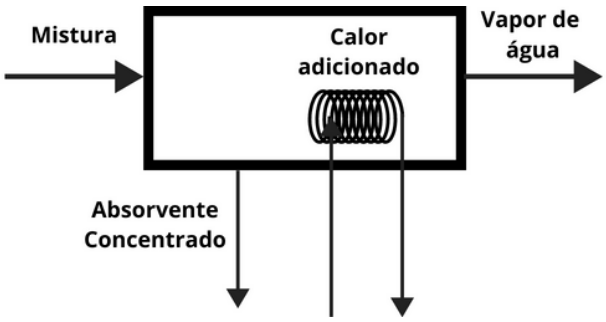


Fonte: Autor

3.4.3 GERADOR

A troca de energia entre a fonte energética e o sistema de refrigeração ocorre no gerador, Figura 9. Neste equipamento, a solução binária sofre um aquecimento, que neste caso se trata do calor de retirado do óleo refrigerante dos compressores de ar, que com a elevada pressão, desenvolvida pela bomba, começa a vaporizar o fluido refrigerante, deslocando-o para o condensador enquanto que o absorvente retorna ao absorvedor.

Figura 9 – Gerador

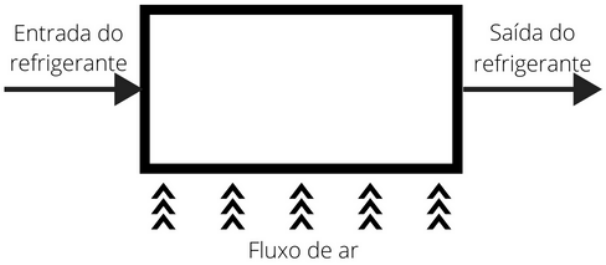


Fonte: Autor

3.4.4 CONDENSADOR

A liberação da energia que foi adquirida pelo refrigerante no gerador é realizada no condensador, Figura 10, que diminui a temperatura do fluido, em um processo isobárico, que em seguida se desloca para a válvula de expansão.

Figura 10 – Condensador



Fonte: Autor

3.4.5 VÁLVULA DE EXPANSÃO

No sistema de refrigeração por absorção existem 2 válvulas de expansões localizadas em pontos diferentes do processo. A primeira válvula, que recebe o fluido do condensador, tem por função reduzir a pressão e temperatura, mantendo a entalpia, processo isoentálpico, que resulta em um fluido bifásico.

A segunda válvula de expansão fica localizada entre o gerador e o absorvedor, e sua função é reduzir a pressão do absorvente que retorna do gerador para o absorverdor.

3.4.6 EVAPORADOR

O refrigerante, ao sair da válvula de expansão em estado líquido e baixa pressão, entra no evaporador, Figura 11, componente do sistema que tem por função realizar a troca de calor entre o ambiente e o refrigerante, e ao se ter temperatura menor que a ambiente, este líquido começa a vaporizar, retirando calor do ambiente e se deslocando para o absorvedor.

Figura 11 – Evaporador

Fonte: Autor

4 METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizada a análise numérica da eficiência energética de um sistema de refrigeração por absorção, o qual tem o reaproveitamento do calor do óleo refrigerante de compressores de ar como fonte de alimentação de energia ao gerador. O estudo está sendo aplicado por base em uma instalação de 2 compressores de 450hp cada.

O modelo desenvolvido exibe de maneira simplificada os estágios entre os processos do sistema de refrigeração. O calor liberado na troca térmica do compressor de ar com o ambiente está sendo reaproveitado de forma total para alimentação energética do gerador e aquecimento da solução binária, desconsiderando perdas neste processo. A bomba, utilizada para aumento de pressão da mistura, terá seu trabalho desconsiderado por efeito de comparação ao trabalho utilizado por outros equipamentos, o mesmo é feito para o bombeamento de água com efeito de refrigeração do absorvedor no momento em que o Brometo de lítio absorve o refrigerante.

Para realizar o estudo da eficiência energética, a metodologia adotada neste trabalho será dividida nas seguintes etapas:

1. Pesquisa documental;
2. Exemplificação do problema;
3. Simulação de sistemas;

4.1 PESQUISA DOCUMENTAL

Com objetivo de aumentar a eficiência energética de um sistema de utilidades instalado em uma indústria, foi realizada uma pesquisa documental na base de dados técnicos de um fabricante de compressores de ar com intuito de reaproveitar o calor existente no óleo refrigerante destes compressores. Tais folhas de dados fornecem as informações necessárias como a temperatura de saída dos gases após a troca térmica no exaustor, a quantidade de calor liberada pelo óleo lubrificante durante sua refrigeração, bem como vazão do óleo no trocador de calor entre outros dados. Como não há informações sobre o regime transiente desde a partida até o regime permanente do compressor, está sendo desconsiderado esta transição.

4.2 RESOLUÇÃO DO MODELO

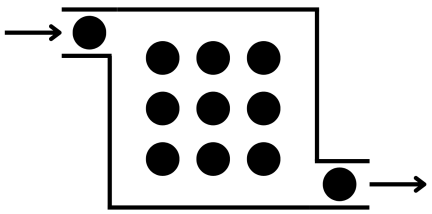
Para a simulação dos sistemas de refrigeração, será utilizado o software Engineering Equation Solver® que aplica as leis e equações termodinâmicas para a formulação e resolução das propriedades pertencentes à cada estágio do sistema. Quando definido cada estágio, as propriedades serão utilizadas para quantificar o consumo e calor gerado ou gasto pelo sistema para então ser definida a eficiência energética do sistema a partir do cálculo do COP, e posteriormente

será desenvolvido um cálculo de retorno financeiro com base na econômia no consumo de eletricidade para funcionamento de um chiller por absorção.

4.2.1 Balanço de massa

Para um determinado volume de controle, se faz necessário analisar o fluxo de massa que ocorre no seu interior. Uma exemplificação do sistema está na Figura 12, no qual uma quantidade determinada de massa entra, movimenta a que já está interna até a saída, gerando uma vazão mássica no sistema. Na termodinâmica é imprescindível avaliar se existe a conservação de massa nos processos, dada pela equação abaixo:

Figura 12 – Balanço de Massa



Fonte: Autor

$$\sum \dot{m_{in}} = \sum \dot{m_{out}} \tag{4.1}$$

4.2.2 Balanço químico

O sistema, por utilizar uma mistura de susbtâncias em alguns de seus estágios, precisa por sua vez de determinar a conservação das mesmas, dada pela equação abaixo:

$$\sum \dot{m}.x_{entrada} = \sum \dot{m}.x_{saida} \tag{4.2}$$

4.2.3 Balanço de energia

A primeira lei da termodinâmica é definida como lei da conservação de energia que rege o fornecimento, armazenamento e consumo energético para um determinado volume de controle. Considerando uma troca de calor entre o meio externo e o volume fechado, além de um trabalho sendo realizado sobre o sistema fechado, é possível definir a 1° lei pela equação abaixo:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m_{out}}.(h_{out} + \frac{1}{2}V_{out}^2 + gZ_{out}) - \sum \dot{m_{in}}.(h_{in} + \frac{1}{2}V_{in}^2 + gZ_{in}) \quad (4.3)$$

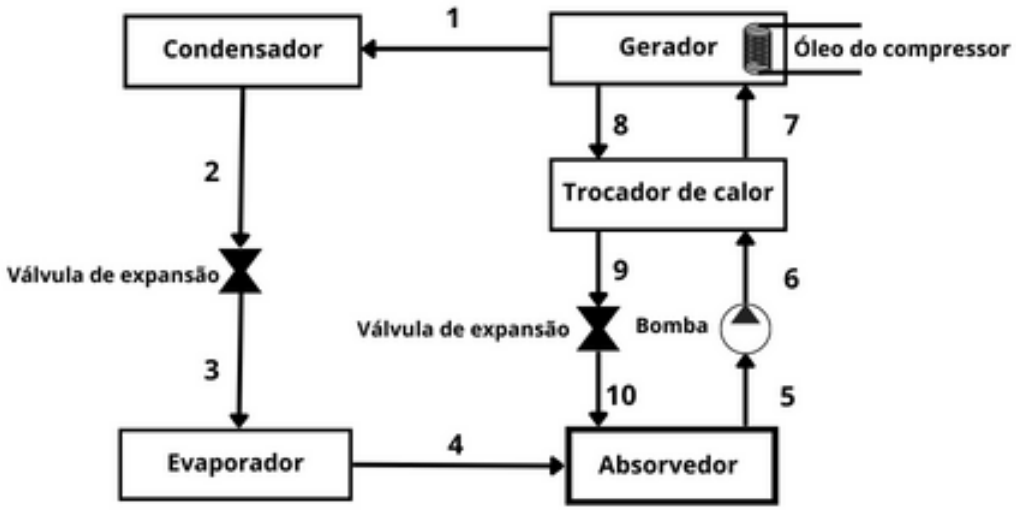
4.3 ANÁLISE DE MASSA E ENERGIA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

As equações definidas anteriormente serão utilizadas para analisar os equipamentos pertencentes ao sistema de refrigeração, porém será levado em consideração neste estudo alguns pontos:

1. Sistema opera em regime permanente;
2. O trabalho da bomba e as perdas de carga nos equipamentos são desprezíveis;
3. Não há transferência de calor nas válvulas;
4. O refrigerante está saturado na saída do evaporador e do condensador;
5. Temperatura ambiente é de 25°C e pressão atmosférica de 101,3kpa;
6. A solução binária permanece em equilibrio com a temperatura e pressão;
7. A saída da mistura se dá em estado saturado no gerador e no absorvedor;

Para o cálculo dos estágios do sistema, os pontos serão definidos de acordo com a Figura 13.

Figura 13 – Definição dos estágios

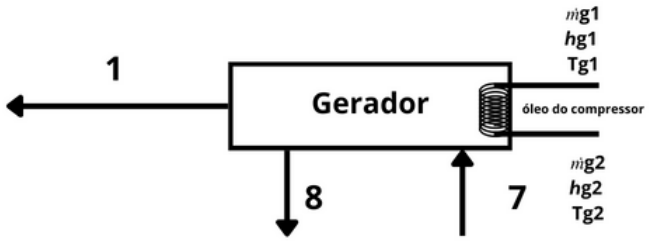


Fonte: Autor

4.3.1 GERADOR

A mistura LiBr-Água entra no gerador, Figura 14, com pressão elevada, após isso é adicionado calor no sistema a partir do óleo do compressor, elevando a temperatura da mistura até que a água vire vapor, seguindo desse modo do ponto 1 até o condensador. A solução concentrada de LiBr se desloca para o ponto 8, em direção à válvula redutora de pressão.

Figura 14 – Sistema do gerador



Fonte: Autor

4.3.1.1 Balanço de massa do gerador

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_1 + \dot{m}_8 \tag{4.4}$$

4.3.1.2 Balanço de energia do gerador

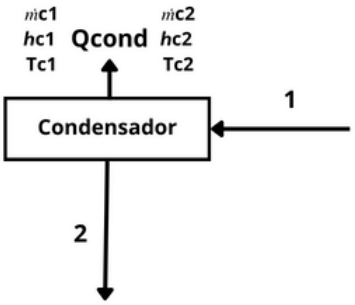
$$\dot{Q}_c + \dot{m}_7.h_7 = \dot{m}_1.h_1 + \dot{m}_8.h_8 \tag{4.5}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m_{g1}}.h_{g1} - \dot{m_{g2}}.h_{g2} \tag{4.6}$$

4.3.2 CONDENSADOR

O vapor de água superaquecido vindo do gerador, acessa o condensador pelo ponto 1, troca calor com o ambiente e vira líquido saturado e segue em direção à válvula de expansão no ponto 2, conforme Figura 15.

Figura 15 – Sistema do condensador



Fonte: Autor

4.3.2.1 Balanço de massa do condensador

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \tag{4.7}$$

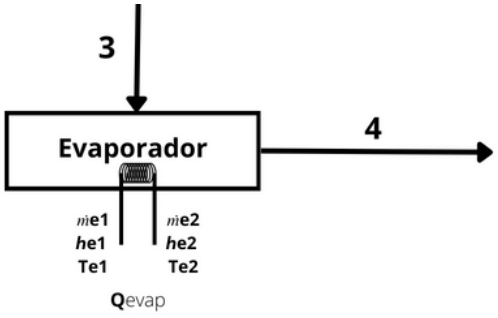
4.3.2.2 Balanço de energia do condensador

$$\dot{Q_{cond}} = \dot{m_{c1}}.h_{c1} - \dot{m_{c2}}.h_{c2} \tag{4.8}$$

4.3.3 EVAPORADOR

O fluído ao sair da válvula de expansão, em processo isentálpico e com pressão reduzida no ponto 3, em estado líquido, evapora ao passar no evaporador, absorvendo calor do ambiente, entrando em estado de vapor, se deslocando para o absorvedor no ponto 4, conforme Figura 16.

Figura 16 – Sistema do evaporador



Fonte: Autor

4.3.3.1 Balanço de massa do evaporador

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \tag{4.9}$$

4.3.3.2 Balanço de energia do evaporador

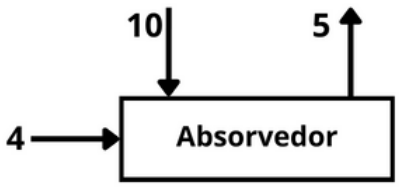
$$\dot{Q}_e = \dot{m}_4.h_4 - \dot{m}_3.h_3 \tag{4.10}$$

$$Q_{evap} = m_e.(h_{e2} - h_{e1}) \tag{4.11}$$

4.3.4 ABSORVEDOR

O fluído ao sair do evaporador em estado de vapor saturado, entra no absorvedor, ponto 4, e é absorvido pela solução forte, neste processo há uma liberação de calor para o meio ambiente, conforme Figura 17.

Figura 17 – Sistema do absorvedor



Fonte: Autor

4.3.4.1 Balanço de massa do absorvedor

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 + \dot{m}_{10} \tag{4.12}$$

4.3.4.2 Balanço de energia do absorvedor

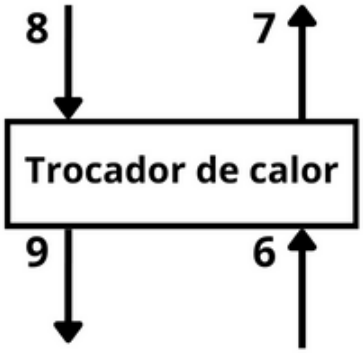
$$\dot{Q}_a + \dot{m}_5.h_5 = \dot{m}_4.h_4 + \dot{m}_{10}.h_{10} \tag{4.13}$$

$$Q_{abs} = m_a.(h_{a2} - h_{a1}) \tag{4.14}$$

4.3.5 TROCADOR DE CALOR DO SISTEMA DE ABSORÇÃO

A energia utilizada para aquecer a mistura no gerador é a maior parcela do custo energético para o funcionamento do sistema. Afim de criarmos um sistema econômico, o trocador terá por finalidade pré aquecer a solução binária vinda do absorvedor, ponto 6-7, utilizando o calor da solução de alta concentração que sai do gerador em direção ao absorvedor, ponto 9-10. No ponto 8, entrada do trocador de calor, é importante observar a probabilidade de haver cristalização do LiBr, onde a entalpia deve ser determinada para que isto não ocorra, estes pontos podem ser observados na Figura 18.

Figura 18 – Sistema do trocador de calor



Fonte: Autor

4.3.5.1 Balanço de massa do trocador de calor

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \tag{4.15}$$

4.3.5.2 Balanço de massa do trocador de calor

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \tag{4.16}$$

4.3.5.3 Balanço de energia do trocador de calor

$$\dot{m}_8.h_8 - \dot{m}_9.h_9 = \dot{m}_7.h_7 + \dot{m}_6.h_6 \tag{4.17}$$

4.3.6 DISPOSITIVOS REDUTORES DE PRESSÃO E BOMBA

Os dispositivos redutores de pressão atuam em dois pontos do sistema, o primeiro recebe o líquido saindo do condensador a uma determinada pressão P2 e reduz a pressão para P3, se direncionando para o evaporador, sendo todo esse processo isoentálpico, conforme Figura 19.

Figura 19 – Válvula de expansão da saída do condensador

Fonte: Autor

O segundo dispositivo reduz a pressão P8 da mistura com alta concentração, saindo do gerador, para a pressão P9 em direção ao absorvedor. Este processo, bem como o primeiro, também é isoentálpico.

Figura 20 – Válvula de expansão no retorno ao absorvedor

Fonte: Autor

A bomba tem por objetivo aumentar a pressão do fluido que sai do absorvedor em direção ao gerador, por efeitos de hipótese, este processo também será considerado isoentálpico.

Figura 21 – Bomba

Fonte: Autor

4.3.6.1 Balanço de energia da bomba

$$h_6 = h_5 \tag{4.18}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia já apresentada, os resultados da pesquisa e das simulações em regime permanente foram obtidos e aqui serão comentados, tomando por base que o calor residual no óleo refrigerante dos compressores é quem irá definir a demanda térmica.

5.1 SIMULAÇÃO COM SOFTWARE EES

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado o software EES (Equation Engineering Solver), o qual foi selecionado para a resolução das equações e modelagem do sistema, por possuir a biblioteca de propriedades físicas, possibilidade da resolução de funções, base matemática, exibição de gráficos e soluções como exemplo. Além de que os dados de entrada são obtidos em literaturas, enquanto as outras propriedades são identificadas com a programação e biblioteca do EES. O fluxograma, Figura 22, abaixo detalha a sequência e formação dos cálculos para a obtenção dos resultados demonstrados mais a frente.

Figura 22 – Fluxograma de cálculos

Fonte: Autor

- Inserção dos dados de cada estágio (Vazão, Temperatura, Pressão e Concentração);
- Inserção das equações dos estágios;
- Definição das propriedades do refrigerante e do absorvente (Solução LiBr/Água);
- Determinação das entalpias de acordo com o próprio EES;
- Definição das taxas de calor transferido em cada equipamento do sistema;
- Determinação do COP do sistema;

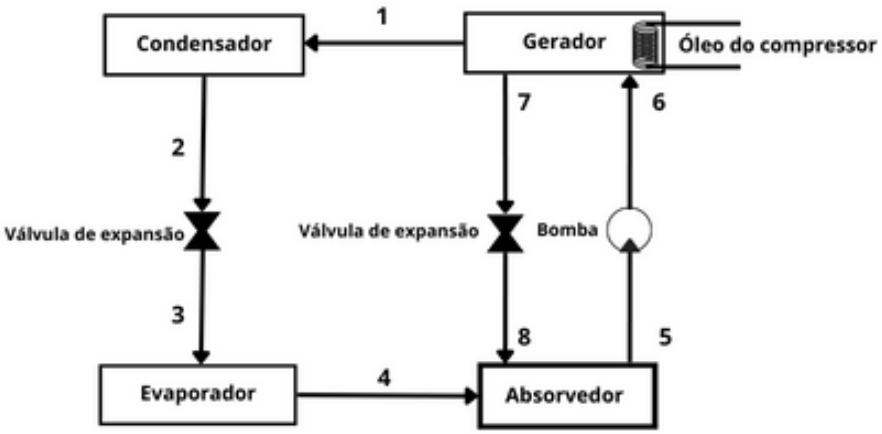
5.1.1 Simulação do ciclo sem trocador de calor

Os dados de entrada foram baseados em literaturas, referenciadas neste trabalho, conforme abaixo:

- Temperatura de saída do gerador a 90°C (Estágio 1);
- Temperatura de saída do absorverdor a 30°C (Estágio 5);
- Temperatura de entrada no evaporador a 12°C (Estágio 3);
- Temperatura de saída do condensador a 40°C (Estágio 2);
- Vazão mássica da bomba igual a 0,6 kg/s (Estágio 6);
- Vazão mássica do absorvente ao sair do gerador é de 0,44 kg/s (Estágio 7);

Utilizando as equações demonstradas na metodologia, foram calculadas as taxas de transferencia de calor no condensador, evaporador, absorvedor e gerador, dessa forma sendo possível determinar o COP do sistema, conforme imagem com a tabela de dados do sistema abaixo:

Figura 23 – Sistema sem trocador de calor



Fonte: Autor

Para comparação, iremos iniciar com a simulação de um sistema de refrigeração por absorção, sem o trocador de calor entre o absorvedor e gerador, sendo alimentado com o calor do óleo refrigerante do compressor, conforme Figura 23:

Figura 24 – Dados dos estágios do sistema sem trocador

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

COP = 0,7686	h1 = 2669	h2 = 167,5	h3 = 167,5	h4 = 2523
h5 = 59,12	h6 = 59,12	h7 = 224,5	h8 = 224,5	m1 = 0,16
m2 = 0,16	m3 = 0,16	m4 = 0,16	m5 = 0,6 [kg/s]	m6 = 0,6
m7 = 0,44	m8 = 0,44	P1 = 7,38 [kPa]	P2 = 7,385	P3 = 1,4 [kPa]
P4 = 1,4	P5 = 1,4	P6 = 7,38	P7 = 7,38	P8 = 1,4
$Q_{absorvedor}$ = 467	$Q_{condensador}$ = 400,2	$Q_{evaporador}$ = 376,9	$Q_{gerador}$ = 490,3	T1 = 90 [°C]
T2 = 40 [°C]	T3 = 12 [°C]	T4 = 12 [°C]	T5 = 30 [°C]	T6 = 30 [°C]
T7 = 90 [°C]	T8 = 90 [°C]	X2 = 0	x5 = 0,4761	x7 = 0,6215

Fonte: Autor

Figura 25 – Resultados do sistema com trocador

$\dot{Q}absv$	$\dot{Q}cond$	$\dot{Q}evap$	$\dot{Q}gera$	COP
467 kW	400,2 kW	376,9 kW	490,3 kW	0,7686

Fonte: EES

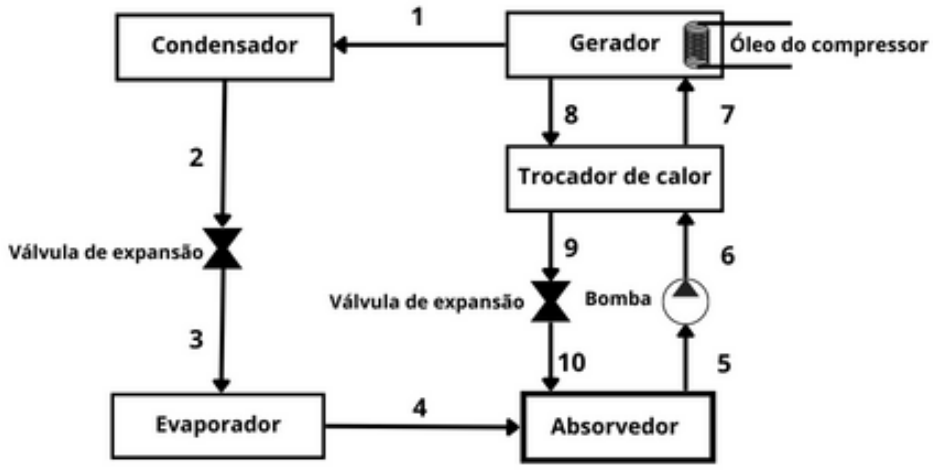
5.1.2 Simulação do ciclo com trocador de calor

Agora, iremos calcular os resultados do sistema com a inserção de um trocador de calor, conforme mostrado na figura abaixo. Os dados de entrada utilizados para a simulação:

- Temperatura de saída do gerador a 90°C (Estágio 1);
- Temperatura de saída do trocador de calor a 61°C (Estágio 7);
- Temperatura de saída do absorverdor a 30°C (Estágio 5);
- Temperatura de entrada no evaporador a 12°C (Estágio 3);
- Temperatura de saída do condensador a 40°C (Estágio 2);
- Vazão mássica da bomba igual a 0,6 kg/s (Estágio 6);
- Vazão mássica do absorvente ao sair do gerador é de 0,44 kg/s (Estágio 8);

Assim como no tópico passado, os resultados obtidos com as equações demonstradas seguem conforme imagem da tabela de dados abaixo:

Figura 26 – Sistema com trocador de calor



Fonte: Autor

Figura 27 – Dados dos estágios do sistema com trocador

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

COP = 0,8407	h1 = 2669	h10 = 131,3	h2 = 167,5	h3 = 167,5
h4 = 2523	h5 = 59,12	h6 = 59,12	h7 = 129,1	h8 = 224,5
h9 = 131,3	m1 = 0,16	m10 = 0,44	m2 = 0,16	m3 = 0,16
m4 = 0,16	m5 = 0,6 [kg/s]	m6 = 0,6	m7 = 0,6	m8 = 0,44
m9 = 0,44	P1 = 7,38 [kPa]	P10 = 1,4	P2 = 7,385	P3 = 1,4 [kPa]
P4 = 1,4	P5 = 1,4	P6 = 7,38	P7 = 7,38	P8 = 7,38
P9 = 7,38	$Q_{absorvedor}$ = 425,9	$Q_{condensador}$ = 400,2	$Q_{evaporador}$ = 376,9	$Q_{gerador}$ = 448,3
T1 = 90 [°C]	T10 = 62	T2 = 40 [°C]	T3 = 12 [°C]	T4 = 12 [°C]
T5 = 30 [°C]	T6 = 30 [°C]	T7 = 61 [°C]	T8 = 90 [°C]	T9 = 62 [°C]
X2 = 0	x5 = 0,4761	x7 = 0,4749	x8 = 0,6215	x9 = 0,4814

Fonte: EES

É possível observar que ao adicionarmos o trocador de calor, entre o absorvedor e gerador, obtemos maior eficiência do sistema, devido ao reaproveitamento de calor, em cerca de $7,18\%$ se comparado ao sistema sem trocador de calor, isso porque o calor da solução binária será menor por não ter reaproveitamento da energia térmica. Neste caso utilizamos a mistura, que sai do absorvedor, é aquecida pelo absorvente concentrado que sai do gerador, e com isso mantemos a mesma carga térmica do sistema, tornando o consumo energético mais econômico no gerador.

Figura 28 – Resultados do sistema com trocador

$\dot{Qabsv}$	$\dot{Qcond}$	$\dot{Qevap}$	$\dot{Qgera}$	COP
425,9 kW	400,2 kW	376,9 kW	448,3 kW	0,8407

Fonte: Autor

5.2 REAPROVEITAMENTO TÉRMICO DOS COMPRESSORES

Como observado nos sistemas acima, podemos ter uma melhor eficiência global utilizando o trocador de calor para reaproveitamento térmico. Porém, para os resultados obtidos de acordo com dados de entrada coletados em literaturas, é preciso determinar o que irá alimentar o sistema com a carga térmica e se este valor será suficiente para os resultados obtidos com as simulações.

Para isso, este trabalho está considerando uma parte de um parque industrial automotivo, onde estão sendo analisados 2 compressores, ambos de 450HP, totalizando 900HP somados. Como parte do processo de compressão, uma grande parcela de energia é liberada em forma de calor, que é absorvido pelo óleo refrigerante do sistema, e liberado posteriormente no trocador de calor com o ambiente. Neste trabalho, iremos utilizar o calor do óleo refrigerante para ter a troca térmica com a mistura binária do sistema de refrigeração por absorção.

Com os dados do fluxo de óleo em cada máquina, o coeficiente calorífico do óleo, além da diferença térmica ideal para operação do compressor, podemos obter a taxa de calor que pode ser transferida entre os sistemas:

- Temperatura de entrada do óleo refrigerante no trocador é de 101°C (T1);
- Temperatura de saída do óleo refrigerante no trocador é de 79°C (T2);
- Valor do coeficiente calorífico do óleo é 0,497cal/g°C;
- Vazão mássica de óleo refrigerante do sistema é 5,17kg/s;

$$\dot{Q_{comp}} = \dot{m_{oleo}}.C_{oleo}.(T2 - T1) = 5170.0, 497.22 = 236kW \tag{5.1}$$

Cada compressor libera cerca de 236kW no trocador de calor, equivalente à 472kW de calor que pode ser reaproveitado no sistema de refrigeração. De acordo com as simulações, para o sistema apresentado com reaproveitamento energético, é necessário a admissão de 448,3kW para a correta operação do sistema. Valor este que é menor comparado ao calor ofertado pela dupla de compressores, o que torna viável a alimentação térmica partindo destes equipamentos.

5.3 RETORNO FINANCEIRO

Como todo sistema implantado em indústria, se faz necessário a inclusão de um estudo sobre o retorno financeiro ou economia que este sistema pode ofertar. De acordo com a simulação com reaproveitamento energético, podemos absorver cerca de 376,9kW de calor do ambiente, cerca de 107 TR ou 1286036 Btu/h.

Um chiller com mesma capacidade refrigerativa próxima do obtido acima (100 TR) consome cerca de 92kW/h, e tendo o valor do custo por kW pago, é possível obter o valor gasto para operação e o quanto pode ser economizado operando com o sistema estudado neste trabalho.

- Valor do kW/h gasto é de R$ 0,28;
- Regime de operação anual é de 8000 horas;

$$R\$ = \frac{R\$}{kW/h}.kW.h = 0,28.92.8000 = R\$206.080,00 \tag{5.2}$$

A economia anual é de R$ 206.080,00

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas as simulações dos sistemas de refrigeração por absorção simples e com trocador de calor, ambos em regime permanente. O modelo simplificado, utilizando dados de entrada obtidos em literatura, demonstrou as quantidades de calor requeridas para alimentar o gerador, térmicamente, e o quanto de calor pode ser retirado do ambiente a ser refrigerado. Apesar das hipóteses desconsiderarem perdas por calor ou por eficiência, o estudo ainda se torna viável por ter uma grande parcela de calor perdida e que pode ser reaproveitada, principalmente no sistema com reaproveitamento com trocador de calor, no qual é possível notar uma diferença significativa no COP. Foi observado também que quanto melhor o reaproveitamento de calor, ou aumento de temperatura no gerador, melhor se torna o resultado do COP.

A inclusão de outros equipamentos que melhorem a funcionabilidade do sistema, pode também aumentar a eficiência global, já que quanto maior a quantidade de calor permanecer dentro do sistema, maior será a troca térmica no evaporador. Apesar das limitações deste estudo, as simulações demonstram ser possível a adaptação de um sistema de refrigeração para compressores, destinados ao reaproveitamento térmico para alimentar sistemas de refrigeração por absorção, visto que o principal fator para contruibuir neste investimento, seria o retorno financeiro dado com a economia no consumo de energia elétrica.

Para aprimoramento do modelo a fim de obter resultados mais objetivos, outros trabalhos poderão complementar o presente estudo como:

- Considerar perdas nos equipamentos.
- Realizar experimentos para verificar o comportamento em diferentes vazões da solução binária.
- Modelar o comportamento do sistema no regime transiente.
- Realizar simulação com mais sistemas de regeneração.
- Avaliar o efeito das eficiências nas entalpias entre estágios.
- Realizar simulações considerando transferência de calor nos trechos entre os equipamentos.

REFERÊNCIAS

A.TASSOU, H. J. N. K. S. A. B. D. A. C. S. Waste heat recovery technologies and applications. **Thermal Science and Engineering Progress**, Elsevier, v. 6, p. 268–289, 2018. Citado na página 15.

FONSECA, J. d. A. **Metodologia experimental para estudo da transferência de calor e massa no processo de absorção do vapor d'água por filmes verticais descendentes de água-brometo de lítio**. 239 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Citado na página 19.

HENNING, H.-M. Solar assisted air conditioning of buildings – an overview. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 27, p. 1734–1749, 2007. Citado na página 14.

HEROLD K. E.; RADERMACHER, R. K. S. A. **Absorption Chillers and Heat Pumps**. 1 ed boca raton. ed. [S.l.]: CRC Press, 1996. Citado na página 17.

L.A.B. MüHLE I.N., S. A. C. Refrigeração por absorção com o par água - amônia e seu potencial no caso brasileiro. **Abrava**, Abrava, v. 2, p. 33–38, 1994. Citado na página 14.

MENDONÇA, A. L. Z. L. G. **Ar condicionado solar: modelagem e simulação**. 133 f. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Citado na página 22.

NIKBAKHTI XIAOLIN WANG, A. K. H. A. I. R. Absorption cooling systems – review of various techniques for energy performance enhancement. **Alexandria Engineering Journal**, Elsevier, v. 59, p. 707–738, 2020. Citado na página 14.

PERRY, W. R. M. C. W. Turning air compressors into an energy source. In: **World Energy Enginnering Congress**. Washington DC, USA: [s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 15.

SIDDIQUI, S. S. M. A review of solar powered absorption systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 93–115, Jun 2015. ISSN 1057-7149. Citado na página 19.

SIMEONE, E. W. Y. L. A. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Elsevier, v. 29, n. 10, p. 50–59, 2018. Citado na página 15.

STEPHAN, K. History of absorption heat pumps and working pair developments in europe. **International Journal Of Refrigeration**, Butterworth Co, v. 6, p. 160–166, 1983. Citado na página 14.

STOECKER, J. W. J. W. E. **Refrigeração e Ar condicionado**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1985. Citado 6 vezes nas páginas 14, 16, 17, 20, 21 e 23.

SUN WEI HAN, X. J. D. Z. H. J. L. A power and cooling cogeneration system using mid/low-temperature heat source. **Applied Energy**, Elsevier, v. 112, p. 886–897, 2013. Citado na página 14.