

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA ALTERAÇÃO DA CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO PARA ABSORÇÃO

Edison Antonio Deliberal¹
Hellen Cristina Pauletti²

RESUMO

Nas indústrias de alimentos é comum o emprego de sistemas de refrigeração por compressão de amônia, no entanto esse sistema demanda de uma alta potência para desenvolver a ação mecânica necessária para obter o resultado esperado, nestas plantas a energia utilizada para atividade de refrigeração pode atingir 65% do consumo total de energia da planta produtiva, neste contexto realizou-se um estudo de caso de nível exploratório com objetivo de analisar os sistemas de compressão e absorção, para verificar a viabilidade técnica de alteração na concepção do sistema de refrigeração por compressão por um sistema de absorção de amônia. Devido ao consumo de diferentes recursos para geração de frio, para uma comparação do custo entre os sistemas, determinou-se um fator compatível há ambos os sistemas, e desta forma foi possível desenvolver o indicador R\$/kcal, que apresentou um resultado expressivo na comparação dos sistemas. Tecnicamente o sistema de absorção pode ser aplicado em substituição do sistema de compressão, além de possuir um diferencial no consumo de energia elétrica e um custo de operação menos oneroso do que o sistema por compressão.

Palavras-chave: Refrigeração. Compressão. Absorção. Frigorífico. Viabilidade técnica.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração representam um peso crescente no aumento do consumo de energia elétrica em todo mundo. De acordo com o *International Institute of Refrigeration* – IIR aproximadamente 15% de toda a eletricidade produzida mundialmente é utilizada em aplicações de ar condicionado e refrigeração (DIACONU; VARGAS; OLIVEIRA, 2011).

Grandes instalações industriais, como refinarias petroquímicas e fábricas de processamento de alimentos, dependem de sistemas de refrigeração em grande escala para suas operações diárias (SANKARLAL, 2007).

Em frigoríficos com sistemas de refrigeração industrial por compressão o consumo de energia elétrica pode atingir 65% do total da planta, devido a potência necessária para comprimir a amônia (WITTE, 2016).

Apesar do alto consumo de energia elétrica, a refrigeração é fundamental para garantir a segurança alimentar, pois o frio é capaz de evitar a degradação dos alimentos. No processo de

¹ Graduando em Engenharia Química (2021). E-mail: deliberal.edison@gmail.com

² Mestre em Ciências Ambientais. E-mail: hellen@uceff.edu.br

refrigeração a velocidade das transformações microbiológicas e bioquímicas nos alimentos é reduzida, prolongando assim a sua vida útil por dias ou semanas (TOLEDO, 1991).

O consumo de energia elétrica nas indústrias de alimentos é significativamente alto e de grande impacto financeiro (FROZZA, 2013). Neste contexto, é necessário avaliar alternativas para os sistemas atuais de refrigeração e o sistema de absorção tem como característica utilizar recursos térmicos, podendo aplicar rejeitos de sistemas, como por exemplo insumo energético, produzindo assim uma demanda menor por energia elétrica (MORAN, 2006).

Os sistemas de absorção competem com os sistemas de refrigeração de compressão de vapor e possuem como vantagem a utilização de uma fonte de energia térmica menos nobre. Já nos sistemas de compressão utiliza-se energia elétrica, mais nobre, para conseguir o mesmo efeito (NOBERTO, 2018).

Neste contexto, o objetivo geral do trabalho é realizar uma análise aprofundada destes processos para poder esclarecer a diferença de necessidades de recursos e seus impactos relacionados a alteração da concepção do sistema. Desta forma que a questão problema pode ser levantada: **É tecnicamente viável substituir um sistema de refrigeração por compressão por um sistema de absorção?** Sendo assim justifica-se a relevância em desenvolver um estudo comparativo e de viabilidade técnica entre o sistema atual de refrigeração por compressão de amônia instalado em uma unidade industrial frigorífica e um sistema de refrigeração por absorção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O foco do estudo é embasado na determinação das principais diferenças entres os sistemas de compressão e absorção de amônia, bem como os equipamentos e os custos de operação de cada sistema acerca do consumo de energia elétrica e de vapor.

Portanto se faz necessário entender o surgimento da refrigeração industrial e quais são as principais aplicações, desta forma, neste tópico são abordados os conceitos dos sistemas de refrigeração, os ciclos de refrigeração e os impactos econômicos deste tipo de processo.

2.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

As indústrias de carne surgiram em meados do século XIX, nos Estados Unidos da América, a partir de uma junção entre trabalho barato, matéria-prima abundante

(PACYGA,2008). Segundo Horowitz (1997) no final do século XIX e início do século XX, Swift, Armour, Morris, Cudahy e Wilson, também conhecidas como Big Five, tornaram-se as principais empresas que dominaram o mercado até a década de 1950. A Big Five tinha o monopólio de produção de carne, no montante representava 80% do abate de todos os suínos e 90% de todos os bois negociados.

O crescimento e fortalecimento das indústrias de carne fez-se em aversão ao modelo artesanal e público existente em grande parte dos países da Europa, onde prevaleceu, até o início do século XX, a produção de carne nos matadouros municipais e a venda por meio de uma rede de varejo dominada por açougueiros (LEE, 2008). No contexto histórico, segundo Marra (2019) no Brasil, como em parte da Europa, as indústrias surgiram em função de preocupações sanitárias e higiênicas. A maioria das grandes cidades criou seu matadouro municipal para eliminar o trânsito de animais, o mau cheiro, o sangue e o barulho, além de tornar clandestino todo abate fora de seus domínios. A inauguração de um dos primeiros frigoríficos no Brasil, no Rio de Janeiro, em 1881.

No âmbito de melhoria no processo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Reforma Agraria emitiu a Portaria número 304, Segundo Brasil (1996) as condições na época dos abatedouros locais se torna inadiável e necessário introduzir modificações para alcançar as condições higiênicas, sanitárias e tecnológicas no âmbito de comércio de alimentos cárneos. Tendo em vista a necessidade do produto não se deteriorar em razão da manipulação inadequada e condições de transporte, torna-se necessário para comercialização o produto estar em uma temperatura máxima de 7°C, devidamente embalados e identificados, as estocagens, entrepostos e estabelecimentos varejistas devem garantir a manutenção da temperatura no centro da musculatura da peça.

James Harrison em 1856, foi contratado por uma cervejaria para construir uma máquina que pudesse resfriar cerveja. Ele desenvolveu com sucesso a refrigeração por compressão de vapor, que foi quase imediatamente adotada pela indústria cervejeira e também foi amplamente utilizada por fábricas de empacotamento de carne (LANG, 1982).

Segundo Horowitz (1997) a tecnologia por trás do resfriamento por absorção remonta a meados do século 19, quando o sistema de absorção foi patenteado nos Estados Unidos em 1860 pelo francês Ferdinand Carré, que usava água e amônia. Outros projetos se seguiram utilizando essa tecnologia, incluindo um patenteado pela primeira vez em 1928 por Albert Einstein e seu ex-aluno, Leo Szilard. A aceitação pública do *chiller* por absorção de Einstein-Szilard foi prejudicada pelo alto custo de energia do dispositivo, o início da Grande Depressão

em 1929 e a introdução do gás freon (um componente-chave das unidades de resfriamento do compressor) em 1930.

No final do século 19, a maioria dos equipamentos de refrigeração baseava-se no princípio de absorção. Esta tecnologia não necessitava de energia elétrica, sua principal fonte de calor de energia propulsora vinha de uma caldeira a vapor ou de um queimador (MATOS, 2017).

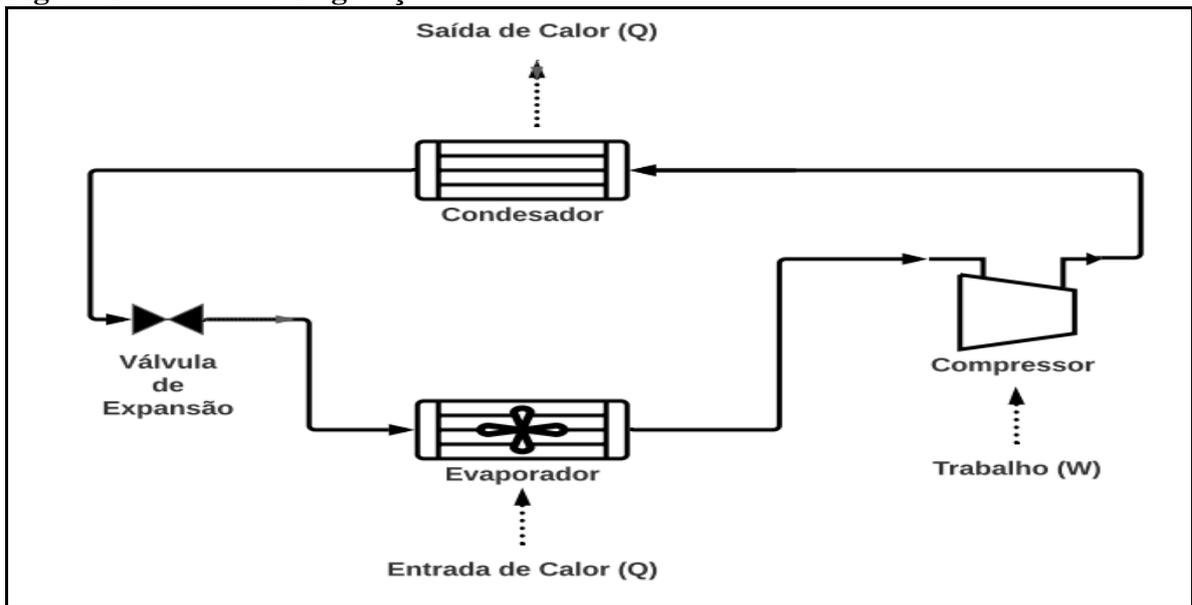
Na década de 1950, devido aos baixos preços da energia, os compressores herméticos foram colocados no mercado e a tecnologia de absorção foi deixada de lado. Ele permaneceu usado apenas em algumas áreas onde sua alta confiabilidade e capacidade de resfriamento a temperaturas extremamente baixas eram uma vantagem (BARHOUMI, 2009).

2.2 CICLOS DE REFRIGERAÇÃO

Para Stoecker (2002) a refrigeração ocorre através de um ciclo termodinâmico, os quais envolvem procedimentos para a obtenção de refrigeração de maneira contínua. O fluido refrigerante passa por uma série de processos e retorna ao seu estado inicial. Um desses processos envolve a remoção de calor de um ambiente a baixa temperatura. O ciclo de Carnot se destaca por se tratar de um ciclo ideal (reversível) que opera entre dois níveis de temperatura e, portanto, aquele que apresenta a maior eficiência.

Quanto a isso, o ciclo de refrigeração é um ciclo térmico, basicamente composto por uma entrada de trabalho (compressor), uma saída de calor (condensador) e uma entrada de calor (evaporador), conforme esboço da Figura 1.

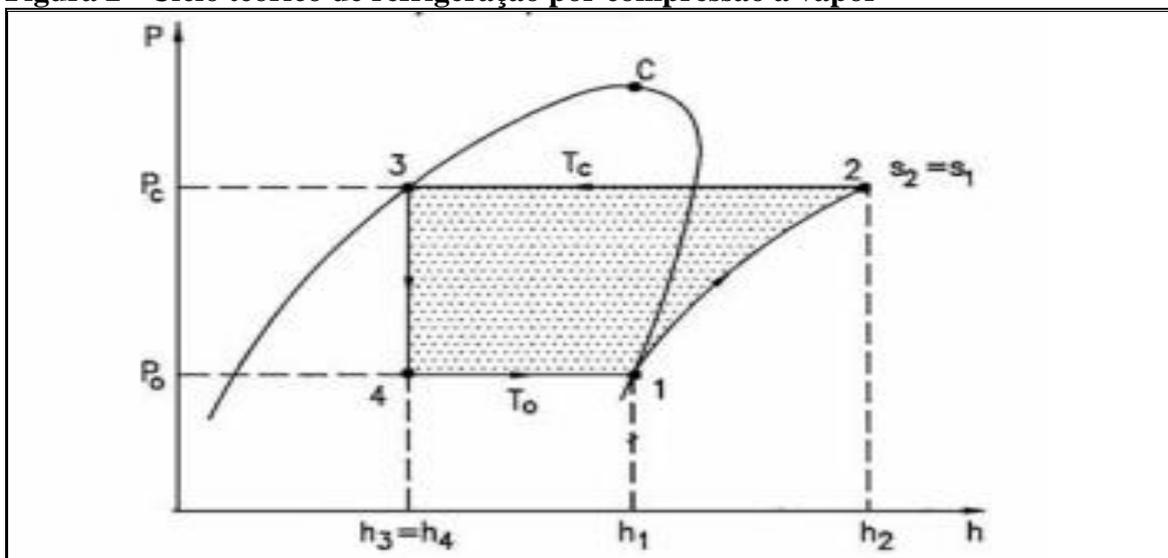
Figura 1 - Ciclo de refrigeração



Fonte: Adaptado de Stoecker (2002).

Com base no ciclo de refrigeração e seus principais componentes Eletrobrás (2005) esboça o diagrama de Mollier, que é um ciclo teórico deste processo e pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Ciclo teórico de refrigeração por compressão a vapor



Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2005).

Os processos termodinâmicos que compõem o ciclo são:

- Processo 1-2: Ocorre no compressor, sendo um processo adiabático reversível e, portanto, isentrópico. O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação.

- b) Processo 2-3: Ocorre no condensador, sendo um processo de rejeição de calor, do refrigerante para o meio de resfriamento, à pressão constante. Neste processo o fluido frigorífico é resfriado até a temperatura de condensação.
- c) Processo 3-4: Ocorre no dispositivo de expansão, sendo uma expansão irreversível à entalpia constante (processo isentálpico), da pressão de condensação até a pressão de vaporização.
- d) Processo 4-1: Ocorre no evaporador, sendo um processo de transferência de calor à pressão constante e, conseqüentemente, à temperatura constante, desde vapor úmido até atingir o estado de vapor saturado seco (ELETROBRÁS, 2005).

Grande parte das instalações de refrigeração operam em sistemas de múltiplos estágios, pois a acentuada diferença de temperatura entre a evaporação e condensação trazem diversos problemas de operação. O emprego de sistemas de múltiplos estágios tem um aumento significativo no custo de instalação, contudo essa aplicação minimiza os problemas operacionais, além de reduzir a potência necessária para compressão (STOECKER, 2002).

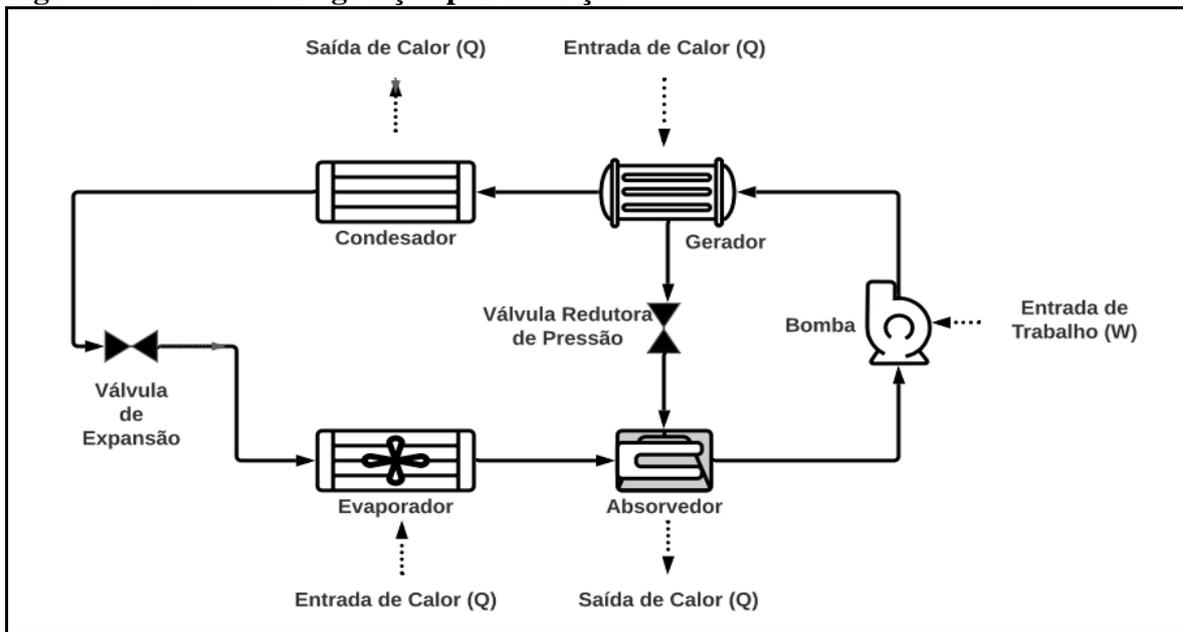
A grande vantagem aplicada ao emprego de sistemas de múltiplos estágios é que a presença de um reservatório intermediário ajuda no processo de refrigeração da descarga do compressor de alta pressão, evitando assim a queima do óleo de lubrificação, formação de goma nas válvulas do sistema (ELETROBRÁS, 2005).

Os sistemas de refrigeração usam a física básica para mover a energia térmica de uma área para outra, deixando a primeira área mais fria do que antes. Desde esta primeira máquina, a popularidade de sistemas de absorção aumentou e diminuiu devido a condições econômicas e de desenvolvimento tecnológico. As vantagens de sistemas de absorção, contudo, permanecem as mesmas ao longo do tempo (MORAN, 2006).

O ciclo de refrigeração por absorção assemelha-se ao ciclo de refrigeração por compressão de vapor, pois ambos possuem evaporador, condensador e dispositivo de expansão. Entretanto, o trabalho realizado pela compressão mecânica é substituído pelo calor proveniente de uma fonte externa (CARVALHO, 2007).

A forma em que os dois sistemas operam são semelhantes, ambos possuem condensador, válvula de expansão e evaporador, a principal diferença entre os sistemas é a forma com que o vapor de baixa pressão é transformado em vapor de alta pressão e este processo é melhor evidenciado pela Figura 3.

Figura 3 - Ciclo de refrigeração por absorção



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

No sistema por compressão utiliza-se um compressor para fazer o trabalho, no sistema de absorção são três etapas:

- a) Primeira Etapa: Um absorvente, absorve o vapor de baixa pressão, ocorrendo a condensação e rejeição de calor;
- b) Segunda Etapa: Uma bomba hidráulica eleva a pressão do fluido;
- c) Terceira Etapa: Adiciona-se calor e libera-se vapor do fluido em alta pressão (ASHRAE, 2012).

No absorvedor, o vapor de baixa pressão do evaporador é absorvido por uma solução líquida, se esse processo de absorção fosse realizado adiabaticamente, a temperatura da solução iria subir e eventualmente a absorção de vapor poderia cessar. Para perpetuar o processo de absorção o absorvedor é resfriado por água ou ar, que finalmente rejeita calor para a atmosfera (ABREU, 1999).

Sendo assim Morran (2006) define que o vapor de amônia vindo do evaporador é absorvido por água líquida. A formação desta solução líquida é exotérmica. Uma vez que a quantidade de amônia que pode ser dissolvida na água aumenta à medida que a temperatura da solução diminui, a água de resfriamento é circulada ao redor do absorvedor para remover a energia liberada conforme a amônia vai para a solução e manter a temperatura no absorvedor o mais baixa possível. A forte solução de amônia-água deixa o absorvedor no ponto a e entra na bomba, onde sua pressão é aumentada para a do gerador.

No gerador, o calor de uma fonte de alta temperatura expulsa o vapor que havia sido absorvido pela solução. O calor de uma fonte de alta temperatura é fornecido ao gerador, enquanto o calor a baixa temperatura da substância a ser refrigerada é fornecido ao evaporador (MENDONÇA, 2017).

A transferência de calor de uma fonte de alta temperatura conduz o vapor de amônia fora da solução (um processo endotérmico), deixando uma solução fraca de amônia-água no gerador. O vapor liberado passa para o condensador, e o restante a solução fraca flui de volta para o absorvedor por meio de uma válvula. A única entrada de trabalho é a potência necessária para operar a bomba, e isso é pequeno em comparação com o trabalho isso seria necessário para comprimir o vapor refrigerante entre os mesmos níveis de pressão (MORAN, 2006).

2.3 CARGA TÉRMICA

Segundo Çengel (2013), a carga térmica pode ser definida como a quantidade de energia que pode ser transferida, essa transferência de energia é considerada como transferência de calor quando a força motriz desta é um diferencial de temperatura, onde pode-se definir a quantidade de calor pela soma do calor sensível e latente que um corpo possui.

O calor sensível é o calor que, recebido ou cedido por um corpo, provoca nele uma variação de temperatura. Durante esse processo o estado físico da substância permanece inalterado. Segundo Tipler (2015), a quantidade de calor sensível (Q_s) necessária para ocorrer a variação de temperatura é proporcional à massa da amostra utilizada. A quantidade de calor sensível é definida pela Equação 1.

$$Q_s = m * c * \Delta T \quad (1)$$

m = Massa (g);

c = Calor específico (cal/g °C);

ΔT = Variação de temperatura (°C);

Segundo Halliday (2006), a quantidade de energia por unidade de massa que deve ser transferida na forma de calor para que uma amostra mude totalmente de fase é chamada calor de transformação ou calor latente. Vale lembrar que, durante esse processo, a amostra permanece com a temperatura constante. Para Tipler (2015) durante o tempo em que a água é aquecida, os movimentos de suas moléculas aumentam e sua temperatura aumenta. Quando a temperatura atinge o ponto de ebulição, as moléculas não podem mais aumentar sua energia cinética e permanecem no líquido.

Enquanto a água líquida se transforma em vapor, o acréscimo de energia é utilizado para romper as atrações intermoleculares. Isto é, a energia é utilizada para aumentar a energia potencial das moléculas em vez de aumentar sua energia cinética. Como a temperatura é uma medida da energia cinética média de translação das moléculas, a temperatura não varia. A quantidade de calor latente pode ser encontrada através da Equação 2.

$$Ql = m * L \quad (2)$$

m = Massa (g);

L = Calor específico latente (cal/g);

2.4 IMPACTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS

O estudo da viabilidade é definido por Xavier (2010) como um passo importante para avaliação antes de iniciar um projeto pois ele permitirá verificar a necessidade do que está sendo proposto. Tem como objetivo investigar a exequibilidade e prever os prováveis resultados, riscos e consequências da ação, norteará a tomada de decisão com dados de tempo de retorno do investimento, os custos aproximados envolvidos para realização da proposta, os potenciais de ganhos, entre outros.

No ponto de vista técnico segundo Mertin (2018) os sistemas conseguem desempenhar a mesma função porém de formas diferentes, com equipamentos diferentes, onde o sistema de compressão de vapor necessita de uma demanda grande de energia e já no sistema de absorção esse consumo é menor porém se faz necessário a utilização de vapor, tecnicamente o sistema de absorção possui um *Coefficient of Performance* - COP muito baixo ao comparar com o sistema de compressão, justamente por consumir calor em forma de energia.

No foco econômico Menna (2008) apresenta que a vantagem do ciclo de refrigeração por absorção sobre o ciclo refrigeração por compressão está na potência necessária para operar a bomba pode ser de dez a trinta vezes menor que a para operar o compressor, considerando as mesmas condições de ciclo.

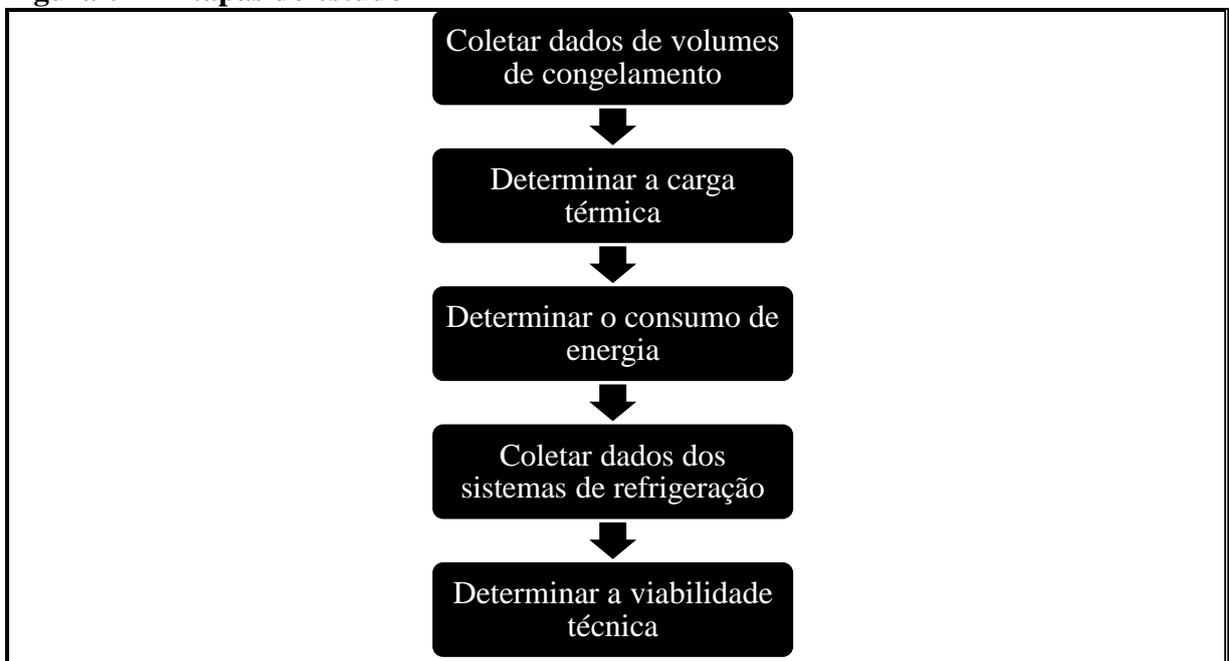
Somando-se a isso, deve-se considerar que os sistemas de absorção necessitam de uma fonte de calor para sua operação, porém a energia na forma de calor via de regra é mais barata que na forma de trabalho, como a energia elétrica necessária ao compressor (MENNA, 2008).

Neste contexto Thaler e Shefrin (1981) definem o *saving* como indicador que serve como base para tomadas de decisão em companhias, onde o mesmo traz os benefícios financeiros que as ações propostas podem acarretar, ou seja, as economias ou ganhos financeiros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa classificou-se como estudo de caso, de nível exploratório devido a necessidade de um estudo mais profundo das características dos sistemas de refrigeração por compressão e absorção em processos de plantas industriais em funcionamento, para isso utilizou-se como instrumento de coleta de dados a observação dos ambientes, bem como entrevistas informais com operadores dos sistemas de refrigeração e coleta de dados via documentos físicos e relatórios em sistemas para compor os dados para pesquisa. As etapas do estudo estão detalhadas e em ordem cronológica na Figura 4 e descritas na sequência.

Figura 04 – Etapas do estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O presente estudo foi desenvolvido com base em dois sistemas de refrigeração, os dados do sistema de refrigeração por compressão foram coletados por meio de observação no local, entrevistas informais, documentos físicos e relatórios de sistemas na planta fabril onde o sistema está aplicado, trata-se de uma indústria frigorífica situada no estado de Santa Catarina, que atua no ramo de alimentos cárneos. O complexo em questão possui duas casas de máquinas responsáveis pela geração de frio, o estudo contempla apenas uma das casas de máquinas, que é responsável exclusivamente para operação de um túnel de congelamento da planta fabril.

Os dados do sistema de refrigeração por absorção foram coletados por meio de observação no local, entrevistas informais, documentos físicos e relatórios de sistemas de uma

segunda unidade industrial da mesma companhia situado no estado do Rio Grande do Sul. Os dados de ambos processos foram comparados para que fosse possível mensurar a viabilidade do projeto de alteração de concepção do sistema de refrigeração.

Para coleta dos volumes, foram medidos os dados de produção conforme o tipo de produto, devido a diferentes características de cada produto, para obter este dado fez-se o uso do sistema de apontamento utilizado para controle de produção onde foram feitas coleta de relatórios de sistemas, onde são apontadas as etiquetas com códigos de barras, sendo assim possível extrair relatórios, onde foram separados os volumes por produto para fins de cálculo de carga térmica.

Esse processo de coleta dos volumes de produção foi aplicado para ambas as plantas produtoras onde os respectivos sistemas estão instalados, as duas plantas pertencem a mesma companhia e possuem o mesmo sistema de controle instalado, o que difere são os tipos de produtos produzidos em cada planta.

Neste contexto, a carga térmica pode ser definida como a quantidade de calor que deve ser removido de um ambiente afim de proporcionar o bem estar das pessoas, e resfriamento ou processamento de produtos conforme característica desejada (ÇENGEL, 2013).

Neste sentido, foram determinadas as cargas térmicas totais necessárias com base na estruturas dos produtos e suas características, através de cálculos utilizando as equações (1) e (2). Sendo esta etapa significativa para o projeto, pois uma falha na definição da carga térmica pode se transformar em um projeto com superdimensionamento ou subdimensionamento, afetando os resultados esperados e a eficiência do sistema de refrigeração.

No âmbito de consumo de energia, pode-se determinar o consumo de energia com base na potência, ciclos, tempo diário de operação e projetar o consumo de energia de acordo com os dias de operação no mês (FILHO, 2017).

Desta forma, foram coletados dados de documentos físicos e relatórios de sistema, com o consumo de energia nos sistemas de geração de frio para atender a demanda de carga térmica de ambos os sistemas de refrigeração. Para que fosse possível determinar o consumo de energia de cada uma das casas de máquinas foram calculados os consumos de energia conforme potência empregada nos equipamentos de cada local e em cada planta.

Com base na observação *in loco* e entrevistas informais com os operadores dos sistemas de refrigeração instalados nas plantas, foram mapeados os processos, equipamentos, fluxos, potência instalada e recursos empregados nos sistemas de refrigeração, com posse destes dados foram estimados os consumos de energia baseados na potência instalada. Com isso pode-se

elaborar um comparativo dos dados entre os sistemas para verificar a diferença de consumo e de recursos necessários.

Segundo Tamietti (2009) a definição dos equipamentos necessários para um projeto deve levar em consideração as capacidades para atender a demanda, pressão temperatura, potência, dimensão, material dos componentes, entre outras características.

Neste contexto, foram comparados os sistemas e elaborados os fluxogramas de ambos dos processos, apresentando os equipamentos empregados nas plantas que atualmente operam com suas específicas cargas térmicas.

Segundo Hirschfeld (2009), o estudo de viabilidade de um projeto a ser executado consiste em examina-lo visando verificar sua justificativa, levando-se em consideração aspectos jurídicos, administrativos, financeiros, comerciais e técnicos. Neste ponto, foram realizadas avaliações de viabilidade da alteração da concepção dos sistemas de refrigeração, com base nos dados levantados nas etapas do estudo descritas anteriormente, comparando o custo para geração de frio em cada sistema e, finalmente, foram analisados quais os ganhos e perdas podem ser gerados frente a uma possibilidade de alteração de instalação.

Neste contexto, verificou-se entre os dois sistemas quais os custos de operação por hora trabalhada com base no consumo de energia elétrica e vapor, além dos pontos de atenção na operação do sistema.

4 RESULTADOS

O sistema de refrigeração por compressão empregado atualmente na casa de máquinas em estudo, possui sistema de alta e baixa pressão, com finalidade de minimizar os problemas operacionais e obter um menor consumo de energia.

Contudo, é importante definir que a casa de máquinas em questão não possui saída para de fluido de baixa pressão para refrigeração nos evaporadores, pois a mesma é dedicada para operação de um túnel de congelamentos contínuo, onde o mesmo opera com regime de temperatura de -30°C , sendo assim o fluido de baixa pressão somente é aspirado pelo compressor de alta pressão.

Neste contexto, pode-se observar na Tabela 1 os volumes de produção que passam em média no túnel de congelamento por dia (24 horas), bem como as temperaturas médias que os itens entram no túnel de congelamento.

kcal/h, após esta etapa a amônia líquida contida no reservatório é bombeada por três bombas para os evaporadores.

O parque fabril total do sistema por compressão de amônia possui uma potência instalada de 18.676,49 kW, o setor de casa de máquinas responsável pela geração de frio representa 54,74% do total da potência instalada. As áreas e suas respectivas potências instaladas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Potência instalada por área do parque fabril (sistema por compressão)

Área	Potência (kW)	% Potência Instalada
Casa de Máquinas	10.222,97	54,74%
Casa de máquinas 1	9.030,65	88,34%
Casa de máquinas 2 – em estudo	1.192,32	11,66%
Abate Suínos	2.441,92	13,07%
Alimentos Processados	2.360,33	12,64%
Apoio*	2.209,00	11,83%
Abate Aves	1.442,28	7,72%
Total	18.676,49	

Apoio* - Áreas que atendem o complexo (Setores administrativo, tratamento água, efluente, entre outros).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A capacidade instalada na casa de máquinas é apresentada através da Tabela 3 onde são apresentados os equipamentos e suas respectivas potências, e no apêndice 1 são apresentados os equipamentos e seus componentes, totalizando 1.192,32 kW com capacidade de remoção de 427.839,39 kcal/h.

Tabela 3 – Potência instalada dos equipamentos e componentes (sistema por compressão)

Equipamento	Potência (kW)
Compressor N°1 - Baixa Pressão	147,20
Compressor N°2 - Baixa Pressão	147,20
Compressor N°3 - Baixa Pressão	147,20
Compressor N°4 - Alta Pressão	331,20
Compressor N°5 - Alta Pressão	331,20
Bomba de Amônia Líquida N°1	4,44
Bomba de Amônia Líquida N°2	4,42
Bomba de Amônia Líquida N°3	4,38
Condensador N°1	25,02
Condensador N°2	25,02
Condensador N°3	25,02
Total	1.192,32

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Na Tabela 4 apresentam-se as cargas térmicas empregadas no sistema de absorção por dia (24 horas), bem como as variações temperatura sofridas pelos produtos nas câmaras de resfriamento, congelamento e túneis da instalação.

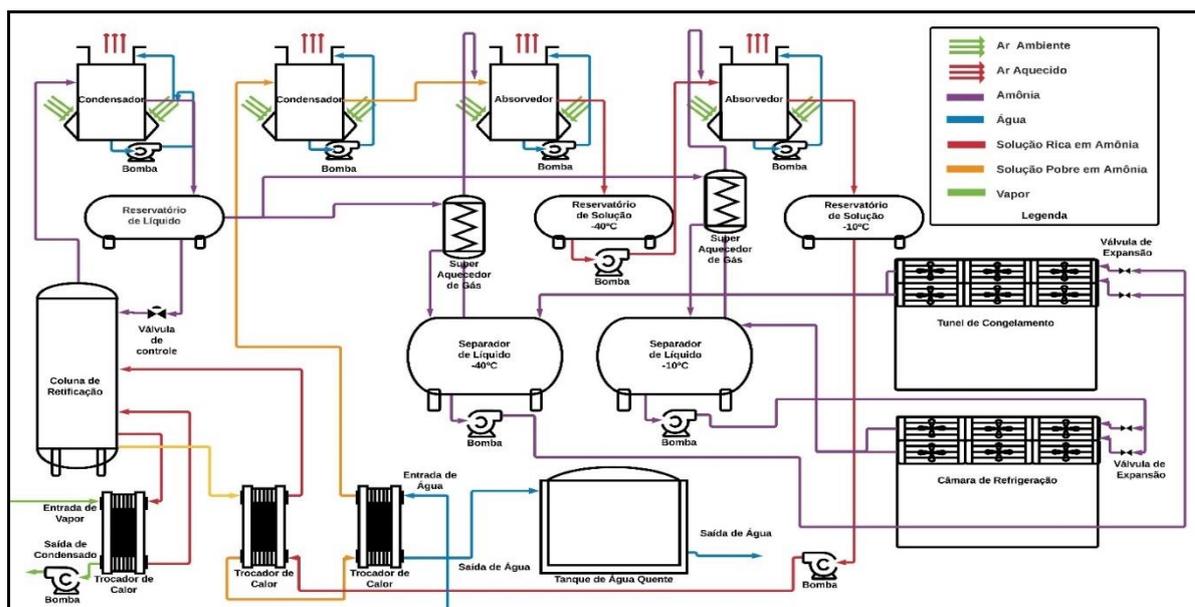
Tabela 4 – Demanda média de calor a serem retiradas do sistema diariamente (sistema por absorção)

Produto	Massa (kg)	Varição de Temperatura (°C) - Sensível	Varição de Temperatura (°C) - Latente	kcal/h
Carcaça Suína	298.360,00	28	-	490.304,93
Carne Suína <i>In Natura</i>	162.058,40	9,2	15,8	237.388,55
Carne Suína <i>In Natura</i>	69.296,00	7	-	84.964,90
Miúdos Suíno	65.296,00	25	15,8	119.154,32
Total	595.168,00	-	-	932.812,70

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

O sistema de absorção, diferente do sistema por compressão, não possui compressor na sua concepção, sendo este o seu grande diferencial ou peça chave para a não proporcionalidade quando se trata de consumo de energia, por outro lado, este sistema possui um consumo de vapor para que o ciclo de refrigeração seja completado, conforme pode-se observar na Figura 6 onde está apresentado o fluxograma do processo contendo equipamentos e fluxos dos fluidos.

Figura 6 – Fluxograma do sistema de refrigeração por absorção



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Neste processo, no absorvedor o vapor de amônia é absorvido por água líquida. A formação desta solução líquida é exotérmica. Uma vez que a quantidade de amônia que pode ser dissolvida na água aumenta à medida que a temperatura da solução diminui, a água de resfriamento é circulada ao redor do absorvedor para remover a energia liberada conforme a amônia vai para a solução e mantém a temperatura no absorvedor o mais baixa possível. A forte solução de amônia-água deixa o absorvedor e entra na bomba onde é direcionada para gerador onde então recebe calor e posteriormente é realizada a separação.

A capacidade instalada na casa de maquinas do sistema por absorção é apresentada na Tabela 5 onde são descritos os equipamentos e suas respectivas potências, que totalizam 384,66 kW com capacidade de remoção de 932.812,70 kcal/h.

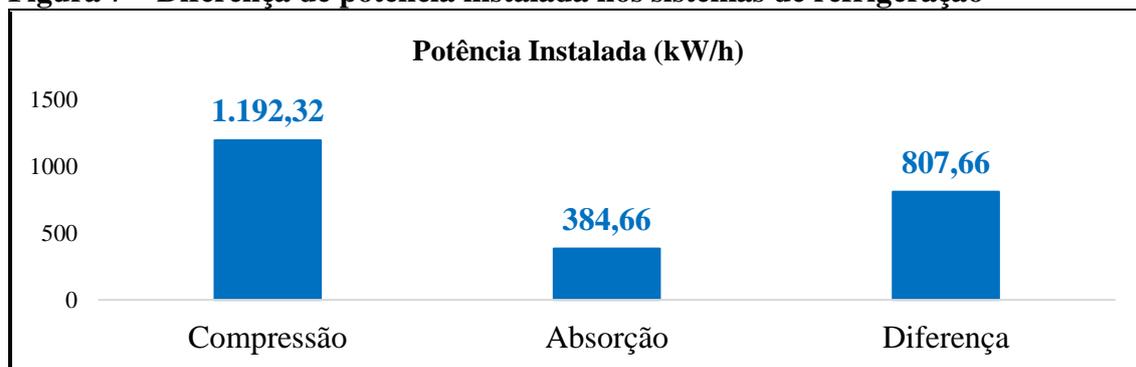
Tabela 5 – Potência instalada dos equipamentos e componentes (sistema por absorção)

Equipamento	Potência (kW)
Condensador N°1 – Amônia	75,02
Condensador N°2 – Solução	75,02
Absorvedor N°1 - Baixa Pressão	75,02
Absorvedor N°2 - Alta Pressão	75,02
Bomba Amônia (Regime -40°C)	11,03
Bomba Amônia (Regime -10°C)	11,03
Bomba de Solução Rica de Alta para Baixa	18,39
Bomba de Solução Rica para Trocador de Calor	44,13
Total	384,66

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A redução de potência instalada pode ser observada comparando-se os dados apresentados na Tabela 3 e Tabela 4, onde o sistema por absorção representa uma redução de 67,74% ao ser comparado com o sistema de compressão de vapor, ou seja, redução de 807,66 kW de potência instalada conforme Figura 7.

Figura 7 – Diferença de potência instalada nos sistemas de refrigeração



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A ressalva do sistema de absorção é o consumo de vapor como fonte de energia para que seja possível realizar o ciclo completo de refrigeração, sendo assim, o sistema para operar necessita de forma ininterrupta do abastecimento de energia para aquecimento da solução no gerador.

Para que o ciclo de absorção seja efetuado, o mesmo precisa de uma fonte de calor, no sistema por compressão tem-se vapor, esse sistema possui um consumo de até 7 toneladas de vapor por hora de operação, na Figura 8 pode-se observar mensalmente o custo para geração de vapor em R\$/Ton de vapor da caldeira instalada na planta fabril de refrigeração por compressão.

Figura 8 – Custo R\$/Ton de vapor do ano de 2021



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Afim de comparar os sistemas quanto a suas características apresenta-se na Tabela 6 o sistema de compressão de vapor e na Tabela 7 o sistema de absorção os consumos de carga ocorridos multiplicados pelo preço médio do kW praticado no ano de 2021, que é de R\$0,37, para o volume de vapor consumido utilizou-se o fator de multiplicação mais expressivo observado nos controles do mesmo ano, que foi de R\$37,94.

Tabela 6 – Parâmetros de custo por hora do sistema de compressão com base na potência instalada

Sistema	Consumo	Valor Unit.	Valor Total
Compressão			
Potência			R\$441,15
Bomba de Amônia Líquida Nº1 (kW/h)	4,44	R\$0,37	R\$1,64
Bomba de Amônia Líquida Nº2 (kW/h)	4,42	R\$0,37	R\$1,64
Bomba de Amônia Líquida Nº3 (kW/h)	4,38	R\$0,37	R\$1,62
Compressor Nº1 - Baixa Pressão (kW/h)	147,20	R\$0,37	R\$54,46

Compressor N°2 - Baixa Pressão (kW/h)	147,20	R\$0,37	R\$54,46
Compressor N°3 - Baixa Pressão (kW/h)	147,20	R\$0,37	R\$54,46
Compressor N°4 - Alta Pressão (kW/h)	331,20	R\$0,37	R\$122,54
Compressor N°5 - Alta Pressão (kW/h)	331,20	R\$0,37	R\$122,54
Condensador N°1 (kW/h)	25,02	R\$0,37	R\$9,26
Condensador N°2 (kW/h)	25,02	R\$0,37	R\$9,26
Condensador N°3 (kW/h)	25,02	R\$0,37	R\$9,26
Total			R\$441,15

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Tabela 7 – Parâmetros de custo por hora do sistema de absorção com base na potência instalada

Sistema	Consumo	Valor Unit.	Valor Total
Absorção			
Potência			R\$138,25
Absorvedor N°1 - Baixa Pressão (kW/h)	75,02	R\$0,37	R\$27,76
Absorvedor N°2 - Alta Pressão (kW/h)	75,02	R\$0,37	R\$27,76
Bomba de Amônia (Regime -40°C) (kW/h)	11,03	R\$0,37	R\$4,08
Bomba de Amônia (Regime -10°C) (kW/h)	11,03	R\$0,37	R\$4,08
Bomba de Solução Rica de Alta para Baixa (kW/h)	18,39	R\$0,37	R\$6,80
Bomba de Solução Rica para Trocador de Calor (kW/h)	44,13	R\$0,37	R\$16,33
Condensador N°1 – Amônia (kW/h)	75,02	R\$0,37	R\$27,76
Condensador N°2 – Solução (kW/h)	75,02	R\$0,37	R\$27,76
Vapor	11	R\$37,94	R\$417,34
Vapor (Ton/h)	11	R\$37,94	R\$417,34
Total			R\$555,59

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Para fins comparativos avaliou-se o custo em R\$/kcal.h⁻¹ para que fosse possível estimar os impactos financeiros dos sistemas, os cálculos para sistema de compressão estão descritos na Equação 3.

$$Custo \left(\frac{R\$}{kcal \cdot h^{-1}} \right) = \frac{Custo \text{ de Operação}}{kcal \cdot h^{-1}}$$

$$Custo \left(\frac{R\$}{kcal \cdot h^{-1}} \right) = \frac{R\$ 441,15}{427.839,39 kcal \cdot h^{-1}} = 0,00103 \frac{R\$}{kcal \cdot h^{-1}} \quad (3)$$

Os cálculos do sistema de absorção são apresentados na equação 4.

$$Custo \left(\frac{R\$}{kcal \cdot h^{-1}} \right) = \frac{Custo \text{ de Operação}}{kcal \cdot h^{-1}}$$

$$Custo \left(\frac{R\$}{kcal \cdot h^{-1}} \right) = \frac{R\$ 555,59}{931.812,70 kcal \cdot h^{-1}} = 0,00060 \frac{R\$}{kcal \cdot h^{-1}} \quad (4)$$

Com base nesses valores, pode-se observar que a operação com sistema de absorção possui um valor de 0,00043 R\$/kcal.h⁻¹ menor que o sistema de compressão, o que representa 41,75% de redução no custo por quilo caloria empregada no processo, tendo o vista os cenários e especificidades do estudo.

Avaliando mensalmente os gastos de operação da casa de máquinas e levando em consideração o mês com 30 dias, cada dia com 24 horas e uma carga térmica de 427.839,39 kcal.h⁻¹, tem-se o sistema de compressão com custo de R\$317.285,69 e se o sistema empregado fosse executado pelo processo de absorção poderia ser gasto R\$184.826,62 gerando um *saving* mensal de R\$ 132.456,07, ou seja, um total economizado de R\$1.589.472,88 no ano.

Desta forma, pode-se observar que tecnicamente, via uma análise de consumo energético dos sistemas de refrigeração, que o sistema de absorção é uma alternativa para redução de custos do processo tendo nos cenários avaliados uma economia financeira significativa, além de proporcionar uma redução no consumo de energia elétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral de realizar uma análise da alteração de concepção do sistema de compressão por absorção podemos com este concluir que o sistema de compressão de vapor é um dos melhores quanto ao quesito operação, pois neste sistema depende apenas de energia elétrica para que o mesmo funcione, ainda é possível desligar compressores quando a carga térmica diminui, ou até mesmo em uma situação de ampliação na geração de frio é possível instalar mais um compressor e adaptar o sistema para tal situação.

Neste contexto, o sistema de absorção é viável tecnicamente, porem possui características intrínsecas, pois necessita de energia elétrica e uma fonte de calor (vapor) para que o sistema funcione, já na operação, todas as casas de maquinas precisam manter-se acionadas para que o sistema não estabilize as pressões e sature os vapores. No ponto de vista de ampliar a capacidade de geração de frio, o sistema precisa ser redimensionado por completo

devido as capacidades de fluxo nas bombas, capacidade de condensação, absorção, aquecimento e separação no gerador.

Contudo, esse sistema apresenta uma potência instalada com diferencial de potência significativo, o que torna o sistema por absorção mais econômico se observado o quesito de consumo de energia elétrica, em contra partida consome vapor para separar a amônia da solução, quando transformamos esses dados em custo, o sistema continua mais vantajoso no ponto de vista econômico.

Neste contexto, a operação do sistema por compressão pode modular a potência, desta forma desligando alguns componentes, quando a carga térmica reduz, reduzindo o consumo de energia. Em contra partida o sistema de absorção não possui a mesma capacidade de modulação, praticamente não alterando o seu consumo de energia elétrica.

Sendo assim o sistema de absorção depende da caldeira para geração de vapor e consequentemente a operacionalização do sistema de refrigeração, desta forma uma manutenção ou anomalia na caldeira, faz com que o sistema de refrigeração não consiga gerar frio, uma solução para este problema neste sistema, seria possuir válvulas de controle para a entrada de amônia nos evaporadores e quando houver anomalias ou manutenções no sistema, operar esses evaporadores a partir da amônia vinda do sistema de compressão da casa de máquinas, porém para isso é necessário desenvolver um trabalho futuro visando o estudo de viabilidade técnica para estabelecer a exequibilidade desta ação.

Outra variável é a redução de custos com manutenção preventiva, como sugestão de trabalhos futuros é avaliar a diferença na concepção dos sistemas, tendo em vista que o sistema de compressão possui elevada ação mecânica, além do uso de óleo lubrificante nos mesmos que gera um custo adicional, necessitando de um estudo destas características para contemplação aprofundada de *payback*.

O sistema de absorção pode ser uma saída para um futuro onde se possa existir um racionamento de energia elétrica, apesar da sua potência requerida ser 67,74% menor que no sistema de compressão, o sistema necessita de um fonte de energia auxiliar de calor, e uma alternativa pode ser encontrar um fonte de geração de vapor limpa que torne o sistema ainda mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. F. d.; **Sistema de refrigeração por absorção intermitente: concepção, dimensionamento, construção, ensaio e considerações econômicas**; Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

- ASHRAE; **Handbook of System and Equipment**; American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc.; Atlanta; 2012.
- ASHRAE; **Refrigeration**; American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc.; Atlanta; 1982.
- ASKIN, R. G., STANDRIDGE, C. R. **Modeling and analysis of manufacturing systems**. John Wiley & Sons; New Jersey; 1993.
- BARHOUMI, M.; BEN EZZINE, N.; BELLAGI, A. **Exergy analysis of an ammonia? water absorption system**. International Journal of Exergy, 2009.
- BRASIL; **Portaria Nº 304**; Ministério da Agricultura, do Abastecimento e Reforma Agraria, 1996.
- CARVALHO, E. N.; **Modelagem e simulação de unidades resfriadoras de líquidos por Absorção H₂O-LiBr de simples e duplo efeito, incluindo o efeito de aditivos e clima local**; Universidade de Brasília; Brasília; 2007.
- COOPER, HARRIS; HEDGES, LARRY; VALENTINE, JEFFREY; **The Handbook of Research Synthesis and Meta-Analysis**; Russell Sage Foundation; New York; 2019.
- ÇENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A.; **Termodinâmica**; AMGH; Porto Alegre; 2013.
- DIACONU, B. M.; VARGAS, S.; OLIVEIRA, A. C. **Numerical Simulator of a solar-assisted ejector air conditioning system with cold storage**. Energy, 2011.
- ELETROBRÁS; FUPAI/EFFICIENTIA; **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**; Eletrobrás; Rio de Janeiro; 2005.
- EWING, J. A.; **The Mechanical Production of Cold** (Classic Reprint); Forgotten Books; 2018.
- FELLOWS, P.J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: princípios e práticas**. São Paulo: Artmed; 2006.
- FERREIRA, STANLEY PRIMO; **Análise Termodinâmica de um sistema de refrigeração por absorção de vapor com dessorção do refrigerante por energia solar**; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia; Ceará; 2018.
- FILHO, JOÃO MAMEDE; **Instalações Elétricas Industriais**; Livros Técnicos e Científicos Editora – LTC; Rio de Janeiro; 2017.
- FROZZA, J. F.; **Eficiência energética em indústria frigorífica; desafios de implantação**; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Pato Branco; 2013.
- GASPAROVIC, CLAUDIA LUIZA MANFREDI; **Simulação e controle de uma coluna de absorção para purificação de biogás: avaliação da viabilidade técnica e econômica do processo**; Universidade Tecnológica Federal Paraná; Paraná; 2014.

GAVA, ALTANIR J.; **Princípios de tecnologia de alimentos**; NOBEL; São Paulo; 1998.
HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S.; **Física 3**; Livros Técnicos e Científicos; Rio de Janeiro; 2006.

HIRSCHFELD, HENRIQUE. **Engenharia econômica e análise de custos: aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores**; Atlas; São Paulo; 2009.

HOROWITZ, Roger. **Negro and White Unite and Fight! A Social History of Industrial Unionism in Meatpacking, 1930-1990**. Urbana: University of Illinois Press, 1997.

LANG, WILLIAM RAWSON; **James Harrison, Pioneering Genius**; Neptune Press Pty; Newtown, Victoria; 1982.

LEE, PAULA Y. (Org.). **Meat, Modernity, and the Rise of the Slaughterhouse**. Durham, New Hampshire: University of New Hampshire Press, 2008.

MARRA, GABRIELA CHAVES; **Saúde e Processo de Trabalho em Frigorífico: da Necessidade ao Adoecimento**; Fundação Oswaldo Cruz – FIOCRUZ; Rio de Janeiro; 2019.

MATOS, RUDMAR SERAFIM; **Refrigeração**; Universidade Federal do Paraná – UFPR; Paraná; 2017.

MENDONÇA, ANTONIO LUIZ ZAMBELLI LOYOLA GONZAGA; **Avaliação energética e econômica de um ciclo de refrigeração por absorção aplicado a hotéis**; Universidade de São Paulo; São Paulo; 2017.

MENNA, M. R. M.; **Modelagem e análise de custo de sistema de refrigeração por absorção**; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Paraná; 2008.

MERTIN, LUCAS HENRIQUE; **Comparação entre o sistema teórico de refrigeração por compressão de vapor de amônia e o sistema teórico de absorção de amônia no arrefecimento de óleo lubrificante de compressores a parafuso**; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Paraná; 2018.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**; John Wiley & Sons, Inc.; 2006.

NANTES, J.F.D.; MACHADO, J.G.C.F. **Aspectos Competitivos da Indústria de Alimentos no Brasil. In: Identificação de Gargalos Tecnológicos na Agroindústria Paranaense**. Curitiba, Ipardes, 2005.

NOBERTO, LUIS GABRIEL DE MATOS; **Análise de um sistema de refrigeração por absorção com mistura água-brometo de lítio**; Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRN; Rio Grande do Norte; 2018.

ORDÓÑEZ, J.A. **Tecnologia de Alimentos: Componentes dos Alimentos e Processos**. Porto Alegre: Artmed; 2005.

PACYGA, Dominic A. **Meat, Modernity, and the Rise of the Slaughterhouse**. Durham, New Hampshire: University of New Hampshire Press, 2008.

POTTER, N. N. **Food Science**. New York: Academic, 1995.

SANKARLAL, T.; MANI, A. J. R. E. **Experimental investigations on ejector refrigeration system with ammonia**. Renewable Energy, 2007.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. SAIZ; **Refrigeração Industrial**; São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 2002.

TAMIETTI, RICARDO PRADO; **Engenharia de projetos industriais**; Centro Universitário do Leste de Minas Gerais; Minas Gerais; 2009.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. New York: Chapman e Hall, 1991.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene; **Física para Cientistas e Engenheiros – Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**; LTC; Rio de Janeiro; 2015.

XAVIER, CARLOS MAGNO DA S.; KEELLING, RALPH; **Conceitos de Projetos e Viabilidade**; Ed. Saraiva; São Paulo; 2010;

WITTE, MAIKEL CAMINHA. **Eficiência Energética: Mapeando oportunidades em indústria de alimentos através de melhorias operacionais nos sistemas de utilidades**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

ZACCARELLI, S. B.; **Programação e controle da produção**. Livraria Pioneira Editora; Rio de Janeiro; 1986