

FILIPPE BRITO VENÂNCIO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA E PERFORMANCE DAS CARACTERÍSTICAS DO
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS:
ESTUDO DE CASO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

FILIPPE BRITO VENÂNCIO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA E PERFORMANCE DAS CARACTERÍSTICAS DO
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Área de habilitação:

Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

Uberlândia - MG

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela oportunidade de realizar esse trabalho e força para superar as dificuldades. Aos meus familiares e amigos pelo incentivo e companheirismo. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

RESUMO

A busca pela diminuição do consumo de energia elétrica e pelo aumento da eficiência em sistemas de refrigeração é muito estratégico para as indústrias, dessa forma pois o consumo de potência desta instalação é alto. A simulação de sistemas de refrigeração desempenha um papel fundamental no projeto, pois otimiza passos e desperdiça recursos físicos. Este estudo visa descrever e analisar um sistema de refrigeração utilizando o fluido refrigerante Amônia (R-717), na indústria de bebidas, introduzindo o conceito do ciclo de refrigeração e demonstrando cada componente utilizado no ciclo. A análise se dará por meio da variação de parâmetros do ciclo, tais como: temperatura de descarga dos compressores, pressão e temperatura de condensação. Para tal, dados experimentais foram coletados diretamente na planta industrial e, assim, os diversos estados termodinâmicos e os balanços de energia e entalpia, viabilizaram a análise de performance do ciclo. Os resultados indicaram uma melhora do coeficiente de performance (COP) do sistema ao elevar a temperatura de evaporação sendo 6% maior que o atual, viabilizando um possível investimento.

Palavras-Chave: Refrigeração, Amônia, COP.

ABSTRACT

The search for a decrease in the consumption of electric energy and the increase of efficiency in refrigeration systems is very strategic for the industries, because, in this way the simulation of such systems plays a fundamental role in the project, since it optimizes steps and wastes physical resources. This study aims to describe and analyze a refrigeration system using Ammonia refrigerant (R-717) in the beverage industry, introducing the concept of the refrigeration cycle and demonstrating each component used in the cycle. For that, experimental data were collected directly in the industrial plant and, thus, the various thermodynamic states and the energy and enthalpy balance, enabled the analysis of cycle performance. The results indicated an improvement of the coefficient of performance (COP) by reducing the evaporation temperature of the system, being the coefficient 6% higher than the current one, making possible a possible investment.

Keywords: Refrigeration, Ammonia, COP.

SUMÁRIO

1. Introdução	7
2. Objetivos	8
2.1. Objetivo geral	8
2.2. Objetivos específicos	8
3. Revisão bibliográfica	9
3.1. Refrigeração industrial	9
3.1.1. Ciclo de refrigeração por compressão a vapor	9
3.2. Componentes existentes no sistema de refrigeração industrial utilizando fluido R-717	11
3.2.1. Compressor de amônia	11
3.2.2. Condensadores.....	13
3.2.3. Válvula de Expansão e Válvula Solenóide.....	14
3.2.4. Evaporadores	14
3.2.5. Separador de líquido.....	15
3.2.6. Reservatório de líquido.....	15
3.3. Sistema com evaporadores de recirculação	16
3.4. Modelagem matemática.....	17
3.4.1. Coeficiente de eficácia do ciclo, ou coeficiente de performance (COP).....	17
3.4.2. Entalpia na Válvula de Expansão	17
3.5. Software EES	17
4. Metodologia	18
4.1. Componentes da planta em análise.....	18
4.2. Dados da planta e propriedades termodinâmicas do sistema	21
5. Resultados e discussões	29
5.1. Troca compressores alternativos para compressor parafuso	29
5.2. Alterar a temperatura de evaporação ou condensação.....	29
5.3. Obtenção de novos tanques de bebida para as linhas	30
6. Sugestões para trabalhos futuros	31
7. Conclusões	32
8. Referências bibliográficas	33
9. Apêndice	34
9.1. Código da modelagem computacional do sistema no software EES.....	34

1. Introdução

Cerca de 25% da produção de alimentos perecíveis no mundo é refrigerada (GEORGE, 1993), existindo ainda uma vasta estrutura para produção, transporte e estocagem desses alimentos. Por outro lado, refrigeração pode ser utilizada em processos de mudança das características ou mesmo estrutura química, denominando-se processamento de alimentos. Entre aqueles que são submetidos a processos que utilizam refrigeração durante sua preparação podem ser citados: café instantâneo, queijos e bebidas como cerveja, vinhos, sucos cítricos (STOECKER e JABARDO, 2002).

Neste sentido, com a necessidade de diminuir o consumo de energia elétrica tem-se incentivado o desenvolvimento de sistemas de refrigeração cada vez mais eficientes na utilização dessa energia, visando a redução de perdas de energia em conjunto com o aumento do conforto humano (BORJA, 2006).

A simulação de sistemas de refrigeração desempenha um papel fundamental no projeto de instalação, onde alguns processos são estudados e analisados de forma isolada. Por meio de simulações computacionais é possível analisar a influência de vários parâmetros de um sistema, com uma quantidade reduzida ou mesmo sem necessidade de testes experimentais, bem como testar diversos componentes e possíveis configurações de um determinado sistema, ainda na fase de projeto. (BORJA 2006).

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Analisar uma planta real de refrigeração visando a economia de energia da fábrica.

2.2. Objetivos específicos

- Propor mudanças no sistema de refrigeração, visando o aumento do Coeficiente de Desempenho (COP).
- Realizar a modelagem e simulação computacional do sistema;

3. Revisão bibliográfica

3.1. Refrigeração industrial

O processo de refrigeração define-se como o processo de retirar ou reduzir calor de um corpo ou ambiente determinado, ou seja, visa transferir constantemente a energia térmica de uma região de baixa temperatura para uma de maior temperatura.

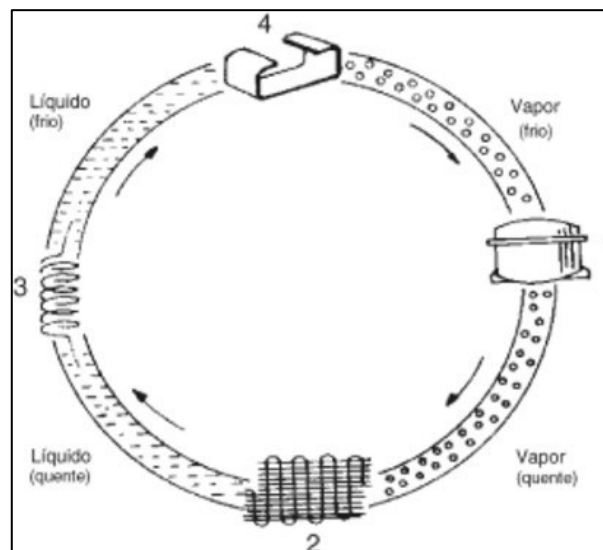
Cerca de $\frac{1}{4}$ da produção de alimentos perecíveis como um todo são refrigerados, sendo considerado um artifício excelente para conservação de suas qualidades (GEORGE, 1993). Com isso, ressalta a crescente importância dos alimentos refrigerados no mundo e cita a importância da refrigeração na sociedade e principalmente nas indústrias.

3.1.1. Ciclo de refrigeração por compressão a vapor

O sistema por compressão a vapor funciona através de um quadro de componentes básicos interligados. Além destes componentes é utilizado os fluidos refrigerantes, sendo tais elementos, fatores primordiais para que exista o processo.

Na figura 1 é demonstrado como este ciclo se comporta, ou seja, demonstra a sequência em que os componentes atuam no processo.

Figura 1 - Sistema básico de refrigeração



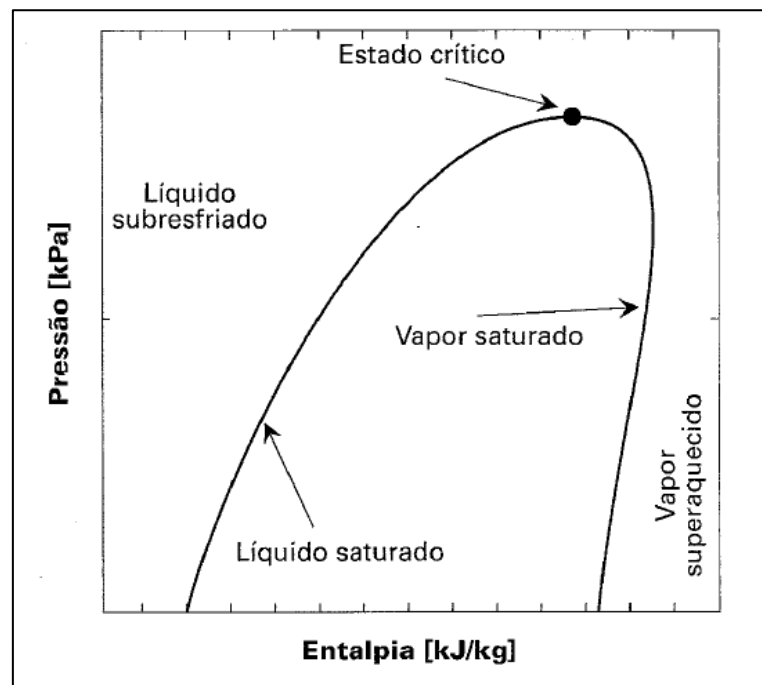
Fonte: CASTRO (2010).

Este ciclo inicia-se pelo trabalho fornecido ao compressor (1), que tem como objetivo, elevar a pressão (determinando a pressão que o sistema irá trabalhar) e a temperatura do fluido refrigerante no estado gasoso, promovendo a circulação do sistema, logo em seguida o vapor comprimido e em alta pressão é enviado para o condensador (2) onde o calor é rejeitado, sendo responsável por esfriar e condensar o vapor superaquecido originado pela compressão. O fluido condensado segue em direção a um dispositivo de expansão (3) passando do estado líquido a alta pressão para uma mistura líquido - vapor a baixa pressão e temperatura. Finalmente o fluido refrigerante passa pelo evaporador (4) retirando o calor do ambiente ou sistema a ser refrigerado, completando assim o ciclo.

O diagrama P-H (pressão - entalpia) é o mais utilizado no estudo das propriedades termodinâmicas dos refrigerantes. As diferentes fases do refrigerante no diagrama pressão - entalpia são determinadas por estados localizados em regiões separadas pelas linhas de saturação (STOECKER; JABARDO, 2002).

Na figura 2 é ilustrado o Diagrama P - H com a linha de saturação, a sua área de saturação ou região de mistura e por fim delimitando as regiões de vapor superaquecido e líquido sub-resfriado.

Figura 2 - Diagrama P - H com linha de saturação e regiões de diferentes fases



Fonte: (STOECKER e JABARDO, 2002).

O fluido refrigerante R-717 é classificado conforme a NR 34 baseada na ANSI/ASHRAE como fluidos refrigerantes inorgânicos, somando ao número 700. Sua fórmula molecular é NH₃, pois possui o nitrogênio (N) com massa molecular M=14 g/mol e o hidrogênio (H) com massa molecular M= 1 g/mol, de modo que: 700 + 14 + 3.1 = R-717.

A amônia é conhecida pelas suas propriedades termodinâmicas favoráveis. Em uma ampla faixa de aplicações, que superam os refrigerantes sintéticos. É um fluido refrigerante altamente eficiente, com uma eficiência teórica ligeiramente superior ao do R1-34a ou do Propano. Por ser um refrigerante natural, possui zero potencial de deterioração e zero potencial de aquecimento global. Porém, a Amônia possui alto índice de toxicidade e inflamabilidade, por este motivo, as instalações que a utilizam são orientadas pelas regulamentações nacionais.

3.2. Componentes existentes no sistema de refrigeração industrial utilizando fluido R-717

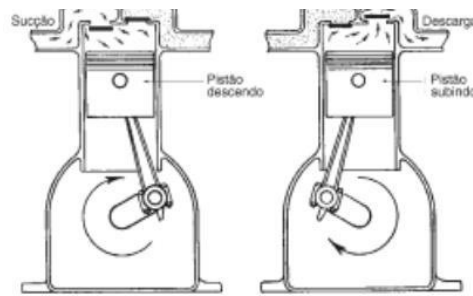
Neste tópico foram descritos cada componente utilizado no processo de refrigeração industrial, detalhando suas principais funções, com o intuito do conhecimento das características e operação.

3.2.1. Compressor de amônia

Na maioria das instalações de refrigeração, o compressor é o componente que mais consome energia, influenciando significativamente no custo operacional da instalação (STOECKER; JABARDO,1994)

Os compressores alternativos trabalham por compressão via pistão, ou seja, este compressor possui basicamente os mesmos componentes de um motor de combustão interna. A figura 3 apresenta o princípio de funcionamento de um compressor alternativo, demonstrando qual o ciclo percorrido pelo refrigerante no ato de sua compressão.

Figura 3 - Princípio de funcionamento de um compressor alternativo



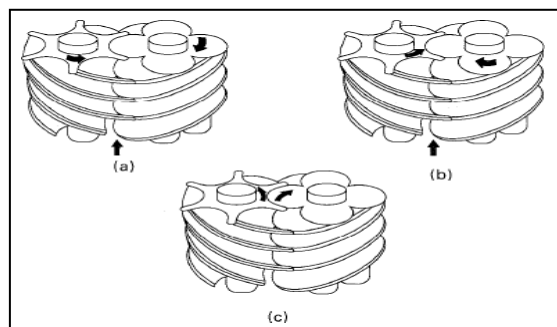
Fonte: CASTRO (2010).

A figura ilustra o movimento exercido pelo êmbolo, ou seja, primeiramente o compressor aspira o refrigerante para câmara através da válvula de admissão e durante a compressão o êmbolo comprime o gás para fora através da válvula de descarga (ELETROBRÁS, 2005).

O compressor parafuso é hoje o mais utilizado em refrigeração industrial por compressão de amônia, destacando pelo tamanho menor e o número de inferior de partes móveis comparado aos compressores alternativos. Este compressor há dois rotores, sendo denominado de macho e fêmea, onde tem a função de transportar e comprimir o gás refrigerante de forma constante de um lado ao outro ao longo de seu eixo (PILLIS, 2005).

A figura 4 apresenta o sentido o formato e o sentido de trabalho dos rotores no ato da compressão. Analisando a compressão do compressor parafuso, primeiramente o gás penetra no espaço entre os rotores (a), com a entrada do gás entre os rotores, o mesmo inicia-se o processo de compressão (b) e por fim o refrigerante encontram-se comprimido e encaminha para a região de descarga.

Figura 4 - Sentido de trabalho do Compressor parafuso duplo



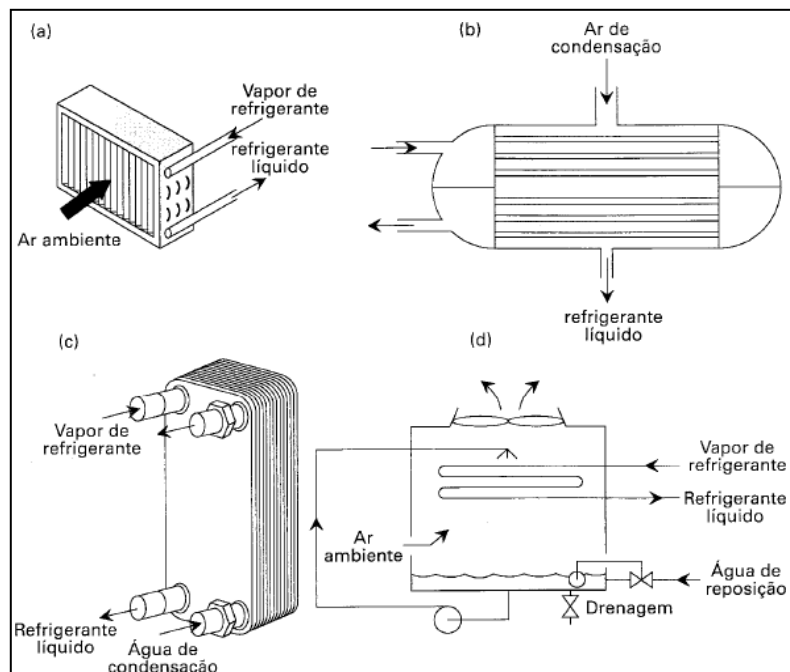
Fonte: STOECKER; JABARDO (2002).

3.2.2. Condensadores

O condensador é o componente do sistema de refrigeração responsável por transformar o gás quente, descarregado a alta pressão pelo compressor, em líquido refrigerante (STOECKER; JABARDO, 2002). Para isso, é rejeitado o calor contido no fluido refrigerante para alguma fonte de resfriamento, sendo composto por um trocador de calor.

Na refrigeração industrial são encontrados 4 tipos de condensadores, sendo apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Tipos de condensadores



Fonte: STOECKER; JABARDO (2002).

Os condensadores podem ser resfriados a ar (a), resfriados a água (casco tubo) (b), de placas (c) e evaporativos (d). Na refrigeração industrial predomina o tipo evaporativo, bem como os conjuntos de condensadores a placas com torres de resfriamento (MARTINELLI JUNIOR, 2003).

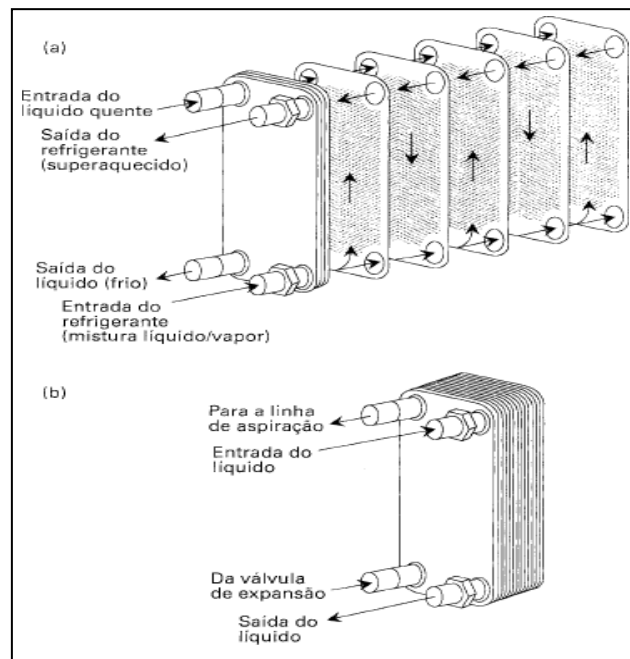
3.2.3. Válvula de Expansão e Válvula Solenóide

Em um sistema de refrigeração, a válvula de expansão tem a função de reduzir a pressão do refrigerante desde a pressão de condensação até a pressão de vaporização, sendo instalada logo após o reservatório de líquido. (CASTRO, 2010). Já a válvula solenóide, é uma válvula eletromagnética e destina-se ao bloqueio do refrigerante na linha de líquido, antes da válvula de expansão, com a finalidade de evitar a migração de refrigerante ao evaporador por ocasião da parada do compressor por controle de temperatura, isto evita problemas de lubrificação e golpes de líquido no compressor durante a partida do mesmo.

3.2.4. Evaporadores

O evaporador é o agente direto de resfriamento, sendo os 4 principais componentes do sistema. Neste componente é onde ocorre a troca de calor entre o fluido refrigerante e o produto ou ambiente a ser refrigerado, ocorrendo com isto a evaporação do fluido refrigerante.

Figura 6 - Representação de um evaporador a placas



Fonte: STOECKER; JABARDO (2002).

Na figura 6 é representado o fluxo e sua estrutura, onde; (a) ilustra o escoamento do refrigerante e do líquido sendo resfriado entre as placas; (b) o trocador de placas montado e seu sentido de entrada e saída do refrigerante e o líquido.

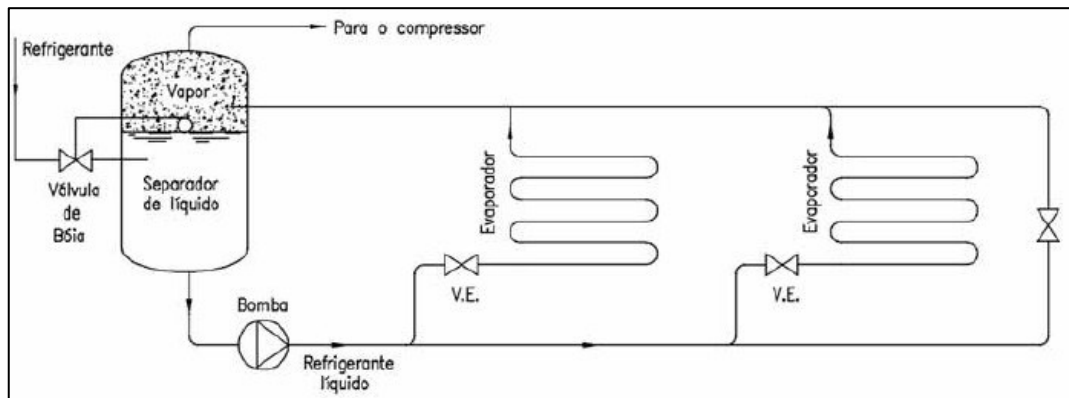
3.2.5. Separador de líquido

Os reservatórios de líquido de baixa pressão, sendo chamados na prática de separadores de líquido, e possuem a função de separar líquido e vapor, evitando que o refrigerante em estado líquido seja aspirado pelos compressores, sendo posicionados entre os evaporadores e os compressores.

A gravidade exerce um papel fundamental no processo de separação de líquido, pois ela de acordo com a densidade, separa o líquido do vapor no recipiente. Os separadores de líquido podem ser divididos em dois tipos, sendo distintos de acordo com a direção de escoamento do vapor, horizontal e vertical (STOECKER; JABARDO, 2002).

Como ilustrado na figura 7, temos um separador de líquido na vertical, demonstrando o sentido de fluxo do refrigerante.

Figura 7 - Sistema de refrigeração utilizando separador de líquido vertical



Fonte: Eletrobrás (2005).

3.2.6. Reservatório de líquido

Todo sistema de refrigeração que utiliza amônia como fluido refrigerante, deve possuir um reservatório de alta pressão com volume suficiente para armazenar a carga total de refrigerante para compensar as variações de consumo e produção de refrigerante

líquido. O termo de alta pressão é designado pelo fato de ser um sistema que está antes do dispositivo de expansão (STOECKER; JABARDO, 2002).

Conforme podemos observar na figura 8, a instalação do reservatório, é logo após aos condensadores e está localizado geralmente abaixo dos condensadores, de forma a receber o fluido R-717 já condensado por gravidade.

Figura 8 - Reservatório de amônia a alta pressão líquida



Fonte: Eletrobrás (2005).

Sua outra função é a de absorver as variações de volume de refrigerante consequentes das mudanças de carga e na pressão de sucção, sendo provocada pela variação de capacidade dos compressores e variação da carga térmica dos equipamentos de processo

3.3. Sistema com evaporadores de recirculação

Em um sistema de recirculação de líquido, a mistura bifásica (líquido-vapor) que deixa os evaporadores é enviada a um separador de líquido, ao passo que o líquido é recirculado pelos evaporadores. E neste mesmo vaso de pressão, o vapor saturado é succionado pelo compressor através da linha de aspiração, sendo esta uma das principais vantagens deste tipo de sistema.

Como neste tipo de sistema, o fluido que ingressa no trocador de calor está na fase líquido comprimido, este usa de forma eficiente toda a sua superfície de transferência de calor, pelo qual resulta um coeficiente global de transferência de calor mais elevado.

3.4. Modelagem matemática

3.4.1. Coeficiente de eficácia do ciclo, ou coeficiente de performance (COP)

O Coeficiente de Performance do Ciclo pode ser definido como a razão entre a energia útil e a energia gasta para que esta seja produzida, de acordo com a Equação 01 ((ELETROBRÁS, 2005):

Equação 1 – Cálculo do Coeficiente de Performance

$$COP = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia gasta}} = \frac{h_{entra(comp)} - h_{sai(exp)}}{h_{sai(comp)} - h_{entra(comp)}}$$

3.4.2. Entalpia na Válvula de Expansão

O processo de estrangulamento ocorre quando um fluido escoando em uma linha e subitamente encontra uma restrição. O resultado do processo de estrangulamento, é uma queda brusca na pressão do escoamento, e este processo pode ser considerado adiabático. Nestas condições, aplicando a primeira lei da termodinâmica e desconsiderando os termos justificados, teremos uma igualdade de entalpia na seção de alimentação, com a entalpia na seção de descarga. (STOECKER; JABARDO, 2002).

Equação 2 – Entalpia na válvula de expansão

$$h_{saída_expan} = h_{entr_expan}$$

3.5. Software EES

O software EES (Engineering Equation Solver) foi desenvolvido pela empresa F-Chart Software voltado para a área de Ciências Térmicas. Seu grande diferencial em relação a outros softwares utilizados nessa área é seu banco de dados com propriedades termodinâmicas para diversos fluidos. A programação no software permite a realização de balanços de massa e energia dos sistemas, além da possibilidade de resolução de

equações que contenham até mesmo variáveis implícitas, não importando a seqüência de entrada de dados.

Todos esses recursos são apresentados pelo EES de maneira intuitiva e simples, de forma que não é necessário um estudo aprofundado de sua lógica de programação para uma primeira utilização. Estudar o comportamento do sistema quando alguma das variáveis sofre alguma alteração. Possui também a parte de construção de gráficos de propriedades termodinâmicas.

4. Metodologia

Na indústria de bebidas (especialmente na produção de cervejas e refrigerantes), o sistema de refrigeração é o principal consumidor de energia elétrica, pois além da importância deste sistema na conservação do produto e dos insumos utilizados, ele também faz parte do processo, para que se atinjam as temperaturas desejadas conforme a necessidade de cada etapa. Segue abaixo alguns fatores que exigem o uso de um sistema de refrigeração neste tipo de indústria:

- A bebida é envasada a baixas temperaturas (3°C a 12°C) e sob pressão para assegurar uma elevada concentração de CO₂ no produto final. (MAIOLI, 2013).
- Processos de envase a frio são importantes, pois há minimização da criação de espuma na máquina enchedora de garrafas.

4.1. Componentes da planta em análise

Tabela 1 – Componentes e características dos componentes da planta de refrigeração

Código	Equipamento	Tipo	Potência [CV]
A	Compressor	Parafuso	400,00
B	Compressor	Alternativo	100,00
C	Compressor	Alternativo	100,00
D	Condensador Evaporativo	Água	30,00
E	Condensador Evaporativo	Água	15,60
F	Condensador Evaporativo	Água	15,60
G	Válvula Solenóide		
H	Válvula de Expansão		

FONTE: Autor

O sistema em questão, trabalha com o fluido refrigerante Amônia R-717 como fluido principal e Etanol como fluido secundário. A planta de refrigeração, opera a fim de resfriar o Etanol (através da troca de calor com a Amônia), e este resfria a bebida diretamente através da troca calor com a bebida. A Amônia é um composto tóxico, corrosivo para a pele, e caso seja inalada pode causar tosse, falta de ar, asfixiar e queimar as vias aéreas superiores, dessa forma realizar o resfriamento da bebida diretamente com a Amônia não é adequado.

Na figura 9, pode-se observar o trocador a placas da bebida com o fluido Etanol, na sala de envase de produção, exemplificando a troca de calor entre ambos.

Figura 9 - Trocador de calor na sala de envase



Fonte: Autor.

O sistema trabalha com 3 compressores de Amônia, sendo 2 deles compressores alternativos, com 100 CV de potência, e uma capacidade térmica de 277.300 [kcal/h] e um compressor do tipo parafuso (Figura 10), com 400 [CV] de potência e capacidade de 1.347.900 [kcal/h]. A amônia é succionada pelos compressores a uma temperatura de -11 [°C] e pressão de 2,5 [bar]. Ao ser comprimida, suas propriedades térmicas são alteradas e o fluido refrigerante (amônia) passar ficar com uma pressão de 11 [bar] e 93 [°C] de temperatura.

Figura 10 - Compressor Parafuso



Fonte: Autor.

Após ser comprimido o fluido circula até os condensadores á água, onde a pressão é mantida a 11 bar e a temperatura cai para 25 [°C] (temperatura de evaporação). A planta possui três condensadores deste tipo, sendo que dois deles possuem uma capacidade de 1.000.000 [kcal/h] e outro com uma capacidade de 1.767.100 [kcal/h]. O fluido é estocado em um vaso de pressão (Figura 11), com capacidade de 4.500 [L]. Sabe-se que o fluido que sai do evaporador, está como líquido comprimido, ou seja o título igual a zero.

Figura 11 - Reservatório de Amônia



Fonte: Autor.

Após ser estocada no tanque pulmão, o fluido se direciona para a válvula de expansão (Figura 12) e altera suas propriedades termodinâmicas novamente, passando de

uma pressão de 11 [bar] para uma pressão de 2,5 [bar]. No circuito, antes da válvula de expansão, possui a válvula solenóide, cuja sua função foi explicada no item 3.2.3

Figura 12 - Válvula de Expansão e Válvula Solenóide do sistema de Refrigeração



Fonte: Autor.

A amônia proveniente da expansão entra no tanque separador de líquido horizontal. Este mesmo vaso, possui tais entradas e saídas de fluido refrigerante:

- Entrada de Amônia da saída da válvula de expansão;
- Entrada de Amônia após retornar da troca de calor com Etanol no evaporador;
- Saída de Amônia para o trocador de calor, onde este fluido refrigerante irá resfriar o Etanol;
- Saída de Amônia para a sucção dos compressores

Após ser resfriado pela troca de calor com a Amônia, o Etanol é estocado em um tanque pulmão, onde será bombeado para os trocadores a placa das linhas de produção, onde irá resfriar a bebida a ser envasada.

O Etanol “quente” proveniente da troca de calor com a bebida, retorna para um tanque acumulador e posteriormente este fluido é bombeado para ser resfriado pela Amônia.

4.2. Dados da planta e propriedades termodinâmicas do sistema

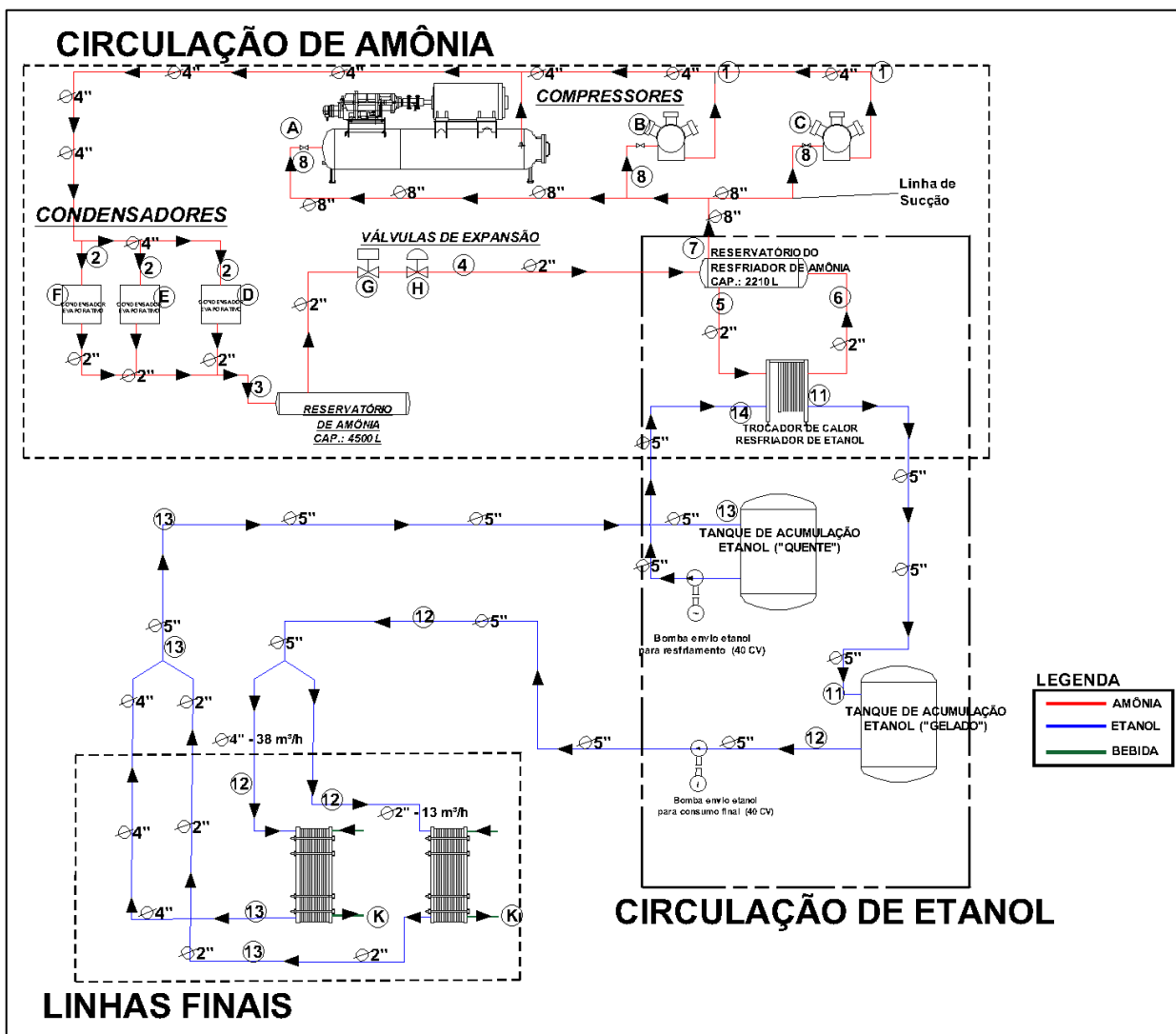
O sistema de refrigeração, está representado de maneira esquemática e simplificada na Figura 13, destacando-se os pontos de análise, após cada componente do sistema.

Neste trabalho foi feita a coleta de dados (Tabela 2) do sistema de refrigeração das seguintes formas:

- Reunir dados disponíveis através do supervisor do sistema;
- Informações de temperatura nas tubulações (de pontos de interesse) através de um pirômetro;
- Através de observações “*in loco*” e opiniões do técnico operador com base na sua experiência;
- Documentações do projeto da planta.

Com tais dados foi possível determinar todo estado do fluido bem como o comportamento do mesmo durante toda sua passagem por cada processo que compõe o ciclo de refrigeração. Porém, não foi possível coletar todos os pontos do sistema, pois muitas tubulações possuem isolamento térmico restringindo o uso do pirômetro.

Figura 13 - Representação esquemática do sistema de refrigeração



Fonte: Autor.

Tabela 2 - Dados e informações Coletadas

Ponto	Fluido	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Localização
1	Amônia	80,0	11,10	Saída dos compressores
2	Amônia	75,0	11,10	Entrada dos compressores
3	Amônia	30,0	11,10	Saída dos condensadores
4	Amônia	Não aferido	2,50	Saída da Válvula de Expansão
5	Amônia	Não aferido	2,50	Entrada no resfriador de etanol
6	Amônia	Não aferido	2,50	Saída no resfriador de etanol
7	Amônia	Não aferido	2,50	Saída do separador de liq. Linha sucção
8	Amônia	3,0	2,50	Linha de Sucção
11	Etanol	-3,7	3,60	Saída do resfriador de etanol com bebida (entrada do tanque de Etanol "gelado")
12	Etanol	-3,6	3,60	Saída tanque de etanol "gelado"
13	Etanol	22,0	3,60	Saída do resfriador de etanol (entrada do tanque de Etanol "quente")
14	Etanol	23,0	3,60	Saída tanque de etanol "quente"
	Bebida	2		Bebida

Fonte: Autor

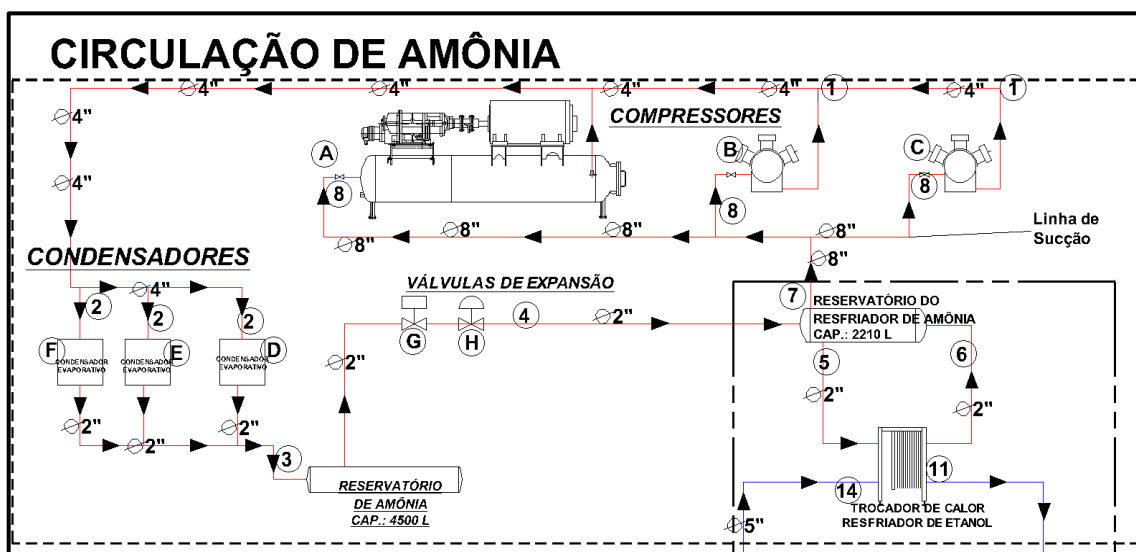
Para determinar os demais dados, foram feitas considerações e uso da teoria da termodinâmica para realização dos cálculos através do *EES (Equation Engineering Software)*.

Podemos verificar na figura 14, no ponto 1, logo após a compressão, temos a Amônia no estado de vapor superaquecido. A Entalpia (h_1) foi calculada e tem o valor de 1663 [kJ/kg].

No ponto 2 o fluido não passa por nenhum processo, porém, o mesmo chega com uma temperatura 5 [°C] menor que quando sai do ponto A, mostrando assim que há uma perda de temperatura pelas tubulações, tal queda pode ser provocada por algum problema de isolamento na tubulação, onde, há uma transferência de calor para o meio externo, ou até mesmo a localização de algum ponto da mesma perto de um processo de geração de calor. Assim logo antes de entrar nos condensadores a entalpia do Fluido é igual a 1650 [kJ/kg].

Após a condensação da Amônia, temos no ponto 3, o fluido no estado de líquido comprimido título (X_3) igual a 0, temperatura de 25 [°C] e a Entalpia neste ponto de 333,5 [kJ/kg]. O reservatório de amônia com capacidade de 4600 [L], é o pulmão do sistema.

Figura 14 – Representação da Circulação de Amônia no sistema

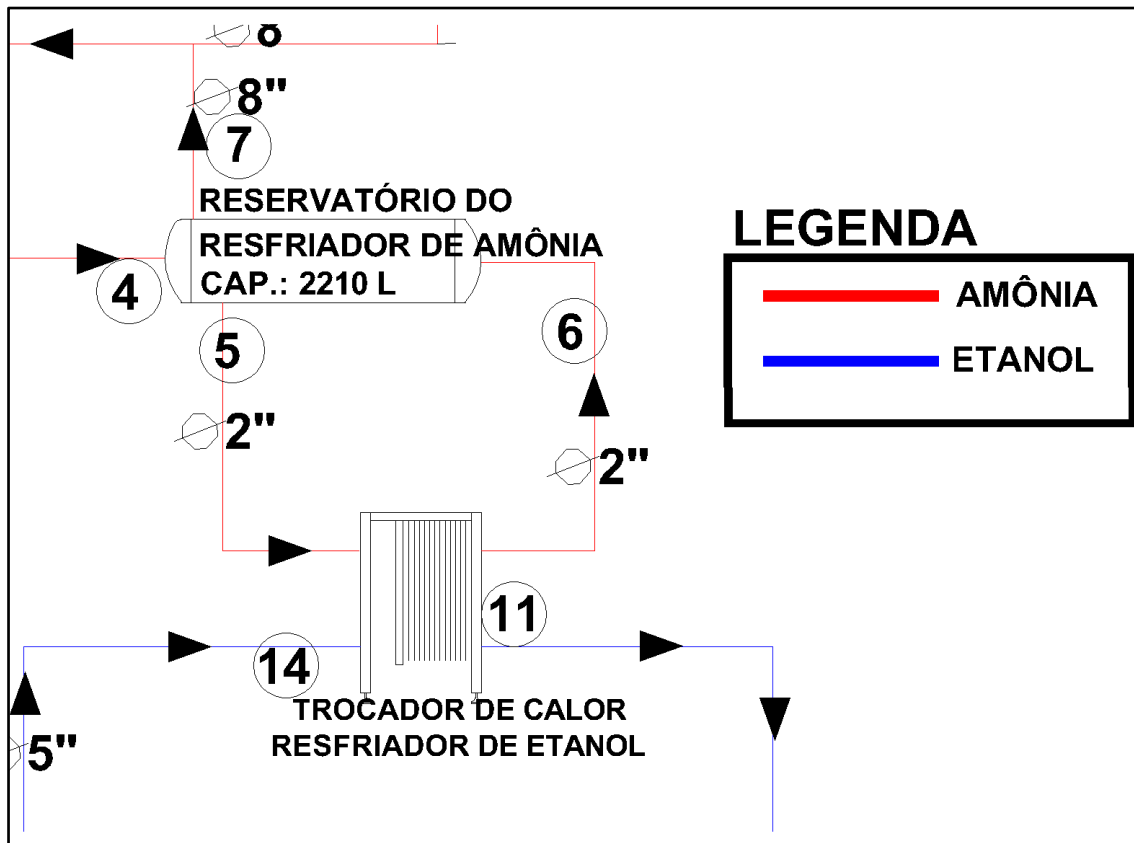


Fonte: Autor.

Após a expansão do fluido no ponto 4 o valor da pressão do fluido cai de 11 [bar] para 2,5 [bar]. A temperatura também irá cair consideravelmente, porém não foi possível coletar o valor da propriedade na tubulação devido ao isolamento térmico. Sabe-se que pela Equação 2, que não houve mudança na entalpia causada por este processo, dessa forma esta propriedade se mantém no mesmo valor do ponto 3: 333,5 [kJ/kg], possibilitando determinar qual a temperatura da amônia neste ponto: Pelos cálculos realizados utilizando o *EES* o valor de temperatura é de -13,7 [°C], que é a temperatura de saturação deste fluido com uma pressão a 2,5 [bar]. O valor do título (X_4) é de 0,15.

No reservatório de Amônia do trocador de calor do Resfriador de Etanol (que também funciona como um separador de líquido), conforme na Figura 15, a análise deve ser mais detalhada, uma vez que trata-se de um sistema com recirculação do líquido, conforme explicado suas vantagens no item 3.3.

Figura 15 - Representação do separador de líquido horizontal



Fonte: Autor.

Para determinar as propriedades termodinâmicas de alguns pontos, foram levantadas algumas considerações:

- Dentro do tanque reservatório do resfriador a Amônia está temperatura de Saturação (-13,7 °C) e a uma pressão de 2,5 [bar]. O que irá diferenciar termicamente nos pontos de entrada e saída é o título;
- Pode-se afirmar que o fluido que está no tanque reservatório do resfriador (Figura 16) e que se encaminha para o evaporador (ponto E), está na fase de como líquido comprimido, ou seja o título igual a 0;
- Outra afirmação é que o fluido succionado do tanque reservatório do resfriador (ponto G), se encontra com título igual a 1.

Seguindo as determinações acima, conseguimos calcular o valor de Entalpia de alguns pontos.

$$T_4 = T_5 = T_6 = T_7 = -13,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_4 = 333,50 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right], x_4 = 0,15$$

$$h_5 = 137,30 \left[\frac{kJ}{kg} \right], x_5 = 0,00$$

$$h_6 = 248,30 \left[\frac{kJ}{kg} \right], x_6 = 0,10$$

Figura 16 - Separador de líquido horizontal e trocador a placas dos fluidos



Fonte: Autor.

Para definir a temperatura de saída do resfriador (da amônia – Ponto 6) no trocador de placas foram utilizadas as informações que temos do fluido resfriado, etanol. Com o valor da pressão, temperatura de entrada e saída e sabe-se que o recalque do etanol é executado por duas bombas, o que leva a conclusão que o mesmo trabalha somente em estado de líquido comprimido. Com tais dados foram calculados os valores das entalpias do Etanol em todos os pontos:

$$h_{11} = 180,30 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h_{12} = 179,80 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h_{13} = 291,20 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h_{14} = 291,20 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Levando em consideração que a quantidade de energia que entra é igual a quantidade de energia que sai no trocador a placas, é possível determinar o estado da amônia da saída do mesmo. Assim tem - se:

$$h_{entrada} = h_{saída}$$

$$h_{14} + h_5 = h_{11} + h_6$$

$$h_6 = 248,30 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Tem-se que no ponto F, a amônia se encontra na região de saturação, e realizado o calculo através do Software EES, o valor do título neste ponto igual a $x_6 = 0,11$.

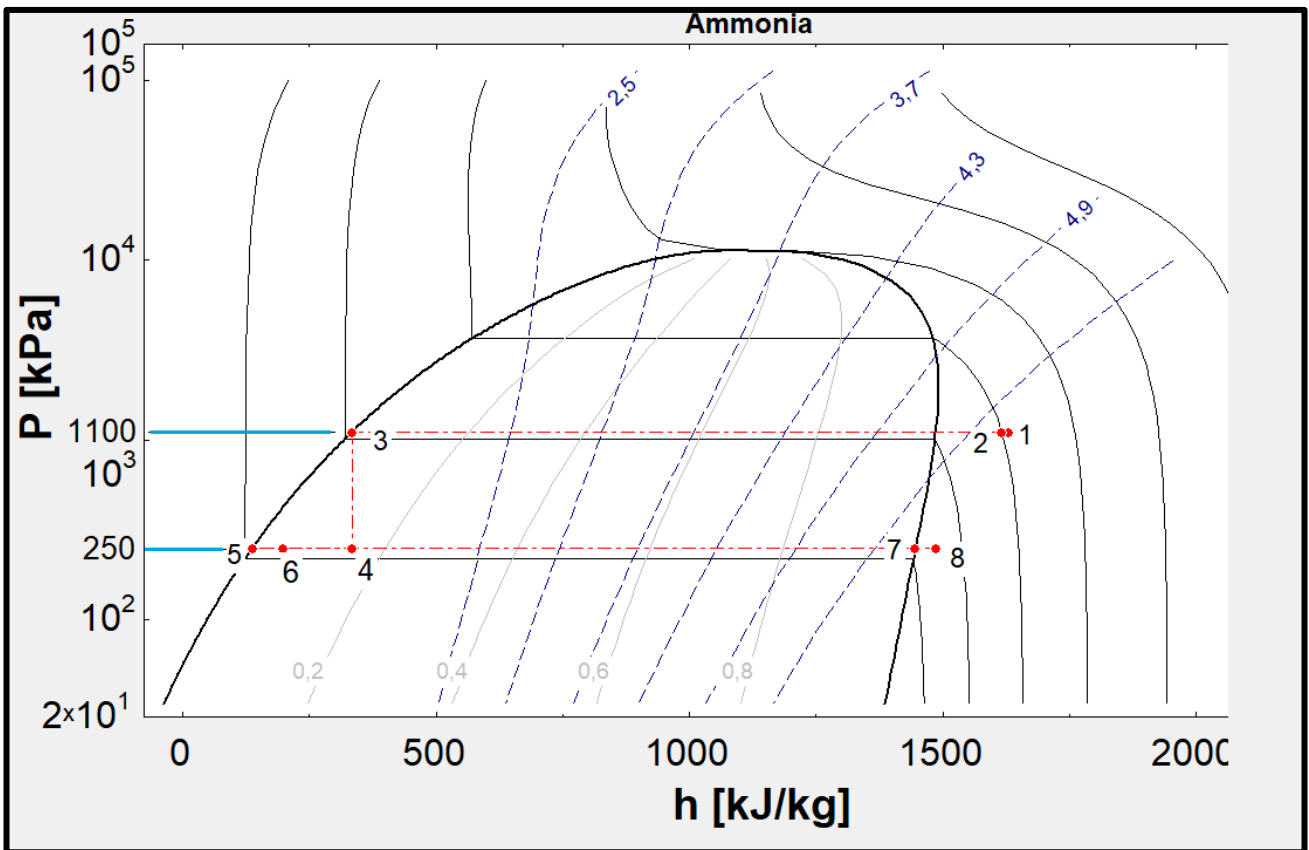
Tabela 3- Dados e informações após análises

Ponto	Fluido	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Localização	Entalpia [kJ/kg]	Estado	Título
1	Amônia	93,0	11,10	Saída dos compressores	1663,00	Vapor Superaquecido	-
2	Amônia	88,0	11,10	Entrada dos compressores	1650,00	Vapor Superaquecido	-
3	Amônia	25,0	11,10	Saída dos condensadores	333,50	Liquido comprimido	0,000
4	Amônia	-13,7	2,50	Saída da Válvula de Expansão	333,50	Saturação	0,150
5	Amônia	-13,7	2,50	Entrada no resfriador de etanol	137,30	Liquido comprimido	0,000
6	Amônia	-13,7	2,50	Saída no resfriador de etanol	248,30	Saturação	0,100
7	Amônia	-13,7	2,50	Saída do separador de liq. Linha sucção	1446,00	Vapor Saturado	1,000
8	Amônia	-11,0	2,50	Linha de Sucção	1453,00	Vapor Superaquecido	-
11	Etanol	-9,2	3,60	Saída do resfriador de etanol com bebida (entrada do tanque de Etanol "gelado")	180,30	-	-
12	Etanol	-9,2	3,60	Saída tanque de etanol "gelado"	179,80	-	-
13	Etanol	38,0	3,60	Saída do resfriador de etanol (entrada do tanque de Etanol "quente")	291,20	-	-
14	Etanol	38,0	3,60	Saída tanque de etanol "quente"	291,20	-	-
	Bebida	2		Bebida		-	-

Fonte: Autor.

Com todas as características e pontos do Sistema, é possível desenhar o diagrama pxh, conforme na figura 17.

Figura 17 -Diagrama PH do sistema de refrigeração



Fonte: Autor.

Com todas as características termicas do sistema, é possível calcular o coeficiente de performance da planta industrial, com as entalpias de entrada e saída da linha nos compressores e na saída da válvula de expansão, utilizando a Equação 1:

$$COP = \frac{h_8 - h_4}{h_1 - h_8}$$

$$COP = \frac{1453,0 - 335,5}{1663,0 - 1453,0}$$

$$COP = 5,41$$

5. Resultados e discussões

5.1. Troca compressores alternativos para compressor parafuso

A fim de melhorar o sistema de refrigeração, uma alternativa seria trocar os dois compressores alternativos de pistão por um compressor parafuso que seja capaz de equivaler a capacidade térmica e manter as condições tanto a pressão de sucção, quanto a de descarga. As principais vantagens dos compressores parafuso em relação aos compressores alternativos são:

- ✓ Os compressores parafuso, possuem poucas peças móveis, possibilitando uma manutenção em intervalos muito mais longos. Os compressores alternativos, por conterem muitas peças, como, biela, pistão, anéis, válvulas, mancais, necessitam de uma manutenção com maior frequência;
- ✓ A área de ocupação dos compressores parafuso, comparada à compressores alternativos, a mesma carga, é menor;
- ✓ Compressores parafuso, possuem um maior rendimento em relação a compressores alternativos.

5.2. Alterar a temperatura de evaporação ou condensação

Temos que para uma pressão de descarga dos compressores a 11 [bar], uma temperatura de saturação igual a 25 [°C]. A diminuição desta temperatura, irá implicar em um aumento do Coeficiente de performance. Foram realizados testes com temperaturas menores, e calculado o COP para estes valores, conforme na tabela 4 e na figura 18.

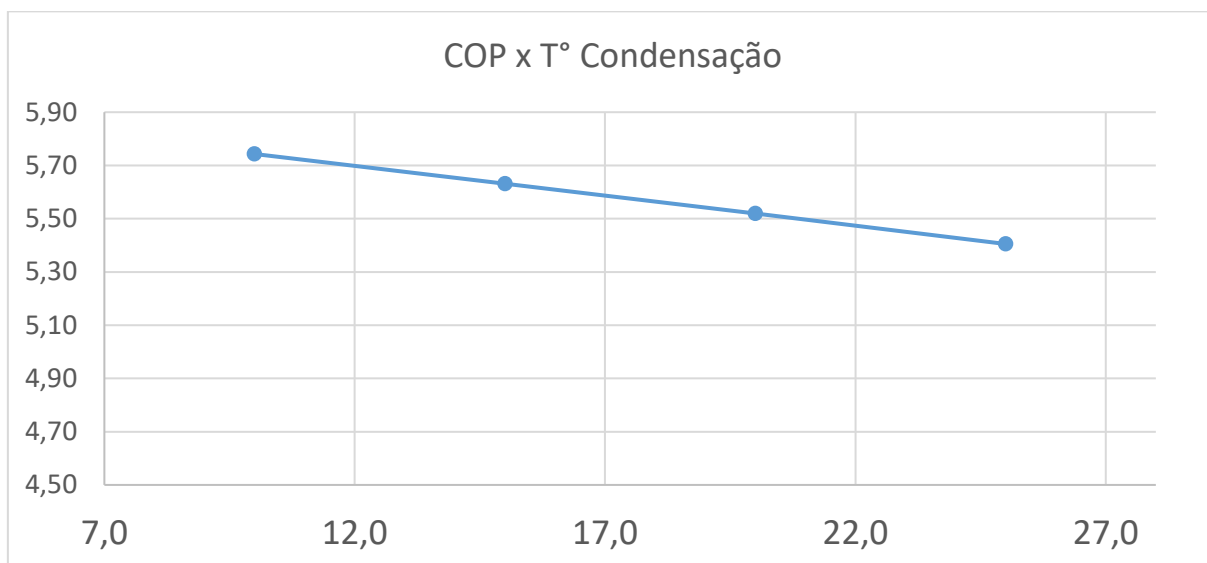
A cada 1°C de redução na temperatura de condensação, reduz se o consumo em aproximadamente 2 a 3% (ELETROBRÁS, 2005).

Tabela 4 - Valores de testes de aumento da temperatura

T [°C] Condensação	COP	Diminuição
25,0	5,41	-
20,0	5,52	2,1%
15,0	5,63	4,0%
10,0	5,74	5,9%

Fonte: Autor.

Figura 18 - COP e Temperatura de Condensação °C



Fonte: Autor.

5.3. Obtenção de novos tanques de bebida para as linhas

Uma limitação que a planta industrial apresenta hoje, é o fato de que toda bebida refrigerada na linha, vai diretamente para o envase. Caso houver uma falha em algum equipamento na linha de produção, o resfriamento da bebida é pausado.

Para otimizar tempo e evitar eventuais sobrecargas na planta de refrigeração, é viável inserir na saída do resfriador de bebida, um tanque isolado termicamente, conforme o tanque da figura 19, para armazenar a bebida, uma vez que se houver paradas na linha de produção, o resfriamento da bebida não necessariamente precisa parar também. O volume do tanque, depende exclusivamente da velocidade de envase da linha.

Figura 19 - Tanque para bebida resfriada



Fonte: MAYEKAWA (2018)

6. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar o cálculo financeiro de PayBack sobre a atualização do sistema, levando em conta o preço pago pelos novos equipamentos e venda dos atuais (com depreciação), bem como calcular o tempo de retorno do investimento;
- Verificar o controle de rotação dos ventiladores dos condensadores;
- Verificar o custo para instalação de medidores de temperatura ou pressão nas tubulações isoladas.

7. Conclusões

Conforme proposto no trabalho, foi realizado a modelagem e simulação do sistema, no *software EES*. A planta industrial em estudo, foi desenvolvida por um fabricante da área de refrigeração industrial, o qual mantém o sigilo de informações do projeto, desta forma, não foi possível a obtenção de todos necessários de maneira clara e assertiva, gerando certa limitação nas análises.

Sabe-se que o conhecimento das propriedades térmicas de uma planta de refrigeração de um sistema real, é fundamental para propor melhorias à mesma. Os resultados apresentados mostram que, o aumento da pressão e temperatura de condensação de uma variação de 3 °C na temperatura com maior amplitude de 9 °C (25 °C a 34 °C) eleva o COP consideravelmente em 10,08% do valor atual, o que é bastante viável o investimento em novos compressores, condensadores e acessórios para atingir esse valor.

É necessário um *upgrade* no projeto, para aquisição de novos equipamentos, tais como: compressores parafuso, tanque acumulador de bebida resfriada e outros acessórios que já estão que tempo de vida útil antigos, não só a nível de melhorias de performance do sistema, mas no sentido de garantir que a planta continue atendendo a demanda existente.

8. Referências bibliográficas

BORJA, J.A.T. Automatização e Controle Inteligente Online de Sistemas de Refrigeração Utilizando Redes Neurais Artificiais.

Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Uberlândia
Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006

CASTRO, JOSÉ D., Refrigeração Comercial e Climatização Industrial, 1ª Edição,
Editora Leopardo. São Paulo, 2010.

ELETROBRÁS, Eficiência Energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial. Rio de Janeiro, 2005.

GEORGE, R.M., Freezing Processes Used in the Food Industry, Trends in Food Technology, vol. 4, p. 134-138, 1993.

MAIOLI, D. Caracterização Físico-Química e Sensorial de Bebida Energética Durante o Armazenamento

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Porto Alegre 2014.

NETO, R.M.S. Análise Comparada de Evaporadores de Expansão Directa e Inundados.

Dissertação de Mestrado - Instituto Superior De Engenharia De Lisboa,
Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa (Portugal), 2013

SALVADOR, F. Projeto de um Sistema de Refrigeração Industrial com Set Point Variável. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EPUSP, Departamento de Engenharia Eletrônica, São Paulo, 1999.

SILVA, A. M; Utilização Do Software Ees No Auxílio Ao Desenvolvimento De Trabalhos Acadêmicos E De Projetos De P&D - Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais, Green – Grupo de Estudos em Energia, Belo Horizonte, 2009

STOECKER, W. F; J. M. SAIZ JABARDO. Refrigeração industrial. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2002.

<http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com.br/refrigerants/ammonia/#/>
Acesso em: 21/10/2018 às 10:13

9. Apêndice

9.1. Código da modelagem computacional do sistema no software

EES

{Ponto A1 - saída dos compressores}

```
T[1] = 93
P[1] = 1100
h[1] = Enthalpy(Ammonia;T=T[1];P=P[1])
x[1] = Quality(Ammonia;T=T[1];h=h[1])
```

{Ponto B2 - entrada dos condensadores}

```
T[2] = 88
P[2] = 1110
h[2] = Enthalpy(Ammonia;T=T[2];P=P[2])
x[2] = Quality(Ammonia;T=T[2];h=h[2])
```

{Ponto C3 - reservatorio de amonia}

```
P[3] = 1110
x[3] = 0 {liq. comprimido}
T[3] = 10
h[3] = Enthalpy(Ammonia;x=x[3];T=T[3])
```

{Ponto D4 - saída das valvulas}

```
P[4] = 250
h[4] = h[3]
x[4] = Quality(Ammonia;P=P[4];h=h[4])
T[4] = Temperature(Ammonia;P=P[4];x=x[4])
```

{Ponto E5 - Entrada no resfriador de etanol - Lado Amonia}

```
P[5] = 250
T[5] = T[4]
x[5] = 0
h[5] = Enthalpy(Ammonia;x=x[5];P=P[5])
```

{Ponto F6 - Saída no resfriador de etanol, lado amonia}

```
P[6] = 250
T[6] = T[4]
h[5] + h[14] = h[6] + h[11]
x[6] = Quality(Ammonia;P=P[6];h=h[6])
```

{Ponto G7 - saída do tanque entrada dos compressores}

```
T[7] = T[4]
P[7] = 250
x[7] = 1
h[7] = Enthalpy(Ammonia;T=T[7];X=X[7])
```

{Ponto H8 - entrada dos compressores}

$$\begin{aligned}T[8] &= -11 \\P[8] &= 250 \\h[8] &= \text{Enthalpy}(\text{Ammonia}; T=T[8]; P=P[8])\end{aligned}$$

{Ponto R11 - Saída do resfriador de etanol com bebida (entrada do tanque de Etanol "gelado")}

$$\begin{aligned}T[11] &= -9 \\P[11] &= 360 \\h[11] &= \text{Enthalpy}(\text{Ethanol}; T=T[11]; P=P[11])\end{aligned}$$

{Ponto S12 - Saída tanque de etanol "gelado" }

$$\begin{aligned}T[12] &= -9,2 \\P[12] &= 360 \\h[12] &= \text{Enthalpy}(\text{Ethanol}; T=T[12]; P=P[12])\end{aligned}$$

{Ponto T13 - Saída do resfriador de bebidas com o etanol (entrada do tanque de Etanol "quente")}

$$\begin{aligned}T[13] &= 38 \\P[13] &= 360 \\h[13] &= \text{Enthalpy}(\text{Ethanol}; T=T[13]; P=P[13])\end{aligned}$$

{Ponto U14 - Saída tanque de etanol "quente" }

$$\begin{aligned}T[14] &= 38 \\P[14] &= 360 \\h[14] &= \text{Enthalpy}(\text{Ethanol}; T=T[14]; P=P[14])\end{aligned}$$

$$Q_{\text{certo}} = h[8] - h[4]$$

{Trabalho no compressor}

$$W = h[1] - h[8]$$

{COP do ciclo de amônia}

$$\text{COP} = \text{abs}(Q_{\text{certo}}/W)$$