UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ENG 02298 – TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

ESTUDO DE CASO: Eficiência Energética no Sistema de Refrigeração de uma cervejaria

Jéssica Pereira Oliveira Lima
00214004

Professora Orientadora:
Dra. Andréa Moura Bernardes

Junho de 2016

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração de muitas pessoas. Manifesto minha gratidão a elas e de forma particular:

À todos os colegas da cervejaria onde trabalho, e, em especial, à Sávio Fernando, por me inspirar todos os dias e por todas as orientações, estímulos e confiança no meu trabalho. À Tiago Cavalcante e Eduardo Leal pelo auxílio na minha trajetória e porque juntos faremos a Utilidades ser a melhor do Brasil. Aos especialistas do Centro de Engenharia e à Prof. Dra. Andréa Moura Bernardes, por aceitar ser minha orientadora, pela paciência e auxílio.

À cervejaria que concedeu a oportunidade de realizar este estudo de caso.

Principalmente, aos meus pais, que, com sabedoria, souberam me dar força, carinho e apoio em todos os momentos.

E, em especial, ao meu companheiro, Pedro Ramos, que esteve comigo do início ao fim da faculdade, dando suporte, carinho e conselhos nos momentos bons e ruins dessa trajetória.

RESUMO

Através da utilização de uma metodologia baseada em boas práticas de operação testadas em outras unidades da empresa em estudo, este trabalho tem por objetivo identificar oportunidades de eficiência energética no sistema de refrigeração da cervejaria afim de reduzir o consumo de energia elétrica, sendo analisados todos os componentes do sistema de refrigeração. O sistema de refrigeração deste estudo de caso utiliza amônia anidra (NH_3) como fluido refrigerante no circuito principal e solução de etanol 20% como fluido secundário, sendo composto por compressores do tipo parafuso, condensadores evaporativos, evaporadores de placas e dispositivos expansores. Usualmente, os sistemas de refrigeração atendem diversos processos e etapas de produção, que diferem nos requisitos de temperatura de produto. Inicialmente há uma breve descrição dos principais componentes do sistema de refrigeração, bem como da metodologia utilizada para identificação de oportunidades de redução e todas as ações aplicadas para a melhoria na eficiência energética do sistema de refrigeração. Os resultados do trabalho mostram a efetividade da metodologia utilizada e uma considerável redução no consumo de energia da cervejaria.

Palavras-chave: Energia Életrica, Eficiência Energética, Sistema de Refrigeração, Cervejaria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo teórico de compressão a vapor 13

Figura 2 - Representação em corte de um compressor rotativo tipo parafuso 16

Figura 3 - Processos de (a) sucção, (b) compressão e (c) descarga 16

Figura 4 - Esquema simples de um compressor parafuso 17

Figura 5 - Condensador de placas..... 21

Figura 6 - Torre de resfriamento de tiragem mecânica 22

Figura 7 - Condensador evaporativo 23

Figura 8 - Trocador de calor para resfriamento de mosto 29

Figura 9 - Tanques OD's fermentadores 30

Figura 10 - Compressor rotativo tipo parafuso 32

Figura 11 - Condensadores Evaporativos..... 33

Figura 12 - Perguntas da metodologia de boas práticas de operação para redução da pressão de descarga 36

Figura 13 - Estação Metereológica 37

Figura 14 - Ponto de purga do reservatório de amônia 40

Figura 15 - Esquema simplificado da limpeza química em um trocador 41

Figura 16 - Limpeza química do trocador de calor 41

Figura 17 - Perguntas da metodologia de boas práticas de operação para aumento da pressão de sucção 42

Figura 18 - Evaporador com sintoma de congelamento 43

Figura 19 - Drenagem manual de óleo em um evaporador 44

Figura 20 - Automação da variação de pressão de sucção conforme demanda dos consumidores 45

Figura 21 - Consumo de Energia Elétrica em Março, Abril e Maio de 2016 46

Figura 22 - Indicador de Energia Elétrica em Março, Abril e Maio de 2016 47

Figura 23 - Pressão de Sucção em Abril e Maio de 2016 48

Figura 24 - Pressão de Descarga em Abril e Maio de 2016 49

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 7

1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REFRIGERAÇÃO 10

1.1 Introdução à Refrigeração 10

1.2 Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor 11

2. COMPONENTES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....14

2.1 Compressores.....14

2.1.1 Compressores Parafuso 14

2.1.2 Controle de capacidade dos compressores 16

2.2. Condensadores.....18

2.2.1 Condensadores de placas 19

2.2.2 Torres de resfriamento.....20

2.2.3 Condensadores evaporativos 22

2.3 Reservatório de líquido.....23

2.4 Dispositivo de expansão.....23

2.5 Evaporadores.....24

2.6 Amônia (NH3) 25

3. PROCESSO PRODUTIVO DE CERVEJA 26

3.1 Obtenção do malte 26

3.2 Brassagem 26

3.3 Fermentação.....27

3.4 Maturação.....29

3.5 Filtração.....29

3.6 Envase 29

4. ESTUDO DE CASO - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CERVEJARIA ...30

4.1 Especificação dos compressores.....30

4.2 Especificação dos condensadores.....30

4.3 Especificação do sistema.....31

5. METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E APLICAÇÃO 33

5.1. Ações com Impacto na Pressão de Condensação/Descarga 33

5.1.1 Pressão ótima de descarga e temperatura de bulbo úmido.....34

5.1.2 Purga de Incondensáveis 36

5.1.3 Limpeza dos condensadores de placas.....38

5.2 Ações com Impacto na Pressão de Sucção.....40

5.2.1 Drenagem de óleo.....41

5.2.2 Operar com a maior pressão de sucção (temperatura).....43

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....45

6.1 Redução no consumo de Energia Elétrica.....45

6.2 Resultado do aumento da pressão de sucção 46

6.3 Resultado da redução da pressão de descarga 47

CONCLUSÃO.....49

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 50

INTRODUÇÃO

A gestão e otimização dos recursos naturais é hoje um dos principais desafios que, em nível mundial, a sociedade enfrenta. A natureza finita dos recursos de energia e o impacto ambiental da sua produção e consumo alertam o mundo para a necessidade de mudança de comportamento e premissas.

A grande maioria das indústrias, se desejam crescer ou mesmo manter-se no mercado, devem produzir e entregar seus produtos a preços competitivos. Para isto, é essencial que os custos sejam controlados rigorosamente, a fim de garantir uma margem de lucro sobre o produto, que permita o investimento em novas tecnologias, na capacidade produtiva e a geração de valor aos acionistas.

A utilização de energia elétrica é indispensável ao processo produtivo de qualquer segmento e deve ser utilizada com inteligência e estratégia. A eficiência energética é o principal instrumento para o combate ao uso irracional e ao desperdício.

Além dos aspectos econômicos envolvidos na racionalização do uso de energia, deve-se destacar a valorização da imagem e a visão estratégica da empresa. Atualmente, o mercado exige produtos de empresas comprometidas com ações de proteção ao meio ambiente. Devido à proporção que os equipamentos componentes do sistema de refrigeração representam no consumo de energia elétrica, a sua eficiência energética é cada vez mais relevante. (TASSINI, 2012).

Eficiência energética significa reduzir o consumo e custos, sem perder, em nenhum momento, a qualidade e eficiência dos serviços (PROCEL, 2012). A eficiência energética, atualmente atrelada às questões ambientais e com a difusão de informações, do conhecimento aplicado e novas tecnologias é um tema que vem ganhando cada vez mais espaço (MESQUITA, 2009).

Refrigeração pode ser definida como um processo físico, no qual ocorre a transferência contínua de energia térmica de um corpo, ambiente ou substância, havendo em seguida a transferência do calor retirado para outro corpo, outro ambiente ou outra substância, sendo considerados os processos cujas reduções ou conservações de temperatura sejam inferiores à temperatura do ambiente circundante. Sistemas de refrigeração são utilizados com o objetivo de viabilizar processos, processar e conservar produtos (TASSINI, 2012).

No processo produtivo de cerveja, que é o contexto no qual este estudo é apresentado, o sistema de refrigeração tem importância vital. É ele o responsável pelas etapas de refrigeração que o processo de fabricação exige, bem como pela conservação dos produtos em tanques e adegas.

A utilização dos sistemas de refrigeração é inerente ao processo. Como conseqüência, também é inerente o uso da energia elétrica para o acionamento dos equipamentos associados a esses sistemas. Assim, se não é possível evitar a degradação ambiental pela exploração irracional dos recursos naturais, uma importante contribuição consiste em reduzir ao máximo o consumo da energia.

Atualmente são restritas as ferramentas e metodologias que permitam a identificação de oportunidades para reduzir o consumo de energia elétrica em um sistema de refrigeração. Para este estudo foi utilizada uma metodologia que se apresenta em forma de perguntas e que foi baseada em boas práticas criadas por unidades da mesma cervejaria, localizadas no Brasil e em outros países. A metologia consiste em realizar uma avaliação dos parâmetros dos componentes do sistema de refrigeração, de forma a diagnosticar as causas de ineficiência e identificar oportunidades para melhoria do mesmo.

Este estudo propõe-se a esclarecer brevemente os conceitos e os componentes dos sistemas de refrigeração bem como as informações sobre sua operação e manutenção. Os aspectos teóricos serão destacados, para que esse conhecimento possa auxiliar no entendimento do processo e das ações aplicadas.

A partir dos conceitos básicos, serão descritos as etapas do processo de fabricação da cerveja e como é estruturado o sistema de refrigeração da cervejaria. Descritos esses sistemas, apresenta-se uma série de medidas de eficiência energética.

OBJETIVOS

A proposta contida neste trabalho tem como objetivo aumentar a eficiência energética de um sistema de refrigeração industrial, diminuindo seu consumo de energia elétrica.

Como objetivos específicos, este estudo busca:

- Identificar oportunidades para redução do consumo de energia elétrica focado no sistemas de refrigeração de uma cervejaria
- Avaliar conceitos de eficiência energética
- Definir soluções para a melhoria do sistema de refrigeração
- Avaliar os resultados obtidos após a aplicação das soluções previamente definidas.

1. EFICIENCIA ENERGÉTICA E REFRIGERAÇÃO

Ações de eficiência energética podem ser aplicadas em diversos setores na indústria de bebidas, como na iluminação, nos sistemas de força motriz, sistemas de refrigeração, na produção eficiente de ar comprimido, nos sistemas de bombeamento e nos processos industriais mais específicos.

BARBOSA (2010) afirma que as cervejarias têm gasto anual médio superior a US$ 200.000.000,00 com consumo de energia. Estes custos são responsáveis por 3% a 8% do custo total de produção, o que torna a eficiência energética e a redução do consumo um importante recurso para redução no custo produtivo. As medidas de melhoria em eficiência, tanto para o setor de utilidades quanto para outros setores, será vista como uma boa oportunidade de redução de custos.

A cervejaria busca uma eficiência melhor nos sistemas de refrigeração e consequentemente, um consumo menor de energia elétrica, pois este sistema são os principais consumidores desta indústria, podendo corresponder até 40% do consumo total da fábrica.

Segundo MENDES (2014) a identificação das etapas do processo e o conhecimento de quanto se consome em cada uma delas ajuda na elaboração de um diagnóstico e mapeamento eficiente de energia. Monitorar cada variável da planta industrial de forma específica permite uma melhor orientação das ações de melhorias e racionalização da operação de cada uma delas.

O sistema de refrigeração tem a finalidade de remover calor, a fim de manter refrigerado, constantemente, um produto, material ou espaço. Normalmente ele é usado para climatização, conservação de produtos e viabilização de processos. Em uma fábrica de cerveja e refrigerantes, o sistema de frio é usado tanto no processo de fabricação como na conservação dos produtos em adegas e tanque.

1.1 Introdução à Refrigeração

A refrigeração industrial tem como objetivo a refrigeração de alguma substância ou meio, a fim de preservar as suas características. Por outro lado, refrigeração pode ser utilizada em processos de mudança das características ou mesmo estrutura química. No setor alimentício, 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.

No caso da cerveja, duas são as reações químicas principais que ocorrem durante o processo de fabricação: 1) conversão do amido do grão em açúcar; 2) fermentação, no qual o açúcar é convertido em álcool e dióxido de carbono. Como a fermentação é um processo exotérmico, o produto deve ser resfriado sob pena de ocorrer um

aumento de temperatura suficiente para reduzir ou mesmo interromper a transformação do açúcar. A mistura em fermentação deve ser mantida a temperatura que pode variar entre 7°C e 13°C. Por outro lado, refrigeração também é utilizada no processo de maturação da cerveja.

Entre os principais sistemas de refrigeração estão os sistemas por absorção, os sistemas por efeito termoelétrico e os sistemas por compressão de vapor. Os sistemas por compressão de vapor são predominantes nas instalações industriais para processamento e armazenagem de alimentos e em equipamentos de pequeno porte, como refrigeradores e condicionadores de ar compactos.

Os requisitos de temperatura e pressão ideais de operação do ciclo de refrigeração são determinados pelo conhecimento das características do produto e do processo, bem como do ciclo e seus componentes.

Em indústrias de bebidas, o sistema de refrigeração é o principal consumidor de energia elétrica, pois além da importância deste sistema na conservação do produto, ele também faz parte do processo de fabricação da cerveja, para que se atinjam as temperaturas desejadas, conforme a necessidade de cada etapa do processo.

1.2 Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

O estudo dos ciclos termodinâmicos envolvem um procedimento para a obtenção de refrigeração de maneira contínua. Tal procedimento consiste em fazer com que um fluido, denominado refrigerante, passe por uma série de processos, retornando ao estado inicial. Dentre os possíveis ciclos frigoríficos, o de Carnot se destaca por se tratar de um ciclo ideal (reversível).

No ciclo de refrigeração por compressão de vapor, o trabalho fornecido ao compressor é utilizado para elevar a pressão e a temperatura do fluido refrigerante gasoso que chega ao compressor. O vapor, a alta pressão e temperatura, segue até o condensador onde rejeita calor para o meio, condensando o fluido refrigerante. O líquido condensado segue em direção a um dispositivo de expansão, onde passa do estado líquido a alta pressão (num processo isoentálpico) para uma mistura líquido-vapor, a baixa pressão e temperatura. O fluido refrigerante então retira calor do ambiente ou sistema a ser refrigerado, utilizando esse calor para se vaporizar, seguindo em direção ao compressor, onde completa o ciclo (TASSINI, 2012).

Define-se como ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor um ciclo no qual os processos são mais próximos aos do ciclo real. Desta forma, torna-se mais fácil comparar o ciclo real com o ciclo teórico, que terá melhor performance operando nas mesmas condições do ciclo real (STOECKER e JABARDO, 2002). O

ciclo teório de refrigeração por compressão de vapor pode ser visualizado na Figura 1.

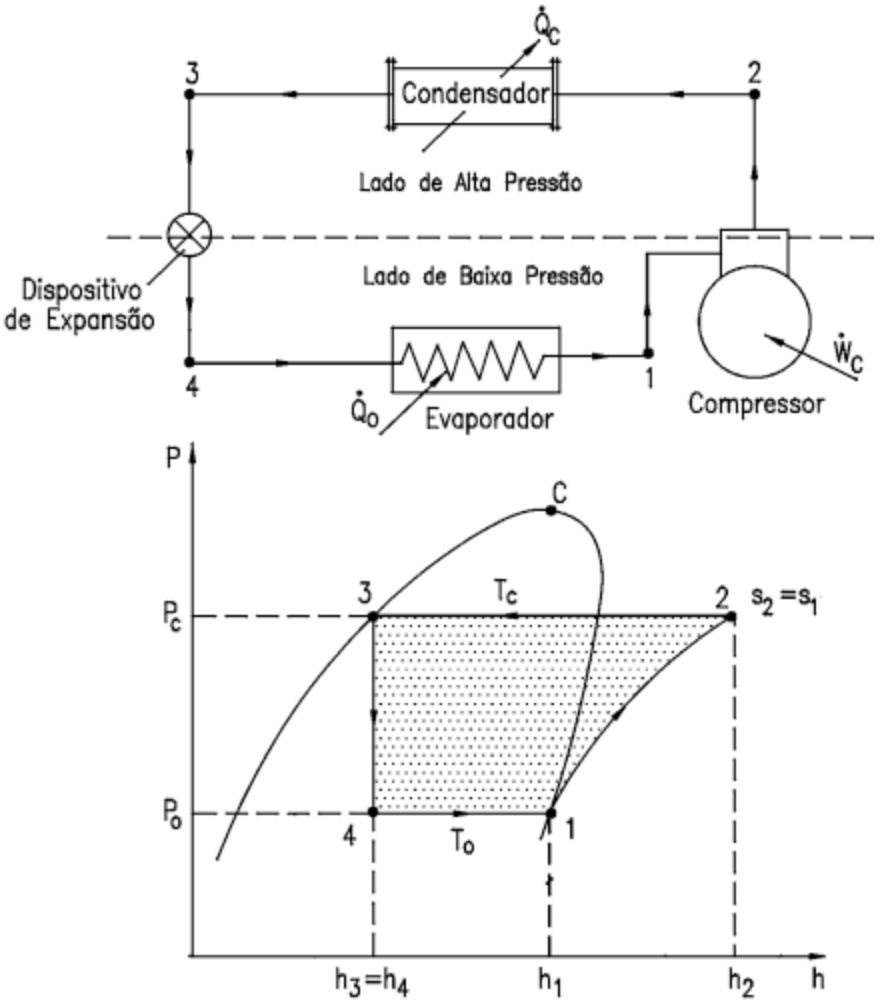

Figura 1 - Ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.
Fonte: (CASTRO, 2008).

Os processos termodinâmicos que constituem o ciclo teórico em seus respetivos equipamentos são:

a) Processo 1→2: O líquido refrigerante absorve calor quando evapora e é esta mudança condicional que produz resfriamento em um processo de refrigeração. O refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador. O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação e, ao sair do compressor está superaquecido à temperatura T2.

b) Processo 2→3: O refrigerante rejeita calor no condensador, e este calor é transferido para um meio que tem um temperatura inferior . A quantidade de calor emitido é o calor absorvido pelo refrigerante no evaporador mais o calor criado pela compressão. O meio de transferência de calor pode ser ar ou água, à pressão

constante. Neste processo, o fluido refrigerante é resfriado da temperatura T2 até a temperatura de condensação TC e, a seguir, condensado até se tornar líquido saturado na temperatura T3.

c) Processo 3→4: O líquido do condensador é então enviado a um tanque receptor. A pressão no receptor é muito maior do que o a pressão no evaporador, devido à compressão (aumento de pressão), que ocorreu no compressor. Para reduzir a pressão ao mesmo nível que a pressão de evaporação, é utilizado um dispositivo, chamado de válvula de expansão, reguladora de pressão.

d) Processo 4→1. Ocorre no evaporador, sendo um processo de transferência de calor a pressão constante (Po), conseqüentemente a temperatura constante (To), desde vapor úmido (estado 4), até atingir o estado de vapor saturado seco.

2. COMPONENTES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Neste capítulo são descritos e detalhados os componentes de um sistema de refrigeração industrial, bem como os parâmetros que têm influência sobre sua eficiência energética.

2.1 Compressores

O compressor é um dos quatro componentes principais de um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor. O compressor é o responsável pela circulação do refrigerante no ciclo, de forma contínua. Nesse processo o compressor aumenta a pressão do refrigerante (e, consequentemente, sua temperatura enviando o vapor ao condensador).

A energia fornecida para que o ciclo de refrigeração seja completado ocorre através do compressor. Esta energia é recebida através do motor elétrico acoplado a este componente mecânico e transferida para o fluido, transformando-a em energia térmica (PILLIS, 2005). Os compressores representam cerca de 70% do consumo de energia elétrica em um sistema de refrigeração (VENTURINI; PIRANI, 2005b).

No sistema de refrigeração uma de suas funções é remover o vapor do fluido refrigerante do evaporador, através de sucção, para manter a pressão compatível com a temperatura de evaporação necessária. A outra função é comprimir este gás, elevando a pressão do vapor, para fazer com que o fluido circule ao longo do sistema. A pressão é elevada até o ponto onde a quantidade de calor retirada no condensador leve o fluido ao estado líquido (PILLIS, 2005).

Segundo Venturini e Pirani (2005a), a capacidade da instalação, função do fluido refrigerante escolhido e da temperatura de vaporização, é que definirá o tipo de compressor a ser utilizado. Em indústrias que utilizam sistema de frio, os tipos de compressores mais encontrados são o alternativo e o parafuso.

2.1.1 Compressores Parafuso

Os compressores parafuso são hoje muito usados em refrigeração industrial para a compressão de amônia e outros gases, e são geralmente utilizados em instalações de grande carga térmica. Por não possuírem válvulas de admissão e descarga, este tipo de compressor funciona em alta rotação, combinando grandes capacidades com dimensões externas reduzidas.

As principais partes do compressor de parafuso são os dois rotores em roscas, um chamado de macho e outro de fêmea, com diferentes números de lóbulos, onde na configuração mais usual, o rotor macho apresenta quatro e o fêmea seis. Estes

rotores são montados sobre mancais a fim de fixar as respectivas posições na câmara de operação. O rotor macho tem um perfil convexo, ao contrário do rotor fêmea, que possui perfil côncavo. Sua geometria básica pode ser observada na Figura 2.

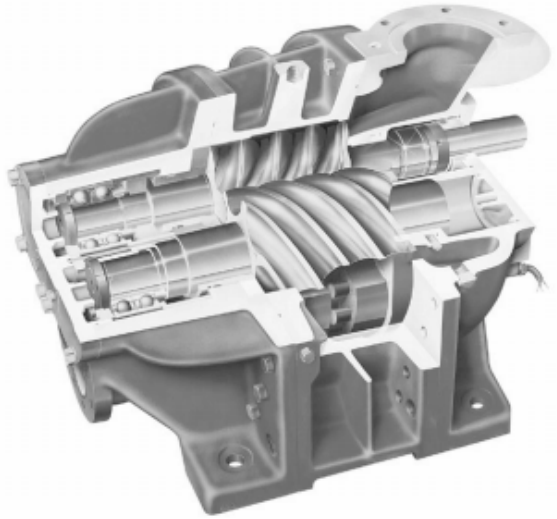

Figura 2. Representação em corte de um compressor rotativo tipo parafuso. Fonte: (CASTRO, 2008).

O processo de compressão é dividido em três etapas: sucção, compressão e descarga. A sucção ocorre quando, durante a rotação dos rotores o espaço se abre entre os lóbulos e aumentam de volume, aspirando o gás pela parte superior, fazendo com que o volume máximo seja preenchido e a entrada seja fechada. Logo após a sucção, começa a compressão, quando os rotores macho e fêmea começam a encaixar suas ranhuras, reduzindo o volume de gás e o deslocando axialmente, em função da rotação dos dois parafusos**,** até a tubulação de descarga, situada na parte inferior do compressor. Estas três etapas estão representados na Fig. 3.

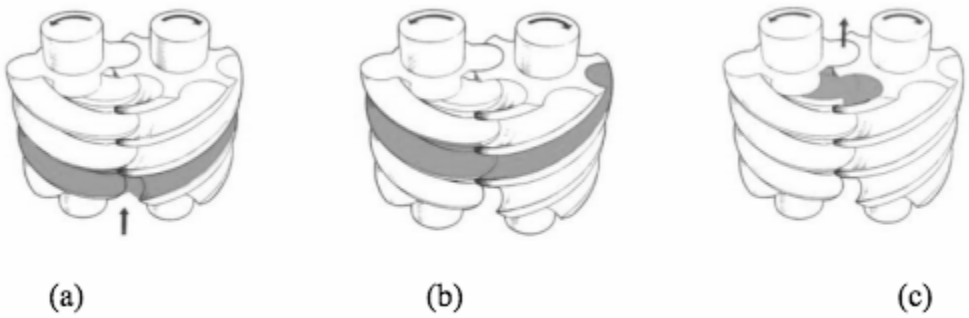

Figura 3. Processos de (a) sucção, (b) compressão e (c) descarga em um compressor parafuso. Fonte: (CASTRO, 2008).

Os espaços entre os rotores e a folga existente entre os mesmos e a carcaça são selados por meio de injeção de óleo entre os rotores, a fim de lubrificar, evitar desgastes, resfriar e vedar. O compressor parafuso selado com óleo aumenta o rendimento volumétrico, pois, utilizando a quantidade adequada de óleo, permite

que este retire parte do calor ganho na compressão, diminuindo a temperatura de descarga. (MAYEKAWA, 2008).

Entretanto, esse óleo é indesejável nas outras partes do processo, principalmente nos trocadores de calor, onde funciona como um fator de incrustação, exigindo o uso de separadores de óleo.

A separação do óleo nebulizado misturado ao gás é realizada através do filtro coalescente, onde as pequenas partículas de óleo são retidas em gotas maiores, sendo direcionadas até o fundo do coletor do filtro. Este óleo é então coletado e retorna ao compressor para reutilização.

O calor transferido para o óleo durante a compressão deve ser removido através de um sistema de resfriamento. As três formas mais comuns de resfriamento de óleo são: resfriamento a água, resfriamento por termosifão ou injeção de líquido.

Um esquema simples do compressor parafuso é apresentado na Figura 4.

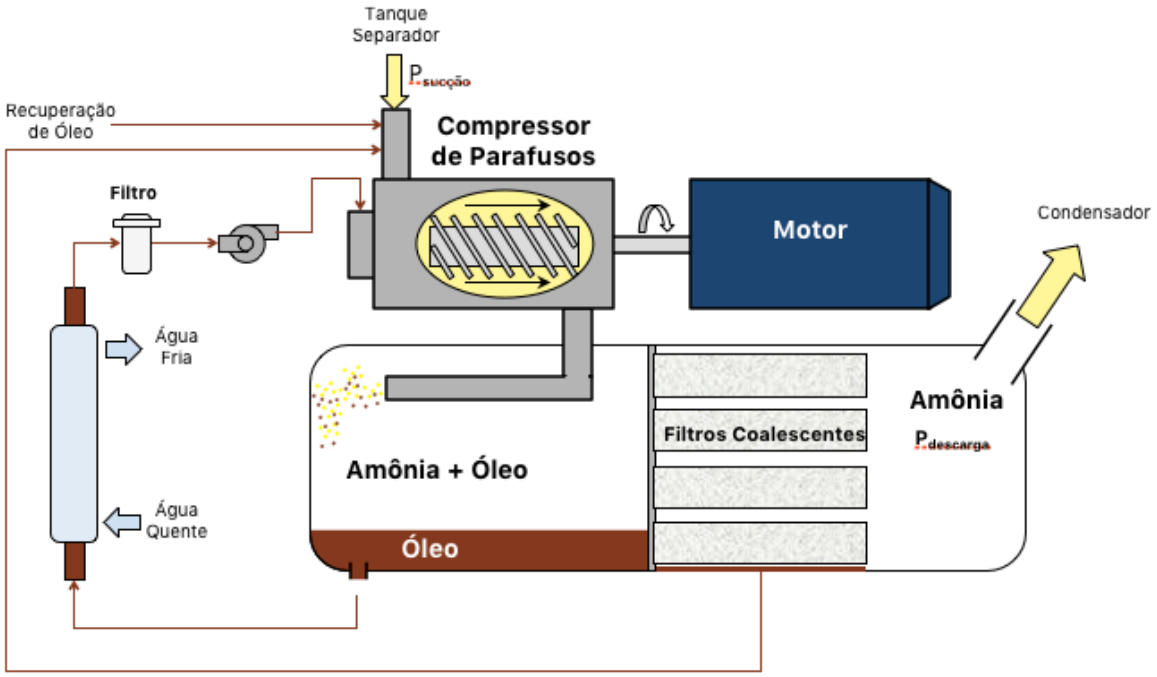

Figura 4. Esquema simples de um compressor parafuso. Fonte: (Ambev, 2016)

2.1.2 Controle de capacidade dos compressores

O controle de capacidade é utilizado em compressores parafusos para variar a quantidade de vapor comprimido, fazendo um balanço entre a capacidade do

compressor e a capacidade de refrigeração necessária para o sistema, em função de variações de carga térmica.

Em um sistema de refrigeração o compressor é normalmente selecionado para que seja capaz de satisfazer a maior carga possível de refrigeração. Geralmente, há uma variação de carga térmica considerável em indústrias de bebida, em função, principalmente, do processo. Isto significa que é sempre necessário controlar a capacidade do compressor para que ela seja adequada à carga efetiva do calor a ser removido, de acordo com a demanda e variação de carga térmica.

O controle de capacidade dos compressores é que mantém estável o parâmetro de controle do sistema de refrigeração, que normalmente é a pressão de sucção ou a temperatura do fluido secundário na entrada do tanque logo após passar pelos evaporadores. Caso o compressor se mantivesse operando de maneira constante, ou seja, gerando a mesma capacidade frigorífica, e houvesse o aumento de carga térmica, a temperatura de evaporação e a pressão de sucção aumentariam.

Em contra partida, se a carga térmica diminuísse e o compressor não reduzisse sua capacidade frigorífica ocorreria ao contrário, diminuiria a temperatura de evaporação, podendo ocorrer o congelamento dos trocadores de calor ou desarme dos compressores. Em ambos os casos a qualidade do produto poderia ser comprometida. Por isso, é fundamental o controle de capacidade dos compressores (MENDES; SOBRINHO, 2012).

Há várias maneiras de se fazer o controle de capacidade dos compressores, algumas mais eficazes e outros menos, como o liga/desliga do compressor, o estrangulamento do gás de aspiração entre o evaporador e o compressor, o desvio do gás na descarga do compressor para a linha de sucção ou para o evaporador e a utilização de inversores de frequência. (VENTURINI; PIRANI, 2005a).

Nos compressores parafuso os controles de capacidade mais usuais são através da *slide valve* (SV) e através do inversor de frequência.

A *slide valve* ou válvula interna deslizante é o dispositivo mais comum utilizado para controlar a capacidade de um compressor parafuso, a qual é acionada por pressão de óleo. A atuação desta válvula impede que parte do gás na sucção seja comprimido. A *slide valve* fica dentro do invólucro do rotor, se move paralelamente aos rotores e é responsável pelo controle da quantidade de gás que entra na câmara, em função da demanda de carga térmica, pois ela define o tamanho da região de compressão (MENDES, 2014).

Neste tipo de controle se consegue boas eficiências, para uma determinada faixa de carga (85% a 100%), porém a potência não reduz de maneira significativa para cargas abaixo de 50% da máxima e a eficiência do compressor é baixa neste caso.

Isso significa que a *slide valve* não é a melhor opção para a modulação dos compressores.

Atualmente, o inversor de frequência é a melhor alternativa do ponto de vista energético para o controle de capacidade, pois não desvia gás da descarga para a sucção, não altera a geometria inicial do equipamento, sendo assim mais eficiente, permitindo que a potência do compressor decresça com a rotação dos rotores e com a razão de compressão. (VENTURINI; PIRANI, 2005b).

Como a maioria das instalações industriais é composta por um grupo de compressores, o ideal é que alguns dos compressores do sistema sejam dotados de inversor de freqüência para que possam variar sua velocidade de acordo com a variação da demanda (carga térmica). Os demais compressores operariam na base do sistema, ou seja, atendendo uma carga térmica mínima fixa.

O ideal nestes casos, de vários compressores para o mesmo regime de operação, é o controle de capacidade do grupo, buscando operar na faixa de maior eficiência de cada equipamento e consequentemente, menor consumo de energia elétrica.

2.2. Condensadores

Condensadores são os elementos do sistema de refrigeração que têm a função de transformar o gás quente a alta pressão, oriundo do compressor, em líquido, rejeitando o calor contido no fluido refrigerante para o meio.

Há quatro tipos de condensadores que podem ser aplicados na refrigeração industrial. Podem ser resfriados a ar ou resfriados a água. Na refrigeração industrial predomina o tipo evaporativo, bem como os conjuntos de condensadores a placas, utilizando torres de resfriamento.

Os condensadores evaporativos possuem característica estrutural semelhante a uma torre de resfriamento. O calor rejeitado pelo refrigerante é transferido sucessivamente à água e ao ar. Nos condensadores a placas, o fluido refrigerante é condensado e escoa no sentido descendente, enquanto a água circula no sentido ascendente. A água aquecida pela condensação do refrigerante é circulada por bombas através de uma torre de resfriamento, de onde retorna ao condensador.

O condensador, no sistema de refrigeração, recupera o líquido refrigerante, deixando-o em condições de repetir o ciclo. O vapor do fluido entra superaquecido no condensador e varia a mistura de líquido mais vapor ao longo do equipamento, até sair completamente líquido.

Toda a energia absorvida pelo sistema (evaporador) mais a energia mecânica necessária para o funcionamento do mesmo (compressor) deve ser rejeitada no

condensador. Por esta razão a capacidade de condensação deve ser maior que a capacidade de refrigeração ou de compressão. Além disso, os condensadores possuem a função de controlar a pressão de descarga dos compressores.

2.2.1 Condensadores de placas

Os condensadores de placas são resfriados através de torres de resfriamento e bombas que fazem a água circular entre o condensador e a torre. As placas, geralmente constituídos de aço inox, que facilitam a circulação em regime turbulento, são montadas na vertical, paralelamente umas das outras, com um pequeno espaçamento. A água de resfriamento e o fluído frigorífico circulam em contracorrente entre os espaços alternados, formados pelas placas. O líquido refrigerante flui no sentido descendente e a água no ascendente.

Além de serem compactos, os condensadores de placas possuem outras vantagens que fazem com que seu uso seja cada vez mais frequente, por exemplo, o fato de poder ser ampliado com a inclusão de placas, por ter elevado coeficiente global de transferência de calor, por ser mais leve, pelo sistema operar com baixo volume de fluido refrigerante e por ser de menor custo. (LÓPEZ, 2005).

Os condensadores de placas também possuem desvantagens em relação aos demais, como por exemplo, é um equipamento sensível às incrustações por sujeira, perdendo muita eficiência e, pelo fato de possuir pequeno volume, se há presença de incondensáveis a pressão de descarga aumenta rapidamente (LÓPEZ, 2005). A Figura 5 apresenta um condensador de placas.

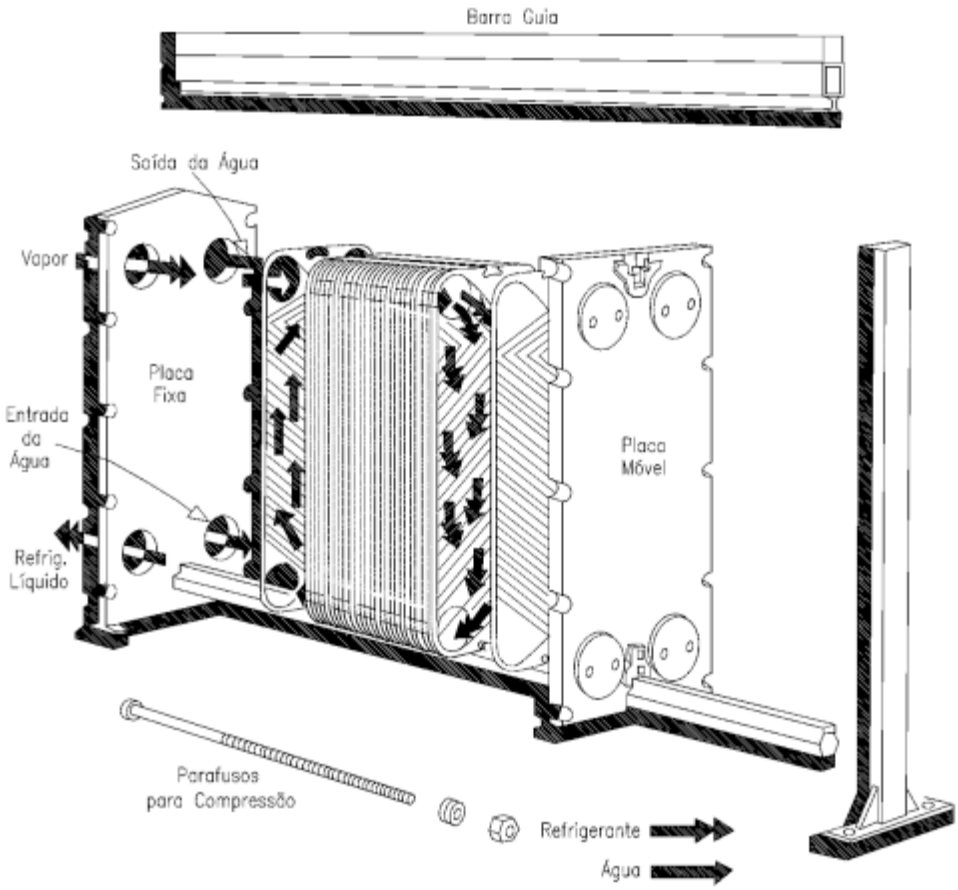

Figura 5. Condensador de placas. Fonte: (CASTRO, 2008).

2.2.2 Torres de resfriamento

As torres de resfriamento são instaladas para resfriamento de água pelo contato com o ar atmosférico. Elas são o ponto no sistema onde o calor é dissipado para a atmosfera através da evaporação, e são comuns nas indústrias tais como refino de petróleo, processamento químico, usinas siderúrgicas, e diferentes processos de fabricação onde o arrefecimento do processo é necessário.

A carga de refrigeração é determinada pela quantidade de calor que tem que ser extraída de dado processo ou um pico de demanda. A torre de resfriamento deve ser adequadamente dimensionada para rejeitar essa mesma quantidade de calor para a atmosfera.

A função do ar é aumentar a taxa de evaporação. A evaporação utiliza calor para ocorrer, e por isso, representa cerca de 80% do resfriamento do restante da água, que não é evaporada, em uma torre de resfriamento ou em um condensador evaporativo, porque como as moléculas com maior energia evaporam, as que ficam tem menor energia cinética média, diminuindo a temperatura.

Os outros 20% são em função da diferença de temperatura entre o ar e a água, porque quando a TBU (Temperatura de Bulbo Úmido) do ar é menor que a temperatura da água, a água fornece energia para o ar, aumentando a entalpia dele, através de calor sensível, como consequência, a temperatura de saída da água tende ao valor da TBU.

A água evaporada deve ser reposta ao sistema através de uma tubulação de reposição, controlada por nível, com uma boia.

As torres de tiragem mecânica utilizam os ventiladores, axiais ou centrífugos, para controlar a entrada de ar, por isso, são mais compactas, o que diminui a altura e potência para bombeamento, o controle da temperatura de água fria é mais fino e se atinge temperaturas de aproximação de 1 °C a 2 °C.

A Figura 6 apresenta uma torre de resfriamento.

Figura 6. Torre de resfriamento de tiragem mecânica. Fonte: (Autor, 2016)

A temperatura de bulbo úmido é medida com o bulbo do termômetro envolto com uma gaze umidificada com água. Por definição, é a temperatura atingida em regime permanente (não de equilíbrio termodinâmico), por uma pequena porção de água, em contato com uma corrente contínua de ar, em condições adiabáticas (só há troca térmica entre o ar e essa massa de água), desprezando--se os efeitos de radiação térmica nessa troca.

A temperatura de bulbo úmido é menor ou no máximo igual em relação à temperatura de bulbo seco. Isso ocorre porque, exposta a uma corrente de ar não saturado (umidade relativa menor do que 100 %), parte da água presente na gaze evapora e com isso, a temperatura abaixa.

2.2.3 Condensadores evaporativos

Os condensadores evaporativos são formados por uma espécie de torre de resfriamento de tiragem mecânica, no interior da qual é instalada uma serpentina, por onde escoa o líquido refrigerante. Na parte superior destes condensadores são instalados bicos injetores que pulverizam água sobre a tubulação de refrigerante.

A água escoa, em contracorrente com o ar, em direção à bacia do condensador. O contato da água com a serpentina por onde escoa o refrigerante provoca a sua condensação. Ao mesmo tempo uma parcela da água evapora e, num mecanismo combinado de transferência de calor e massa entre a água e o ar, esta última é também resfriada. A água que chega à bacia do condensador é recirculada por uma bomba, e a quantidade de água é mantida através de um controle de nível (válvula de bóia), acoplado a uma tubulação de reposição. O esquema estrutural de um condensador evaporativo pode ser visualizado na Figura 7.

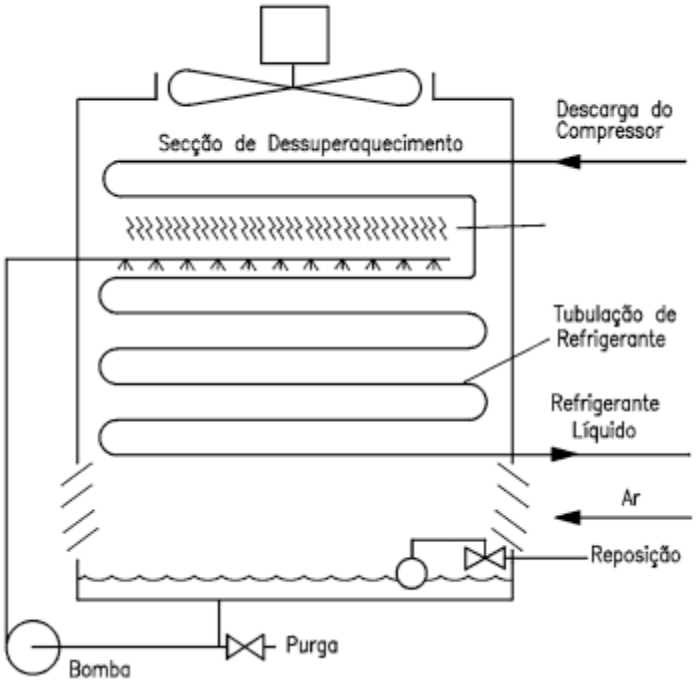

Figura 7. Condensador evaporativo. Fonte: (CASTRO, 2008).

Uma primeira classificação pode ser feita em função da forma com que a água é distribuída para se obter um bom contato com o ar ascendente. O propósito básico consiste em gerar pequenas gotas de água, em cuja superfície se verifica o

processo de evaporação. Este efeito é conseguido mediante a queda da água sobre uma série de camadas superpostas compostas por barras, enquanto o ar se movimenta no sentido horizontal (fluxo cruzado) ou vertical (fluxo em contracorrente). A água, ao cair, se quebra em gotas cada vez menores.

É necessário a realização de tratamento de água, que serve para evitar, ou pelo menos, minimizar a corrosão e incrustações nos equipamentos e nas serpentinas. Além disso, o tratamento de água é importante em condensadores evaporativos, torres de resfriamento e trocadores de calor para manter o melhor desempenho e aumentar a vida útil, pois os sais dissolvidos, matéria orgânica em suspensão dissolvida na água, e sólidos contribuem para formação de fungos, bactérias e algas, que provocam a redução da eficiência (CORTINOVIS; SONG, 2012; VENTURINI; PIRANI, 2005b).

2.3 Reservatório de líquido

Os reservatórios de líquido nos sistemas de refrigeração industriais têm como função o armazenamento de líquido refrigerante para compensar as variações de consumo e produção de refrigerante líquido e a separação de vapores para evitar a migração de líquido para os compressores.

Há dois tipos de reservatórios de líquido, o reservatório de líquido de alta pressão, cuja função é armazenar o líquido proveniente do condensador, e o reservatório de baixa pressão, que opera com funções de separação de líquido e reservatório para o sistema de evaporadores com recirculação forçada.

O projeto de cada tipo de reservatório deve considerar os níveis baixo e alto necessários em cada caso para garantir que somente líquido (nível baixo) ou gás (nível alto) deixem o reservatório.

Os reservatórios de alta e baixa pressão devem ainda ser calculados para armazenar o líquido presente nos equipamentos (condensadores ou evaporadores) e nas linhas para o caso de parada da instalação. Os reservatórios devem ainda ser calculados para garantir o fornecimento de refrigerante líquido e a separação dos gases mesmo nos transitórios do sistema.

2.4 Dispositivo de expansão

Em um sistema de refrigeração, o dispositivo de expansão têm a função de reduzir a pressão do refrigerante desde a pressão de condensação até a pressão de vaporização. Ao mesmo tempo, este dispositivo deve regular a vazão de refrigerante que chega ao evaporador, de modo a satisfazer a carga térmica aplicada ao mesmo.

Na válvula de expansão ocorre a diminuição da pressão do fluído refrigerante com uma mudança de fase parcial de líquido para líquido mais gás. Com a diminuição da pressão a troca de calor na forma de vaporização do fluído no evaporador fica favorecida, além disso, a temperatura mais baixa também favorece a troca térmica. (MENDES, 2014)

Normalmente, os sistemas industriais com evaporador inundado possuem, após a válvula de expansão, um separador de líquido, o qual tem como objetivo principal manter o evaporador cheio de líquido e aumentar a geração de vapor, favorecendo a troca de calor latente.

2.5 Evaporadores

O evaporador é a parte mais importante de um sistema de refrigeração. Embora seja simples, eles recebem este nome porque é onde se evapora o fluido refrigerante. O fluido refrigerante sofre uma mudança de estado no evaporador, saindo de líquido e se transformando em vapor (MARTINELLI JÚNIOR, 2003).

York Refrigeration (2008) afirma que os evaporadores são a interface entre o sistema de refrigeração e o processo, ou seja, é nos evaporadores que a troca térmica entre o fluido refrigerante e o produto a ser resfriado ocorre, fazendo com que a carga de calor do segundo seja transferida e absorvida pelo primeiro, principalmente como calor latente, e este se evapore.

O líquido vem do reservatório com alta pressão, passa pela válvula de expansão e entra no evaporador. Há um sistema de controle na válvula de expansão, que tem a função de manter, entre o reservatório e o evaporador, um diferencial de pressão para que, dentro do evaporador, se inicie a ebulição a uma temperatura menor que a da substância que está sendo resfriada. (TASSINI, 2012).

Como a pressão dentro do evaporador é baixa, a temperatura de evaporação também é. No lado externo do evaporador passa a substância a ser resfriada com uma temperatura maior que a do fluido refrigerante. Este último se evapora e recebe um acréscimo de temperatura, também chamado de superaquecimento. Em sistemas de refrigeração com amônia, é no evaporador que a amônia com baixa pressão líquida se transforma em amônia com baixa pressão de vapor.

Em alguns casos a troca térmica é feita diretamente entre o fluido refrigerante e o produto, em outros se utiliza um fluido secundário ou intermediário, como a solução de etanol, que posteriormente troca calor com o produto final, ou seja, há troca entre o fluido refrigerante (primário) e o intermediário (secundário) e depois troca do intermediário com o produto.

Embora haja perdas térmicas em função de haver uma troca a mais, o uso do fluido secundário se torna cada vez mais comum por causa de segurança, principalmente em instalações que utilizam amônia como fluido primário. A solução de água com 20% de etanol ou glicol é bastante utilizada porque pode chegar, sem risco de se congelar, a temperaturas abaixo de 0°C. (TASSINI, 2012).

.

Há vários tipos de evaporadores para líquidos, mas em instalações industriais de grande porte prevalecem os evaporadores de placas ou ainda casco e tubo, sendo este último encontrado em instalações antigas.

Os evaporadores de placas apresentam características muito próximas dos condensadores do mesmo tipo e são os mais usados porque possuem uma área maior de superfície e elevado coeficiente global de transferência de calor, ocupam pouco espaço e tem preços competitivos, comparados com os demais tipos.

Além disso, estes evaporadores possuem maior elasticidade no caso de congelamento, pois as placas semissoldadas deformadas podem voltar para suas devidas posições, podem ser usados com a alimentação de qualquer tipo, podem operar com maior TE, ao ser possível uma aproximação menor entre a TE e a saída do líquido.

2.6 Amônia (NH3)

Há vários fluidos refrigerantes utilizados em sistemas de refrigeração, como o freon, a amônia, dentre outros. A amônia, também conhecida como o fluido refrigerante R-717, apresenta várias vantagens como excelentes propriedades termodinâmicas, como alto calor latente de evaporação, apresente grande densidade, o efeito de refrigeração mais elevado por kg e não se mistura com o óleo lubrificante.

Além disso, em temperatura ambiente, a água absorve cerca de novecentas vezes o seu próprio volume em gás de amônia. Também nesta temperatura, a amônia é volátil, sendo simples a análise de pureza. possui um preço bastante reduzido, é de fácil detecção e não é acumulativa no corpo humano. Tudo isso faz da amônia o principal fluido utilizado em refrigeração (JOHNSON CONTROLS, 2010).

A amônia pura não ataca os metais, porém, se houver água na amônia, formará hidróxido de amônia, que possui uma ação corrosiva, principalmente sobre o cobre. Portanto é essencial que a amônia utilizada em sistemas frigoríficos seja pura.

Além disso, a presença de água e ar na amônia estimula a corrosão, envelhecimento rápido de óleos, usados como lubrificantes, e formação de borras, o que aumenta demais o custo de operação e manutenção dos equipamentos (GEA REFRIGERATION TECHNOLOGIES, 2010).

3. PROCESSO PRODUTIVO DE CERVEJA

A cerveja é obtida pela fermentação da cevada, que consiste na conversão em álcool dos açúcares presentes nos grãos de cevada. A fermentação é a principal etapa do processo cervejeiro e sua efetividade depende de várias operações anteriores, incluindo o preparo das matérias-primas. Após a fermentação são realizadas etapas de tratamento da cerveja, para conferir as características organolépticas (sabor, odor, textura) desejadas no produto final.

3.1 Obtenção do malte

Em geral, o malte é obtido em instalações específicas, conhecidas como maltarias. Após a colheita no campo, a cevada segue para estas instalações para os procedimentos de limpeza, seleção de grãos, embebição, germinação e secagem dos grãos. Os procedimentos são necessários para que o amido do cereal possa ser transformado em açúcar fermentável, o que é essencial para a fabricação da cerveja.

A primeira etapa na maltaria é a limpeza para separação de palha, pedras, etc. Em seguida, é feita a seleção dos grãos com o objetivo de homogeneizar o malte. Na embebição, os grãos são armazenados em silos, recebem água e oxigênio e, depois de algumas horas, atingem maiores teores de umidade e ficam prontos para a germinação. Na germinação, que dura alguns dias, os grãos são dispostos em estufas com controle de umidade e temperatura, para que brotem as radículas (SANTOS e RIBEIRO, 2005).

No final do processo, a cevada germinada passa por secagem ou torrefação nos fornos de secagem, onde é interrompido o processo de germinação pela ação do calor. Nesse processo, chamado de caramelização ou cura, dependendo da intensidade, o malte pode assumir colorações e aromas que diferenciam as cervejas.

3.2 Brassagem

Após o recebimento do malte proveniente das maltarias, o malte é triturado através de moinhos, com o objetivo de expor a parte interna dos grãos para concluir a ação enzimática, disponibilizando as proteínas e o amido presentes no interior dos grãos.

O malte é direcionado para um tanque com água quente, onde existe controle rigoroso da duração do processo e temperaturas de cozimento, dando início à produção do mosto. O mosto pode ser definido como uma solução aquosa de açúcares, que serão os alimentos para as bactérias que realizam a fermentação, dando origem ao álcool. (SANTOS e RIBEIRO, 2005).

Em função dos parâmetros da cerveja a ser produzida, utiliza-se outra fonte de açúcar além do malte, conhecido como adjunto ou gritz. Os tipos de adjunto mais comuns são: gritz de milho, arroz, trigo ou a *high maltose*, que possui custo mais elevado, porém, tem como benefício a produção de mosto com maior concentração. (TASSINI, 2012).

O preparo do mosto consiste em cozinhar o malte com os devidos cuidados,que inclui etapas de preparo (como a moagem do malte, maceração, separação do mosto e sua filtração), o cozimento em si, e etapas de condicionamento posterior, como a clarificação e o resfriamento em um trocador de calor com água gelada até sair com uma temperatura entre 6 e 12ºC. A solução livre de impurezas e rica em açúcares resultante deste processo é então enviada para a fermentação.

Para o resfriar o mosto proveniente da brassagem, com uma temperatura aproximada de 95ºC, é utilizado água gelada, com temperatura média de 2,5ºC.
A temperatura de saída do mosto frio deve ser aproximadamente 9ºC, e a água quente gerada neste resfriamento é reutilizada para o próximo fabrico. Na Figura 8 pode ser visto um trocador de calor a placas utilizado no processo de resfriamento de mosto.

Figura 8. Trocador de calor para resfriamento de mosto. Fonte: (Autor, 2016)

3.3 Fermentação

Os tanques fermentadores recebem o mosto já resfriado, juntamente com a levedura (fermento). A fermentação do mosto é dividida em duas etapas: na primeira etapa as leveduras se reproduzem, aumentando de quantidade de 2 a 6 vezes, em

seguida as leveduras realizam a fermentação propriamente dita, convertendo os açúcares presentes no mosto em CO2 e álcool. O processo de fermentação dura de 6 a 9 dias, ao final dos quais obtém-se, além do mosto fermentado, uma grande quantidade de CO2, que após ser beneficiado e purificado é enviado para a etapa de carbonatação da cerveja. Os tanques podem ser visualizados na figura 9 (TASSINI, 2012).

O controle da temperatura varia de acordo com os tipos de cerveja, e um bom processo de fermentação exige um rigoroso controle e manutenção de temperaturas. Cervejas do tipo “Lager” são fermentadas em temperaturas mais baixas, enquanto as do tipo “Ale” fermentam em temperaturas um pouco mais elevadas (AMBEV, 2016).

De modo a garantir um bom andamento ao processo de fermentação, é necessário que a temperatura se mantenha constante, em valores entre 8 e 15ºC. Para isso é necessário que os tanques fermentadores sejam resfriados, uma vez que a fermentação é um processo exotérmico.

A fermentação finaliza em temperatura aproximada de 14ºC, e após seu término, a cerveja é transferida do tanque fermentador para o tanque maturador, sendo que a maturação é mantida a temperaturas negativas, em torno de -0,5ºC. Portanto, é necessária uma redução brusca da temperatura da cerveja durante esta transferência, que é denominada trasfega. Refrigera-se a cerveja em trocadores de calor a placas. Além disso, a cerveja é centrifugada para a remoção das partículas em suspensão, como leveduras e sedimentos.

Figura 9. Tanques OD’s fermentadores. Fonte: (Autor, 2016)

3.4 Maturação

Após a fermentação, existe uma grande quantidade de substâncias indesejáveis presentes na cerveja. Estas substâncias indesejadas são eliminadas no processo de maturação e estabilização, onde a cerveja é mantida em descanso nos tanques maturadores em temperatura aproximada de -0,5ºC.

O processo dura alguns dias, permitindo a ocorrência das reações químicas para a estabilização. No final da etapa, a cerveja está praticamente concluída, com aroma, sabor e corpo definidos.

3.5 Filtração

Após a maturação, o processo de filtração tem como objetivo remover as impurezas e partículas restantes de leveduras, além de garantir a clarificação e eliminar eventual turbidez. É conhecida como a etapa de acabamento da cerveja.

A cerveja proveniente da maturação, aproximadamente a 0ºC, passa novamente por outro trocador de calor a placas até que atinja temperatura média de -2,0ºC, para que seja realizado o processo de filtração.

Utilizam-se diversos tipos de meios filtrantes, além do uso de terra infusória. O processo não altera a composição ou sabor da bebida, mas é fundamental para garantir sua apresentação, deixando-a límpida, transparente e brilhante.

Ainda nesta fase de filtração, é realizada uma etapa de carbonatação, pois o teor de CO_2 existente não é suficiente para atender os requisitos do produto. Além da injeção de gás carbônico, também é realizada uma etapa conhecida como blendagem no caso da produção de cerveja concentrada. Consiste em adicionar água desaerada à cerveja filtrada, obtendo assim a cerveja pronta para o envase. (AMBEV, 2011).

3.6 Envase

Esta é uma fase importante para garantir a qualidade e a estabilidade da cerveja, pois é necessário cuidado especial com possíveis fontes de contaminação, perda de CO2 e incorporação de oxigênio. Tais ocorrências podem comprometer a qualidade do produto. Podem ser usadas garrafas e latas (envase realizado pelas enchedoras) e barris (embarrilamento).

4. ESTUDO DE CASO - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA CERVEJARIA

Este sistema é composto por vários componentes, sendo suas descrições técnicas dadas nos subitens seguintes.

4.1 Especificação dos compressores

O sistema é composto por 2 compressores parafuso da marca Mycom tipo N250VLD. A vazão volumétrica deslocada por cada compressor a 3550 rpm (60 Hz) é de 2840 m3/h e a capacidade refrigeração é de 1906 kW (temperatura de evaporação -8ºC e de condensação de 35ºC). Os compressores podem variar a sua carga através da *slide valve*. Os compressores parafuso possuem a taxa de volume interno variável, o que gera uma variabilidade de 0 a 100 % na capacidade de refrigeração do compressor. Estes são os compressores principais do sistema e pode ser visualizados na figura 10.

Figura 10. Compressor rotativo tipo parafuso. Fonte: (Autor, 2016)

4.2 Especificação dos condensadores

O sistema de refrigeração é composto por 10 condensadores evaporativos da Marca Allenge tipo CEA 750E. A capacidade para retirada de calor é de 872 kW (temperatura de bulbo úmido de 24ºC e temperatura de condensação 35ºC). Os

ventiladores absorvem uma potência de 11,8 kW e a bomba de 3,7 kW. Os condensadores são apresentados na figura 11.

Figura 11. Condensadores Evaporativos. Fonte: (Autor, 2016)

A expansão acontece em válvulas de expansão manuais associadas com válvulas de bloqueio de controle de nível. A taxa de fluxo líquido através da válvula depende do diferencial de pressão através do orifício da válvula e do grau de abertura da válvula, sendo o último ajustado manualmente. As válvulas reguladoras de pressão se encontram após os separadores de líquido a função básica é manter a temperatura da amônia acima da de evaporação para evitar que a mesma possa congelar o fluido circulante nos circuitos intermediários.

4.3 Especificação do sistema

Além dos condensadores e compressores, o sistema é composto também por evaporadores (sistema primário e secundário) do tipo de placas e serpentinas de refrigeração nas camisas dos tanques fermentadores e maturadores inundados com refrigerante (amônia) no estado líquido. Estes evaporadores trocam calor com um sistema secundário de água com etanol diluído a 20% para evitar o congelamento no trocador. A montagem foi realizada dessa forma para evitar que a amônia entre em contato com o produto que vai ser envasado na linha de produção (causando

contaminação), e garantir uma inércia maior do sistema a mudanças de temperatura e vazão de produto nas linhas de produção.

É importante afirmar que os processos durante a fabricação não ocorrem simultaneamente, existindo constantemente a oscilação de carga térmica.

No próximo capítulo são descritas e detalhadas a metodologia utilizada bem como a avaliação das oportunidades encontradas para o aumento de eficiência do sistema de refrigeração em estudo, com foco no aumento da pressão de sucção e redução da pressão de descarga.

5. METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E APLICAÇÃO

Segundo SHEHATA (2009) as ações para melhoria na eficiência e otimização de um sistema de refrigeração industrial devem avaliar a o sistema de refrigeração, desde a sua geração, na sala de máquinas, envolvendo o sistema de compressão e condensação, a distribuição que compreende o sistema de bombeamento e, por fim, o consumo nos trocadores de calor de processo.

O sistema de refrigeração, nas indústrias produtoras de cerveja, é responsável pelo consumo elétrico de 30 a 40% do total de energia elétrica consumida pela planta.

Para o caso estudado, os equipamentos do sistema de refrigeração representam uma média de 40% do consumo de energia elétrica de toda a fábrica.

Em 2008, a empresa criou uma metodologia de eficiência energética no qual foram utilizadas como base boas práticas de operação de sistemas consumidores de energia elétrica. Essas práticas já haviam sido testadas em outras unidades do Brasil e de outros países e apresentaram resultados satisfatórios. Para que as outras unidades da empresa tivessem os mesmos resultados e consequentemente a redução no consumo, foi compilada todas as boas práticas e padronizadas através de uma metodologia.

A metodologia compreende no total mais de 500 boas práticas de operação. Para este trabalho foram escolhidas ações com impacto na pressão de condensação/ descarga e ações com impacto na pressão de evaporação/sucção, pois estas apresentavam resultados imediatos e baixo custo para a execução.

Os operadores do sistema de refrigeração foram questionados previamente se realização destas atividades estava dentro da rotina de trabalho, se eram padronizada e se eram executadas com alguma determinada frequência. Através da interação com a operação foi possível entender as lacunas e identificar estas perguntas como oportunidades de ganho em energia elétrica dentro do sistema de refrigeração da cervejaria.

5.1. Ações com Impacto na Pressão de Condensação/Descarga

A pressão de descarga dos compressores é determinada por três fatores:

- Capacidade de refrigeração dos compressores em funcionamento no sistema, que define a vazão de amônia;
- A capacidade de condensação dos condensadores em funcionamento, que define a vazão de amônia que se condensa e passa pelos condensadores.

- A temperatura de bulbo úmido, que determina a temperatura mínima de condensação (e pressão de descarga) que é possível atingir, ainda que infinitos condensadores sejam colocados em funcionamento.

As boas práticas de operação têm por objetivo reduzir a pressão de condensação ou de descarga até um limite estabelecido, chamado aqui de pressão ótima de descarga. Esta redução impacta diretamente no consumo de energia elétrica, pois reduz o trabalho de compressão, que é o maior responsável pelo consumo de energia elétrica.

Neste estudo de caso foram utilizadas as seguintes perguntas da ferramenta para identificação de oportunidades em sistemas de refrigeração, que estão apresentadas na figura 12.

Os condensadores evaporativos são controlados através da pressão ótima de descarga e temperatura de bulbo úmido?
É checada a presença de gases incondensáveis no sistema?
É realizada limpeza nos trocadores de calor periodicamente a fim de eliminar poeira, óleo e resíduos?

Figura 12. Perguntas da metodologia de boas práticas de operação para redução da pressão de descarga.

5.1.1 Pressão ótima de descarga e temperatura de bulbo úmido

É sabido que a capacidade de condensação se reduz com o aumento da temperatura de bulbo úmido, e que a temperatura da água de condensação, e consequente pressão de descarga, pode ser otimizada através da condição de temperatura de bulbo úmido local trazendo ganhos na eficiência.

O conceito de pressão ótima de descarga tem por objetivo a redução da pressão de descarga até o ponto em que o ganho em energia elétrica na compressão seja maior que a energia elétrica de condensação utilizada para reduzir esta pressão. Este ponto é determinado pela temperatura de bulbo úmido, pois ainda que a instalação possua infinitos condensadores em operação, a temperatura da água de condensação tende a atingir a temperatura de bulbo úmido. Como nenhuma instalação frigorífica conta com infinitos condensadores, o ideal é que seja

considerado um intervalo no qual as pressões de condensação estejam razoáveis para uma dada temperatura de bulbo úmido. (TASSINI, 2012).

Antes de iniciar este trabalho, Shehata (2009) realizou um estudo com ensaios experimentais, em sistemas de refrigeração com amônia que usavam condensadores evaporativos, e demonstrou uma relação interessante entre a TBU e a pressão ótima de descarga. A equação apresenta esta relação, que deve possuir limites máximos e mínimos de 14,0 bar e 8,6 bar, respectivamente.

$$P_D = 0{,}0146 \cdot TBU^2 - 0{,}293 \cdot TBU + 10{,}092$$

onde:

P_D: pressão ótima de descarga [bar]

TBU: temperatura de bulbo úmido [ºC]

Na linha de equalização da descarga dos compressores deve existir um transmissor de pressão e o programa tem por objetivo fazer a comparação deste medição com o resultado determinado pela equação. Quando a pressão medida no transmissor estiver acima da pressão determinada pela equação, significa que é precisso mais capacidade de condensação e quando a pressão medida pelo transmissor estiver abaixo da pressão determinada pela equação programada, significa que a capacidade de condensação pode ser reduzida.

Deve-se utilizar um limite de +- 0,3 bar para esta comparação entre pressão medida e pressão real, para evitar que condensadores sejam ativados e/ou desativados com frequência e prejudicando assim a vida útil dos mesmos.

A cervejaria já possuía uma estação meteorológica para controlar os ventiladores em função da TBU e da temperatura da bacia há 4 anos. Porém o transmissor de temperatura nunca havia sido calibrado, indicando assim uma temperatura de bulbo úmido errônea para o sistema. Foi realizada a calibração dos transmissor de temperatura da estação meteorológica e incluído no plano de calibração da cervejaria com peridiocidade de 1 ano. A estação metereológica pode ser visualizada na figura 13.

Figura 13. Estação Metereológica. Fonte: (Autor, 2016)

5.1.2 Purga de Incondensáveis

Outra ação para aumento de eficiência que apresenta bons resultados refere-se a manter o circuito de refrigeração livre da presença de ar ou gases incondensáveis

A presença de incondensáveis no sistema de refrigeração causa uma série de problemas operacionais. O ar pode penetrar no sistema de distintas maneiras, como por exemplo, através de selos de vedação, juntas ou válvulas, ou através de aberturas na tubulação de baixa pressão, durante operação a pressões inferiores à atmosférica.

Todo o ar admitido no sistema na região de baixa pressão, por ocasião destes e outros fatores, tende a acumular-se nas regiões de alta pressão, a região do condensador, onde se acumula, uma vez que o líquido refrigerante opera como um selo, impedindo sua migração a outras regiões da instalação.

A presença de gases incondensáveis no condensador prejudica o sistema em dois aspectos:

- Aumento de pressão de condensação, que é resultante da soma das pressões parciais de compressão;
- Redução no coeficiente de transferência de calor do condensador, que é o resultado da resistência da difusão do vapor de refrigerante no sentido da superfície fria da serpentina, imposta pelo gás incondensável.

É comprovado que manter as instalações livres da presença de gases não condensáveis aumenta a eficiência do sistema e reduz os custos de consumo de energia.

Para identificar se a quantidade de incondensáveis espalhada no sistema de amônia está afetando a capacidade de condensação e elevando a pressão de descarga, verifica-se se há presença de gases incondensáveis em excesso e, consequentemente, se há necessidade de purgar o sistema, através da comparação da pressão de descarga do compressor com a pressão de saturação correspondente à temperatura na região de equilíbrio líquido-vapor. Se a pressão medida for significativamente superior à pressão de saturação, o sistema deve, efetivamente, ser purgado. Em sistemas de médio e grande porte, a purga deve ser feita com frequência, devendo, inclusive, ser automatizada. (STOCKER, 2002).

Os pontos preferenciais de purga devem apresentar as seguintes características:

1) presença exclusiva de vapor
2) baixa velocidade do vapor

Os procedimentos de purga de incondensáveis podem ser realizados de forma manual ou com sistemas que executam a purga automática. A purga manual nos condensadores evaporativos pode ser realizada de duas formas distintas:

1) Purga pelas válvulas de purga na saída de amônia líquida dos condensadores evaporativos, que deve ser realizada em momentos quentes do dia, quando a carga operativa não estiver muito elevada e quando a pressão de descarga esteja atingindo a pressão ótima indicada para a temperatura de bulbo úmido.

2) O procedimento de purga manual também pode ser realizado no reservatório de amônia líquida, conectando uma mangueira em uma válvula de purga e levando a outra extremidade da mangueira até uma bombona com água, na qual será realizada a purga por borbulhamento. O ideal é se purgar por válvulas que não fiquem muito próximas à entrada de amônia líquida no reservatório.

O procedimento manual é mais efetivo nas condições de sistema totalmente parado, quando o ar tende a se acumular nas partes mais altas do sistema (condensadores evaporativos) e podem ser purgados mais facilmente. Porém, em uma instalação com produção contínua, como é o caso aqui apresentado, raramente se tem condições de parada total.

O sistema de refrigeração da cervejaria não possuía o sistema de purga automática, porém apresentavam válvulas de purga nos reservatórios de amônia, sendo necessário a realização do procedimento manual, que teve sua frequência definida para a cada 2 dias a fim de evitar a acumulação dos gases incondesáveis. Os colaboradores já sabiam realizar o procedimento, porém não realizavam com a peridiocidade necessária. A purga manual de incondensáveis foi padronizada e os colaboradores foram treinados. O ponto de purga é apresentado na figura 14.

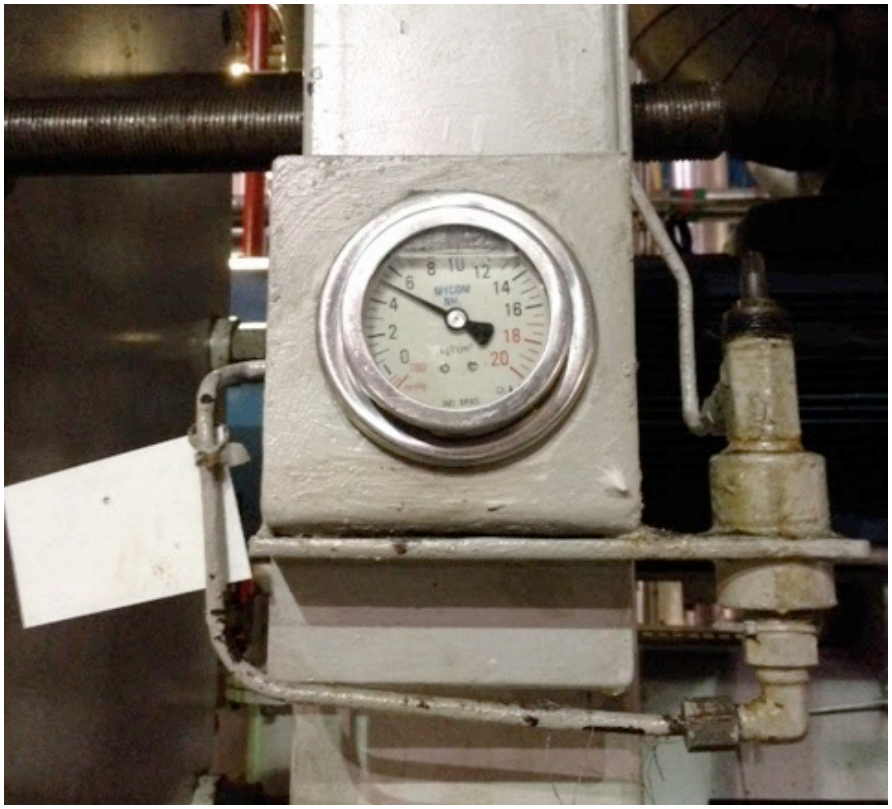

Figura 14. Ponto de purga do reservatório de amônia. Fonte: (Autor, 2016)

5.1.3 Limpeza dos condensadores de placas

Os tubos dos condensadores resfriados à água podem estar sujeitos à formação de incrustações resultantes de impurezas. As incrustações não alteram somente a capacidade do trocador de calor, sabe-se que no fim da vida útil, este equipamento chega a perder até 25% de sua capacidade nominal em função da perda de tubos, tamponamentos e por sujeira. Incrustação ocorre quando um fluido passa por um trocador de calor, e as impurezas no fluido precipitam-se sobre a superfície dos tubos. A precipitação destas impurezas pode ser causada por:

- Uso frequente do trocador de calor
- Ausência de limpeza regular do trocador de calor

Os sais dissolvidos, sólidos e matéria orgânica em suspensão dissolvidos na água de resfriamento são fatores que contribuem para a formação de um meio favorável à proliferação de algas, bactérias e fungos, que por sua vez, prejudicam não só a operação da torre de resfriamento, mas também o desempenho térmico da rede de trocadores de calor.

Com o conceito do CIP (Cleaning in Place) é possível fazer a limpeza nos trocadores de calor a placas sem a necessidade de abertura. O CIP (Cleaning in Place) foi desenvolvido para a higienização das superfícies internas de

equipamentos, tubulações e tanques de armazenamento, sem que haja a necessidade do desmonte das partes e peças. O conceito CIP é baseado na circulação de solução química pelas superfícies internas dos equipamentos, provendo ação térmica, mecânica e química, além do tempo de ação de cada um destes agentes.

A limpeza é realizada quimicamente pela circulação de uma solução, sendo uma alcalina e uma segunda ácida. A central CIP utiliza uma solução e um tanque com bomba de circulação. O sentido do fluxo da solução CIP deve ocorrer oposto ao do caldo em operação normal, este detalhe tem por finalidade aumentar a eficiência da limpeza e fazer a retrolavagem no trocador. A sequência de etapas sugerida pelo Centro de Engenharia da empresa para a limpeza é a seguinte:

a) Isolar o trocador do circuito.
b) Drenar o trocador.
c) Circular solução alcalina com soda caústica 10% (NaOH) em contra corrente durante 8 horas (para este procedimento deve ser utilizada uma bomba para recirculação e um tanque de 1000 L para armazenar a solução de limpeza).
d) Enxaguar com água por 20 minutos para retirar qualquer resíduo no interior das placas e evitar corrosão.
e) Colocar novamente o trocador em operação.

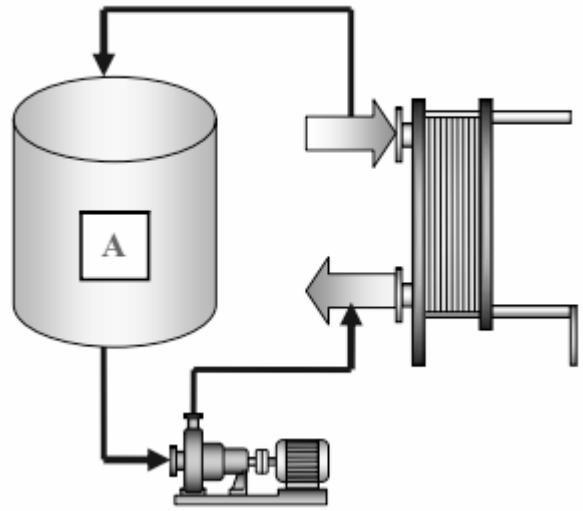

Figura 15. Esquema simplificado da limpeza química em um trocador. Fonte: (BERMO, 2014.)

A limpeza química dos trocadores de calor foi realizada em todos os condensadores de placas do sistema de refrigeração, conforme a figura 16, seguindo as etapas já mencionadas anteriormente. Foi definido uma frequência mensal para a realização dos CIPs, as etapas foram padronizadas em um padrão operacional e os colaboradores foram treinados na atividade.

Figura 16 - Limpeza química do trocador de calor. Fonte: (Autor, 2016)

5.2 Ações com Impacto na Pressão de Sucção

A pressão de Sucção do sistema depende da demanda de refrigeração e não pode ser elevada simplesmente, pois pode não se atingir a temperatura desejada no fluido secundário ou no produto final.

A manutenção periódica dos equipamentos, principalmente dos evaporadores, como por exemplo, a limpeza dos trocadores de calor, purga de óleo e calibração das válvulas de expansão, são fundamentais para a melhora da eficiência do sistema.

Operar com a quantidade correta do fluido primário (amônia) no sistema, com o fluido secundário na concentração recomendada e com a máxima temperatura que atenda as cargas térmicas é fundamental para se conseguir trabalhar com pressões de sucção mais elevadas.

A recomendação é para sempre operar com a maior pressão de sucção possível e reduzi-la, apenas, quando a demanda exigir. Conforme a demanda diminui deve-se aumentar o *set point* de PS novamente.

Para identificar as oportunidades da otimização da pressão de sucção foram utilizadas as seguintes perguntas da ferramenta, que pode ser visualizada na Figura 17.

O óleo é drenado diariamente nos reservatórios?
A pressão do sistema de amônia opera constantemente à maior pressão de sucção (temperatura) requerida pelo processo?

Figura 17. Perguntas da metodologia de boas práticas de operação para aumento da pressão de sucção.

5.2.1 Drenagem de óleo

Quando um sistema de refrigeração está em funcionamento, uma parcela da quantidade de óleo lubrificante dos compressores passa pelo separador de óleo e é arrastado para o sistema, fenômeno conhecido como arraste de óleo.

Isto ocorre por diversos motivos, tais como alteração brusca no controle de capacidade do compressor, filtros coalescentes saturados ou por problemas no compressor. O óleo arrastado acaba se depositando nas partes mais baixas dos equipamentos, principalmente nos evaporadores ou nos separadores de líquido de baixa pressão. A presença de óleo no evaporador atua como um isolante térmico, e faz com que sejam necessárias menores temperaturas de evaporação para compensar a deficiência na troca térmica. Como resultado, os compressores consomem mais potência elétrica e ficam com capacidade reduzida, já que a pressão de sucção decresce. (TASSINI, 2012).

Um sintoma típico de presença de óleo no evaporador é mostrado na Figura 18. Observa-se na figura que há formação de gelo na parte superior do trocador, devido à baixa temperatura em sua superfície, causando condensação e solidificação de vapor de água presente no ar, enquanto que na parte inferior, onde há presença de óleo, as temperaturas não são suficientemente baixas para formar gelo.

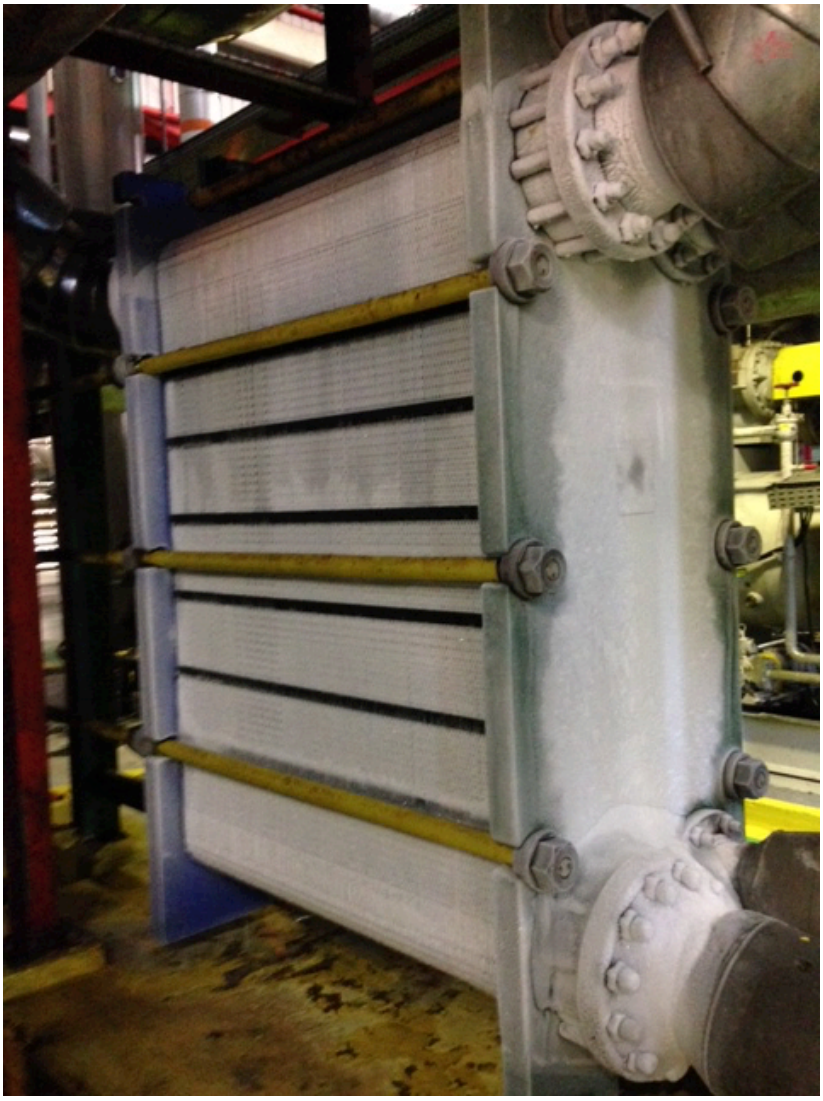

Figura 18. Evaporador com sintoma de congelamento. Fonte: (Autor, 2016)

Foi estabelecida a boa prática de purgar o óleo dos evaporadores com frequência diária, que pode ser visualizado na Figura 19. Além do procedimento de drenagem de óleo periodicamente, a gestão da quantidade de óleo reposta por compressor e da quantidade de óleo drenada nos evaporadores começou a ser realizada, a fim de identificar se havia algum compressor com problema de arraste.

Além disso, foi criado um procedimento para que fosse realizada uma manutenção preventiva nestes sistemas uma vez ao mês.

.

Figura 19. Drenagem manual de óleo em um evaporador. Fonte: (Autor, 2016)

5.2.2 Operar com a maior pressão de sucção (temperatura)

Outra ação que representa uma boa prática foi padronizar e treinar os operadores para trabalharem sempre nos limites superiores das faixas de temperatura de produto requeridas em cada processo, sem comprometer a qualidade.

O conceito de uso de pressão de sucção flutuante, de acordo com as necessidades otimizadas de consumo, foi a base para chegar a um ganho consistente em consumo. A partir deste conceito, foi implementada uma automação de variação da pressão de sucção do sistema conforme a demanda dos consumidores, como pode ser visualizado na Figura 20. Para cada consumidor, foi setada um *set point* de pressão de sucção, de forma que atingisse a temperatura necessária para o processo.

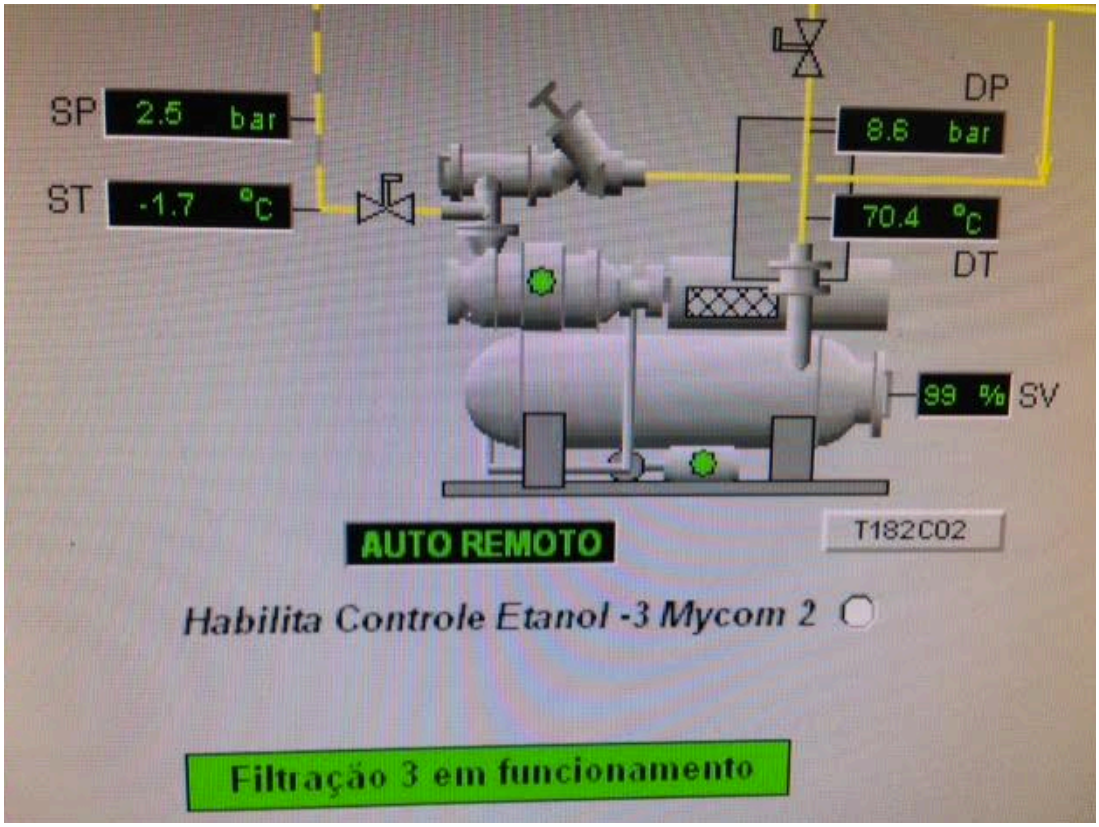

Figura 20. Automação da variação de pressão de sucção conforme demanda dos consumidores.
Fonte: (Autor, 2016)

O ideal é se trabalhar sempre nos limites superiores de temperatura do fluido secundário (solução de etanol), o que representa menor consumo energético e conseqüentemente menor custo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram medidos para comprovar os ganhos das ações implantadas, mas também foram acompanhados através dos índices de energia elétrica pelo volume produzido e através da gestão dos principais itens de controle (IC) e itens de verificação (IV), como a pressão de sucção e a pressão de descarga.

6.1 Redução no consumo de Energia Elétrica

Os dados do sistema de gerenciamento de consumo elétrico foram coletados e dispostos em uma tabela comparativa entre o período de Março de 2016 (quando ainda não haviam sido aplicadas as ações para aumento de eficiência) até Maio de 2016 (com as ações tomadas e/ou em andamento) e a meta de consumo estabelecida para os respectivos meses.

O cálculo do indicador de Energia Elétrica da cervejaria é obtido a partir da divisão do consumo total de energia elétrica do mês pelo volume de líquido (cerveja e refrigerante) produzido durante o mês. Este consumo e volume podem ser observados nos gráficos exibidos nas Figura 21 e o indicador de Energia Elétrica pode ser visto na Figura 22.

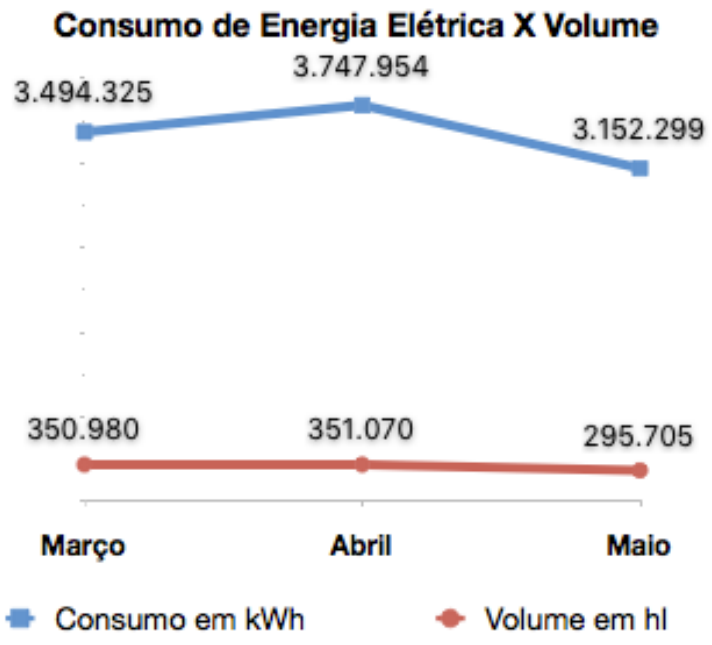

Figura 21. Consumo de Energia Elétrica em Março, Abril e Maio de 2016.

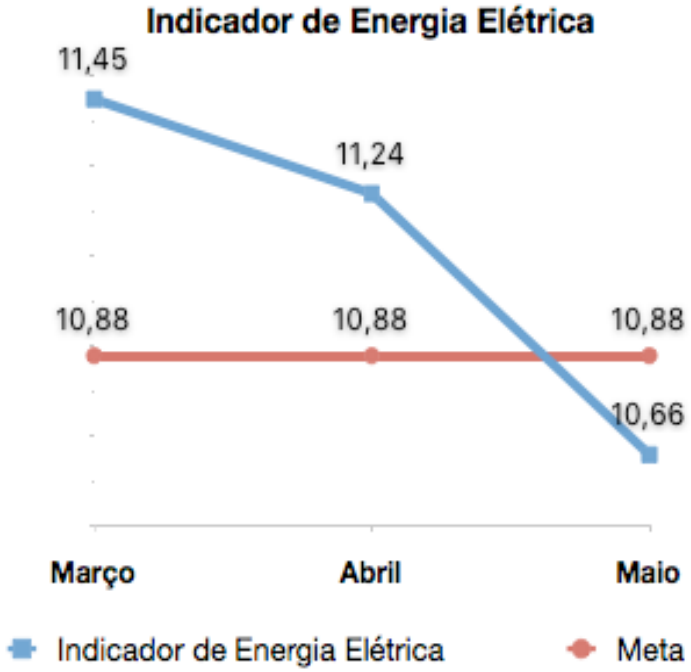

Figura 22. Indicador de Energia Elétrica em Março, Abril e Maio de 2016.

O investimento dessas ações foram mínimos, sendo apenas necessário padronizar estas ações, estabelecer um frequência de realização e treinar os colaboradores nestas atividades. O ganho, somente na redução do consumo de energia elétrica, do mês de Abril para Maio foi de R$ 250 mil.

6.2 Resultado do aumento da pressão de sucção

O projeto de variação da pressão de sucção para os diferentes consumidores foi uma das grandes oportunidades encontradas para aumentar a eficiência do sistema de refrigeração. Antes havia apenas um setpoint definido para atender todos os consumidores do sistema, assim a pressão de sucção deveria ser baixa o suficiente para atender o ponto mínimo de temperatura do processo. Foi modificado então a automação dos compressores, tendo estes então uma pressão de sucção definida para cada consumidor de frio. Sempre que se opera com uma Ps maior, mantendo a mesma PD, aumenta-se o COP do sistema, pelo aumento da capacidade do compressor, mas também se aumenta a potência absovida pelo motor.

Outra ação implementada com a ajuda da ferramenta para a melhora de eficiência do sistema de refrigeração, aumentando a PS, foi a realização diária da drenagem de óleo. O arraste de óleo dos compressores pode ser um problema, pois o óleo arrastado acaba nos evaporador, inundando os trocadores de calor, diminuindo a área de troca térmica e exigindo que o sistema opere com uma Ps mais baixa.

O aumento da pressão de sucção, do mês de Abril até Maio, pode ser observado na Figura 23.

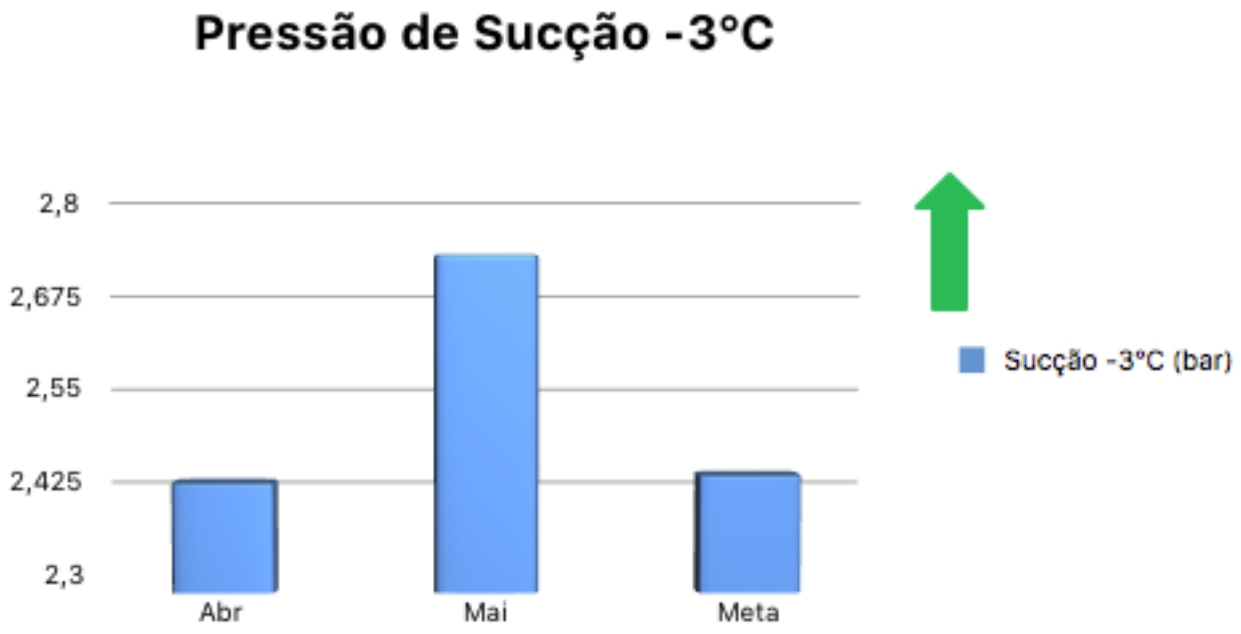

Figura 23. Pressão de Sucção em Abril e Maio de 2016.

6.3 Resultado da redução da pressão de descarga

Com o auxílio da ferramenta de boas práticas de operação, desde o início do trabalho foram realizadas muitas ações para a redução da Pressão de Descarga, iniciando com a limpeza dos trocadores de calor e purga manual de incondensáveis.

A modulação das torres de resfriamento em função da TBU foi uma das medidas adotadas que trouxeram mais ganhos em energia elétrica, principalmente em momentos de baixa carga térmica, como em dias frios e durante a noite, cuja temperatura é menor.

A figura 24 apresenta a redução do delta da pressão de Descarga média, comparando o mês de Abril com o mês de Maio, onde as as ações tiveram uma frequência estabelecida a fim de melhorar a eficiência do sistema.

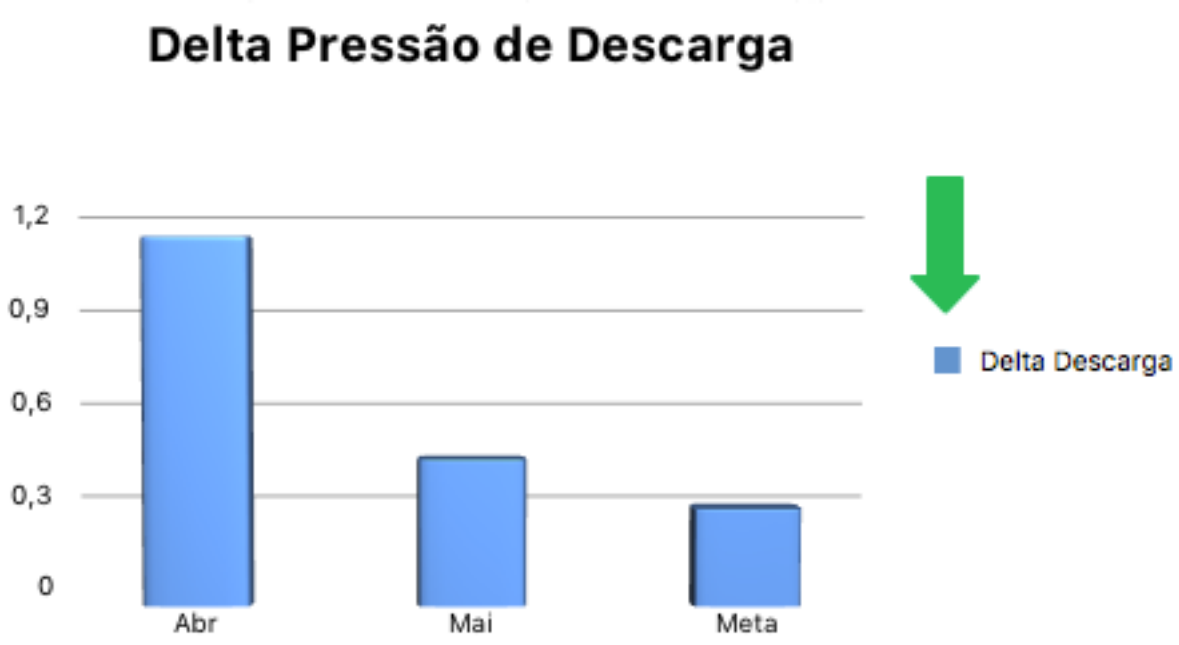

Figura 24. Pressão de Descarga em Abril e Maio de 2016.

CONCLUSÃO

O conceito de eficiência energética e sustentabilidade são muito relevantes atualmente, além do mais, podem e devem ser usados como ferramentas para a redução do consumo de energia, através da melhora de desempenho e eficiência dos sistemas.

A melhoria em eficiência energética nas instalações de refrigeração industriais é imprescindível para se atingirem os objetivos do novo modelo de desenvolvimento, tanto pela diminuição da intensidade energética global, como pelo aumento dos resultados econômicos.

Neste trabalho foram apresentadas as oportunidades encontradas e ações que podem melhorar a eficiência e reduzir o consumo elétrico de um sistema de refrigeração industrial por compressão de vapor empregando amônia como fluido refrigerante, e composto por compressores parafuso, condensadores evaporativos, evaporadores e dispositivos de expansão.

Verificou-se que, além do trabalho de implementação das ações de projeto, o treinamento e conscientização da equipe envolvida na operação são extremamente importantes, pois a aplicação das ações aqui expostas é complementar à aplicação das ações operacionais da equipe do setor de utilidades. O ideal é que todos os envolvidos saibam e entendam o significado de cada ação executada, além de conhecer os conceitos e fundamentos utilizados nesta execução. A comprovação dos resultados obtidos pode enfatizar a necessidade e a importância da mudança de comportamento na operação e determinar uma forma de acompanhamento diário para manter a continuidade das ações aplicadas, seja através do acompanhamento dos índices, delegação de metas, entre outros.

Grande parte das ações não precisavam de investimento financeiro para serem implementadas. O conhecimento técnico dos sistemas estudados ajudou a identificar várias oportunidades de redução do consumo de energia.

Então conclui-se que as ações para otimização dos parâmetros operativos de sistemas de refrigeração industrial constituem uma importante ferramenta para melhoria na eficiência de consumo de energia, mostrando que a metodologia é eficaz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBEV. Fabricação de Cerveja. Disponível em <http://www.ambev.com.br/pt- br/consumidores/fabricacao-da-cerveja/fabricacao-da-cerveja>. Acesso em 25 de Maio de 2016.

BARBOSA, R. M., Contribuição do Mercado de Carbono para a Viabilidade de Projetos de Eficiência Energética Térmica e de Troca de Combustíveis em Cervejarias. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo 2010.

CASTRO, J. Engenharia Mecânica: Apostila de Refrigeração, Universidade Federal do Vale do Rio São Francisco, Petrolina , 2008.

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

JOHNSON CONTROLS. Treinamento de Operação e Manutenção de PAC. Núcleo de Estudos, São Paulo: [s.n.]. 2010. 191 p.

LEITE, A. A. F., OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A INDÚSTRIA: SETORES COM MAIOR POTENCIAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: SUMÁRIO EXECUTIVO. CNI, Brasília, 2010. 86p.

LÓPEZ, R. G., Frío Industrial 2 – Mantenimiento y servicios a la producción ciclos formativos de grado médio y superior. Espanha: Marcombo, 2005. 276 p.

MARTINELLI JUNIOR, L.C. Refrigeração. UNIJUÍ / UERGS DeTEC Departamento de Tecnologia, Panambi, 2003. 134p.

MAYEKAWA DO BRASIL REFRIGERAÇÃO. MYCOM – Unidade Compressora – Parafuso, Manual de operação e manutenção. Arujá, 2008.

MAYEKAWA MFG. CO. LTD. MYCOM Screw Performance Software V. 13.9ep. 2008.

MENDES, J. E. A. Eficiência Energética aplicada na indústria de bebidas em sistemas de refrigeração e ar comprimido – Estudo de casos. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

MESQUITA, R. P. Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de

Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

PILLIS, J., Screw Compressors Basics, YORK Refrigeration - Technical Description of FV19D - SABROE REFRIGERATION AB, Tradução e Adaptação da Engenharia de Aplicação da Divisão de Contrato YORK Refrigeration, Joinville, 2005.

PIRANI, M.J., Refrigeração e Ar Condicionado – Parte I Refrigeração. UFBA, Departamento de Engenharia Mecânica. Salvador, 2005.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). Dados da instituição, 2012. Disponível em www.eletrobras.gov.br/procel. Acesso em 15 de Abril de 2016.

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.

SANTOS, M.S.; RIBEIRO, F.M. Cervejas e refrigerantes. São Paulo, CETESB, 2005. 58 p.

SHEHATA, B. Refrigeration Optimization. Anheuser-Busch InBev. Nova York, 2009.

STOECKER, W.F., SAIZ JABARDO, J.M., Refrigeração Industrial. 2a Edição, Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2002.

TASSINI, J.O. Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial: Estudo de Caso. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005a. 316 p.

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial – Manual Prático. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005b. 75 p.

YORK REFRIGERATION. Treinamento em Refrigeração Industrial com Amônia. Joinville, 2008