

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**RENAN MARQUES LELO**

**ANÁLISE DE SISTEMA DE RESFRIAMENTO EM EMPRESA DE RERREFINO DE**  
**ÓLEO LUBRIFICANTE**

**Varginha**

**2020**

**RENAN MARQUES LELO**

**ANÁLISE DE SISTEMA DE RESFRIAMENTO EM EMPRESA DE RERREFINO DE  
ÓLEO LUBRIFICANTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - Unis como pré requisito para obtenção de grau de bacharel sob orientação do professor Doutor Luiz Carlos Vieira Guedes.

**Varginha**

**2020**

**RENAN MARQUES LELO**

**ANÁLISE DE SISTEMA DE RESFRIAMENTO EM EMPRESA DE RERREFINO DE  
ÓLEO LUBRIFICANTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - Unis como pré requisito para obtenção de grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

**Aprovado em:**     /     /

---

**Prof. Luiz Carlos Vieira Guedes**

---

**Prof.**

---

**Prof.**

**Observações:**

Dedico este trabalho à todos aqueles que contribuíram para sua realização, sendo eles meus familiares, amigos, colegas de curso e aos professores ao longo desta trajetória.

## RESUMO

Este trabalho mostra a realização de uma análise de um sistema de resfriamento em uma fábrica, onde possui ao longo do seu sistema, equipamentos e processos de produção fora de operação, com o intuito de apresentar uma otimização do sistema com uma possível desativação de uma das duas torres de resfriamento instaladas, visando redução de custo sobre o consumo de água e energia elétrica na empresa. Para isso foi coletado os dados de operação do processo produtivo, os dados dos equipamentos do sistema de resfriamento, e por meio destes dados, um breve cálculo de eficiência e de fluxo de calor para confirmação dos dados e em seguida a análise de viabilidade da possível otimização. Ao longo do desenvolvimento da coleta de dados, foi possível notar o superdimensionamento na parte de troca térmica, porém, na parte fluidomecânica as condições não permitiria uma desativação de um dos equipamentos, sendo apresentada ao final uma proposta onde poderia acontecer uma desativação de uma torre de resfriamento que também aumentaria o consumo de energia elétrica, tornando a otimização inviável.

**Palavras-chave:** Resfriamento. Torre de resfriamento. Transferência de calor. Sistema.

## **ABSTRACT**

*This work shows the performance of an analysis of a cooling system in a factory, where it has, throughout its system, equipment and production processes out of operation, in order to present an optimization of the system with a possible deactivation of one of the two cooling towers installed, aiming at cost reduction on water and electricity consumption in the company. For this, the operating data of the production process was collected, the data of the cooling system equipment, and through this data, a brief calculation of efficiency and heat flow to confirm the data and then the feasibility analysis of the possible optimization. Throughout the development of the data collection, it was possible to notice the over-dimensioning in the part of thermal exchange, however, in the fluid-mechanical part the conditions would not allow a deactivation of one of the equipment, being presented at the end a proposal where a deactivation of a tower could happen cooling system that would also increase electricity consumption, making optimization unfeasible.*

**Keywords:** *Cooling. Cooling tower. Heat transfer. System.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trocador de calor duplo tubo	15
Figura 2 - Trocador de calor serpentina	15
Figura 3 - Trocador de calor casco e tubo	16
Figura 4 - Torre de resfriamento Alpina	17
Figura 5 - Esquema de transferência de calor com transporte de massa	18
Figura 6 - Fluxo cruzado	19
Figura 7 - Fluxo contracorrente	19
Figura 8 - Esquema sistema de resfriamento parte 1	23
Figura 9 - Esquema sistema de resfriamento parte 2	24

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	21
Equação 2	21
Equação 3	27
Equação 4	27
Equação 5	28
Equação 6	28

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Definição de sistema</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Transferência de calor</b>	<b>11</b>
2.2.1 Condução	11
2.2.2 Convecção	12
2.2.3 Radiação	12
<b>2.3 Refrigeração industrial</b>	<b>12</b>
2.3.1 Resfriamento evaporativo	13
<b>2.4 Trocadores de calor</b>	<b>14</b>
2.4.1 Duplo tubo	14
2.4.2 Serpentina	15
2.4.3 Casco e tubo (Multitubular)	15
<b>2.5 Torre de resfriamento</b>	<b>16</b>
2.5.1 Princípio de funcionamento	17
2.5.2 Configuração de uma torre de resfriamento	18
2.5.3 Variáveis de uma torre de resfriamento	20
2.5.4 Efetividade	21
2.5.5 Vazão mássica	21
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Coleta de dados</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Cálculos de transferência de calor</b>	<b>27</b>
3.3.1 Cálculo da efetividade	27
3.3.2 Cálculo do fluxo de calor	28
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>29</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A área de utilidades em todos os ramos de indústrias tem obtido pouca atenção na hora de dimensionar e manter os equipamentos em funcionamento. Com os problemas sobre sustentabilidade e toda a economia de recursos por trás deste assunto, cada vez mais será necessário uma análise eficaz dos sistemas da área de utilidades. O setor de utilidades é composto por equipamentos que têm a função de manter um processo produtivo em funcionamento, sendo eles: caldeiras, fornos, compressores de ar e também torres de resfriamento.

Uma avaliação geral de um sistema de resfriamento é importante para apontar onde está ocorrendo as perdas de eficiência e também se existem equipamentos obsoletos no sistema fechado, uma vez em que, o sistema consome água, energia elétrica, produtos químicos para tratamento da água e há a necessidade de manutenção nos equipamentos.

O objetivo do trabalho é apresentar uma análise de um sistema de resfriamento em uma empresa de rerrefino de óleo lubrificante, onde se encontra um sistema com duas torres de resfriamento, trocadores de calor e bombas hidráulicas para a transferência da água para todo o sistema, visto que alguns dos processos produtivos foram desativados e o sistema não foi atualizado. Com intuito de otimizar o sistema de resfriamento e possivelmente desativar uma das torres de resfriamento, no trabalho será analisado as cargas térmicas envolvidas para o refino do óleo, onde há a necessidade do aquecimento e posteriormente o resfriamento do óleo lubrificante.

A execução deste trabalho será feita em etapas, sendo a primeira uma pesquisa bibliográfica sobre os meios de transferência de calor, funcionamento de torres de resfriamento e trocadores de calor, descrevendo os tipos dos equipamentos mais usados, suas tecnologias e principais aplicações. Em uma segunda etapa foi apresentado os dados operação do sistema em estudo, detalhando quais as características das torres de resfriamento, dos trocadores de calor e das bombas hidráulicas atuantes no sistema. Na terceira etapa, foram a realização dos cálculos de fluxo de calor e efetividade para confirmar todos os dados coletados posteriormente e uma análise final de todo o desenvolvimento do estudo.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Para entender os principais equipamentos e a área de estudo do assunto, será apresentado como referencial teórico uma breve definição sobre o que é sistema, transferência de calor com seus meios de transferência, a necessidade de refrigeração na indústria e também as configurações dos principais tipos de trocadores de calor junto a uma introdução sobre torre de resfriamento e suas variáveis.

### **2.1 Definição de sistema**

A definição de sistema é tudo aquilo que está em estudo, a delimitação do que será analisado. Na termodinâmica é considerado um sistema para poder obter o objetivo de uma análise. Tudo que está de forma externa ao sistema é chamado de vizinhança, que se diferencia do sistema por sua fronteira especificada. Existem dois principais tipos de sistemas, sendo o fechado e o isolado (MORAN; et al., 2005).

Para Schmidt, Henderson e Wolgemuth (1996) toda a energia introduzida ou retirada em um sistema termodinâmico, pode ser transferida por duas formas: como trabalho ou calor. Em um sistema onde existe a diferença de temperatura entre a vizinhança e o sistema, acontecerá o fenômeno de transferência de calor, de modo contrário, será como trabalho.

### **2.2 Transferência de calor**

De acordo com Qites e Lia (2020) a transferência de energia de um determinado local para outro, independente do material e estado físico, tendo como resultado uma diferença de temperatura é denominada transferência de calor. Também segundo Çengel e Ghajar (2012) transferência de calor é uma ciência que estuda a taxa de transferência de energia e que existem três mecanismos de transferência, sendo eles: Condução, Convecção e Radiação.

#### **2.2.1 Condução**

Para Qites e Lia (2020) o processo de transferência de energia de um corpo com temperatura mais alta para um corpo com temperatura mais baixa, através do contato físico, é denominada condução, podendo acontecer entre materiais sólidos, líquidos e gasosos. Visto

que Çengel e Ghajar (2012) diziam que em líquidos e gases a colisão desordenadas das moléculas permite a condução entre os mesmos, e em sólidos, a condução se dá por as vibrações das moléculas serem combinadas em rede, tendo a energia transportada por elétrons livre.

### 2.2.2 Convecção

Schmidt, Henderson e Wolgemuth (1996) afirmavam que se dá por convecção a transferência de energia entre um sólido e um fluido, combinando dois acontecimentos: a condução e o movimento de um fluido. Segundo Çengel e Ghajar (2012) o movimento do fluido é diretamente proporcional à taxa de transferência de calor.

### 2.2.3 Radiação

De acordo com Schmidt, Henderson e Wolgemuth (1996), qualquer material irá irradiar energia quando sua temperatura for maior que o zero absoluto, podendo ser transportada pelo tipo gás para superfície e do tipo superfície para superfície. Quites e Lia (2020) também afirmavam que a radiação térmica é feita sob ondas eletromagnéticas, a intensidade desta transferência irá depender apenas da temperatura do corpo de maior calor e da natureza da superfície do mesmo, tendo como exemplo a energia que o planeta Terra recebe do Sol (que está a mais de 5500 °C).

De forma resumida, Quites e Lia (2020) dizem que a condução e a radiação dependem de uma variação de temperatura para acontecerem, já a convecção precisa-se que se tenha variação de temperatura e transporte de massa. Os mecanismos de transferência se apresentam como:

- a) Condução: colisão entre as partículas;
- b) Radiação: ondas eletromagnéticas;
- c) Convecção: transferência de massa.

## 2.3 Refrigeração industrial

A refrigeração está presente na humanidade desde a necessidade de manter alimentos e bebidas em baixa temperatura, tanto para o correto consumo quanto para a conservação dos mesmos. A climatização de ambientes e de produtos medicinais também não ficam fora da necessidade de se manterem a temperatura abaixo da ambiente. Além disso, a refrigeração ou resfriamento está muito presente nas indústrias de qualquer setor de produção (SILVA, 2019).

Resumidamente Borgnakke e Sonntag (2012) explicam que a refrigeração promove uma transferência de energia térmica de um corpo com baixa temperatura para um corpo com alta temperatura por meio de fornecimento de trabalho.

O objetivo da refrigeração industrial é promover ou manter o resfriamento de um determinado produto abaixo da temperatura do ambiente exterior. Os fluidos atuantes em um sistema de resfriamento normalmente são: ar, água ou algum fluido refrigerante específico, os equipamentos que compõem o projeto serão os trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubulações e dispositivos para controle e medições das variáveis do processo (JABARDO; STOECKER, 2018).

Para uma substância passar do estado líquido para vapor (vaporização) ou de forma contrária, do estado de vapor para líquido (condensação), é necessário adicionar trabalho à substância, para que o mesmo ganhe calor, mantendo a pressão e a temperatura constante, este fenômeno é denominado como calor latente de vaporização ou condensação (MACINTYRE, 1997).

### 2.3.1 Resfriamento evaporativo

Resfriamento evaporativo consiste em reduzir a temperatura do ar por meio da evaporação adiabática da água, que acontece quando a água entra em contato com uma corrente de ar. A água que está a uma temperatura mais baixa que a do ar, se evapora quando recebe energia, reduzindo sua temperatura de bulbo seco e aumentando sua umidade. (ARAÚJO, 2016).

De acordo com Ferreira (2006) um exemplo simples de resfriamento evaporativo está no cotidiano das pessoas, o movimento rápido das mãos após uma lavagem promove uma sensação de frio, isso acontece por causa da evaporação dos respingos de água que estava na superfície das mãos durante a troca de calor com o ar em movimento.

## 2.4 Trocadores de calor

Trocador de calor é definido como um equipamento que permite a troca de calor entre dois líquidos de diferentes temperaturas em uma interface metálica. Trocadores de calor estão presentes em aparelhos do cotidiano como eletrônicos e eletrodomésticos, e também, em porte bem maior, nas indústrias químicas e siderúrgicas (MACINTYRE, 1997). Para Çengel e Ghajar (2012) os trocadores de calor atuam como facilitadores para a troca de calor entre dois fluidos, evitando que os mesmos se misturam entrando em contato físico.

Incropera et al (2008) afirmam que trocadores de calor são classificados de acordo com o tipo de construção e a configuração do escoamento. Na configuração mais simples os dois fluidos transitam no mesmo sentido (paralelo) ou em sentidos contrários (contracorrente) dentro de tubos concêntricos:

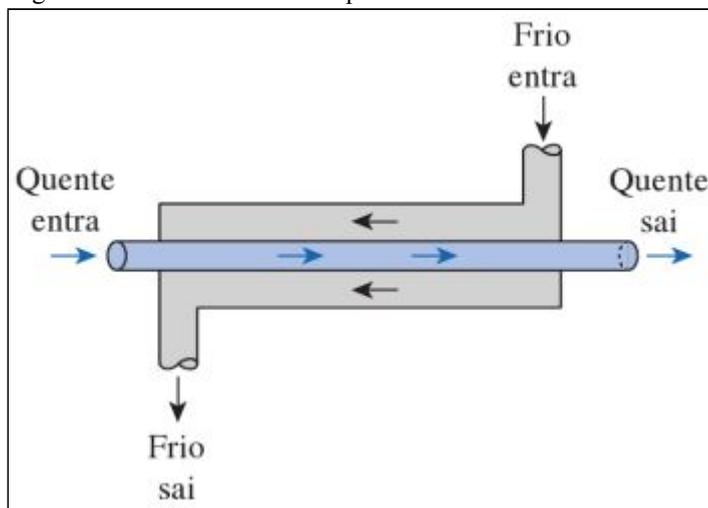
- a) Configuração paralelo: O fluido quente e frio passam pelo equipamento no mesmo sentido de fluxo, tendo suas entradas e saídas pelo mesma extremidade;
- b) Configuração contracorrente: O sentido dos dois fluidos são opostos, com as entradas e saídas do interior do equipamento em extremidades opostas.

Segundo Quites e Lia (2020) existem 3 principais tipos de trocadores de calor: duplo tubo, serpentina, e o multitubular.

### 2.4.1 Duplo tubo

Com dois tubos concêntricos este apresenta uma construção mais simples, sendo uma espécie de um tubo dentro de outro tubo maior. A área de troca de calor é a da superfície do tubo interior (QUITES; LIA, 2020).

Figura 1 - Trocador de calor duplo tubo

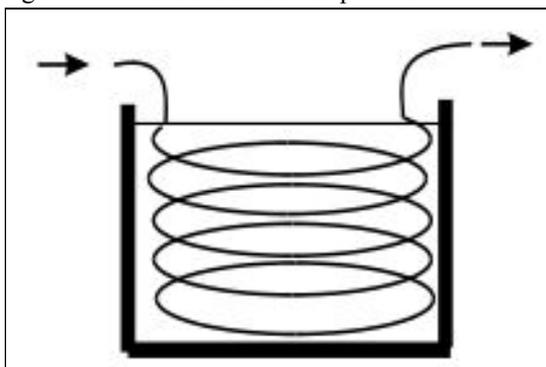


Fonte: (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 630).

#### 2.4.2 Serpentina

Um tubo enrolado em forma de serpentina é fixado em um recipiente que será preenchido com um fluido. A área de troca de calor é a área da serpentina. Mais usado para situações onde se deseja resfriar ou aquecer um banho (QUITES; LIA, 2020).

Figura 2 - Trocador de calor serpentina

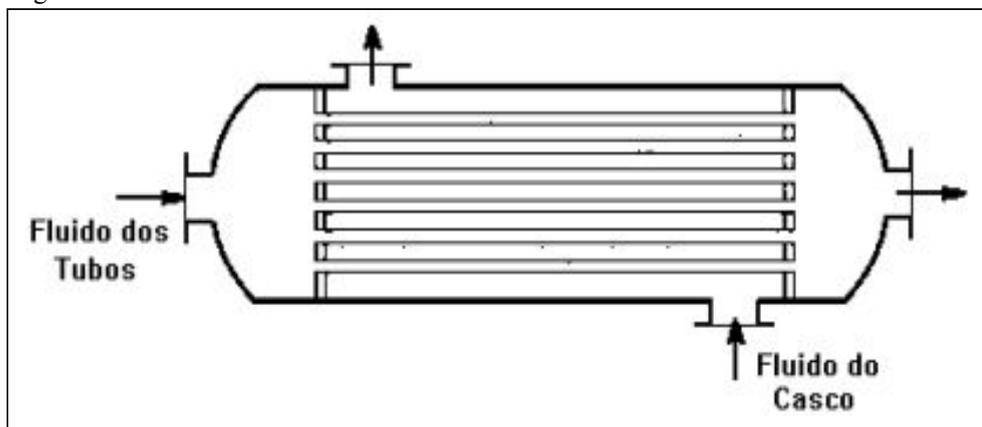


Fonte: (QUITES; LIA, 2020, p. 89).

#### 2.4.3 Casco e tubo (Multitubular)

Em um tubulão ou casco cilíndrico, são inseridos feixes de tubos paralelos, nesta configuração um dos fluido passa por dentro dos tubos internos e o outro fluido escoo pelo lado de fora dos tubos e dentro do casco. É o tipo construtivo mais usado nas indústrias por ter uma grande área de troca de calor (QUITES; LIA, 2020).

Figura 3 - Trocador de calor casco e tubo



Fonte: (QUITES; LIA, 2020, p. 89).

Segundo Incropera et al (2008) nesta configuração de trocador de calor pode-se instalar chicanas para melhorar a eficiência do equipamento, e também, aumentar o número de passes do fluido pelo casco e pelos tubos.

## 2.5 Torre de resfriamento

Basicamente em todas as operações industriais necessitam de resfriamento durante os processos de fabricação, incluindo máquinas, ambientes, produtos e também matéria prima. Quando se tem a necessidade de resfriar água, sem a intenção de chegar a condição de “água gelada”, é utilizado a torre de resfriamento (MACINTYRE, 1997).

De acordo com Cortinovis e Song (2020) um sistema de resfriamento com torres de resfriamento é uma ótima opção por reutilizar a água em um processo fechado, visto as questões econômicas e de escassez de água tratada. Ainda assim Oikawa (2012) explica que devido à evaporação, respingos e arraste, há perdas de água no sistema, devendo completar o nível de água para o nível adequado.

Figura 4 - Torre de resfriamento Alpina



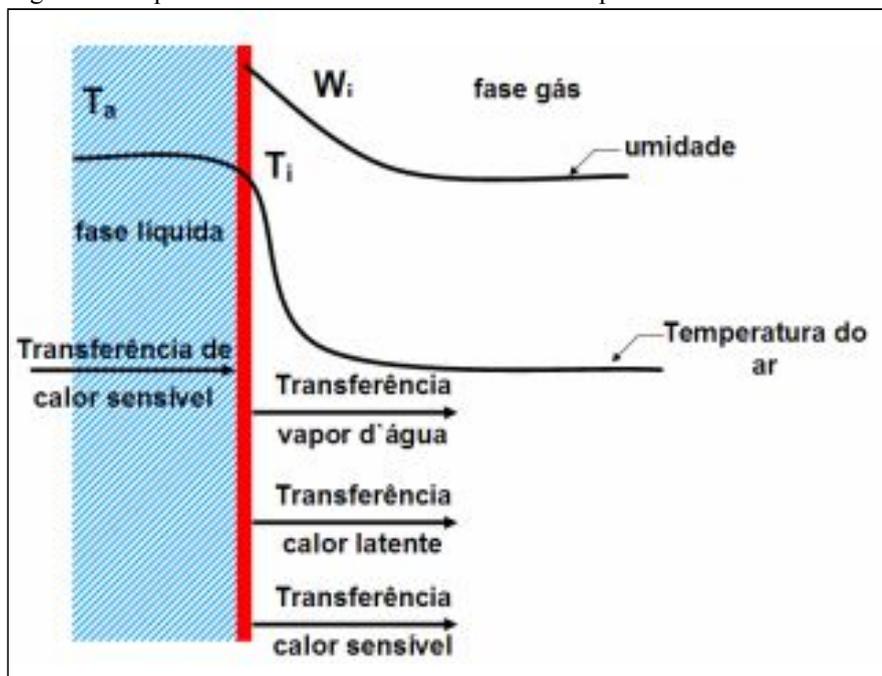
Fonte: (ALPINA, 2020).

Existem alguns tipos de torres de resfriamento baseando-se em quatro configurações: transferência de calor da água; fornecimento de ar; tipo de escoamento de ar em relação à água e a alimentação de água (JUNIOR, 2011).

### 2.5.1 Princípio de funcionamento

Existem duas formas de transferência de calor em um sistema de torre de resfriamento: por contato, sem transporte de massa, e a por evaporação, com transporte de massa. Na transferência por evaporação uma parte da água em circulação evapora, passando para o ar em forma de vapor de água. Assim se tem o resfriamento evaporativo, diminuindo a temperatura da água (OIKAWA, 2012).

Figura 5 - Esquema de transferência de calor com transporte de massa



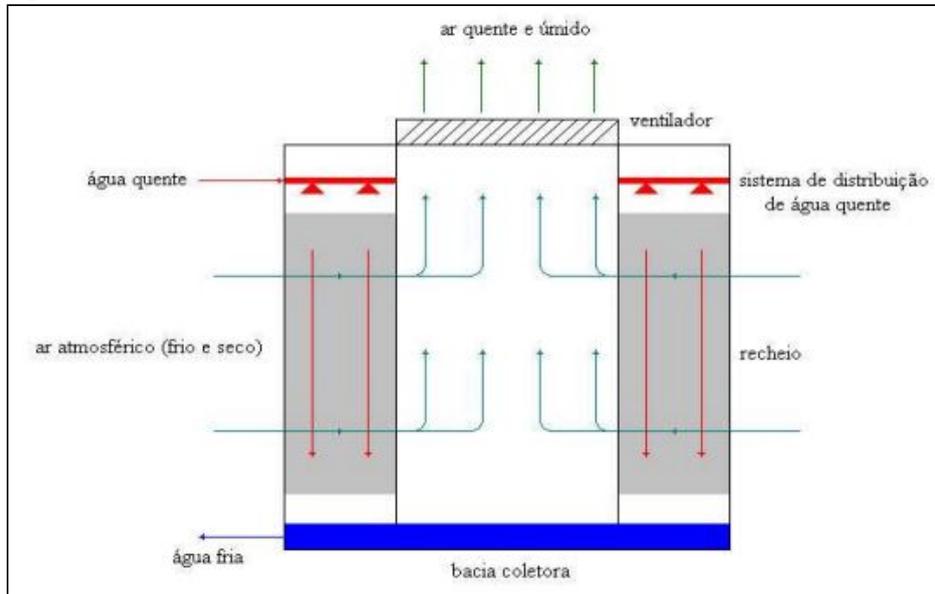
Fonte: (OIKAWA, 2012, p. 11).

O resfriamento acontece dessa forma por que a água precisa de calor latente para evaporar, que acaba sendo adquirido do próprio escoamento da água pela torre. Cerca de 80% do resfriamento da água acontece devido à evaporação da mesma, os outros 20% está ligado a diferença de temperatura entre o ar e a água (CORTINOVIS; SONG, 2020).

### 2.5.2 Configuração de uma torre de resfriamento

As torres de resfriamento apresentam três tipos de circulação de ar: circulação natural, circulação induzida e circulação forçada. Por ter uma distribuição mais uniforme do ar no interior do equipamento, obtendo assim uma melhor eficiência, as torres de tiragem induzida são mais utilizadas. São duas as configurações principais de escoamento de ar e água, sendo elas: escoamento em contracorrente e escoamento cruzado. No escoamento cruzado existe um ventilador na lateral do equipamento que cria um fluxo de ar forçado horizontalmente dentro da torre de resfriamento. A água cai por gravidade em cruzamento com o ar forçado dentro do equipamento (OIKAWA, 2012).

Figura 6 - Fluxo cruzado

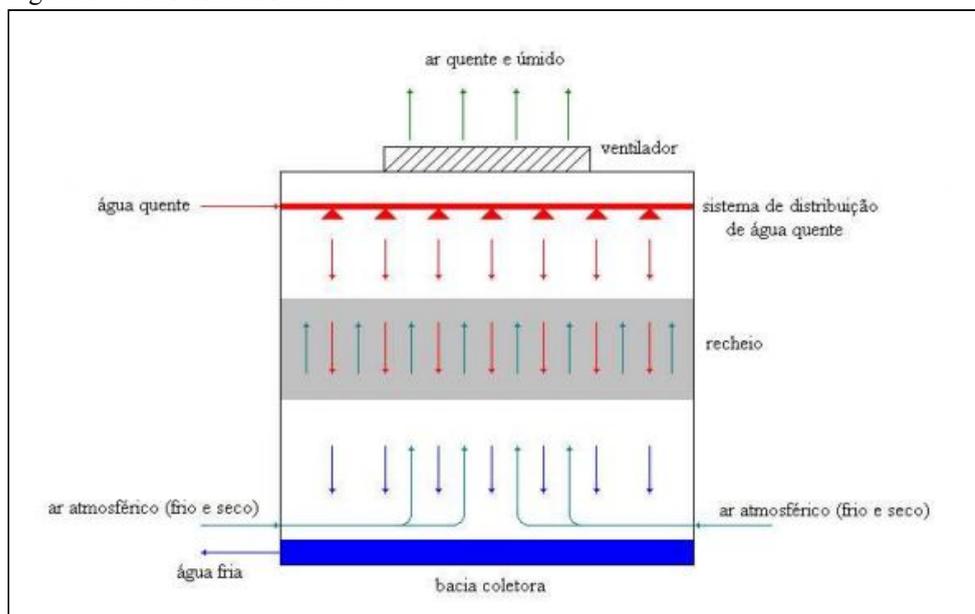


Fonte: (JUNIOR, 2011, p. 8).

As características desta configuração são: facilidade de acesso ao sistema de alimentação e distribuição de água, o recheio ocupa quase toda o interior da torre e baixa perda de carga do lado do ar (OIKAWA, 2012).

Na configuração em contracorrente o ventilador instalado na parte de cima da torre cria um movimento de ar vertical ascendente dentro do equipamento no sentido contrário a água (OIKAWA, 2012).

Figura 7 - Fluxo contracorrente



Fonte: (JUNIOR, 2011, p. 9).

Nesta configuração a água quente entra em contato com o ar úmido e a água fria com o ar mais seco, assim obtendo uma alta eficiência no resfriamento da água (OIKAWA, 2012).

Ainda na configuração das torres existe a purga, com o objetivo de retirar uma pequena quantidade de água do sistema para reduzir as concentrações de partículas sólidas na água para reduzir as incrustações nos equipamentos ao longo do sistema. Para repor a água perdida pelos possíveis vazamentos, arraste, evaporação e também pela purga, é instalado um sistema de reposição de água, que na maioria dos casos, a água é retirada direto da rede de saneamento básico (MELLO, 2008).

### 2.5.3 Variáveis de uma torre de resfriamento

Em relação às condições ambientais as variáveis que influenciam no desempenho e dimensionamento de uma torre de resfriamento não podem ser controladas, mas precisam ser conhecidas para uma melhor confiabilidade do sistema (OIKAWA, 2012). Também para Cortinovis e Song (2020) as condições do clima influenciam em um sistema, no verão a temperatura da água tende a ficar maior, e para continuar com a mesma temperatura de saída da água, pode-se aumentar a vazão de água na torre de resfriamento, já no inverno, poderá ser feito o contrário, diminuindo a vazão de água dentro do sistema.

Uma característica importante são as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco. Basicamente a temperatura de bulbo úmido é dada pelo bulbo de um termômetro envolto por um tecido úmido, quando uma pequena quantidade de água exposta a uma corrente de ar não saturada (CORTINOVIS; SONG, 2020). De forma simples a temperatura de bulbo seco é a medição da temperatura do ar com o bulbo do termômetro seco (JUNIOR, 2011).

A diferença de temperatura entre a água de entrada (água quente) e de saída (água fria) da torre de resfriamento é conhecida como *range*. Este dado varia de acordo com os processos da fábrica. A diferença da temperatura entre a água de saída da torre e a do bulbo úmido é o *approach*, que normalmente gira em torno de 5°C. Outra variável importante é a vazão de água das torres, que é basicamente junto ao *approach* e o *range* a variável mais importante no dimensionamento de uma torre de resfriamento (CORTINOVIS; SONG, 2020). Contudo, a carga térmica também é um dado essencial definida pelo processo de fabricação de uma fábrica em específico, de forma sucinta, ela é a capacidade de uma torre de resfriamento de

remover, por unidade de tempo, uma quantidade de calor da água durante o processo de resfriamento (JUNIOR, 2011).

#### 2.5.4 Efetividade

É a eficiência do resfriamento evaporativo que dá origem à eficiência térmica da torre de resfriamento, representada na equação abaixo:

$$E = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_{lim}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde  $T_e$  é a temperatura da água de entrada do equipamento (quente),  $T_s$  é a temperatura de saída da torre (fria) e  $T_{lim}$  é o limite da temperatura da água para o resfriamento evaporativo que é igual à temperatura de bulbo úmido (OLIVEIRA, 2009).

#### 2.5.5 Vazão mássica

Segundo Çengel e Ghajar (2012) uma quantidade de fluido que escoar em uma tubulação por unidade de tempo é denominado vazão mássica, o que permanece constante em um escoamento permanente. Nesta configuração, normalmente são desprezadas as questões de energia potencial e cinética, sendo assim, este fenômeno é representado na equação abaixo:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$Q$  = Carga térmica

$m$  = Vazão mássica

$C_p$  = Calor específico

$\Delta T$  = Variação de temperatura

Mais detalhadamente Çengel e Ghajar (2012) também definem a variável  $Q$  como sendo a taxa de fluido que foi transferido para dentro ou fora do sistema fechado.

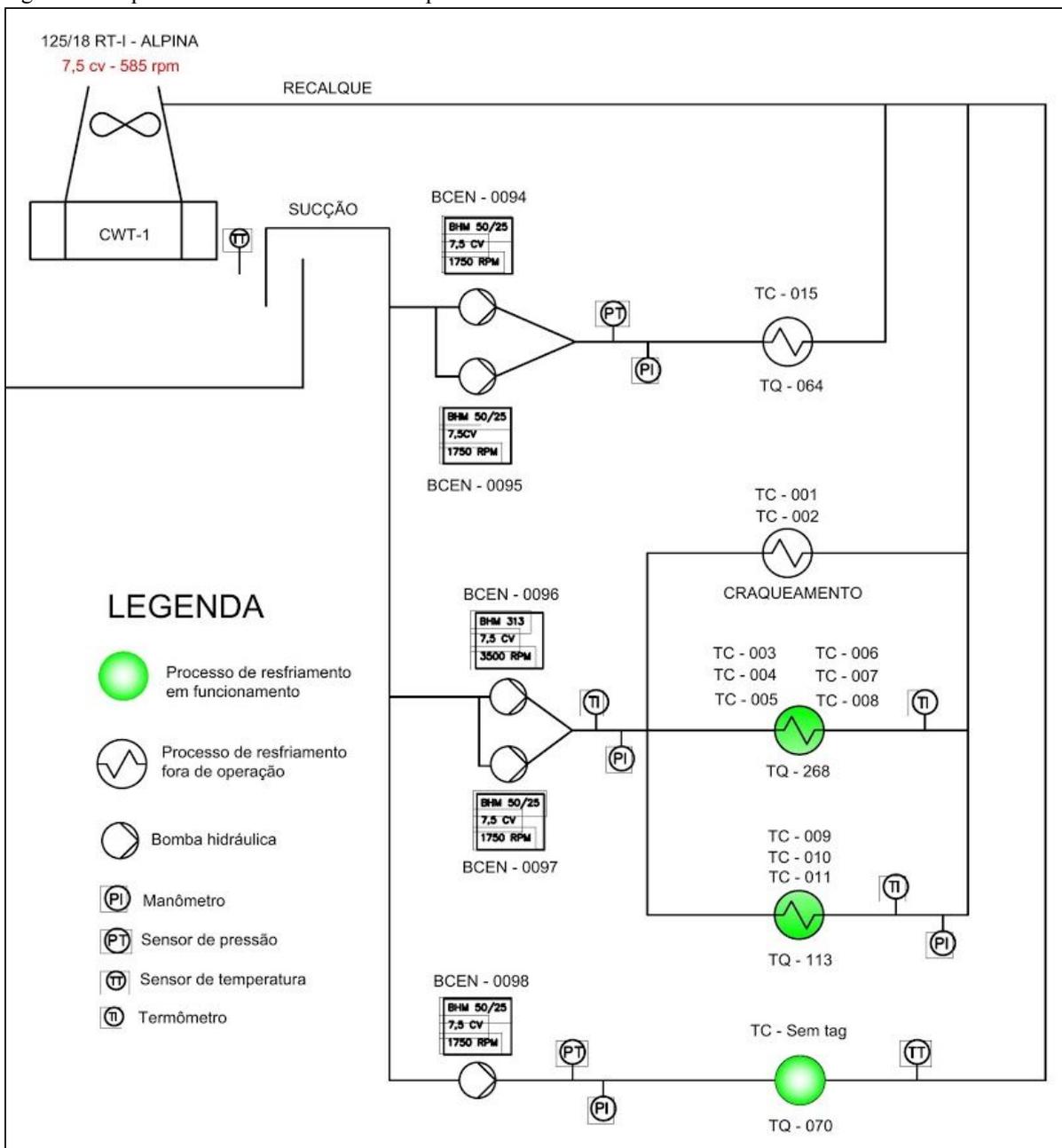
### **3 METODOLOGIA**

O estudo de caso foi desenvolvido de forma a conseguir o máximo de confiabilidade possível, dentro do ambiente fabril foi possível observar todo o sistema, confirmando os processos desativados e em funcionamento, bem como as temperaturas informadas ao longo do desenvolvimento do estudo.

#### **3.1 Coleta de dados**

O trabalho foi desenvolvido com foco na área de transferência de calor e termodinâmica. Foram coletados, primeiramente, dados em relação a estes assuntos no local, por arquivos no sistema da empresa, e também, direto com fornecedor. Sendo estudado de início, quais equipamentos estavam desligados no processo, no diagrama geral do sistema, foram marcados com a cor verde os processos produtivos em funcionamento. Abaixo é apresentado um esquema macro do sistema em duas partes, foi esquematizado as duas torres de resfriamento, os trocadores de calor, as bombas hidráulicas e os processos produtivos do sistema, com a linha de tubulação da água.

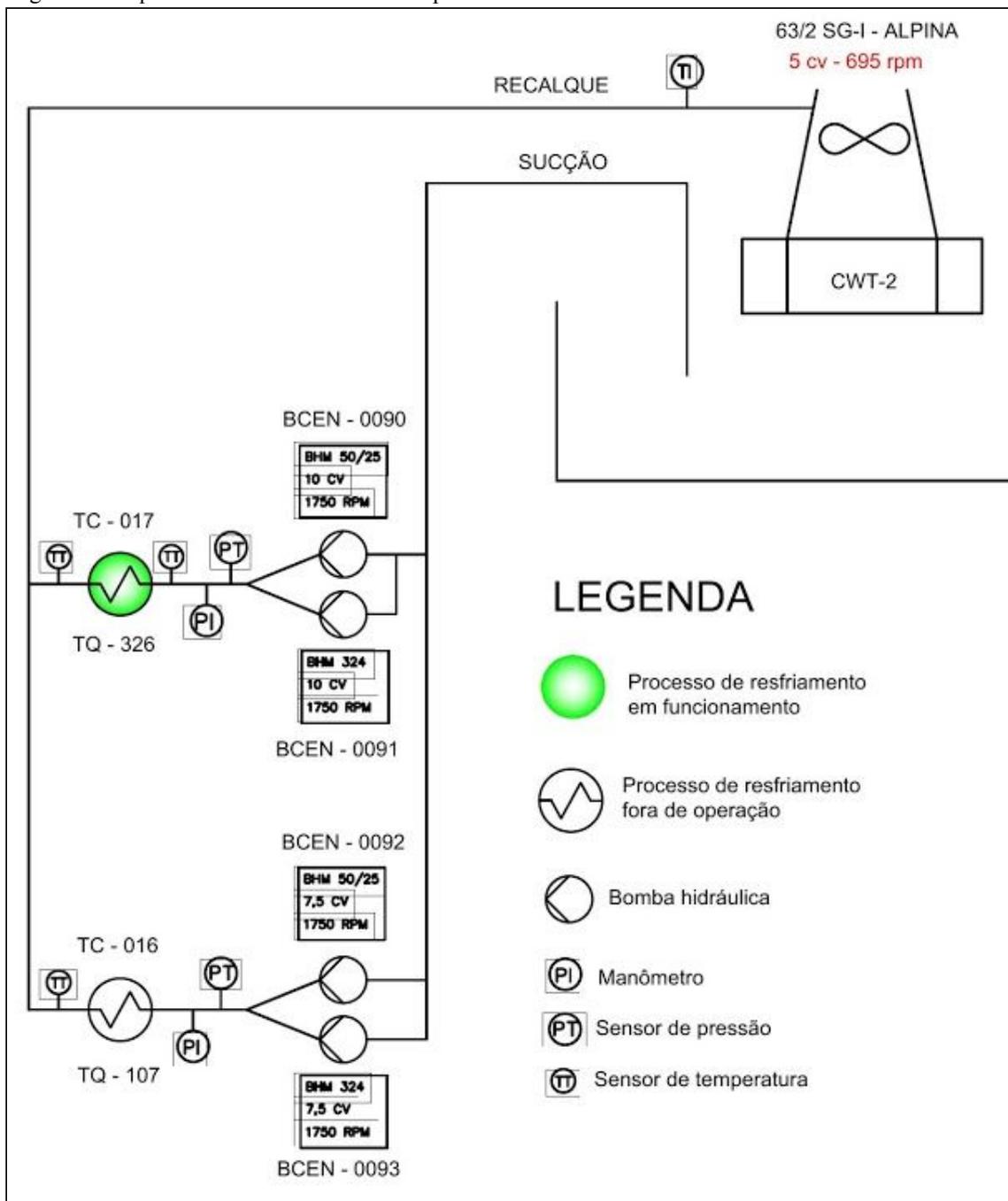
Figura 8 - Esquema sistema de resfriamento parte 1



Fonte: O autor.

A segunda parte do diagrama do sistema é apresentada abaixo:

Figura 9 - Esquema sistema de resfriamento parte 2



Fonte: O autor.

Por meio da conferência no local, foi possível obter as reais informações e dados, podendo ter com certeza quais equipamentos estão em funcionamento e quais estão desativados. Visto que são um total de 9 bombas hidráulicas e dentre elas 5 estão em operação e 4 estão inoperantes:

Quadro 1 - Dados das bombas hidráulicas

<b>Bombas</b>	<b>Funcionamento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>	<b>Potência (CV)</b>	<b>Torre interligada</b>
BCEN - 0090	Sim	BHM 50-25	95	10	AP-63/2-SG-I
BCEN - 0091		BHM 324	85	10	
BCEN - 0092	Não	BHM 50-25	62	7,5	
BCEN - 0093		BHM 324	95	7,5	
BCEN - 0094		BHM 50-25	62	7,5	
BCEN - 0095		BHM 50-25	62	7,5	
BCEN - 0096	Sim	BHM 313	30	7,5	AP-125/18-RT-I
BCEN - 0097		BHM 50-25	62	7,5	
BCEN - 0098		BHM 50-25	68	7,5	

Fonte: O autor.

Para os trocadores de calor se encontra um total de 15 equipamentos, sendo 11 em funcionamento e 4 fora de operação:

Quadro 2 - Dados dos trocadores de calor

<b>Trocadores de calor</b>	<b>Dimensão (m)</b>	<b>Operação</b>	<b>Trocadores de calor</b>	<b>Dimensão (m)</b>	<b>Operação</b>
TC - 001	3 x 0,270	Não	TC - 009	3 x 0,270	Sim
TC - 002	3 x 0,270		TC - 010	3 x 0,270	
TC - 003	3 x 0,270	Sim	TC - 011	3 x 0,270	
TC - 004	3 x 0,270		TC - 015	3,5 x 0,3	Não
TC - 005	3 x 0,270		TC - 016	3,5 x 0,6	
TC - 006	3 x 0,270		TC - 017	3,5 x 0,6	Sim
TC - 007	3 x 0,270		TC sem tag	3 x 0,7	
TC - 008	3 x 0,270				

Fonte: O autor.

Considerando cada processo de resfriamento que os equipamentos atuam, são 7 processos em tanques diferentes, sendo que 3 deles estão desativados, abaixo na tabela estão apenas os processos em funcionamento, contendo a carga térmica consumida de cada processo, a temperatura de entrada e saída do óleo no tanque onde acontecerá o resfriamento. Além de indicar as torres de resfriamento que atuam em cada processo, também foi acrescentado o tempo de resfriamento e o volume dos tanques.

Tabela 1 - Tabela de dados dos processos produtivos

<b>Processos de resfriamento</b>	<b>Carga térmica (Kcal/h)</b>	<b>Temp. entrada máxima (°C)</b>	<b>Temp. saída máxima (°C)</b>	<b>Tempo de resfriamento máximo (h)</b>	<b>Volume de óleo máximo (L)</b>	<b>Torre</b>
TQ - 268	136000	87,5	77	02:00	10.000	AP-63/2-
TQ - 113	204000	110	82,4	02:00	10.000	SG-I
TQ - 326	85200	145	126,2	00:45	10.000	AP-125/
TQ - 70	85000	140	127,5	02:00	10.000	18-RT-I

Fonte: O autor.

São duas torres de resfriamento de capacidades diferentes, os dados foram fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, abaixo a tabela com os principais dados:

Tabela 2 - Tabela de dados das torres de resfriamento

<b>Variáveis</b>	<b>Torre modelo AP-63/2-SG-I</b>	<b>Torre modelo AP-125/18-RT-I</b>
Capacidade de resfriamento (Kcal/h)	605.000	1.128.500
Vazão de projeto (m <sup>3</sup> /h)	110	185
Temperatura de entrada (°C)	35	34
Temperatura de saída (°C)	29,5	27,9
Temperatura de bulbo (°C)	24	24

Fonte: O autor.

O material da estrutura da torre é composto de poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV) e todas as partes metálicas são protegidas por meio de zincagem a fogo e revestimento a base de epóxi para o inibição da corrosão (ALPINA, 2020).

Os dados para análise do sistema foram coletados a partir de um sistema supervisor com sensores de temperatura, termômetros analógicos e termômetro à laser.

A partir dos dados coletados já pode se criar a hipótese que o sistema se encontra superdimensionado, visto que a soma das capacidades de resfriamento das torres é de 1.733.500 Kcal/h e o sistema consome um total de apenas 510.200 Kcal/h.

### 3.2 Cálculos de transferência de calor

Como visto no item 3.1 o sistema, de forma nominal, apresenta um suposto superdimensionamento, uma vez em que a somatória da capacidade de refrigeração das duas torres de resfriamento é maior que a somatória de carga térmica consumida pelo processo produtivo. Os cálculos apresentados será importante para comprovar os dados dos equipamentos e para que se possa realizar de fato uma análise e posteriormente a tentativa de otimização de todo o sistema, desativando a torre AP-63/2-SG-I.

#### 3.3.1 Cálculo da efetividade

Aplicando a equação apresentada no item 2.4.4 é visto que o sistema opera em uma boa condição de efetividade próximo à 60 %.

a) Torre de resfriamento AP-125/18-RT-I:

$$E = \frac{34 - 27,9}{34 - 24} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$E = 0,61$$

b) Torre de resfriamento AP-63/2-SG-I:

$$E = \frac{35 - 29,5}{35 - 24} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$E = 0,61$$

Ambos os equipamentos apresentaram uma efetividade de 61 %.

### 3.3.2 Cálculo do fluxo de calor

O cálculo de fluxo de calor foi realizado com o objetivo de confirmar os dados de carga térmica das torres de resfriamento informados pelo fornecedor:

a) Torre de resfriamento AP-125/18-RT-I:

$$Q = 185.1.(34 - 27,9) \quad \text{Eq. (5)}$$
$$Q = 1.128.500 \text{ Kcal/h}$$

b) Torre de resfriamento AP-63/2-SG-I:

$$Q = 110.1.(35 - 29,5) \quad \text{Eq. (6)}$$
$$Q = 605.000 \text{ Kcal/h}$$

Por meio dos cálculos pôde-se ter a confirmação de carga térmica dos equipamentos, podendo assim, analisar de forma sucinta os valores obtidos e estudar uma possível desativação da torre de resfriamento de menor capacidade.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados coletados e todos os cálculos realizados, em relação à transferência de calor, o sistema suportaria uma otimização. A melhoria sugerida inicialmente seria a desativação do equipamento de menor capacidade de resfriamento, a Torre AP 63/2 - SG-I, o que atenderia a demanda do processo de produção com uma certa folga, para que se caso alguma pequena carga térmica no sistema fosse introduzida no futuro. Abaixo é apresentado um resumo dos valores obtidos de carga térmica dos equipamentos:

Quadro 3 - Comparação de cargas térmicas

<b>Torre de resfriamento</b>	<b>Capacidade (Kcal/h)</b>	<b>Somatório de carga das duas torres (Kcal/h)</b>	<b>Processo</b>	<b>Carga do processo (Kcal/h)</b>	<b>Total de carga para cada torre (Kcal/h)</b>	<b>Somatório de carga do processo (Kcal/h)</b>
Torre 125/18 RT-I	1.128.500	1.733.500	TQ - 268	136.000	340.000	510.200
			TQ - 113	204.000		
Torre 63/2 SG-I	605.000		TQ - 326	85.200	170.200	
			TQ - 70	85.000		

Fonte: O autor.

Em relação à vazão do sistema, apenas uma torre de resfriamento não suportaria a demanda, visto que esta análise considera valores nominais para as vazões das bombas hidráulicas, uma vez em que na empresa em questão, não existe medidores portáteis de vazão.

Para avaliar a questão da vazão do sistema analisado, foi somado os valores da vazão nominal de cada bomba hidráulica em funcionamento para obter uma estimativa de vazão máxima do sistema, e como resultado se obteve um valor de 255 m<sup>3</sup>/h. Abaixo é apresentado uma tabela comparando os valores:

Quadro 4 - Dados das vazões nominais do sistema

<b>Bombas</b>	<b>Vazão (bomba)</b>	<b>Total (máximo)</b>	<b>Somatório da vazão (bombas)</b>	<b>Torre de resfriamento</b>	<b>Vazão máxima (torre)</b>	<b>Somatório da vazão (torres)</b>
BCEN - 0090	95 m <sup>3</sup> /h	95 m <sup>3</sup> /h	255 m <sup>3</sup> /h	AP-63/2-SG-I	110 m <sup>3</sup> /h	295 m <sup>3</sup> /h
BCEN - 0096	30 m <sup>3</sup> /h	160 m <sup>3</sup> /h		AP-125/18-RT-I	185 m <sup>3</sup> /h	
BCEN - 0097	62 m <sup>3</sup> /h					
BCEN - 0098	68 m <sup>3</sup> /h					

Fonte: O autor.

A solução indicada pelos fabricantes dos equipamentos (Alpina) para fazer a desativação da torre AP-63/2-SG-I, seria aumentar a potência do motor da torre AP 125/18 RT-I de 8 CV para um motor de potência igual a 20 CV, e trocando o modelo do ventilador atual, assim aumentaria a vazão de projeto de 185 m<sup>3</sup>/h para 255 m<sup>3</sup>/h aproximadamente, o que não seria viável, uma vez em que o consumo de energia elétrica iria aumentar ao invés de reduzir, o consumo de água não teria alterações e seria necessário adquirir o acionamento, junto às peças de reposição para o novo conjunto de equipamentos.

## 5 CONCLUSÃO

Considerando que na empresa em questão, processos produtivos foram desativados e que possui equipamentos desligados no seu sistema de resfriamento, as duas torres de resfriamento instaladas, não tiveram nenhum estudo que avaliasse as capacidades de carga térmica e também a demanda de resfriamento requerida pelo processo de produção. Ao realizar as coletas de dados de todo o sistema, foi observado uma grande diferença de carga térmica disponível entre o sistema de resfriamento e o da demanda do processo de rerrefino de óleo lubrificante.

O estudo realizado no trabalho mostrou que não basta apenas considerar uma área da tecnologia do sistema de resfriamento, que no caso foi a transferência de calor, mas também é necessário analisar todas as tecnologias envolvidas. Os dados apresentados e também os cálculos realizados mostram que o sistema está superdimensionado apenas na área de transferência de calor, o que permitiria uma otimização do mesmo. Com a otimização, o objetivo do estudo seria desativar uma das torres analisadas, assim reduzindo o consumo de energia elétrica, redução do consumo de água, e também redução de manutenções preventivas no equipamento, abrangendo um ganho financeiro e ambiental.

A falta de análise na parte de fluidomecânica possibilitou que não fosse considerado nos estudos a capacidade de vazão máxima de água das torres de resfriamento, o que poderia ter provocado um equívoco na proposta de melhoria que seria apresentado. Desativar um dos equipamentos, mesmo sendo o de menor capacidade, provocaria o subdimensionamento do sistema na questão de vazão, o que poderia provocar transbordo no equipamento e consequentemente não seria possível resfriar o óleo em produção, permitindo uma grande descontinuidade do processo.

Os objetivos do trabalho foram alcançados parcialmente, uma vez em que a análise foi feita e documentada, evidenciando as condições do sistema atual e mostrando a não viabilidade de otimização no momento. Para novos estudos é sugerido a análise de vazão de todo o sistema, considerando nas análises o volume da piscina de resfriamento, o volume de água para o resfriamento e a medição de vazão das torres de resfriamento e das bombas hidráulicas.

## REFERÊNCIAS

- ALPINA. **ALPINA - Torre de resfriamento de água série AP**. 2020. Disponível em: <https://www.alpinaequipamentos.com.br/produto/torres-de-resfriamento-de-agua/serie-ap/1>. Acesso em: Set. 2020.
- ARAÚJO, Ismael Nickson Pinto De. **Desenvolvimento de sistema auxiliar de resfriamento evaporativo, para arrefecimento de transformadores de força**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/8972/2/arquivototal.pdf>. Acesso em: Jun. 2020.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4. ed. Campinas: AMGH, 2012.
- CORTINOVIS, Giorgia Francine; SONG, Tah Wun. **Funcionamento de uma torre de resfriamento de água**. 2020. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf>. Acesso em: Jun. 2020.
- FERREIRA, Fernando S.; ALMEIDA, Flávio S. D. A.; MAFRA, Henrique T. **Análise do desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo e sua utilização integrada a um sistema de resfriamento convencional**. 2006. Monografia (Graduação) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/955/1/2006\\_Fernando\\_Fl%C3%A1vio\\_Henrique.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/955/1/2006_Fernando_Fl%C3%A1vio_Henrique.pdf). Acesso em: Jun. 2020.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JABARDO, José M. S.; STOECKER, Wilbert F. **Refrigeração Industrial**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.
- JUNIOR, Rafael Cândido De Lima. **Modelagem fenomenológica do desempenho de torres de resfriamento de água acopladas e estudo de casos**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26082011-141855/publico/Dissertacao\\_RAF\\_AEL\\_CANDIDO\\_DE\\_LIMA\\_JUNIOR.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26082011-141855/publico/Dissertacao_RAF_AEL_CANDIDO_DE_LIMA_JUNIOR.pdf). Acesso em: Jun. 2020.
- MACINTYRE, Archibald Joseph. **Equipamentos industriais e de processo**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- MELLO, Lilian Cardoso De. **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-07112008-140442/publico/DISSERTA>

CAO\_INFLUENCIA\_DAS\_VARIAVEIS\_DE\_PROCESSO\_NO\_DESEMPENHO\_DE\_TORRE\_DE\_RESFRIAMENTO.pdf. Acesso em: Out. 2020.

MORAN, Michael J. et al. **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos:** Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OIKAWA, Eduardo Hiroshi. **Avaliação de um sistema industrial de resfriamento de água.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em:  
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-16112012-114140/publico/DissertacaoEduardoHiroshiOikawa.pdf>. Acesso em: Jun. 2020.

OLIVEIRA, Andrezza Carolina Carneiro Tomás. **Análise de utilização de gargalos e fios de de garrafa PET como enchimento de torres de resfriamento.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2009. Disponível em:  
[https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5339/1/arquivo3891\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5339/1/arquivo3891_1.pdf). Acesso em: Out. 2020.

QUITES, Eduardo E. C.; LIA, Luiz R. B. **Introdução à transferência de calor.** São Paulo, 2020.

SCHMIDT, Frank W.; HENDERSON, Robert E.; WOLGEMUTH, Carl H. **Introdução às ciências térmicas:** Termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. 8. ed. São Paulo: Blucher, 1996.

SILVA, Jesue Graciliano Da. **Introdução a tecnologia da refrigeração e climatização.** 3. ed. Florianópolis: ArtLiber, 2019.