

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA – EEL/USP

AMANDA DIAS PELEGRIN

**Projeto de melhoria de um sistema de aquecimento de água usado na fabricação do  
fungicida Mancozebe**

Lorena  
2020

AMANDA DIAS PELEGRIN

**Projeto de melhoria de um sistema de aquecimento de água usado na fabricação  
do fungicida Mancozebe**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Escola de Engenharia de Lorena da Universidade  
de São Paulo como requisito parcial para  
conclusão da Graduação do curso de Engenharia  
Química

Orientador: Prof. MSc. Antonio Carlos da Silva

Lorena  
2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pelegrin, Amanda Dias

Projeto de melhoria de um sistema de aquecimento  
de água usado na fabricação do fungicida Mancozebe /  
Amanda Dias Pelegrin; orientador Antonio Carlos da  
Silva. - Lorena, 2020.

63 p.

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia  
Química - Escola de Engenharia de Lorena da  
Universidade de São Paulo. 2020

1. Fungicida. 2. Água aquecida. 3. Troca de  
calor. 4. Injetor de vapor. I. Título. II. da Silva,  
Antonio Carlos , orient.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais e irmã que sempre se fizeram presentes.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a todas as mulheres que vieram antes de mim e abriram o caminho para que hoje eu possa estar aqui.

Aos meus pais e minha irmã que sempre estiveram presentes e apoiaram o caminho que eu escolhi seguir.

A equipe da Corteva Agriscience sou bastante grata por todas às vezes que me prestaram auxílio, atenção e sobretudo os concelhos que me foram de grande valia durante o estágio.

Agradeço ao professor Carlão que com sua sabedoria e humanidade me ensinou muito mais do que química orgânica, e como última lição, me ensinou sobre a brevidade da vida.

Agradeço ao meu orientador, professor Antônio Carlos por todo o cuidado e atenção que dedicou ao me auxiliar nesse projeto.

Não poderia deixar de agradecer também a cidade de Lorena, que apesar de tudo, foi palco de grandes lições que levarei para a vida e foi também onde conheci vários amigos, pessoas que me inspiraram, criei e vivi muitas histórias.

## EPÍGRAFE

“Se pode olhar, vê. Se podes ver, repara.”

José Saramago

## RESUMO

PELEGRIN, A. D. **Projeto de melhoramento de um sistema de aquecimento de água usado na fabricação do fungicida Mancozebe.** 2020. 63 p. Monografia – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

O sistema de água aquecida é parte importante dentro do processo de fabricação do fungicida Mancozebe, fabricado pela empresa Corteva Agriscience na planta de Jacareí. O antigo sistema de aquecimento de água provocava danos ao interior do tanque devido a rápida formação de bolhas que se chocavam contra parede do tanque de aquecimento, o que era observado pelos ruídos emitidos pelo tanque e pelas inspeções internas realizadas pelo time de manutenção. Também era observado um grande volume de vapor que era lançado para fora do sistema pela linha de alívio do tanque que é atmosférico. O objetivo final desse trabalho foi melhorar o controle de temperatura da água quente que foi utilizada nas etapas de destilação dos reatores a partir da seleção de um novo sistema de aquecimento e implementação de um novo algoritmo para a automação do sistema. Para que esse trabalho fosse possível foi estudado em campo o comportamento do processo de aquecimento, foi avaliado a possibilidade de substituir o sistema antigo de aquecimento buscando informações na literatura e em fornecedores de equipamento de alternativas ao sistema existente. Foram estudadas as possibilidades de instalação de trocadores de calor, serpentina dentro do tanque, encamisar o tanque e, por fim, a instalação de injetores de vapor. Para melhorar o processo foi realizado a troca do sistema de aquecimento de água, que antes era feito pela injeção de vapor através de uma cruzeta perfurada na base do interior do tanque por um sistema com dois injetores de vapor levando em consideração principalmente o custo-benefício do novo sistema e o espaço requerido para essa instalação. Além da melhora do sistema pela instalação de dois injetores de vapor, foi implementado um novo algoritmo de funcionamento para o controle de temperatura. Para realização o projeto foram estudadas as condições para uma melhor troca de calor para realizar o aquecimento de água aproveitando o sistema disponível de vaso e bombas. Como resultado qualitativo, observamos a diminuição da vibração do tanque e da quantidade de vapor eliminado pela linha de alívio durante o aquecimento e como resultado quantitativo, tivemos a diminuição em 4% do tempo da etapa de destilação dos reatores.

Palavras-chave: fungicida, água aquecida, troca de calor, injetor de vapor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grupo ditiocarbamato, função orgânica que caracteriza o grupo de fungicidas alquilenobis.....	15
Figura 2 – Molécula de etilenobisditiocarbamato de zinco, princípio ativo do Mancozebe ....	15
Figura 3 – Reações desejáveis para a formação do EBDC (D-14).....	16
Figura 4 – Sistema de reator e condensador de produção de EBDC e recuperação de CS <sub>2</sub> .....	18
Figura 5 – Ilustração dos três tipos conhecidos de transferência de calor por condução, convecção e radiação .....	19
Figura 6 – Gráfico que da variação de condutividade térmica de alguns materiais em função da temperatura .....	20
Figura 7 – Gráfico que ilustra as propriedades de condutividade térmica de alguns gases, líquidos, sólidos não-metálicos, ligas e metais .....	21
Figura 8 – Exemplo de representação de movimento de vibração em átomos de um metal em um retículo .....	22
Figura 9 – Variação da condutividade térmica com a temperatura de fluidos para: (a) gases, (b) líquidos.....	23
Figura 10 – Distribuição de velocidade e temperatura para a transferência de calor por convecção em uma placa aquecida .....	25
Figura 11 – Intervalo de condutividade térmica efetiva para isolamentos típicos e ao lado, temperatura máxima de estabilidade do material.....	27
Figura 12 – Exemplo de perfil de transferência de calor através de três materiais diferentes em contato, e representação da analogia da transferência de calor e resistência elétrica. ....	28
Figura 13 – Exemplo de perfil de transferência de calor através de um sistema físico a direita, e representação da analogia da transferência de calor e resistência elétrica a esquerda.....	30
Figura 14 – Representação de um trocador de calor tipo regenerador. ....	31
Figura 15 – Representação de um trocador de calor tipo recuperador. ....	32
Figura 16 – Intervalo de condutividade térmica efetiva para isolamentos típicos e ao lado, temperatura máxima de estabilidade do material.....	33



Figura 17 – A esquerda observamos o perfil de temperatura de um trocador de calor de passagem única no qual a fase quente está sendo condensada e a direita, o perfil de um trocador de calor de passagem única onde a fase fria está sendo evaporada. Subscrito “h” representa a fase quente e subscrito “c” a fase fria.....	35
Figura 18 – Distribuição de calor em trocador de calor de contracorrente de passagem única	36
Figura 19 – Distribuição de calor em trocador de calor de correntes paralelas de passagem única.....	36
Figura 20 – Visão superior da descarga de um injetor de vapor em linha.....	38
Figura 21 – Ilustração do perfil de comportamento de um injetor de vapor com a mistura entre as duas fases e abaixo o perfil correspondente de pressão da água percorrendo o injetor de vapor .....	39
Figura 22 – Sistema de reposição e uso de água quente na planta .....	44
Figura 23 – Diagrama de blocos que mostra a sequência lógica da operação das válvulas de água quente e vapor durante a operação de ajuste da temperatura do tanque de água quente para a destilação, em azul no diagrama temos as condições e em branco as ações do algoritmo. ....	48
Figura 24 – Visão lateral do injetor de vapor IN25M do fornecedor Spirax Sarco para instalação do tanque de água quente.....	49
Figura 25 – Visão axial do injetor de vapor IN25M do fornecedor Spirax Sarco para instalação do tanque de água quente.....	50
Figura 26 – Ilustração do injetor de vapor IN25M do fornecedor Spirax Sarco para instalação do tanque de água quente.....	50
Figura 27 – Indicação do local de instalação de indicadores de pressão. ....	51
Figura 28 – Gráfico que relaciona volume e capacidade de aumento da temperatura de água dentro do tanque em relação a vazão de vapor injetado no tanque.....	53
Figura 29 – Croqui da instalação dos dois injetores dentro no tanque. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica de alguns metais sólidos não-metálicos, líquidos e gases a 300K (27°C).....	21
Tabela 2 – Coeficiente de transferência de calor por convecção livre e forçada de diferentes materiais.....	25
Tabela 3 – Coeficiente global de transferência de calor estimado para trocadores de calor tipo casco-tubo para trocas vapor-água.....	34
Tabela 4– Indicação das dimensões do injetor de vapor.....	50
Tabela 5 – Indicação de capacidade de injeção de vapor para tanques atmosféricos com até 3m de profundidade. ....	52
Tabela 6– Tabela de indicação da distância mínima entre a descarga do injetor modelo IN25M e a parede do vaso. ....	55
Tabela 7– Indicação dos custos de implementação do projeto .....	56

## LISTA DE ABREVIACES

CS <sub>2</sub>	Bissulfeto de carbono
EBDC	Etilenobisditiocarbamatos
EDA	Etilenodiamina
LMTD	Diferença de temperatura média logarítmica
NaOH	Hidróxido de sódio
PRL	Pressure relief line - Linha de alívio de pressão
SLF	Straight line filter - Filtro em linha
MnSO <sub>4</sub>	Sulfato de Manganês
ZnSO <sub>4</sub>	Sulfato de Zinco

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área
$\varepsilon$	Efetividade
$h_c$	Coeficiente médio de transferência de calor por condução
$k$	Coeficiente de transferência de calor condutivo
$L$	Espessura
$n$	concentração de moléculas
$P$	Pressão
$q_c$	Taxa de transferência de calor convecção
$q_{eq}$	Taxa de transferência de calor equivalente
$q_k$	Taxa de transferência de calor de condução
$q_r$	Taxa de transferência de calor de radiação
$R$	Constante da equação dos gases perfeitos
$U$	Coeficiente global de transferência de calor
$V$	Volume
$T$	Temperatura
$T_\infty$	Temperatura do meio onde está ocorrendo convecção
$T_f$	Temperatura da superfície fria
$T_q$	Temperatura da superfície quente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos .....	13
1.2	Justificativa .....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	Manzocebe .....	15
2.2	Transferência de calor.....	18
2.2.1	Condução .....	19
2.2.2	Convecção.....	23
2.2.3	Radiação.....	26
2.2.4	Isolamento Térmico .....	27
2.2.5	Resistência térmica e coeficiente global de calor .....	28
2.3	Trocadores de calor.....	30
2.3.1	Tipos de trocadores de calor .....	31
2.3.2	Coeficiente global de transferência de calor e a incrustação .....	33
2.3.3	Diferença de temperatura média logarítmica.....	34
2.3.4	Efetividade do trocador de calor e número de unidades de transferência de calor	37
2.3.5	Injetores de vapor.....	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
3.1	Método de Pesquisa .....	40
3.2	Coleta de Dados .....	40
3.3	Planejamento.....	40
3.4	Implementação .....	41
3.5	Comissionamento.....	41

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1	O Tanque.....	43
4.2	Escolha do método de aquecimento.....	44
4.3	Algoritmo de automação do tanque .....	45
4.4	Injetor de vapor .....	49
4.5	Escolha do injetor .....	51
4.6	A instalação do injetor .....	54
4.7	Comissionamento.....	55
4.8	Custos.....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em indústrias, energia é um tema antigo que permanece relevante e vem recebendo investimentos pela sua importância pois aumentar a eficiência desses sistemas pode gerar uma redução significativa dos custos de uma planta com utilidades, refletindo no custo final do produto e consequentemente nos lucros e competitividade de uma empresa frente ao mercado. Esse tema também é discutido na sociedade em metas de desenvolvimento sustentável, consumo e produção responsáveis como compromisso social e ambiental.

O uso de vapor d'água como forma de transporte de energia dentro de indústrias, é um método conhecido e consolidado e é também causa de grandes preocupações relativas à segurança dos processos e das pessoas. Existem diversos riscos envolvendo a utilização de vapor em processos industriais, os mais relevantes a esse estudo são os que envolvem a integridade mecânica devido a corrosão dos equipamentos que recebem e utilizam o vapor em seu processo e também os riscos quanto à energia na forma de calor que o vapor pode dispor ao processo, causando em um pior cenário um incidente de reatividade química.

Na planta de fabricação de Mancozebe da empresa Corteva Agriscience em Jacareí, utiliza-se vapor em diversas operações. Utiliza-se no aquecimento de equipamentos, na formação de vácuo em um sistema e, o objeto principal deste estudo, utiliza-se vapor no aquecimento da água de um tanque através da injeção direta por sua base, pelo intermédio de uma cruzeta metálica perfurada, o que atualmente foi modificado pelo projeto e é feito através da injeção a partir de dois injetores de vapor.

A água aquecida é utilizada em duas etapas diferentes do processo, na lavagem de sólidos em um filtro em linha, *straight line filter* (SLF), e para a destilação no reator. Para a lavagem de sólidos, o controle de temperatura não necessita ser preciso pois existe uma faixa de temperatura ideal para a lavagem, que está em torno de 45°C e é atingida pela mistura em linha de água quente, provida pelo tanque a ser estudado, com água bruta, a temperatura ambiente, controlados por transmissores de temperatura e fluxo, sendo que a variação da temperatura final não apresenta grandes preocupações a confiabilidade do processo. Já a temperatura da água que é usada no reator é de grande criticidade devido a fatores de segurança e confiabilidade do processo, e como a água quente proveniente do tanque não passa por nenhum outro processo de controle de temperatura até chegar ao reator, é de suma

importância que o controle no tanque seja bem feito e, por isso, essa etapa foi o objetivo final na qual a otimização da operação do tanque esteve focado.

Para a melhora do sistema, foram considerados algumas opções que foram abordadas nesse projeto, sendo elas, a instalação de trocadores de calor, instalação de serpentinas de vapor, instalação de uma camisa no tanque para a troca de calor e, por último, a opção escolhida, instalação de injetores de vapor.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um projeto para melhorar o controle de temperatura do tanque de água quente já existente na planta por meio de estudos de outras maneiras de aquecer a água e automatizar do sistema.

Os objetivos específicos foram:

- Automatizar a operação do tanque baseando-se na etapa do reator (local onde será utilizado a água quente);
- Diminuição as perdas do processo ligadas ao tempo de ajuste da temperatura da água do tanque;
- Identificação e avaliação os tipos de sistemas de aquecimento de água descritos na literatura e compará-los com base em suas vantagens, desvantagens e aplicações;
- Instalação de um novo sistema de aquecimento;
- Diminuir o consumo de vapor durante o aquecimento do tanque.

## 1.2 Justificativa

O tanque de água quente era aquecido, principalmente, pela injeção direta de vapor de baixa pressão através de uma cruzeta com furos na base do tanque. Parte desse vapor injetado era visivelmente desperdiçado pela linha de alívio de pressão, *pressure relief line* (PLR), pois não havia uma homogeneização eficiente do sistema para otimizar as trocas de calor com o meio. Além disso, a injeção direta de vapor causava cavitação da parede do tanque quando nela ocorria o choque das bolhas de vapor geradas pela rápida expansão da água, o que era percebido pelo barulho durante o aquecimento do tanque e pelo desgaste acelerado



observado durante manutenções periódicas. Desde 2013 até 2019, a empresa gastou em torno de 100 mil reais para realizar reparos no tanque, em especial para contornar os problemas de integridade mecânica causados por esse desgaste acelerado.

Outro problema encontrado era que o tanque recebia vapor condensado e pressurizado da camisa e eixo de dois outros equipamentos. Não há medições para registro do volume de condensado que chega no equipamento. Esse volume de condensado, quando drenado ao tanque, em pressão ambiente gerava um *flash* de vapor de água. Essa adição de calor ao tanque, elevava a temperatura e mantinha a água próxima a sua temperatura de ebulição pela maior parte do tempo, desperdiçando energia e dificultando o controle de temperatura.

Para que a água chegue à temperatura ideal para o uso no processo, 86°C, o controle da temperatura era feito a partir da entrada de água bruta que chega ao tanque a temperatura ambiente, e, para homogeneizar a temperatura, uma bomba era ligada em recirculação.

O controle da temperatura do processo era feito pelo operador, que tinha que estar disponível e atento às etapas do reator para gerenciar a operação do tanque controlar a temperatura ideal para o uso durante a destilação. A falta de automatização na etapa influenciava no aumento de tempo nos lotes dos reatores. Duas dificuldades enfrentadas nessa etapa eram as diferenças de tomada de decisão de cada operador para o controle de temperatura do reator e o acúmulo de atividades, que pode, por vezes atrasar o controle do tanque por o operador ter priorizado alguma outra atividade em sua área.

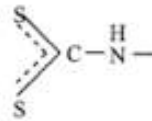
Implementar um novo sistema de aquecimento que tenha uma menor taxa de dano ao tanque e promova um melhor controle da temperatura gerou ganhos em diferentes esferas do processo. Instalar um novo modelo de aquecimento gerou reduções nos tempos de batelada do reator; diminuiu a agressão que o sistema de aquecimento sofre; gerou economia de vapor; diminuiu a carga de trabalho do operador; agilizou o processo de partida pós parada de manutenção por aquecer a água mais rapidamente. Desta forma, este trabalho buscou gerar melhorias para o processo de fabricação do fungicida Mancozebe, na planta em que a pesquisa foi realizada.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Manzocebe

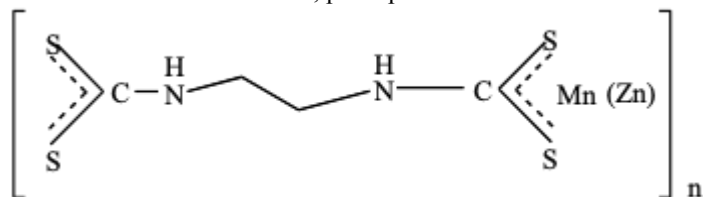
O Mancozebe é um fungicida/acaricida de contato multi-sítio do grupo alquilenobis (ditiocarbamato), representado na figura 1, produzido pela Corteva Agriscience que tem por princípio ativo a molécula Mancozeb, o etilenobisditiocarbamato de zinco, representado na figura 2. Ele é utilizado em diversas plantações, entre elas soja, feijão e café. (CORTEVA, 2019).

Figura 1 – Grupo ditiocarbamato, função orgânica que caracteriza o grupo de fungicidas alquilenobis



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 2 – Molécula de etilenobisditiocarbamato de zinco, princípio ativo do Mancozebe



Fonte: Corteva, 2010

O Mancozebe é vendido na forma de pó molhável, um pó amarelo que para aplicação deve ser disperso em diferentes proporções de água ou água e óleo com emulsificante dependendo da cultura, e aplicado por vias terrestres ou aéreas buscando uma cobertura completa e uniforme das plantas com diferentes intervalos de aplicação, novamente, dependendo da cultura, como descrito na bula do produto. (CORTEVA, 2019)

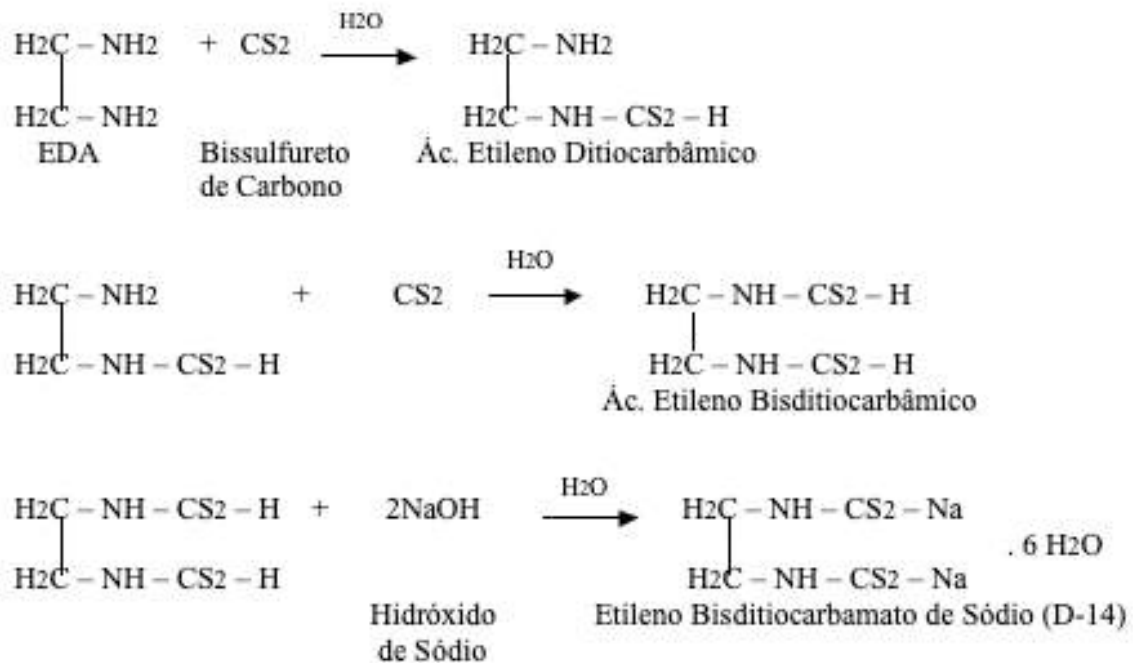
O Mancozebe é um sólido considerado estável, porém é combustível e deve ser mantido longe de umidade, calor ou chama. Ele pode causar irritação se tiver contato direto e

prolongado com a pele e moderada irritação aos olhos devendo ser manuseado sempre com EPIs. (CORTEVA, 2018)

É fungicida multi-sítio, que quando decomposto produz subprodutos fungi-tóxicos que interferem no metabolismo de fungos e acaricidas inibindo enzimas que contém o grupo sulfidrilos (-SH), atuando portanto, em seis processos bioquímicos diferentes dentro do citoplasma e mitocôndrias. (BALARDIN, 2017)

Mancozebe é produzido basicamente a partir da reação de três componentes, o hidróxido de sódio (NaOH), etilenodiamina (EDA) e o dissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>) formando Etileno Bisditiocarbamato de Sódio também chamado de D-14 como ilustra a figura 3, e posteriormente a essas reações, ocorre a precipitação da molécula com sulfato de manganês (MnSO<sub>4</sub>). (GULLINO et al., 2010)

Figura 3 – Reações desejáveis para a formação do D-14



Fonte: Corteva Agriscience, 2020

A reação da soda, EDA e CS<sub>2</sub> é uma reação exotérmica e acontece em duas etapas, primeiramente com a reação do CS<sub>2</sub> com EDA, e a posterior substituição do grupo (-H) pelo íon do Na<sup>+</sup>, formando D-14, que posteriormente, em outras etapas do processo que não são de interesse para esse estudo particular, é precipitado a molécula com sulfato de Manganês

( $\text{MnSO}_4$ ) e realizada a substituição de grupos de manganês por zinco, utilizando Sulfato de Zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ), para formar a molécula final de Mancozebe. (CORTEVA, 2012)

Após término da reação, temos ainda  $\text{CS}_2$  no reator, e que por razões de segurança de processo e redução de custo com matéria-prima, deve ser recuperado, e fazemos isso por destilação. (CORTEVA, 2020)

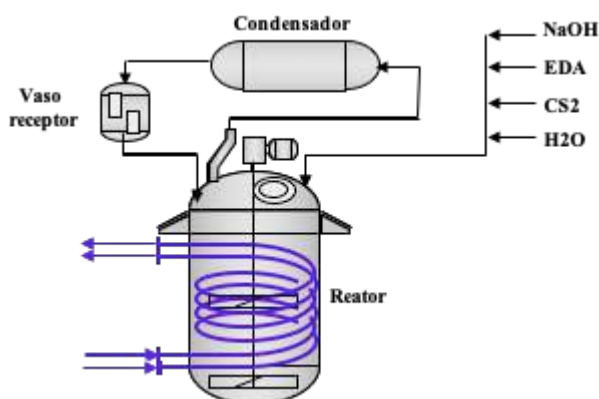
O  $\text{CS}_2$  é um líquido incolor a amarelo, inflamável e tóxico com cheiro característico de ovo podre, produz vapores irritantes e gases tóxicos. Seu limite inferior de inflamabilidade no ar é de 1,3% e superior, 50%. Algumas características importantes para o processo são:

- Ponto de ebulição:  $46,3^\circ\text{C}$
- Densidade relativa: 1,26 a  $20^\circ\text{C}$
- Temperatura de auto-ignição  $100^\circ\text{C}$  (CETESB, 2020)

Com esses dados, é conhecido que o  $\text{CS}_2$  é uma substância extremamente tóxica e inflamável. Durante a reação, deverá ser mantido a uma temperatura menor do que sua temperatura de ebulição para promover uma homogeneização do sistema, e o contato entre os reagentes. Após a reação, a densidade relativa da solução de maneb, resultado da reação do  $\text{CS}_2$ , EDA e NaOH, varia entre 1,28 e 1,30 devido a flutuações no processo e é imiscível com  $\text{CS}_2$ , portanto apresentando dentro do reator, duas fases. A maneira pela qual realizamos a separação das fases é através da destilação, pois a temperatura de ebulição do  $\text{CS}_2$  é de  $46^\circ\text{C}$ . Essa etapa é necessária para garantir a completa retirada do  $\text{CS}_2$  que pode causar distúrbios nas etapas seguintes do processo. (CORTEVA, 2012)

A separação de misturas através de uma separação térmica segue três etapas basicamente. Primeiramente a adição ou remoção de calor para gerar uma nova fase chamada fase auxiliar. Após a geração, existe a promoção de troca de massa e energia entre a fase auxiliar e as fases originais, sendo a fases originais uma fase única ou múltiplas fases, e, por último, após o equilíbrio ser restabelecido entre as fases, existe a separação entre elas o que promove a separação, mesmo que parcial da mistura original. (SATTLER, 1995) A separação do  $\text{CS}_2$ , não obstante, segue essas três etapas, primeiro injeta-se energia no sistema na forma de calor, ebule-se o  $\text{CS}_2$ , e retira-se calor do sistema, enviando o condensado para um vaso receptor.

Figura 4 – Sistema de reator e condensador de produção de EBDC e recuperação de CS<sub>2</sub>



Fonte: Corteva Agriscience, 2020

## 2.2 Transferência de calor

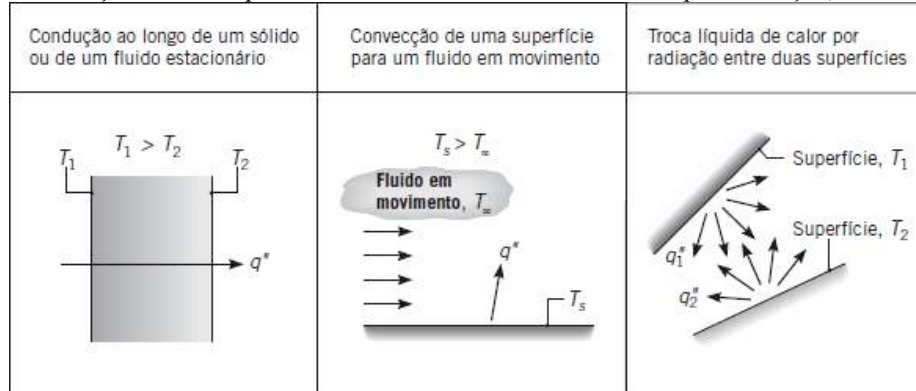
A Primeira Lei da Termodinâmica enuncia que a energia não pode ser criada ou destruída, apenas modificada. A Segunda Lei da Termodinâmica enuncia que o calor sempre flui de uma região mais quente para uma região mais fria, isso quer dizer que sempre que em um sistema fechado houver uma região com uma temperatura maior do que a temperatura de outra região, ocorrerá uma transferência de calor da região mais quente para a região mais fria, sendo que a energia total do sistema será conservada. Isso implica que todo o fluxo de calor é resultado de uma falta de equilíbrio de temperatura. (BORGNAKKE, 1998)

Um ponto deixado de lado pelos estudos da termodinâmica clássica é o tempo. Na termodinâmica leva-se em consideração as variáveis pressão, volume e temperatura deixando de lado as propriedades da matéria como o calor específico de uma substância, que nos informa sobre a taxa de transferência de calor (KREITH, F; BOHN, 2011). Essa propriedade da matéria que não é descrita no estudo clássico da termodinâmica imprescindível para o dimensionamento de equipamentos como caldeiras, trocadores de calor, aquecedores e todos os outros equipamentos que são aquecidos e refrigerados, como, no caso deste estudo, um sistema de aquecimento de água.

A transferência de calor é uma transmissão de energia através de um gradiente de temperatura. Essa transmissão pode ocorrer de três formas: Condução, Radiação e Convecção, sendo a última, uma operação que ocorre concomitantemente ao transporte de massa. As três

formas de transferência de calor podem ocorrer ao mesmo tempo. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

Figura 5 – Ilustração dos três tipos conhecidos de transferência de calor por condução, convecção e radiação



Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 2008)

### 2.2.1 Condução

A condução é uma forma de transferência de calor que exige o contato. Sempre que existir uma diferença de temperatura em materiais que estão em contato ocorrerá a condução, pois nesse caso a transferência ocorre entre partículas adjacentes (GREEN, D. W.; PERRY, 2007).

A taxa na qual a condução ocorre é proporcional a área através da qual ocorre a transferência de calor e também ao módulo da diferença de temperatura, ou seja, quanto maior for a diferença de temperatura, maior a taxa de condução de calor. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Um outro fator essencial para a taxa de transferência de calor é o material do qual é feito o meio onde essa transferência está acontecendo, pois, cada material transfere calor com uma taxa diferente. (KREITH, F; BOHN, 2011)

De acordo com Kreith e Bohn (2011) quantidade de calor transferida é proporcional a área ( $A$ ), e ao gradiente de temperatura em uma determinada espessura ( $\partial T / \partial x$ ), e para corrigir a taxa de transferência referente a cada material na equação de transferência de calor, representada na equação 1, temos o fator que representa a condutividade térmica ( $k$ ) que leva em consideração a velocidade pela qual o material transfere calor. Há também um sinal negativo para ajustar a equação e dar direção ao fluxo de calor, mantendo sempre a máxima de que o calor flui do local com maior temperatura em direção ao local com uma menor temperatura.

$$q_k = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Integrando a equação levando em consideração que a condutividade térmica é suficientemente estável para ser considerada constante, conforme a equação 2.

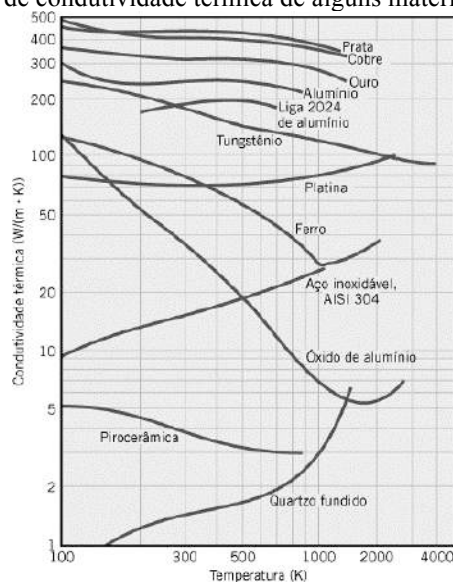
$$q_k = \frac{kA(T_q - T_f)}{L} \quad (2)$$

### 2.2.2.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica de cada material é medida experimentalmente, sendo que metais puros são melhores condutores, e no outro extremo, gases são melhores isolantes e em uma zona intermediária, estão os líquidos, ligas metálicas e outros materiais, como ilustrado na figura 7. (KREITH, F; BOHN, 2011)

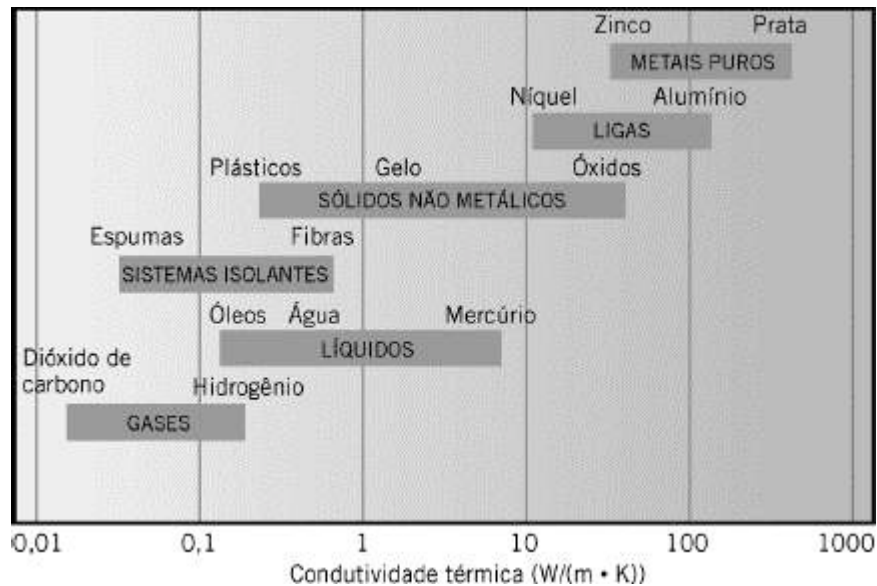
A condutividade térmica de um material varia com a temperatura, figura 6, porém, para o design de equipamentos ela deve ser considerada constante pois sua variação é suficientemente pequena para acarretar em um erro que pode ser desconsiderado desde que não haja troca de fases. Os valores dos coeficientes  $k$  medidos experimentalmente e tabulados podem ser encontrados na literatura para diversos materiais. (KREITH, F; BOHN, 2011) A Figura 6 e 7 e a Tabela 1 apresentam a relação da condutividade térmica de alguns materiais com a temperatura.

Figura 6 – Gráfico que da variação de condutividade térmica de alguns materiais em função da temperatura



Fonte: (CALLISTER, 2008)

Figura 7 – Gráfico que ilustra as propriedades de condutividade térmica de alguns gases, líquidos, sólidos não-metálicos, ligas e metais



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011)

Tabela 1 - Condutividade térmica de alguns metais sólidos não-metálicos, líquidos e gases a 300K (27°C)

Material	Condutividade térmica a 300 K ( $W/ m K$ )
Cobre	399
Alumínio	237
Aço-carbono, 1% C	43
Vidro	0,81
Plástico	0,2 - 0,3
Água	0,6
Etilenoglicol	0,26
Óleo de motor	0,215
Freon (líquido)	0,07
Hidrogênio	0,18
Ar	0,026

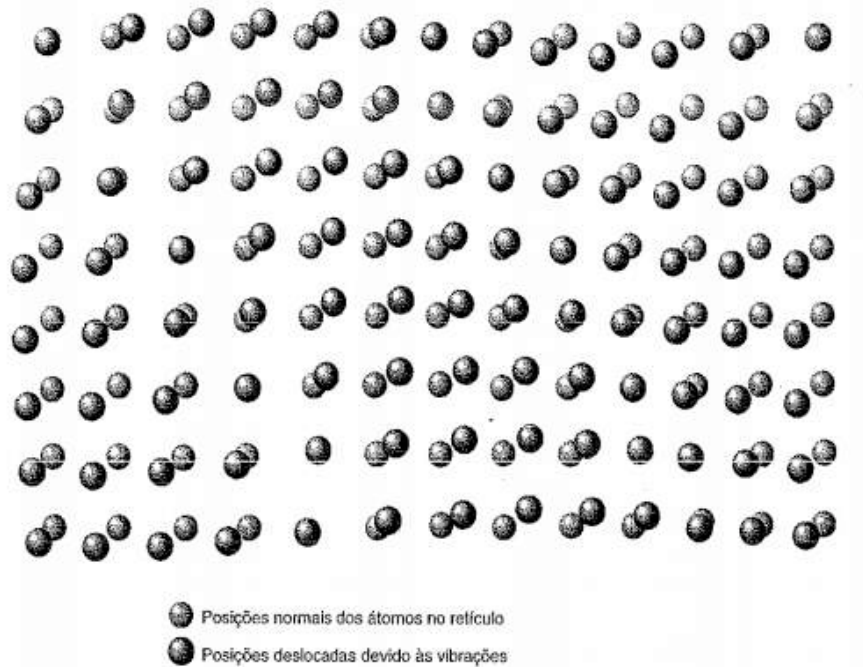
Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011)

De acordo com estudos da ciência dos materiais, os metais consistem de átomos arranjados em retículos cristalinos periódicos das quais elétrons circulam livres e a energia térmica flui por ele de duas maneiras principais quando falamos de condução, sendo elas, a vibração dos retículos e a migração dos elétrons livres. A primeira é a maior responsável pelo



aquecimento do material pois inclui todos os átomos do material, e a segunda parte dos elétrons, aqueles que estão livres. (CALLISTER, 2008)

Figura 8 – Exemplo de representação de movimento de vibração em átomos de um metal em um retículo



Fonte: (CALLISTER, 2008)

Já observando outras dinâmicas de interações moleculares, o mecanismo de condução de calor em gases leva em consideração a teoria cinética dos gases. Em uma explicação simplificada, quanto mais rápida o movimento das moléculas, mais rápido será o transporte de energia efetuado por elas, e quanto maior a pressão, maior o grau de agitação das moléculas. (BORGNAKKE, 1998)

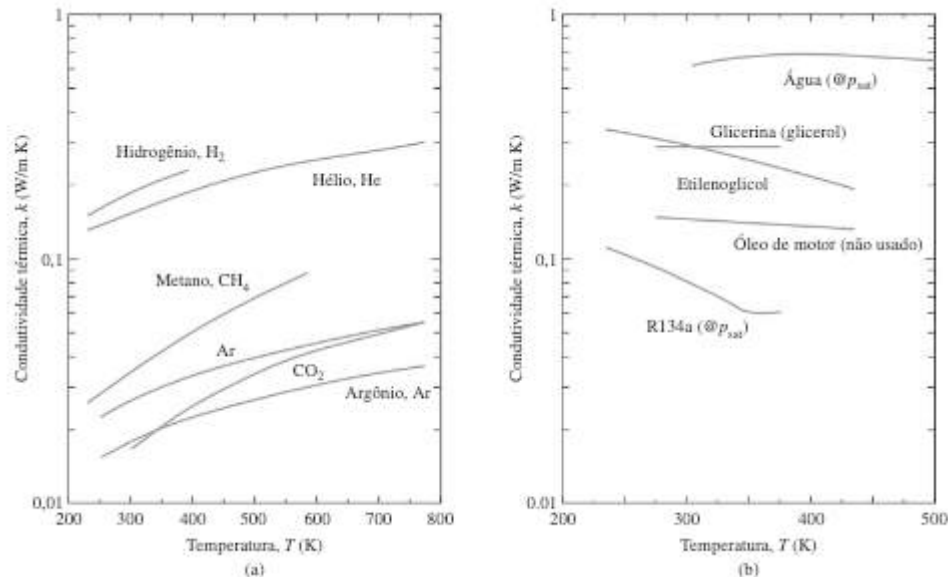
Quanto mais alta a temperatura de um sistema gasoso, maior a velocidade das moléculas se comparado a um sistema similar, com mesmo número de moléculas e uma temperatura mais baixa, e em 0K, a velocidade média das moléculas é nula. Quando em um sistema, as moléculas que estão em estado gasoso, com uma temperatura maior, e portanto maior velocidade, e se movimentam aleatoriamente, ao se chocarem, elas cedem parte de sua energia para a molécula que estava com uma velocidade relativa menor, transferindo energia na forma de velocidade, que num nível macroscópico se traduz em aumento de temperatura da molécula inicialmente com menor velocidade, e diminuição da temperatura da molécula que

estava inicialmente com maior velocidade. Isso acontece até o equilíbrio do sistema, se o sistema for alcançado (BORGNAKKE, 1998). Podemos notar essas relações entre as variáveis de pressão (P), temperatura, volume (V) e concentração de moléculas(n) pela equação geral dos gases perfeitos, corrigidos pelo fator R que nos dá uma ideia geral sobre a influência de algumas variáveis na temperatura, conforme equação 3.(BROWN, LEMAY,BURSTEN;2005)

$$PV=nRT \quad (3)$$

Sobre transporte de calor em líquidos, o mecanismo básico é semelhante ao modo em que gases transportam energia, porém uma concentração maior de moléculas dificulta o estudo de um único exemplar devido as interações e ligações fracas que existem entre elas, por isso a produção de um modelo teórico para prever o comportamento desse sistema seja muito complexo. A condutividade térmica de líquidos geralmente diminui a altas temperaturas, mas a água, uma substância com muitas pontes de hidrogênio, é uma exceção a regra, por exemplo. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Figura 9 – Variação da condutividade térmica com a temperatura de fluídos para: (a) gases, (b) líquidos



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011)

## 2.2.2 Convecção

A convecção é uma forma de transferência de calor que ocorre simultaneamente a transferência de massa, pois ao equalizar temperaturas, ocorrem movimentos macroscópicos das moléculas. (KREITH, F; BOHN, 2011). Ela também pode ser definida como uma transferência de energia térmica através da condução e radiação de um fluido em movimento. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

Existem basicamente dois tipos de convecção, a natural e a forçada. Na convecção natural nenhum fator externo, a exceção do calor, é imposto ao meio, podendo ser gerada por uma diferença de densidade, por exemplo. Já nos casos de convecção forçada, esse movimento pode ser gerado por movimentos induzidos, ocasionados por diferenças de pressão impostas ao sistema, ou por uma ventoinha, a título de exemplo. Para explicar a necessidade de se usar um coeficiente médio na fórmula, usaremos o exemplo da Fig.10. Quando muito perto da fonte quente, a viscosidade do fluido em contato com a superfície dificulta o movimento macroscópico das moléculas e observamos nessa interface a troca de calor condutiva. Quando mais afastada da superfície quente maior a liberdade das moléculas para se movimentarem, por isso, como temos velocidades diferentes de movimentação macroscópica na troca de calor, utilizamos uma média para estabelecer um coeficiente razoável para representar o todo quando estamos buscando uma maneira de estimar a taxa de troca de calor convectiva. (KREITH, F; BOHN, 2011)

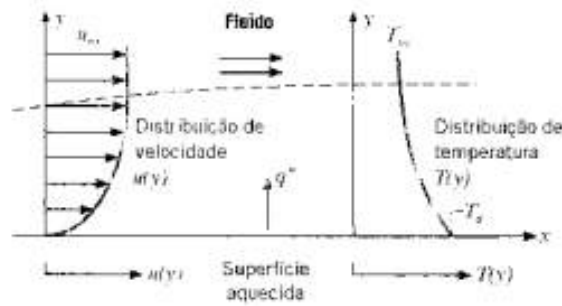
Para quantificar a transferência de calor causada pela convecção, é empregada a equação 4 que leva em consideração o coeficiente médio de transferência de calor por convecção ( $\bar{h}_c$ ). (KREITH, F; BOHN, 2011)

$$q_c = \bar{h}_c A (T_q - T_\infty) \quad (4)$$

Para explicar a necessidade de se usar um coeficiente médio na fórmula, usaremos o exemplo da Fig.10. Quando muito perto da fonte quente, a viscosidade do fluido em contato com a superfície dificulta o movimento macroscópico das moléculas e observamos nessa interface a troca de calor condutiva. O coeficiente de transferência de calor por convecção depende de vários fatores, como geometria da superfície, propriedades físicas do fluido, cinética e por isso, para simplificar os cálculos, utilizamos um valor médio. Quando mais afastada da superfície quente maior a liberdade das moléculas para se movimentarem, por isso, como temos velocidades diferentes de movimentação macroscópica na troca de calor,

utilizamos um coeficiente médio de transferência de calor para representar o todo quando estamos buscando uma maneira de estimar a taxa de troca de calor convectiva. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Figura 10 – Distribuição de velocidade e temperatura para a transferência de calor por convecção em uma placa aquecida



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

A taxa de transferência de calor por convecção pode ser calculada por uma relação que leva em consideração a área de transferência de calor, o gradiente de temperatura e o coeficiente médio de transferência de calor. Podemos encontrar alguns valores tabulados para  $\bar{h}_c$  na literatura.

Tabela 2 – Coeficiente de transferência de calor por convecção livre e forçada de diferentes materiais

Coeficiente de transferência de Calor por Convecção	
Fluido	W/m <sup>2</sup> K
Ar, convecção livre	6 - 30
Vapor ou ar superaquecidos, por convecção forçada	30 - 300
Óleo, convecção forçada	60 - 1800
Água, convecção forçada	300 - 18000
Água, em ebulição	3000 - 60000
Vapor, condensado	6000 - 120000

Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011)

### 2.2.3 Radiação

A radiação é um tipo de transferência de calor na qual a sua maior peculiaridade é o fato dela pode agir a distância e até mesmo ser propagada no vácuo. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

A quantidade de energia irradiada de uma superfície depende de dois fatores, da temperatura absoluta da temperatura da superfície que absorverá a energia. É ainda desconhecido os detalhes do mecanismo físico da radiação, vez é tratada como energia eletromagnética, vez é tratada como energia transportada por fótons, pois nenhum dos dois pontos de vista descrevem isoladamente o comportamento real da radiação de calor, sendo uma fonte de transmissão de calor que se propaga em diferentes meios, incluindo no vácuo. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Pode-se descrever a irradiação de um corpo ideal como aquela que absorve e emite a mesma quantidade de energia dependendo apenas da temperatura da matéria. Esse conceito é apenas um conceito teórico pois duas superfícies diferentes com a mesma temperatura podem ter diferentes emissividades, ou seja, a razão entre a quantidade de energia radiada por uma superfície real e um radiador ideal, aquele que irradia o total de energia disponível. Para calcular a quantidade total de energia irradiada por um corpo negro podemos fazer uso da equação 5.(KREITH, F; BOHN, 2011)

$$q_r = A_q \sigma T_q^4 \quad (5)$$

Nota-se que a transferência de calor leva em consideração dois corpos, e por isso a equação de transferência de calor por irradiação de um corpo negro para um segundo corpo negro, podemos calcular a quantidade de calor transmitida pela equação 6.(KREITH, F; BOHN, 2011)

$$q_r = A_q \sigma (T_q^4 - T_f^4) \quad (6)$$

Posto que o corpo negro, aquele que é considerado um radiador ideal, é um conceito puramente teórico, existem dados tabelados para um fator  $\mathcal{F}$  que corrige a emissividade dos corpos levando em consideração a geometria e emissividade. A equação 7 leva em consideração essas correções. (KREITH, F; BOHN, 2011)

$$q_r = A_q \mathcal{F}_{q-f} \sigma (T_q^4 - T_f^4) \quad (7)$$

#### 2.2.4 Isolamento Térmico

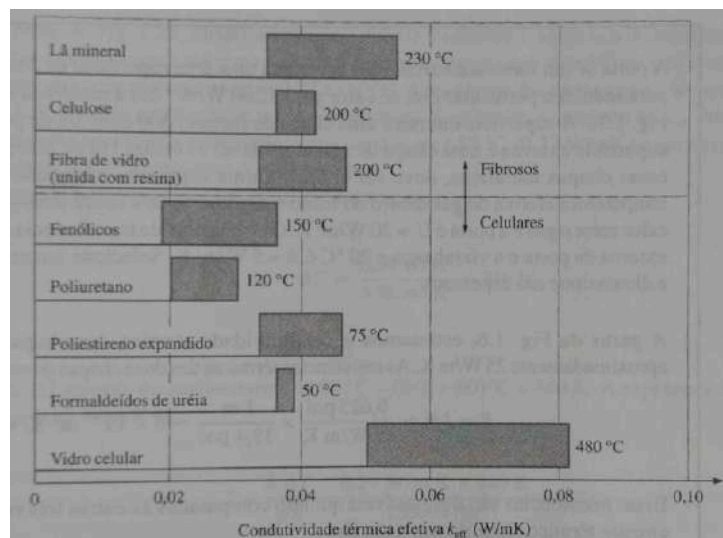
Além da condutividade térmica ser algo desejável na indústria, o extremo oposto também é muito valorizado. Existem diversas situações na qual o uso de materiais ou métodos para o isolamento térmico são essenciais.

Os isolantes térmicos são materiais utilizados para evitar a perda de calor do meio para o ambiente e também como proteção para pessoas, evitando que a superfície quente ou fria esteja em contato direto com os trabalhadores.

Algumas propriedades desejáveis aos isolantes térmicos, além de obviamente a baixa taxa de transporte de calor, é a estabilidade química, o limite superior de temperatura para a integridade do material ser adequada, rigidez, disponibilidade e custo devem ser considerados na escolha de um isolante térmico. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Para isolamento de calor, no geral, para trocadores de calor, são utilizados materiais com pequenas partículas sólidas nas quais o ar é aprisionado, usando da propriedade de baixa condutividade dos gases para diminuir a transferência de calor entre o equipamento e o meio. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Figura 11 – Intervalo de condutividade térmica efetiva para isolamentos típicos e ao lado, temperatura máxima de estabilidade do material.

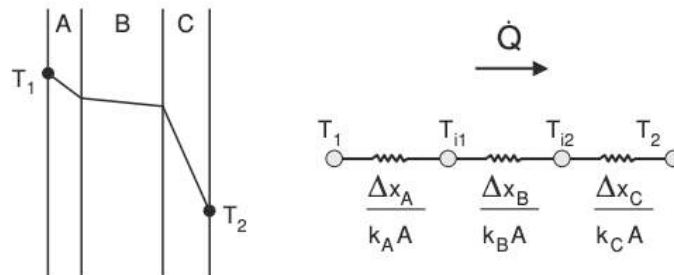


Fonte (KREITH, F; BOHN, 2011)

### 2.2.5 Resistência térmica e coeficiente global de calor

Sobre os estudos de caso, nos três tipos de transferência de calor, podemos simplificar os cálculos tratando as resistências térmicas de maneira semelhante a resistência elétrica. Quando materiais diferentes estão em perfeito contato em placas paralelas, por exemplo, podemos calcular a quantidade de calor transferido por eles da mesma maneira que calculamos a resistência elétrica de um circuito, ou seja, se as placas estão paralelas uma à outra, e temos uma transferência de calor normal a elas, se de um lado da placa temos uma temperatura, e do outro, uma temperatura diferente, é possível calcular a quantidade de calor transferida somando as resistências térmicas de cada placa como se fosse uma resistência elétrica em série, logicamente, o calor fluindo do lado de maior temperatura para o de menor temperatura como na Fig. 12.(GREEN, D. W.; PERRY, 2007).

Figura 12 – Exemplo de perfil de transferência de calor através de três materiais diferentes em contato, e representação da analogia da transferência de calor e resistência elétrica.



Fonte: (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

O interessante sobre esse método é que podemos rearranjar as equações de transferência de calor condutiva, convectiva e radiativa de modo a calcular separadamente a resistência térmica de cada meio e soma-las como no exemplo da figura 13, que inclui a previsão até da ocorrência de dois tipos de transferência de calor ocorrendo paralelamente. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007).

Para que o método seja aplicado, primeiramente devemos colocar as equações de transferência de calor no formato da equação 8 que fala sobre a taxa global de transferência de calor.

$$q_{eq} = \frac{(T_q - T_f)}{R_{eq}} \quad (8)$$

Primeiramente, comparando a equação 2 (equação da transferência de calor condutiva) a equação 9, temos a equação rearranjada.

$$q_k = \frac{kA}{L} (T_q - T_f) \quad (9)$$

Podemos chegar a conclusão que a equação que representa a resistência condutiva é a equação 10.

$$R_k = \frac{L}{kA} \quad (10)$$

Para a equação 3, chegamos a conclusão que a resistência térmica pode ser relacionada como a equação 11.

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c A} \quad (11)$$

Sobre a equação 6, que diz respeito a radiação térmica, realizando uma comparação com a equação 7, temos a equação 12.

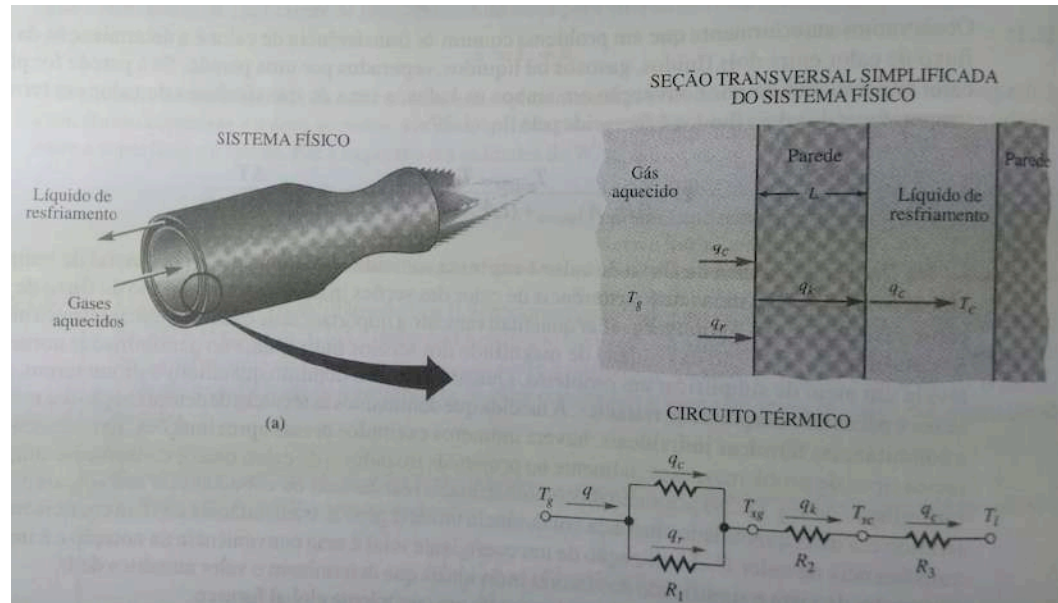
$$q_r = A_q \mathcal{F}_{q-f} \sigma (T_q^4 - T_f^4) = \frac{(T_q - T_f)}{R_r} \quad (12)$$

A partir da equação 12, observa-se que a reatividade pode ser escrita na forma da equação 13.

$$R_r = \frac{(T_q - T_f)}{A_q \mathcal{F}_{q-f} \sigma (T_q^4 - T_f^4)} \quad (13)$$



Figura 13 – Exemplo de perfil de transferência de calor através de um sistema físico a direita, e representação da analogia da transferência de calor e resistência elétrica a esquerda.



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011)

Dito isso, sabendo que é possível simplificar os cálculos das resistências de transferência de calor individuais, é interessante para um projeto de equipamentos de transferência de calor, dar ainda um próximo passo para a simplificação do processo. Através de manipulações algébricas, criar uma equação simples e universal que pode ser utilizada para o cálculo de trocadores de calor. Por isso foi criado o conceito de coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ). (WALAS, 2004; GREEN, D. W.; PERRY, 2007; KREITH, F; BOHN, 2011) Utilizamos esse coeficiente na equação 14.

$$q = U A \Delta T \quad (14)$$

Sendo que  $U$  se relaciona com a resistência térmica pela equação 15.

$$U A = \frac{1}{R_{eq}} \quad (15)$$

### 2.3 Trocadores de calor

Trocadores de calor são dispositivos que utilizam das propriedades de transferência de calor discutidas no capítulo passado para aquecer ou resfriar um sistema ou substância, geralmente utilizando fluidos. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

### 2.3.1 Tipos de trocadores de calor

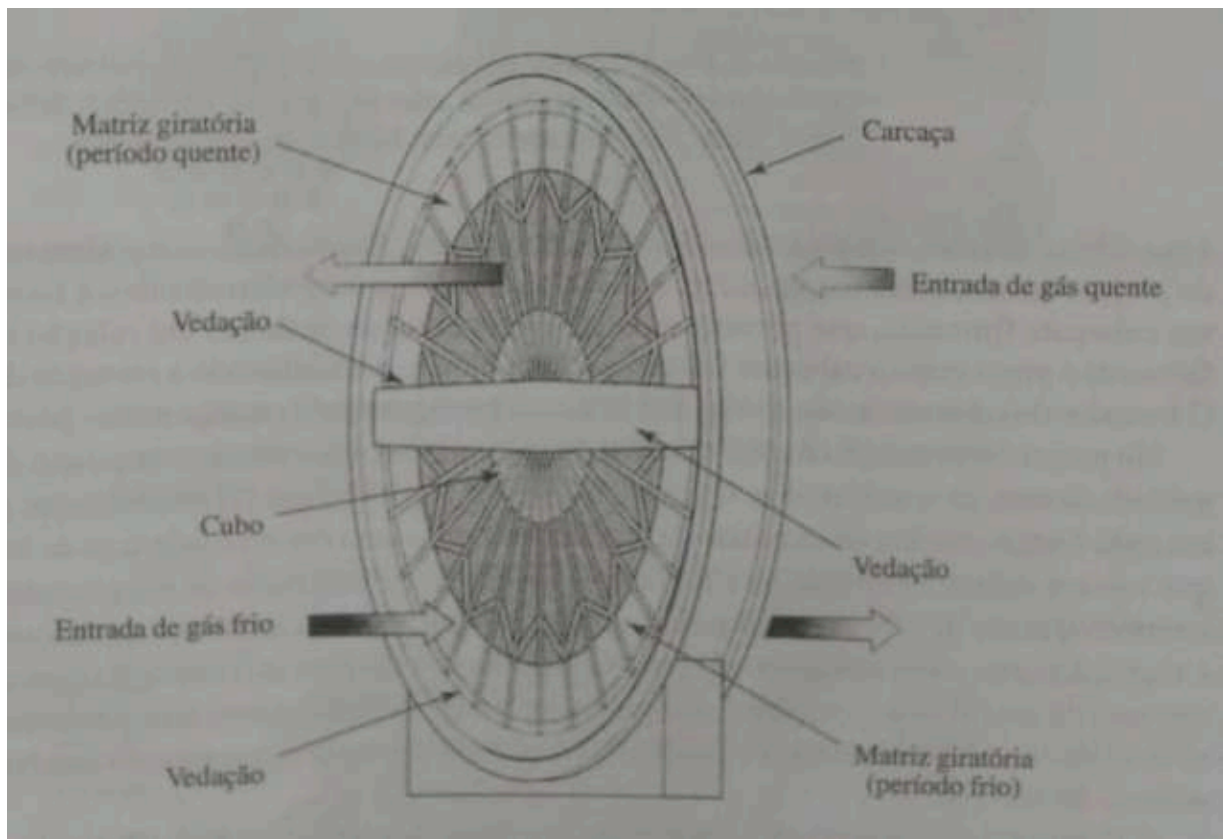
Os trocadores mais utilizados na indústria para aquecimento de líquidos são os tipo casco-tubo, entretanto existem vários tipos de trocadores classificados em três grupos básicos: recuperadores, regeneradores e trocadores de calor de contato direto. Os trocadores do tipo recuperadores são aqueles nos quais os fluidos quente e frio são separados por uma parede e fluem ao mesmo tempo transferindo calor por convecção para a parede e condução para o fluido, isso ao mesmo tempo, são desse tipo, os trocadores tipo casco-tubo. Os trocadores de calor tipo regeneradores fluem um fluido quente por uma matriz que é aquecida, e logo após, passam um fluido frio que é aquecido, isso ocorre alternadamente sendo a matriz local de armazenamento de energia térmica, esse tipo de trocador é usado geralmente para aquecimento de gases e um dos desafios de sua utilização é evitar vazamentos entre os fluidos quentes e frios a pressões elevadas. Por último, temos os trocadores de calor de contato direto, que como a própria classificação diz, colocam os fluidos quente e frio em contato direto são exemplificados pelas torres de refrigeração de gases. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Os trocadores de calor tipo regeneradores são utilizados normalmente para aquecimento de gases. A principal preocupação nesse método é evitar o vazamento entre os fluidos a pressões elevadas. (KREITH, F; BOHN, 2011)

Quando falamos de trocadores de calor tipo casco-tubo, representado como exemplo na figura 15, temos de ter cuidado com os gradientes de temperatura, pois eles podem causar danos de integridade mecânica aos trocadores de calor por causa da tensão gerada pela expansão térmica dos tubos e carcaças. (WALAS, 2004)

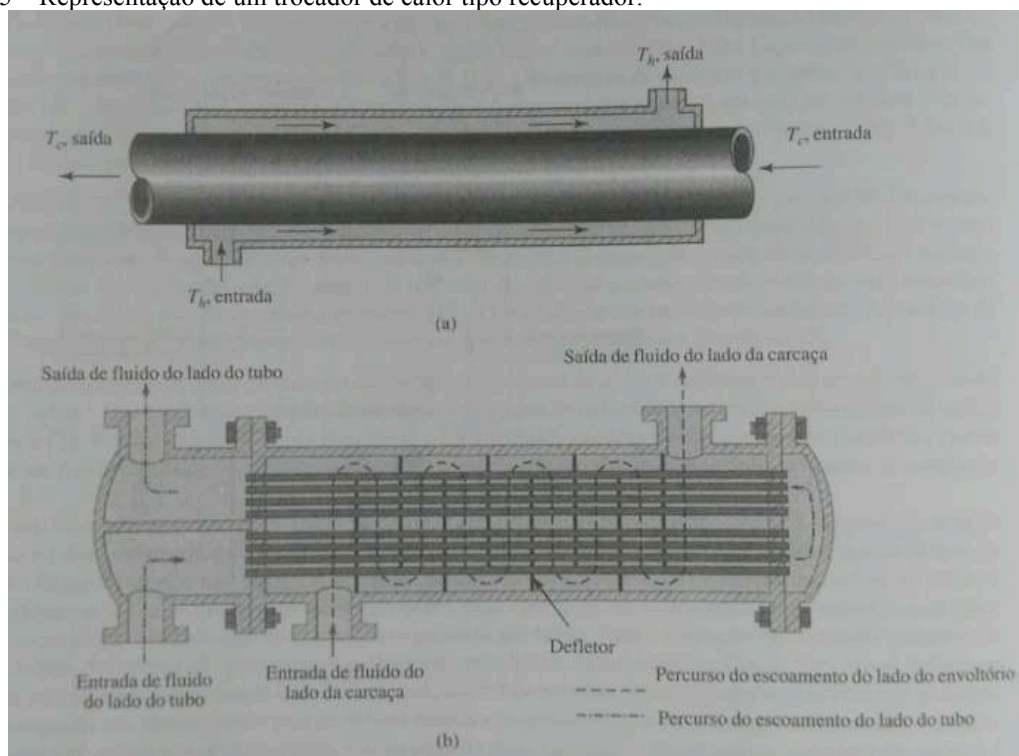
Quando se menciona trocadores de calor de contato direto, um bom exemplo utilizado na indústria são as torres de refrigeração, que utilizam o ar para diminuir a temperatura da água, por exemplo. Outro exemplo, são os lavadores de gases, que utilizam água para retirar material particulado, e que também diminuem a temperatura dos gases que estão sendo eliminados do processo. (WALAS, 2004)

Figura 14 – Representação de um trocador de calor tipo regenerador.



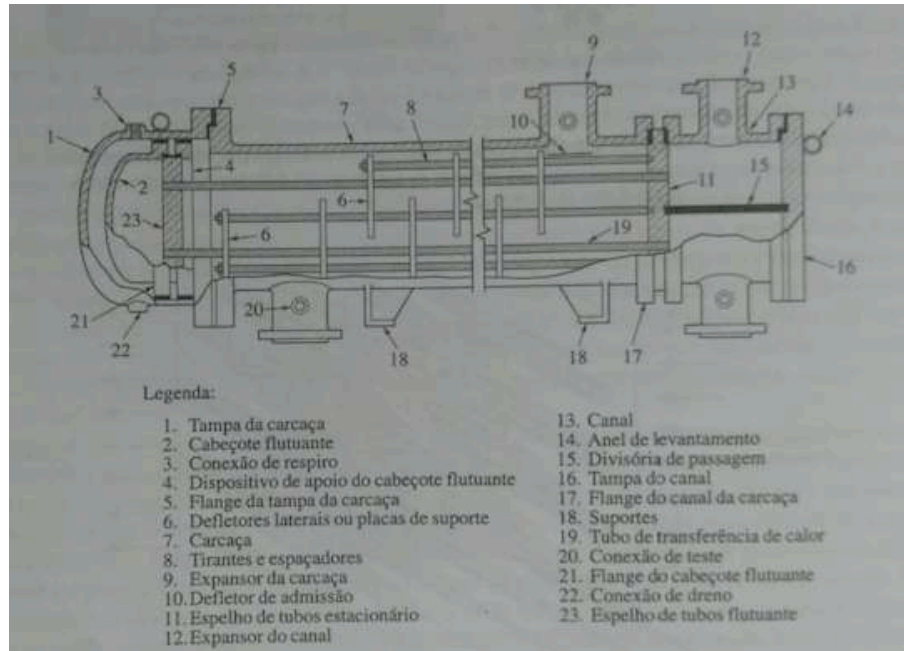
Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

Figura 15 – Representação de um trocador de calor tipo recuperador.



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

Figura 16 – Intervalo de condutividade térmica efetiva para isolamentos típicos e ao lado, temperatura máxima de estabilidade do material.



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

### 2.3.2 Coeficiente global de transferência de calor e a incrustação

A troca de calor leva em consideração a área total de transferência de calor disponível no equipamento, o coeficiente de troca térmica de cada material envolvido e a diferença entre as temperaturas dos fluidos quente e frio. Neste capítulo, falaremos mais sobre o coeficiente global de transferência de calor.

O coeficiente global de transferência de calor em um trocador de calor não é um fator permanente. Embora para quando fabricado e testado o trocador de calor tenha uma eficiência adequada ao processo, o material de construção seja conhecido e o material que irá percorrer o interior do equipamento, tanto fluido quente quanto frio seja conhecido, um dos problemas mais recorrentes e conhecidos quando lidamos com trocadores de calor são as incrustações formadas no interior do trocador de calor. A resistência térmica do equipamento pode ser aumentada devido a essas incrustações que tem origem em diversos fatores como corrosão, depósito de sais, e até mesmo decomposição dos fluidos que ocupam o seu interior durante a operação. (KREITH, F; BOHN, 2011; WALAS, 2004)

É possível, a partir de testes e análises, saber a resistência térmica oferecida pelo depósito, mas a grande dificuldade ao lidar com as incrustações é o fator tempo, pois é difícil quantificar ao longo do tempo a quantidade de material que incrusta no equipamento para realizar os cálculos de troca de calor da maneira exata, sendo que a diminuição da eficiência de um trocador de calor é prevista, na maioria das vezes empiricamente. Um dos problemas enfrentado, portanto é a sub ou sobre dimensão do equipamento pois no início da operação, quando essa incrustação não está presente, pois podemos aquecer ou resfriar um fluido mais do que o desejado. (WALAS, 2004)

De maneira geral alguns dados do coeficiente global de transferência de calor para estimativas desconsiderando as incrustações durante a operação podem ser encontradas na literatura, como na tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente global de transferência de calor estimado para trocadores de calor tipo casco-tubo para trocas vapor-água

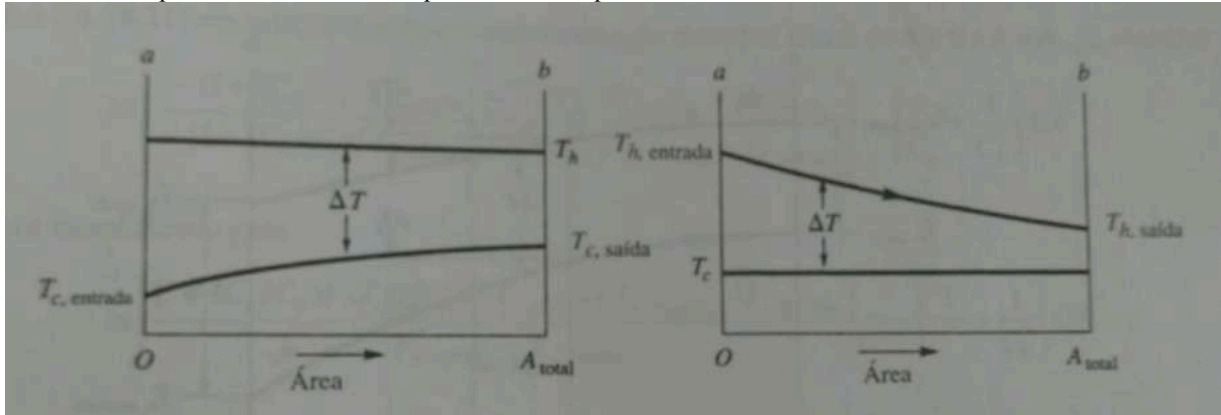
<b>Taxa de transferência</b>	<b>Coeficiente total U (W/m<sup>2</sup>K)</b>
Vapor para água	
aquecedor instantâneo	2270 - 3400
tanque de armazenamento	990 - 1700

Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

### **2.3.3 Diferença de temperatura média logarítmica**

Ao se analisar o perfil e temperatura de um fluido ao longo de toda sua trajetória dentro de um trocador de calor, é notável que o gradiente de temperatura muda por todo o trajeto onde o fluido percorre, ou seja, a temperatura, tanto do fluido quente quanto do fluido frio são alteradas durante o percurso dentro do trocador de calor, como ilustra a figura 17. Tendo consciência dessa informação, e já sabendo que a taxa de transferência de calor é proporcional ao gradiente de temperatura dos fluidos, chegamos à conclusão de que a taxa de transferência de calor também não é constante.

Figura 17 – A esquerda observamos o perfil de temperatura de um trocador de calor de passagem única no qual a fase quente está sendo condensada e a direita, o perfil de um trocador de calor de passagem única onde a fase fria está sendo evaporada. Subscrito “h” representa a fase quente e subscrito “c” a fase fria



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

Dado os fatos, buscamos uma melhor maneira de realizar essa troca de calor com a máxima eficiência, ou seja, realizar a maior troca de calor na menor área possível e cálculos comprovam que essa maneira é realizando o deslocamento dos fluidos em contracorrente, ou seja, entrando com fluido quente de um lado e o fluido frio do lado oposto do trocador. Na prática para realizar o cálculo de calor transferido utilizando desse método é conveniente usar a equação 16. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

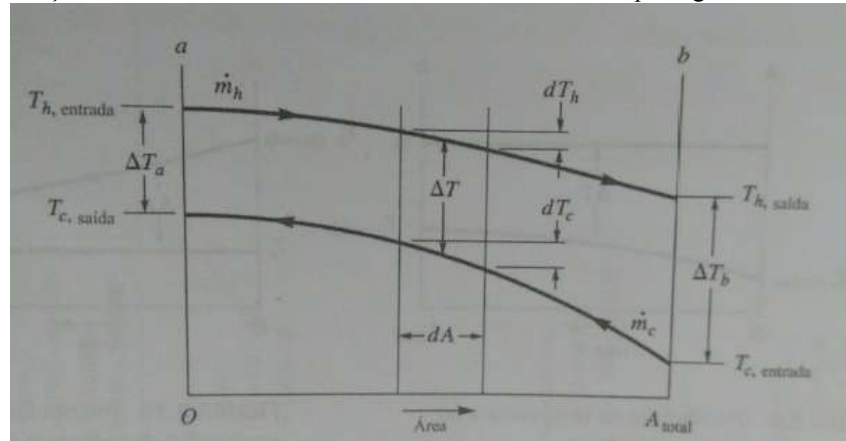
$$q = U A \overline{\Delta T} \quad (16)$$

Usamos  $\overline{\Delta T}$  para nos referir a diferença de temperatura média logarítmica (LMTD), que calcula uma aproximação média de diferença de temperatura na qual o trocador de calor de contracorrente mantém os fluidos e é calculado pela equação 17. (GREEN, D. W.; PERRY, 2007)

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left( \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad (17)$$

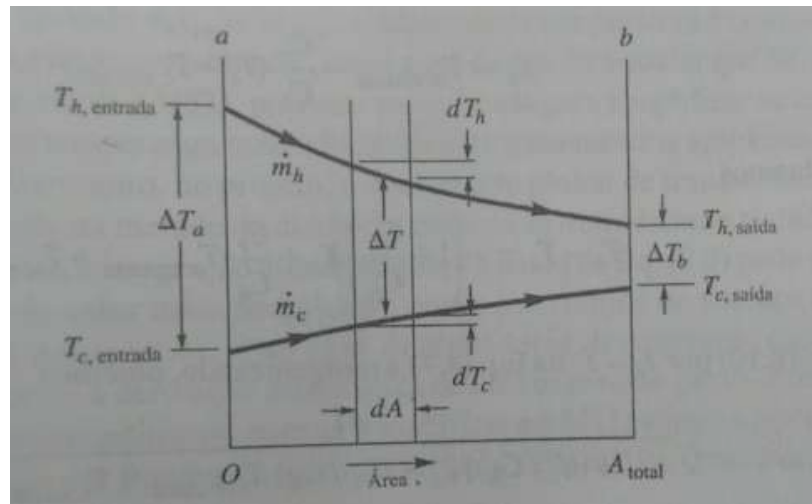
- $\Delta T_a$  é a diferença de temperaturas do lado e que entra o fluido quente
- $\Delta T_b$  é a diferença da temperatura do lado do trocador de calor onde sai o fluido quente

Figura 18 – Distribuição de calor em trocador de calor de contracorrente de passagem única



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

Figura 19 – Distribuição de calor em trocador de calor de correntes paralelas de passagem única



Fonte: (KREITH, F; BOHN, 2011).

Toda a relação da equação 15 e do LMTD foi estudada e pensada para ser uma aproximação de cálculos para o trocador de calor tipo casco-tubo de passagem única, para realizar a aproximação do valor de transferência de calor para outros tipos de trocadores de calor, por exemplo de correntes cruzadas ou múltiplas passagens, o valor do LMTD deverá ser multiplicado por um fator de correção que pode ser dado pelo fornecedor do trocador de calor. (KREITH, F; BOHN, 2011).

O método do LMTD é usado quando sabendo o quanto de calor deve ser retirado ou fornecido ao sistema, para mudar uma substância de fase, ou aquecer um tanto de material-ambos calculados por troca de calor estudados em termodinâmica, é possível saber a área requerida de um trocador de calor necessário para realizar tal aquecimento/resfriamento. Com esses dados em mente, dimensionar um equipamento de passagem simples, múltiplas passagens, realizar simulações variando temperaturas ou fontes de calor que já temos disponíveis na planta.

#### 2.3.4 Efetividade do trocador de calor e número de unidades de transferência de calor

A efetividade ( $\epsilon$ ) de um trocador de calor é definida como a razão entre a transferência real de calor e a transferência máxima de calor possível em um trocador ideal em contracorrente e com a área de transferência tendendo ao infinito, ou seja, quando a temperatura final do fluido quente e frio entrarem em equilíbrio térmico. (KREITH, F; BOHN, 2011).

O número de unidades de transferência de calor (NUT ou simplesmente N) é definido como pela equação 18, sendo que  $C_{min}$  é a menor taxa de capacidade térmica. Quanto maior o valor do NUT, mais próximo mais próximo estará o trocador de calor do seu limite termodinâmico, ou seja, da transferência total de calor. (KREITH, F; BOHN, 2011).

$$NUT = \frac{A U}{C_{min}} \quad (18)$$

Existem gráficos para diferentes tipos de trocadores que medem o desempenho do sistema, onde existe a possibilidade de relacionar a efetividade com o NUT. O  $\epsilon$ -NUT é um método para calcular a eficácia das trocas de calor. (WALAS, 2004).

#### 2.3.5 Injetores de vapor

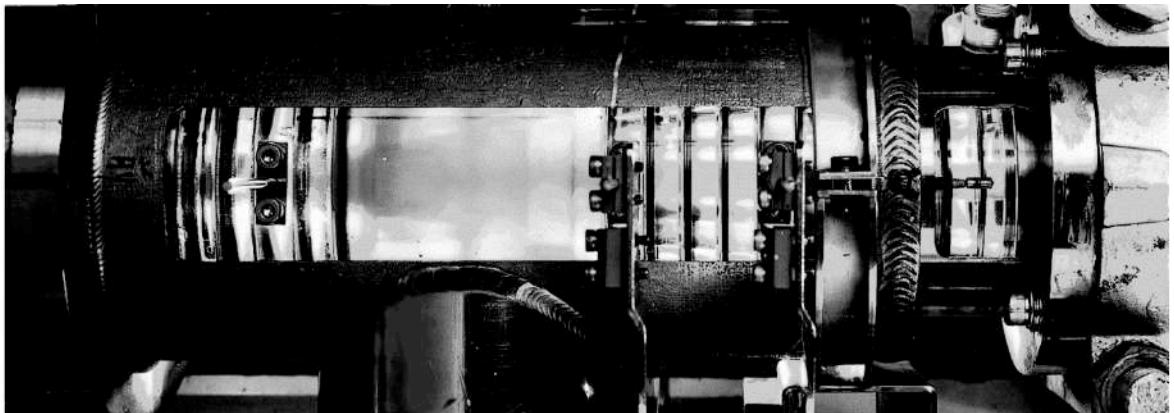
Injetores de vapor são equipamentos que promovem a mistura de duas fases, líquido e vapor utilizando a condensação direta como mecanismo operacional. É um sistema que não requer energia externa, como uma bomba, por exemplo, para realizar a movimentação de fluidos, sendo que após a ação do injetor obteremos um líquido com maior pressão se



comparada a pressão de entrada. (Artigo: Application of steam injector to improve safety of light water reactors)

Os injetores de vapor são equipamentos compactos e simples que podem ser instalados em linha ou dentro de tanques e como efeito secundário da mistura das fases, gera uma turbulência radial em sua descarga causado pela transferência de calor e portanto, o raio de turbulência depende da quantidade de energia do sistema, e deve em casos de dimensionamento do equipamento, ser levado em consideração no momento de decidir o raio da tubulação ou a altura que deve ser instalado dentro do vaso e a distância até a parede do vaso. A figura 20 ilustra a turbulência apresentada na discaga de um injetor em linha. (NARABAYASHI, MIZUMACHI, MORI; 1997)

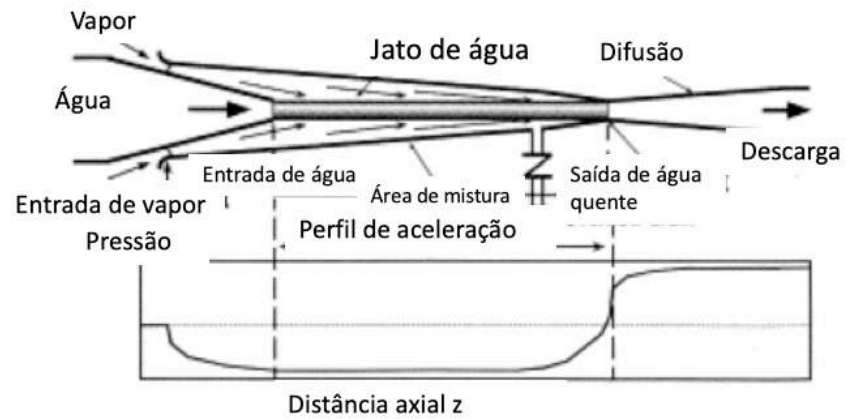
Figura 20 – Visão superior da descarga de um injetor de vapor em linha



Fonte: (NARABAYASHI, MIZUMACHI, MORI; 1997)

A figura 21 ilustra o princípio de atuação do injetor de vapor ilustrando que no equipamento o vapor é introduzido em uma linha cheia de água e gera ao entrar em contato com a água uma zona de baixa pressão que promove o movimento e na descarga obtemos um jato de água com uma pressão mais alta se comparado a pressão de entrada de água. (TAKEYA, MIWA, 2015)

Figura 21 – Ilustração adaptada do perfil de comportamento de um injetor de vapor com a mistura entre as duas fases e abaixo o perfil correspondente de pressão da água percorrendo o injetor de vapor



Fonte: (TAKEYA, MIWA, 2015)

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Método de Pesquisa**

Neste presente trabalho, foi utilizado o método de Pesquisa Ação para realizar a pesquisa. Para isso, foi estudado um problema encontrado na fábrica de Mancozebe em Jacareí da empresa Corteva Agriscience, e para colocar o problema como centro de discussão neste trabalho, foi necessário desenvolver um entendimento profundo dos problemas, definir o escopo do projeto com propostas de solução e estudar as consequências e custos envolvidos na mudança e por fim fazer uma intervenção no processo.(YIN, 2001)

#### **3.2 Coleta de Dados**

Foi realizado a coleta de dados, por um período de duas semanas, duas vezes ao dia, o processo foi observado e foram coletados dados sobre a operação do tanque para verificar as peculiaridades da operação.

Foi realizado o controle manual da temperatura antes e durante a destilação para realizar diversos testes para propôr e validar um novo algoritmo.

Informações sobre a temperatura e nível do tanque durante a operação normal de todo o processo foram observadas por meio de um software que registrou a coleta de dados dos instrumentos da planta.

Informações sobre os desgastes e histórico de manutenção do tanque foram buscados nos registros do equipamento, para justificar o investimento, levando em consideração o custo-benefício das modificações.

#### **3.3 Planejamento**

Os dados coletados foram analisados e a melhor tecnologia foi definida por meio da consulta à literatura sobre sistemas de aquecimento e termodinâmica do vapor d'água,

consultas a tecnologias de outras plantas de Mancozebe da empresa Corteva Agriscience e consulta a informações disponibilizadas por fornecedores.

Os custos para implementação do projeto foram estimados por meio de cotações com fornecedores dos equipamentos

Para a instalação do novo equipamento, foi necessário aguardar uma oportunidade em que os reatores e o filtro em linha estivessem parados para que o processo não fosse prejudicado. Foi decidido que a instalação aconteceria na parada de manutenção e o pedido de compra foi enviado.

Para a preparação para a instalação do novo equipamento, foi necessário garantir que os equipamentos que dependiam da água quente ou que a drenagem fosse direcionada ao tanque estivesse parados. O tanque foi drenado, as linhas conectadas ao tanque foram isoladas, o andaime de acesso foi montado e os equipamentos de proteção individual e ferramentas para a atividade foram selecionadas.

### **3.4 Implementação**

O algoritmo de automação foi posto em serviço após as observações e levantamento de dados em campo e a construção da sequência lógica de operação.

Os equipamentos selecionados foram instalados durante a parada de manutenção da planta seguindo o procedimento de parada de manutenção do tanque de água quente e as indicações do fornecedor.

Para garantir que nenhuma parte do projeto tenha sido negligenciada, foram utilizadas políticas internas da companhia para justificar e garantir que todos o processo do projeto tenha sido lembrado e endereçado, tomando especial cuidado com segurança.

### **3.5 Comissionamento**

Após a instalação, o tanque foi completado com água e foi observado o comportamento de aquecimento comparando com os dados fornecidos e o comportamento foi bastante similar ao esperado.

Após o primeiro aquecimento, o comportamento do tanque foi acompanhado por dois dias e observações do processo levaram a ajustes no algoritmo da automação do aquecimento para adequar a nova velocidade de aquecimento da água do tanque.

Após as últimas mudanças no algoritmo, o tanque foi monitorado por duas semanas e os resultados foram coletados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 O Tanque

O tanque de água quente estudado nesse projeto foi um tanque vertical que tem um volume de  $3,5 \text{ m}^3$  e normalmente opera com 70% de seu volume total, cerca de  $2,45 \text{ m}^3$  de água. Um tanque atmosférico com um sistema de alívio tipo pescoço de ganso e possui um sensor de nível e dois sensores de temperatura que funcionam concomitantemente.

O tanque possuía no seu interior uma cruzeta metálica perfurada na base por onde ocorria a entrada de vapor inicialmente a uma pressão desconhecida, na base também estavam os poços de dois transmissores de temperatura, um poço de transmissor de nível e a linha de sucção da bomba. Na parte superior temos um flange conectado a linha de entrada e retorno de água, a boca de visita do tanque, a linha de retorno de condensado de vapor, a PRL, e o overflow do tanque.

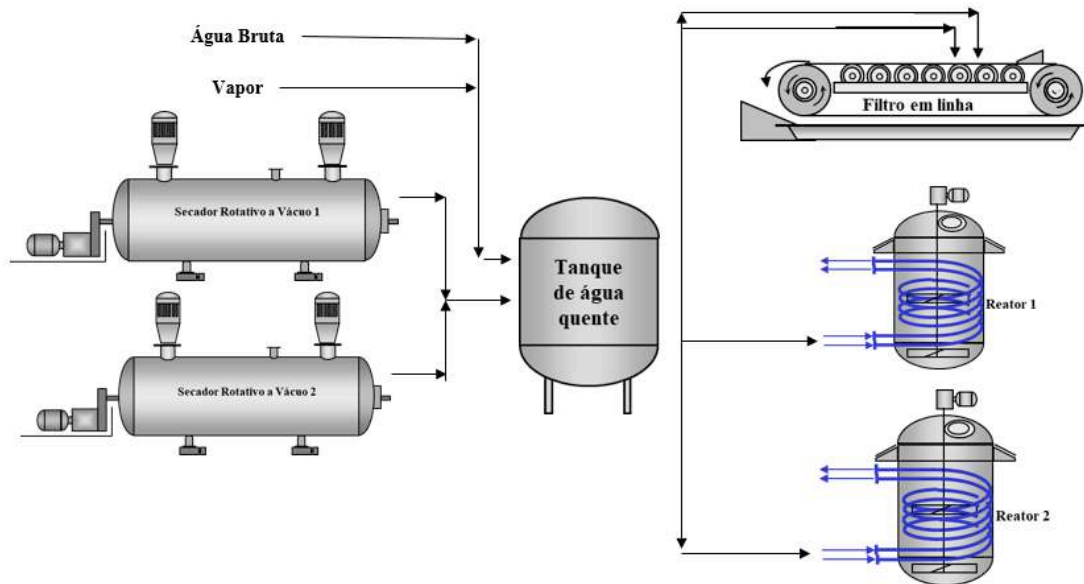
Do volume do tanque, parte era consumido em uma etapa de lavagem a quente no processo, e esse volume de água quente não retorna ao tanque sendo direcionado ao sistema de efluentes. A quantidade de água era repostada pela drenagem de condensado de um equipamento de secagem e pela entrada de água bruta regulada pelo transmissor de nível do tanque repondo o nível para manter um setpoint de 70% do volume do tanque e, portanto, o conteúdo do tanque era constantemente renovado.

Em outra parte do processo, sabe-se que a água quente era utilizada para a destilação nos reatores, recirculando dentro da serpentina do reator e voltando ao tanque de água quente. A figura 22 ilustra um resumo do processo, indicando consumo e reposição de água e vapor.

Antes da etapa de destilação, a serpentina dentro do reator tem seu volume preenchido por água de refrigeração. Quando inicia-se a etapa de destilação, esse volume era direcionado ao tanque de água quente, diminuindo a sua temperatura.

Como acessórios do tanque, temos duas bombas em paralelo, uma principal e outra reserva que, alternadamente conforme planos de manutenção, fazem a recirculação do conteúdo do tanque para homogeneizar a temperatura e transportam água quente para o processo.

Figura 22 – Sistema de reposição e uso de água quente na planta



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

## 4.2 Escolha do método de aquecimento

Após análise do processo e a apresentação dos problemas de controle de temperatura e agressões ao tanque pelo modelo antigo, foram apresentados estudos e propostas para realizar as mudanças necessárias.

Foram levantadas cinco hipóteses para o estudo de melhoria do sistema de aquecimento do tanque: instalação de uma camisa no tanque existente, instalação de serpentinas no tanque, instalação de um trocador de calor casco-tubo, e por último, um novo sistema de injeção de vapor direto no tanque. Das hipóteses levantadas, a escolha do sistema foi realizada da seguinte maneira:

- Encamisar o tanque: Essa possibilidade eliminaria o problema da corrosão, porém, a opção produz condensado, o que vai contra a política da empresa de diminuir a quantidade de água enviada para tratamento de efluentes e a área de troca de calor é pequena para a demanda durante a destilação. Aumentar a vazão de vapor para suprir essa demanda aumentaria o custo de produção e poderia causar desgastes no casco do tanque, portanto a necessidade de

manutenções seria mantida, não obtendo reduções reais no custo da manutenção do equipamento, portanto a opção foi descartada.

- Instalar serpentina no tanque: Também enfrentaríamos a condição de formação de condensado, indesejável, como citado anteriormente e geraria um aumento no consumo de vapor, já que nem toda a energia seria transferida ao conteúdo do tanque, portanto a opção também foi descartada.
- Instalar um trocador de calor casco-tubo: a opção foi rejeitada principalmente pois não havia espaço suficiente disponível próximo ao tanque de água quente, mesmo para modelos compactos de trocadores de calor para a instalação do equipamento. Outras objeções eram o volume de vapor necessário para essa troca de calor e o local para descartá-lo após o uso, já que não é uma opção reciclar o vapor para a caldeira.
- Instalar injetores de vapor: foi a opção selecionada. A opção foi escolhida pois percebemos que é um tipo de equipamento que aproveita o máximo da energia fornecida pelo vapor, tendo poucas perdas pela chaminé do tanque, não gerava problemas para o descarte do condensado, já que todo o vapor e o que é condensado já fica retido dentro do tanque, tem um tamanho compacto e, em uma planta irmã, já utilizam uma tecnologia semelhante. Essa tecnologia era um sistema na qual injetava vapor dentro do tanque e ao mesmo tempo promovia a mistura com a água de forma a aumentar a temperatura principalmente pelo conceito de convecção forçada. O custo de um equipamento era aproximadamente 3% do custo de manutenção dos últimos anos, sem considerar a instalação, e por isso foi escolhido no lugar do sistema anterior.

### **4.3 Algoritmo de automação do tanque**

Em uma primeira tentativa de melhorar o sistema de aquecimento do tanque, e como primeira etapa do projeto, realizou-se um paliativo para diminuir o consumo de vapor na planta. Foi alterado o algoritmo que regia o funcionamento do tanque para que a válvula de vapor abrisse e entrasse vapor pelas cruzetas apenas quando os reatores estivessem próximos



da etapa de destilação de maneira automatizada com o ganho da diminuição do consumo de vapor. A água quente do tanque foi utilizada tanto nos reatores quanto no filtro em linha (SLF) e a grande preocupação quanto ao ajuste fino da temperatura foi em relação ao processo de destilação do reator, pois nele estava contido  $\text{CS}_2$ . Durante a lavagem que ocorre no SLF, a temperatura final da água que chegava ao equipamento não necessita de uma grande precisão, e nesse caso, a temperatura era ajustada pela mistura em linha com água bruta, portanto, as variações na temperatura do tanque influenciam pouco a operação desta parte do sistema e portanto, não serão o objeto de estudo e coleta de dados.

Para as mudanças realizadas na lógica serem efetivas, por um período de 15 dias foi realizado o controle de temperatura do tanque de forma manual, realizando observações do comportamento da temperatura do tanque e coletando observações da operação sobre a melhor forma de controlar a temperatura do tanque.

algumas observações sobre o processo:

- O tanque de água quente recebia um flash de vapor que tinha origem em outra parte do processo. O condensado de um equipamento de secagem era direcionado ao tanque a pressão de 3,4 bar, e quando esse condensado chegava ao tanque, em pressão atmosférica, despressurizava foi observado a formação de um *flash* de vapor dentro do tanque ;
- O tanque operava a uma temperatura maior do que o setpoint, próximo a  $98^\circ\text{C}$ , então o ideal seria resfria-lo injetando água a temperatura ambiente para chegar a temperatura ideal antes da destilação;
- Durante a destilação, a temperatura do tanque diminui, inicialmente pela entrada de água de refrigeração que estava na serpentina, e em um segundo momento devido a troca de calor com o meio reacional. Existe nessa etapa também atrasos devido ao algoritmo que opera a válvula de entrada de vapor não ser suficientemente rápido para controlar a porcentagem de abertura da válvula quando era necessário;
- Quando era necessário aumentar a temperatura do tanque havia um grande desperdício de energia, pois o vapor não misturava com a água de forma eficiente, e pela chaminé do tanque era notável uma grande quantidade de vapor sendo lançado à atmosfera;

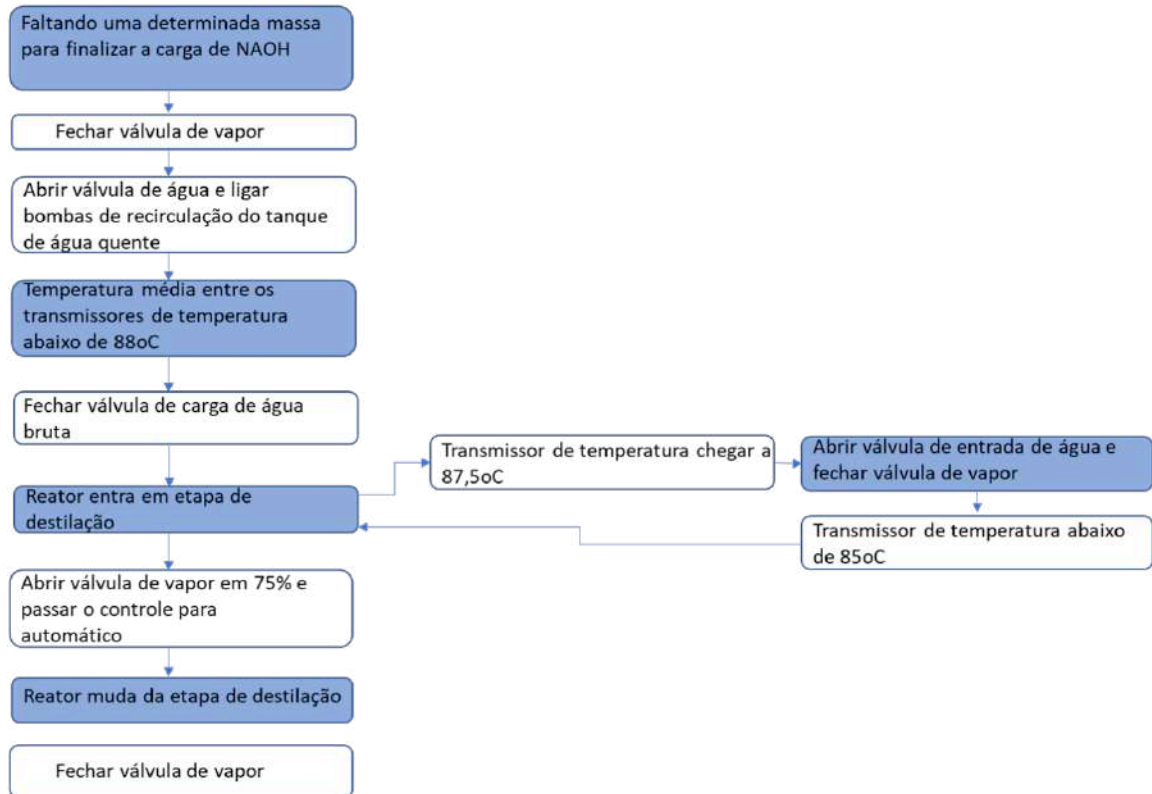
- A atuação do operador ocorria sempre próximo a etapa de destilação dos reatores.
- A temperatura ideal do tanque deve estar abaixo de 88 °C por causa da temperatura de autoignição do CS<sub>2</sub> e acima de 80 °C para garantir eficiência e rápida troca de calor, para operação durante a destilação, contudo, muitas vezes a água ficava fora desse range atrasando a etapa do reator e parando o processo e a entrada de água para a serpentina até que a temperatura da água quente estivesse normalizada;

O algoritmo implementado teve o objetivo de:

- Controlar a temperatura quando do tanque apenas na etapa anterior a destilação do reator;
- Diminuir a temperatura do tanque de 98 °C (temperatura média do tanque antes da implementação do algoritmo) para 88 °C a partir da entrada de água bruta;
- Após alcançar o setpoint de temperatura, quando iniciada a etapa de destilação no reator, era iniciada a injeção de vapor dentro do tanque, para o controle de temperatura;
- Caso a temperatura chegue a um limite superior de 88°C, medidos pela média dos dois transmissores de temperatura instalados no tanque, o algoritmo interrompe a entrada de vapor e abre a válvula de água bruta para a entrada no tanque até que a temperatura média dos dois transmissores chegue a 85 °C e volte a entrar vapor dentro do tanque;
- Com o final da etapa de destilação, a entrada de vapor era cessada.

Para colocar escrever esse algoritmo, foi construído primeiramente um diagrama de blocos para visualizar as condições e ações do programa, como ilustra a figura 23.

Figura 23 – Diagrama de blocos que mostra a sequência lógica da operação das válvulas de água quente e vapor durante a operação de ajuste da temperatura do tanque de água quente para a destilação, em azul no diagrama temos as condições e em branco as ações do algoritmo.



Fonte:Elaborado pela autora, 2020

Após o ajuste de temperatura pré-destilação, o conteúdo do tanque continuava a ter uma queda de temperatura, pois havia um atraso entre a entrada da água e a completa homogeneização da temperatura do tanque, e também existia o fato de que quando se inicia a destilação, a água de refrigeração que estava nas serpentinas do reator era direcionada ao tanque de água quente continuando a abaixar a temperatura medida pelos transmissores de temperatura.

Os set-points e ações propostas no algoritmo foram testadas manualmente e empiricamente apresentando um bom desempenho. A temperatura do tanque voltava a subir para em torno de 98°C com a entrada de condensado do processo e se mantinha dessa maneira durante o período na qual o algoritmo não estava operando durante a destilação, e o nível do

tanque era reposto pela entrada de condensado e água bruta com setpoint de 70% do volume do tanque.

Com as mudanças nas condições de operação, podemos notar uma diminuição de 8,45% nos tempos da etapa de destilação levando em consideração a média do tempo da etapa em ambos os reatores durante um período de 10 dias, o que sozinho era um resultado satisfatório em termos de produção, mas que não resolvia o problema de integridade mecânica do tanque e por isso foi decidido manter o escopo e continuar com a instalação dos injetores de vapor.

#### 4.4 Injetor de vapor

O injetor de vapor escolhido foi o modelo IN25M com conexão rosqueada feito de aço inox 316 da empresa Spirax Sarc. Era uma tecnologia na qual o equipamento injeta vapor dentro do tanque e ao mesmo tempo promove a mistura com a água homogeneizando o sistema. Utilizamos um controle que leva em consideração a abertura modulável da válvula de vapor, a abertura de uma válvula de água e dois transmissores de temperatura para realizar o controle da temperatura, utilizando o vapor para aquecer e a água bruta para diminuir a temperatura. Abaixo fotos e dimensões do injetor nas figuras 27, 28 e 29 e a tabela 4.

Figura 24 – Visão lateral do injetor de vapor IN25M do fornecedor Spirax Sarc para instalação do tanque de água quente

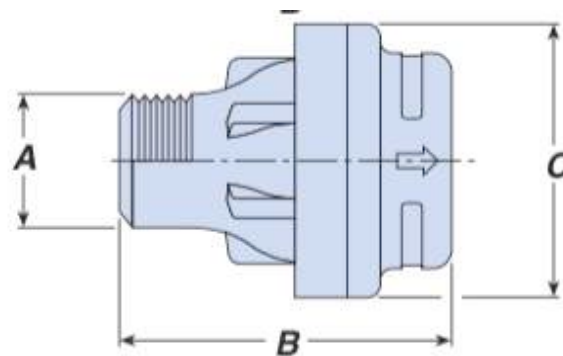


Figura 25 – Visão axial do injetor de vapor IN25M do fornecedor Spirax Sarco para instalação do tanque de água quente



Fonte: Corteva Agriscience, 2020

Figura 26 – Ilustração do injetor de vapor IN25M do fornecedor Spirax Sarco para instalação do tanque de água quente



Fonte: Spirax Sarco, 2020

Tabela 4– Indicação das dimensões do injetor de vapor

Dimensões do injetor		
A	B	C
25,4	84	71

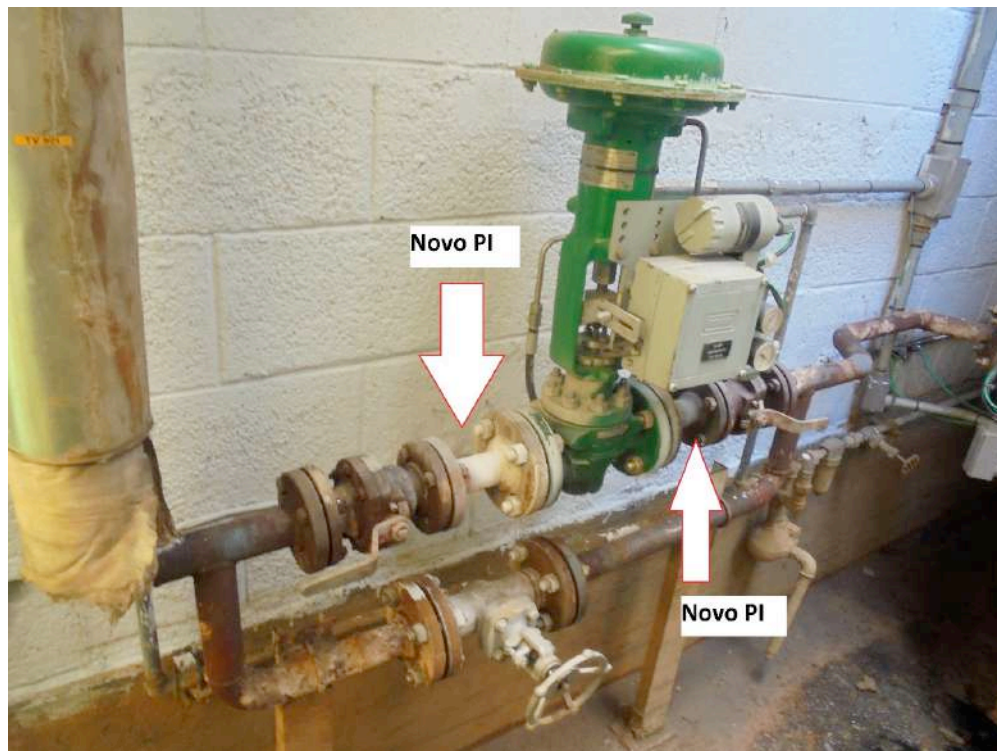
Fonte: Spirax Sarco, 2020

#### 4.5 Escolha do injetor

Para o dimensionamento do equipamento, foram necessárias as informações de pressão de vapor disponível, volume do tanque e tempo necessário para o aquecimento.

Para a coleta dessas informa foram instalados indicador de pressão (PI) na linha de entrada de vapor no tanque no local indicado na figura 27, antes e depois da válvula de controle de vapor. Foi observado que quando a válvula estava fechada, o PI media uma pressão que variava em torno de 4 bar, e ao abrir a válvula de controle em 100%, não foi possível fazer a medição pois a linha equalizava com a pressão atmosférica rapidamente, portanto, não foi possível medir a perda de carga da válvula de controle de vapor. Observamos, entretanto, que na maior parte do tempo, o PI antes da válvula de controle de vapor indicava uma pressão de 4 bar, e foi esse dado foi utilizado no dimensionamento do injetor, na figura observamos os locais de instalação dos PIs.

Figura 27 – Indicação do local de instalação de indicadores de pressão.



Com essa informação, foi possível buscar na tabela 5, fornecida pelo fabricante, a capacidade de injeção de vapor em kg/h de cada modelo de injetor fornecido pela Spirax Sarco. Uma observação a realizada era que a tabela dada pelo fornecedor foi obtida a partir de dados empíricos e que, portanto, poderiam existir algumas variações nos resultados.

Tabela 5 – Indicação de capacidade de injeção de vapor para tanques atmosféricos com até 3m de profundidade.

<b>Tipo do injetor</b>	<b>IN15</b>	<b>IN25M</b>	<b>IN40M</b>
<b>Pressão do vapor na entrada do injetor (bar g)</b>	<b>Capacidade de vapor saturado(kg/h)</b>		
0,5	11	75	222
1	20	135	400
2	48	175	589
3	66	280	805
<b>4</b>	<b>84</b>	<b>350</b>	<b>970</b>
5	102	410	1125

Fonte: Spirax Sarco, 2019

A pressão do vapor que chegava aos injetores que podia variar de acordo com a utilização de vapor em outras partes do processo, e outro fator desconhecido eram as variações no header de vapor e perdas de carga na válvula de controle, linha e conexões até o tanque. Para o dimensionamento do equipamento foi considerado a entrada de vapor no injetor a uma pressão de 4 bar o que pela tabela 5 nos indica que os modelos disponíveis são capazes de injetar vapor a uma vazão entre 84 e 970 kg/h.

Também foi levado em consideração o volume comum de operação do tanque, que foi 2,5 m<sup>3</sup> (cerca de 70% da capacidade do tanque, que era o setpoint do volume do tanque no algoritmo de controle de nível).

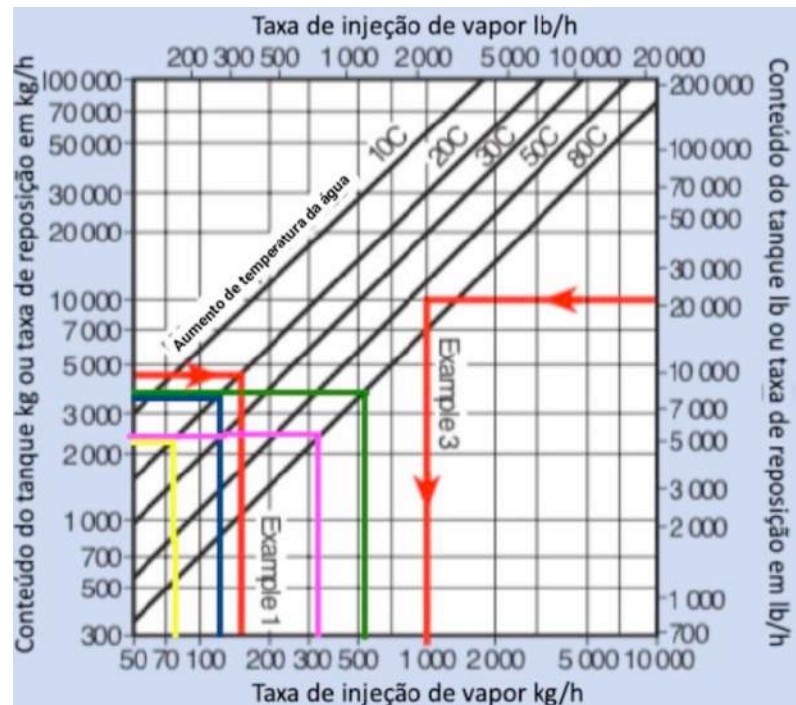


Outro fator importante para o estudo e dimensionamento do tanque foi o tempo necessário para o aumento de temperatura, tanto para a operação rotineira quanto para o retorno da operação pós-parada da planta para manutenções.

Com as instruções e figura 28 fornecidos pela Spirax Sarco foi possível estudar a operação do injetor nas condições mais significativas de operação, sendo elas:

- Partida da planta - temperatura da água em 20°C, operação do tanque com 70% de seu volume total indicado em rosa na figura 28;
- Partida da planta - temperatura da água em 20°C, operação do tanque cheio, considerando 100% de sua capacidade indicado em verde na figura 28;
- Operação regular da planta - temperatura da água a 80°C, operação do tanque com 70% de seu volume total indicado em amarelo na figura 28;
- Operação regular da planta com tanque totalmente cheio, ou seja, 100% de sua capacidade indicado em azul na figura 28.

Figura 28 – Gráfico adaptado que relaciona volume e capacidade de aumento da temperatura de água dentro do tanque em relação a vazão de vapor injetado no tanque.



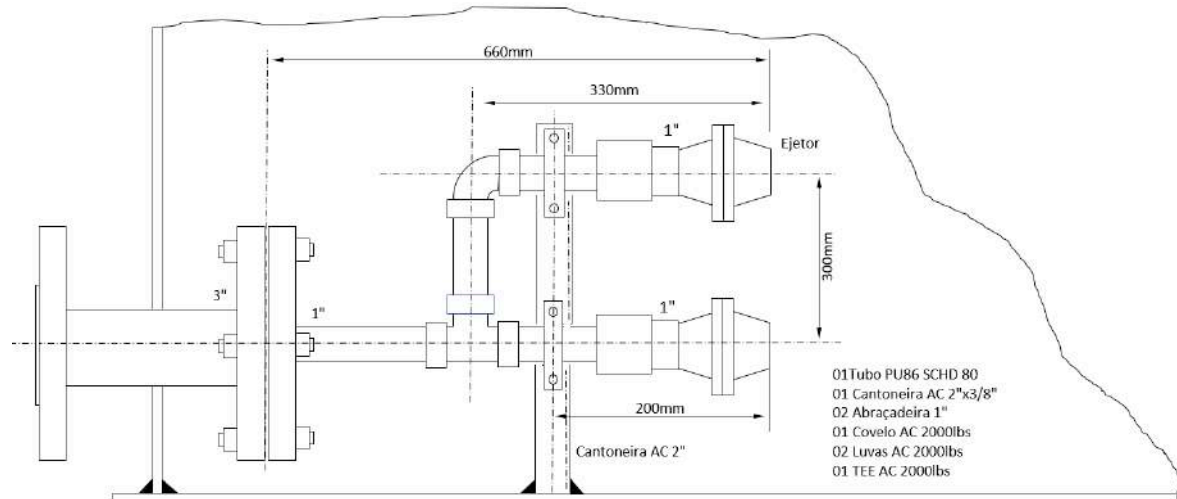


Com esses dados foi possível, através do manual dado pelo fornecedor, dimensionar o injetor de vapor mais adequado para o uso no vaso da planta, portanto instalando dois injetores de vapor IN25M para cobrir todas as necessidades de aquecimento necessários, como pontuado acima. Para a instalação foram seguidas as orientações do fabricante, como ilustra o croqui com dados da instalação e dimensões, na figura 28 ter uma estimativa do tempo necessário para o aquecimento do tanque.

#### 4.6 A instalação do injetor

Para a instalação, cumprimos o manual do fornecedor para evitar a corrosão das paredes pelo choque da mistura de água com vapor, e vibração do sistema dentro do tanque, instalamos os injetores conforme o croqui representado na figura 29. O injetor está localizado próximo ao centro do tanque.

Figura 29 – Croqui da instalação dos dois injetores dentro no tanque.



Fonte: Corteva Agrosience, 2019

Para a instalação, como indicado no manual, o injetor estava posicionado na horizontal, na parte inferior do tanque e com uma distância da parede para que o produto da mistura da água do tanque e do vapor não se choque com a parede do tanque, e para isso

seguimos a recomendação do fabricante segundo tabela 6 de ter uma distância mínima entre a descarga do injetor e a parede do tanque. Também foi requerido uma altura mínima de água abaixo do injetor, 150 mm de altura da base do tanque até o centro do injetor para o modelo escolhido.

Tabela 6– Tabela de indicação da distância mínima entre a descarga do injetor modelo IN25M e a parede do vaso.

<b>Pressão de vapor na entrada do injetor (bar g)</b>	<b>Distância mínima entre o injetor IN25 e a parede (L)</b>
0.5 - 7.0	500mm

Fonte: (Spirax Sarco, 2019)

Para a associação de dois injetores de vapor, também era requerido uma distância mínima de 300mm entre o centro dos dois injetores, respeitada conforme croqui conforme indicado no croqui na figura 30.

#### 4.7 Comissionamento

Após a instalação dos injetores de vapor, o tempo de destilação do reator voltou a subir causado por alguns descompassos no algoritmo. Após a instalação, o tempo de destilação comparado com o tempo original antes das mudanças foi reduzido em 3,5%.

Sabendo que havia um espaço para uma melhoria sem alterar o custo do projeto, fizemos algumas adequações na lógica.

As mudanças que foram propostas e por fim validadas foram:

- Abrir a válvula de vapor antes da mudança para a etapa de destilação em 50%
- Fechar a válvula de água bruta quando a temperatura anterior a destilação; chegar a 89°C e habilitar o controle de temperatura par o setpoint de 85 °C;
- Abrir válvula de água na etapa de destilação caso a temperatura chegue aa 88°C, abrir a entrada de água até o tanque atingir uma temperatura menos que 87,5 °C.

Após alterações e comissionamento final do projeto tivemos uma redução no tempo de destilação de 4% e qualitativamente observamos pela chaminé uma redução do desperdício de

vapor e o nível de ruído do tanque diminuiu o que indica uma diminuição da agressão das paredes do tanque.

#### 4.8 Custos

O custo total do projeto, sem levar em consideração as horas de trabalho da engenharia para o estudo do caso e implementação do algoritmo, pois estes custos foram absorvidos como custos fixos da planta, foi de R\$7461,43 reais, aproximadamente 7,5% do valor destinado a manutenção do tanque nos últimos 10 anos para resolver um problema crônico. Na tabela 7 temos a descrição de cada custo do projeto.

Tabela 7– Indicação dos custos de implementação do projeto

<b>Descrição</b>	<b>Custos (R\$)</b>
Dois injetores de vapor modelo IN25M	6.157,05
Horas de trabalho da manutenção	894,38
Serviços de compra	410,00

Fonte: (Corteva, 2019)

## 5 CONCLUSÕES

A análise do procedimento de aquecimento do tanque, as observações dos operadores, experiências reportadas por outras unidades, e sobretudo, os estudos sobre transferência de calor, trocadores de calor e injetores nortearam as propostas de novos equipamentos e soluções para o aquecimento e operação automatizada do tanque.

Durante a análise das propostas de solução, foi realizada a escolha do sistema de injeção de vapor e a programação de um novo algoritmo para reger o sistema do tanque. Considerando a pressão do vapor de água que chegava ao tanque, o volume e as condições de operação, foi escolhido a instalação de 2 injetores, modelo IN25M do fornecedor Spirax Sarco para a substituição da cruzeta de vapor existente previamente no tanque.

Ao término do projeto e comissionamento do tanque, foi constatado que a escolha foi adequada, pois ocorreu uma diminuição expressiva de aproximadamente 4% do tempo na etapa de destilação por lote em comparação com o estado inicial do processo, qualitativamente foi constatado a uma diminuição na vibração do sistema e a diminuição da quantidade de vapor eliminada pela linha de alívio do tanque.

## REFERÊNCIAS

- BALARDIN, R. S. **Mancozeb - Muito além de um fungicida**. 1ª edição ed. [s.l.] Bookman, 2017.
- BROWN, T. L. de; LEMAY, H. E.; BURSTEN, B. E. **Química: A Ciência Central**, 9ª edição Person Universidades, 2005.
- BORGNAKKE, V. W. S. **Fundamentos da Termodinâmica** - Edgard Blucher Ltda. 5a edição ed. [s.l: s.n.]
- CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução**. 7a edição ed. [s.l.] LTC, 2008.
- Dithane NT®**. Jacaré Corteva Agriscience, , 2019. . Disponível em:  
<[https://www.corteva.com.br/content/dam/dpagco/corteva/la/br/pt/products/files/Bula\\_DithaneNT\\_180918.pdf](https://www.corteva.com.br/content/dam/dpagco/corteva/la/br/pt/products/files/Bula_DithaneNT_180918.pdf)>. Acesso em 07/03/2020.
- Ficha de Informação de Produto Químico**. [s.l: s.n.]. Disponível em:  
<[https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=DISSULFETO DE CARBONO](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DISSULFETO DE CARBONO)>. Acesso em 07/03/2020.
- GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8a edição ed. [s.l.] McGraw-Hil, 2007.
- GULLINO, M. L.; TINIVELLA, F.; GARIBALDI, A.; KEMMITT, G.M.; BACCI, L.; SHEPPARD, B.. **Mancozeb: Past, Present, and Future**. Dow Agrosience. 2010
- INCROPERA, F. P. .; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6a edição ed. [s.l: s.n.]

KREITH, F; BOHN, M. **Princípios de transferência de calor**. 1a Edição ed. São Paulo: Cengage, 2011.

NARABAYASHI, Tadashi; MIZUMACHI, Wataru; MORI, Michitugu. **Study on two-phase Flow dynamics in steam injectors**. Nuclear Engeneering and Design, ed. Elsevier, 1997

**Steam Injectors**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/international/documents/en/ti/in15\\_in25m-ti-p401-05-en.ashx?rev=dba61d3a8a0443ea9e4727623b83d3dc](https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/international/documents/en/ti/in15_in25m-ti-p401-05-en.ashx?rev=dba61d3a8a0443ea9e4727623b83d3dc)>. Acesso em 07/03/2020.

TAKEYA, Y.; MIWA, S.; HIBIKI, T.; MORI, M.. **Application of steam injector to improved safety of light water reactors**. Progress in Nuclear Energy. 2015

WALAS, S. M. **Chemical process equipment: Selection and design**. 2a edição ed. [s.l.] Elsevier, 2004.

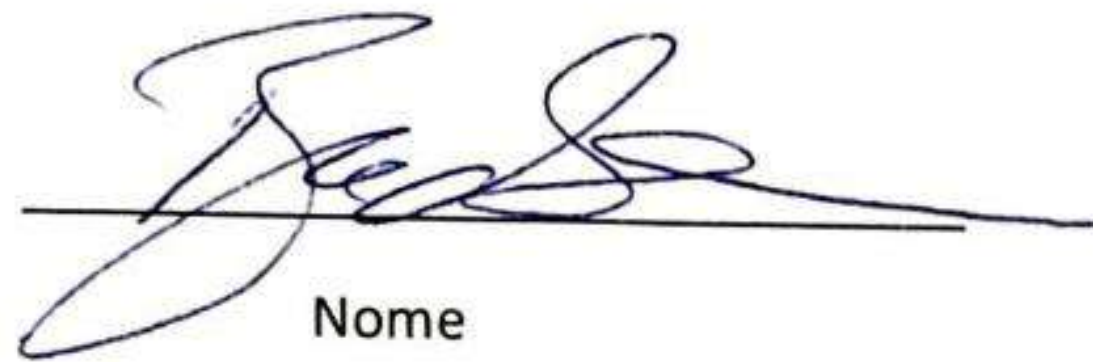
YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Método**. 2a Edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.



## TERMO DE PERMISSÃO DE USO DE INFORMAÇÕES

Através desse termo, nós da empresa Corteva Agrosiences, declaramos que estamos de acordo com a utilização das informações desta empresa no Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "Projeto de melhoria de um sistema de aquecimento de água usado na fabricação do fungicida Mancozebe" desenvolvido pela aluna Amanda Dias Pelegrin, a ser apresentado à Escola de Engenharia de Lorena no primeiro semestre de 2020.

Jacareí, 15/4/20

  
Nome

  
Cargo