



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



Esther Cahali Souza dos Santos

**UTILIZAÇÃO DE TORRES DE RESFRIAMENTO EM PROCESSOS
INDUSTRIAIS – UMA REVISÃO**

Outubro, 2023
Campina Grande – PB

Esther Cahali Souza dos Santos

**UTILIZAÇÃO DE TORRES DE RESFRIAMENTO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS –
UMA REVISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Química, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Laércio Gomes de Oliveira

Outubro, 2023
Campina Grande – PB

S237u

Santos, Esther Cahali Souza dos.

Utilização de torres de resfriamento em processos industriais – uma revisão / Esther Cahali Souza dos Santos. – Campina Grande, 2023.
45 f. : il. color.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Laércio Gomes de Oliveira".

Referências.

1. Engenharia Química. 2. Torre de Resfriamento. 3. Otimização da Torre – Melhoria no Processo. 4. Eficiência Energética. 5. Redução do Consumo – Recursos Hídricos e Energéticos. 6. Balanço de Massa e Energia – Torre de Resfriamento. I. Oliveira, Laércio Gomes de.
II. Título.

CDU 66.01(043)

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, quero expressar minha profunda gratidão por estarem sempre presentes, me encorajando e compartilhando amor e sabedoria. Vocês são minha fonte constante de inspiração, suporte e perseverança. Sou grata por tê-los ao meu lado, sem vocês eu não teria chegado tão longe.

Aos meus queridos irmãos, o apoio incondicional que me deram foi o que tornou cada passo dado ainda mais significativo. Vocês foram um dos pilares que sustentou toda minha jornada.

Aos meus queridos amigos, em especial Talita Fernandes, sou grata por compartilharem comigo os momentos de alegria, as horas de estudo e até mesmo os desafios que enfrentamos juntos. Sua amizade, companhia e amor foram uma fonte constante de motivação, e cada lembrança que construímos será pra sempre lembrada.

A Damiris Valeska, sou profundamente grata por você ter sido meu pilar de amizade, força e confiança. Seu constante incentivo, amor e compreensão tornaram tudo mais fácil, foi meu combustível para superar desafios e alcançar este marco.

Ao Prof. Dr. Laercio Gomes, minha gratidão por sua orientação perspicaz, sabedoria e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Suas sugestões foram inestimáveis para o aprimoramento deste estudo e sou muito grata por sua dedicação em compartilhar seus conhecimentos.

A todos os professores e colegas que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Cada interação e aprendizado moldaram minha jornada e tornaram esta conquista possível.

A todos, meu muitíssimo obrigada. Este trabalho não é apenas um reflexo do meu esforço, mas também do apoio e incentivo de todos vocês. Cada conquista foi uma celebração do papel fundamental que desempenham em minha vida.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre torres de resfriamento. As torres de resfriamento são dispositivos projetados para remover o calor excedente dos processos industriais e sistemas de resfriamento por meio da transferência de calor e massa com o ar ambiente. Elas funcionam por meio da transferência de calor e massa com o ambiente, principalmente via evaporação de água, permitindo que o fluido de resfriamento recircule, mantendo temperaturas adequadas. As torres de resfriamento são amplamente utilizadas, em locais como shoppings, hospitais, aeroportos e, principalmente, na indústria, em setores que exigem controle térmico preciso, como o petroquímico e energético. Reduzir o consumo de recursos, como água e energia, é uma parte fundamental das estratégias de sustentabilidade ambiental e que a otimização contínua visa melhorar a eficiência do processo de resfriamento. A otimização constante se torna essencial para minimizar o consumo de água e energia, além de atender a critérios de sustentabilidade ambiental e aumentar eficiência operacional. Assim, esse trabalho delinea os objetivos de uma revisão sistemática da literatura sobre torres de resfriamento, visando examinar conceitos fundamentais, aplicações industriais e avaliar inovações tecnológicas recentes. Entre os estudos analisados, alguns visam melhorar o equipamento, enquanto outros buscam otimizar os processos de resfriamento, ambas as abordagens são cruciais para a eficiência e sustentabilidade das torres de resfriamento industriais. Por fim, conclui-se que todas as pesquisas foram essenciais para proporcionar a melhoria da eficiência e sustentabilidade das torres, fornecendo soluções para aumentar a economia de recursos, reduzir o consumo de energia e melhorar o desempenho. Ainda assim, algumas áreas ainda precisam de um foco maior em futuras oportunidades de análise, como eficiência energética, sistemas de dosagem de produtos químicos, manutenção preditiva, impacto ambiental, integração de fontes de água alternativas, desenvolvimento de modelos em escala real, estratégias de controle avançadas, design sustentável e segurança.

Palavras-chave: torre de resfriamento; otimização da torre; melhoria no processo; eficiência energética; redução do consumo de recursos hídricos e energéticos; balanço de massa e energia de uma torre de resfriamento.

ABSTRACT

This work presents a Systematic Literature Review (SLR) on cooling towers. Cooling towers are devices designed to extract excess heat from industrial processes and cooling systems through the transfer of heat and mass with the surrounding air. They primarily operate through the evaporation of water, allowing the cooling fluid to recirculate for temperature control. Cooling towers find wide application in various sectors, including shopping malls, hospitals, airports, and predominantly in industrial settings where precise thermal management is critical, such as in the petrochemical and energy sectors. The reduction of resource consumption, such as water and energy, plays a fundamental role in environmental sustainability strategies. Continuous optimization is key to enhancing the efficiency of the cooling process. Continuous optimization becomes essential to minimize water and energy consumption, meet environmental sustainability criteria, and enhance operational efficiency. Thus, this work outlines the objectives of a systematic literature review on cooling towers, aiming to examine fundamental concepts, industrial applications, and assess recent technological innovations. Among the analyzed studies, some focus on equipment improvement, while others aim to optimize the cooling processes. Both approaches are vital for industrial cooling tower efficiency and sustainability. In conclusion, all the research conducted has been pivotal in improving the efficiency and sustainability of cooling towers, providing solutions to increase resource conservation, reduce energy consumption, and enhance performance. Nevertheless, certain areas require further emphasis for future analysis opportunities, such as energy efficiency, chemical dosing systems, predictive maintenance, environmental impact, integration of alternative water sources, real-scale model development, advanced control strategies, sustainable design, and safety.

Keywords: cooling tower; tower optimization; process enhancement; energy efficiency; reduction of water and energy resource consumption; mass and energy balance of a cooling tower.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torres de resfriamento do tipo chaminé. _____	13
Figura 2 – Funcionamento simplificado de uma torre. _____	15
Figura 3 – Range e Approach. _____	15
Figura 4 – Classificações de Torres de Resfriamento. _____	17
Figura 5 – Volume de controle de uma torre de resfriamento, de tiragem induzida, com taxas de fluxos de ar e água _____	22
Figura 6 – Tela inicial do software StArt. _____	26
Figura 8 – Criação do protocolo _____	27
Figura 9 – Seleção dos estudos _____	30
Figura 10 - Extração dos estudos _____	30
Figura 11 – Diagrama esquemático do enchimento corrugado vertical. _____	32
Figura 12 – Diagrama estrutural da Torre de Resfriamento e a tubulação sugerida. _____	33

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 – Lista de estudos com melhoria em equipamentos.</i>	<u>31</u>
<i>Quadro 2 – Lista de estudos com melhoria no processo.</i>	<u>34</u>

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO GERAL	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Contexto Histórico	13
3.2 Funcionamento	14
3.3 Conceitos	15
3.4 Tipos De Torres	17
3.4.1 Classificações por tipo de circuito	17
3.4.2 Classificações por transferência de calor e massa	18
3.4.3 Classificação por Tiragem do Ar	19
3.4.4 Classificação por Escoamento do ar em relação à água	20
3.4.5 Classificação por tipo de enchimento	21
3.4.6 Balanço De Massa	21
3.4.7 Eficiência	24
3.4.8 Áreas De Aplicação	24
4. MÉTODOS	26
4.1 Software	27
4.2 Estratégia de busca	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

As torres de resfriamento são dispositivos projetados para remover o calor excedente dos processos industriais e sistemas de resfriamento por meio da transferência de calor e massa com o ar ambiente. Essa transferência é viabilizada através da evaporação da água, resultando em uma redução significativa da temperatura do fluido de resfriamento. Sua eficácia reside na capacidade de promover a troca térmica entre a água e o ar circundante, possibilitando que a água resfrie e recircule nos processos industriais (de Oliveira e da Silva, 2011).

Existem diferentes tipos, cada uma com suas características e aplicações específicas. Dois tipos comuns são as torres de resfriamento de fluxo cruzado e as torres de resfriamento de fluxo contracorrente. Nas torres de resfriamento de fluxo cruzado, o fluxo de ar atravessa perpendicularmente o fluxo da água e nas torres de resfriamento de fluxo contracorrente, os fluxos de ar e água se movem em direções opostas (de Oliveira, 2010).

À medida que a água quente entra na torre e é distribuída nos enchimentos, parte dela evapora ao entrar em contato com o ar circundante, resultando em um resfriamento geral da corrente de água. A eficiência desse processo depende de diversos fatores, incluindo o projeto da torre, as condições climáticas e as características da água (Silva, 2021)

O uso da água como fluido de resfriamento decorre de suas características físicas distintas, incluindo seu elevado calor específico e baixa viscosidade. A baixa viscosidade facilita o seu fluxo através das tubulações, enquanto o alto calor específico impede um rápido aumento de sua temperatura ao entrar em contato com superfícies aquecidas (Pereira, 2018).

Os sistemas de arrefecimento operam em circuito fechado visando reutilizar a água e minimizar o desperdício (de Oliveira, 2010). Assim a recirculação de água nos sistemas de resfriamento evaporativo é notória, especialmente em regiões com escassez hídrica, onde a eficiência é vital.

Ao longo das últimas décadas, avanços significativos foram alcançados na concepção e operação das torres de resfriamento. Os sistemas de resfriamento evaporativo, amplamente empregados, têm sido alvo de aprimoramentos visando a redução do consumo de água.

A otimização das torres se torna essencial para minimizar o consumo de água e energia, de forma a manter o desempenho térmico necessário. A adoção de circuitos semi-fechados de resfriamento tem se destacado como uma alternativa mais eficiente e responsável (U.S. Department of energy, 2011).

No entanto, desafios como o controle da performance, o tratamento químico da água e a mitigação de riscos ambientais ainda são áreas de preocupação. A adoção de práticas

operacionais adequadas e a consideração dos impactos ambientais e as possíveis otimizações são fundamentais para garantir o desempenho das torres de resfriamento.

Amplamente utilizadas no setor industrial, as Torres também encontram aplicação em grandes estabelecimentos como shoppings, hospitais, hotéis e aeroportos (Femp, 2011). Seu emprego é notável em indústrias que demandam controle térmico preciso, como o setor petroquímico e energético.

Apesar da quantidade de estudos, ainda há uma lacuna na análise das variáveis de operação e dados experimentais de desempenho. Nesse sentido, se destaca a importância da automação e do monitoramento inteligente para otimizar esses processos, resultando em maior eficiência energética e desempenho térmico.

2. OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre torres de resfriamento revelando a gama diversificada de estudos abordando seus conceitos fundamentais, aplicações nas indústrias nos últimos anos e inovações tecnológicas, sintetizando os principais avanços e tendências observadas nesse campo.

2.2 Objetivos Específicos

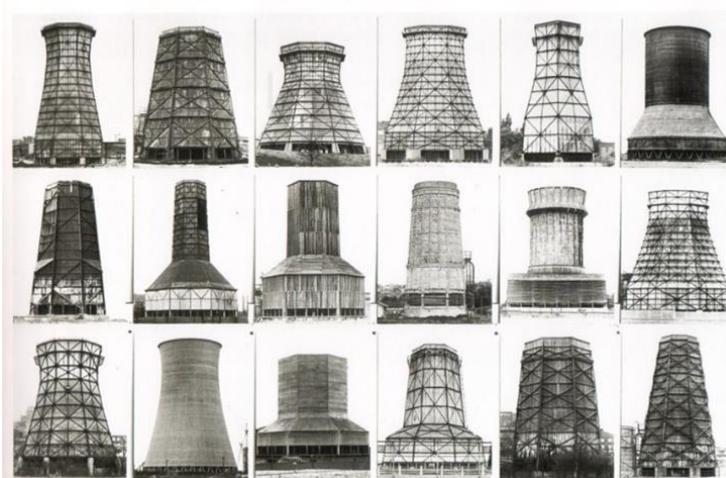
- Realizar uma revisão detalhada da literatura para compreender os princípios de funcionamento, a troca térmica envolvida e os processos de evaporação que ocorrem nas torres de resfriamento;
- Investigar estudos que relatem as aplicações das torres de resfriamento em diferentes indústrias nos últimos anos;
- Organizar e sintetizar as informações coletadas a partir dos estudos selecionados, identificando os principais avanços, padrões e tendências emergentes;
- Desenvolver recomendações práticas que possam ser aplicadas na indústria para otimizar o funcionamento e a eficiência das torres de resfriamento, considerando as aplicações e os desafios específicos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Contexto Histórico

A história da torre de resfriamento remonta ao final do século XIX, quando a necessidade de lidar com a dissipação de calor em processos industriais levou ao desenvolvimento desse equipamento inovador. Em 1894, o engenheiro alemão Hans Joachim Balcke fundou a empresa Balcke&Co e construiu a primeira torre de resfriamento do tipo "chaminé", conforme a Figura 1, com cerca de 12 metros de altura, marcando o pioneirismo nesse campo (Sampaio, 2013). Esse modelo inicial foi projetado para remover o excesso de calor gerado por sistemas industriais, permitindo o resfriamento da água e sua reutilização, e foi vendida para uma Usina Termo Elétrica.

Figura 1 – Torres de resfriamento do tipo chaminé.



Fonte: Becher, 2015.

Inicialmente utilizada na geração de energia, a torre de resfriamento se estabeleceu como um equipamento importante para controlar a temperatura da água empregada como fluido refrigerante. Por volta de 1904, apenas uma década após a criação da primeira torre, aproximadamente 1.400 unidades já estavam em operação ao redor do mundo, demonstrando a sua crescente relevância industrial (Sampaio, 2013).

A busca por maior eficiência energética e desempenho levou ao desenvolvimento de enchimentos estruturados. Frederick Gilberth, em 1918, introduziu um enchimento que aumentava significativamente a área de contato entre água e ar, melhorando a troca térmica e, por consequência, a eficiência das torres (Sampaio, 2013). Foi um marco na melhoria da eficiência das torres de resfriamento ao proporcionar uma superfície de contato eficaz entre os

dois meios.

Ao longo das décadas seguintes, os projetos e modelos de torres de resfriamento evoluíram para atender às demandas cada vez mais complexas das indústrias. Os primeiros modelos de torre de resfriamento, como o projetado por Balcke, consistiam em estruturas verticais que permitiam a circulação de água em um sistema de fluxo cruzado, permitindo o resfriamento por evaporação. Entretanto, com o avanço tecnológico e o aprimoramento das técnicas de engenharia, surgiram modelos mais sofisticados, incluindo as torres de fluxo contracorrente e contracorrente de múltiplos estágios (Vieira, 2011).

A história da torre de resfriamento é uma narrativa rica em inovação e desenvolvimento, mostrando como a necessidade industrial e a busca por eficiência energética impulsionaram a evolução desses equipamentos ao longo dos anos.

3.2 Funcionamento

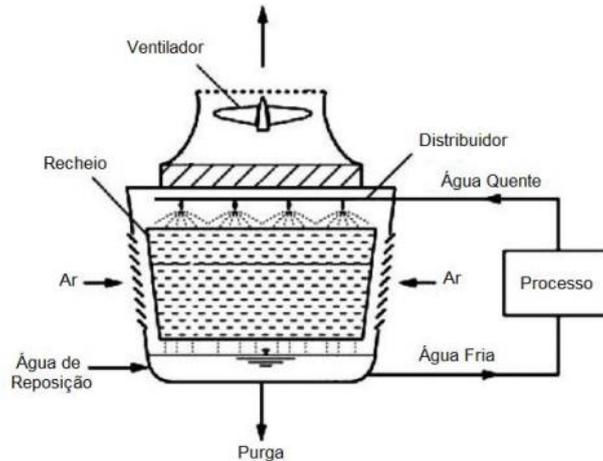
São utilizados na remoção da carga térmica contida na água para o ambiente atmosférico, operando com base na concomitante troca de energia térmica e massa (Mello, 2008). A essência de seu funcionamento reside na dissipação de energia térmica por meio dos processos de calor sensível e latente (Marques, 2016).

Durante o resfriamento da água quente, cerca de 80% da totalidade é predominantemente viabilizada pelo processo de evaporação, a água perde calor latente para atmosfera, que consiste na transferência de massa da fase líquida (água) para a fase gasosa (ar) (Souza et al., 2014). Além disso, uma contribuição menor, aproximadamente 20%, é atribuída à redução da temperatura por meio da perda de calor sensível, concretizada através do delta de temperatura entre o ar e a água (Marques, 2016).

Em resumo, o seu funcionamento se baseia em princípios de transferência de calor e massa, conforme Figura 2, onde a água quente é resfriada, resultando na remoção do calor excessivo e no retorno da água resfriada para o processo.

O desempenho da torre de resfriamento é monitorado e controlado para garantir a eficiência do processo. Isso pode envolver o ajuste da vazão de água, a velocidade dos ventiladores e outras variáveis para otimizar o resfriamento.

Figura 2 – Funcionamento simplificado de uma torre.



Fonte: Oliveira, 2011.

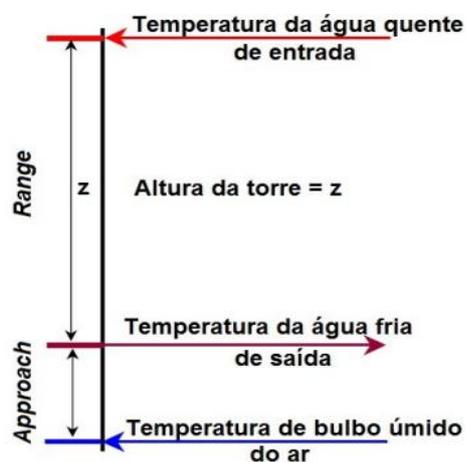
Esse processo eficaz é fundamental para manter o funcionamento eficiente de diversos processos industriais que requerem controle térmico.

3.3 Conceitos

No âmbito da análise das torres de resfriamento, são utilizadas terminologias relacionadas à sua tecnologia. Abaixo estão algumas definições:

- **Approach:** A diferença entre a temperatura da água ao sair da torre e a temperatura de bulbo úmido é denominada "approach" (Burguer, 1994). Segundo Oliveira (2011), essa métrica é empregada para avaliar a eficiência de um sistema de resfriamento, como demonstrado na Figura 3. Quanto mais próxima da temperatura de bulbo úmido estiver a temperatura da água fria, maior será a eficiência da unidade de resfriamento (Pannkoke, 1996).

Figura 3 – Range e Approach.



Fonte: Leal, 2016.

- **Ciclo de concentração:** Representa a relação entre as concentrações de uma determinada espécie na água de circulação e na água de reposição. Essa relação é calculada com base em um elemento que não se decompõe, volatilize ou precipite, como o íon cloreto (Ghislieri, 2017). Frequentemente expresso como C , sendo a razão entre a concentração de sólidos totais dissolvidos na água de resfriamento e a concentração de sólidos dissolvidos na água de reposição.

Este parâmetro é amplamente usado para determinar a quantidade de água que deve ser removida do sistema de resfriamento. O ciclo de concentração adequado para cada sistema é definido pelo projeto, características da água, parâmetros operacionais e plano de tratamento adotado (Betz, 1991).

- **Entalpia específica:** é uma propriedade termodinâmica que representa a soma da energia interna de um sistema (U) com o produto da pressão (P) pelo volume (V) do sistema. Essa relação é expressa pela equação (1):

$$H = U + PV \quad (1)$$

- **Fator de Lewis:** Estabelece a relação entre o coeficiente de transferência de calor e o coeficiente de transferência de massa. Quando se trata da difusão de água no ar, o número de Lewis pode ser considerado igual a 1, sem gerar grandes impactos nos cálculos de desempenho das torres (Kern, 1950).

- **Ponto de orvalho:** Refere-se à temperatura T_{po} na qual a condensação começa a ocorrer quando a temperatura diminui sob uma pressão constante do ar. À medida que a temperatura diminui, ocorre uma perda de vapor d'água por condensação, mesmo que a umidade relativa permaneça a 100% (Sampaio, 2013).

- **Range:** a variação de temperatura entre a água que entra na torre, conhecida como água quente, e a água que sai, denominada água fria (Cheremisinoff et al., 1981).

- **Temperatura de bulbo seco:** É medida por termômetros convencionais de temperatura e refere-se à temperatura ambiente do ar (Burger, 1994; Cortinovis et al., 2005). Geralmente, o termômetro de bulbo seco é colocado próximo ao de bulbo úmido para formar o instrumento chamado psicrômetro (Shapiro et al., 2005).

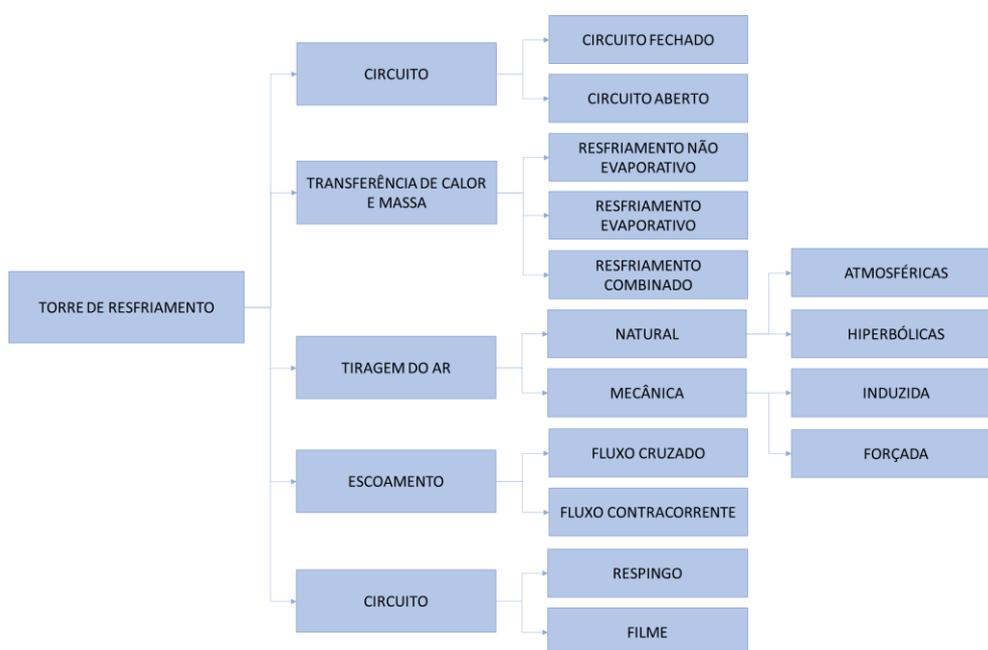
- **Temperatura de bulbo úmido:** É a menor temperatura que a água em circulação na torre pode atingir. Em geral, a temperatura de bulbo úmido é igual ou inferior à temperatura de bulbo seco (Junior, 2014; Unep, 2006). A medição da temperatura de bulbo úmido envolve a colocação de uma mecha úmida na ponta de um termômetro, em contato com

o ar (Jasiulionis, 2012). É essencial notar que a temperatura de bulbo úmido do ar é o limite inferior da temperatura que a água pode atingir na torre de resfriamento (Kern, 1950).

3.4 Tipos De Torres

As torres são classificadas conforme circuito, transferência de calor e massa, tiragem e escoamento do ar e recheio.

Figura 4 – Classificações de Torres de Resfriamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.1 Classificações por tipo de circuito

Quanto ao tipo de circuito, existem dois tipos principais: circuito fechado e circuito aberto. A escolha entre eles depende de diversos fatores e deve ser baseada em uma abordagem equilibrada entre eficiência de resfriamento e conservação de recursos hídricos.

- **Circuito Fechado:** Também conhecido como sistema de recirculação, envolve o uso contínuo da mesma água dentro do sistema de resfriamento. Nesse processo, a água resfriada é reutilizada, passando por um sistema de tratamento para manter sua qualidade. Esse método é altamente eficiente em termos de conservação de água, uma vez que a água não é descartada após cada ciclo de resfriamento (Sampaio, 2010).

- **Circuito Aberto:** A água utilizada para resfriamento entra em contato direto com o ar atmosférico durante o processo de troca de calor (Oliveira, 2012). Uma vez resfriada, essa água é descartada, o que pode resultar em um alto consumo de água. No entanto, essa abordagem é comumente utilizada em indústrias onde a qualidade da água não é crítica e o descarte não representa um problema ambiental significativo.

3.4.2 Classificações por transferência de calor e massa

Para compreender a redução da temperatura da água de resfriamento, é fundamental considerar os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem tanto na superfície como no interior de uma gota de água em contato com o ar.

Nas torres de arrefecimento, observam-se dois processos simultâneos de transferência: a transferência de calor da superfície da água para o ar e a transferência de umidade da superfície da água para a corrente de ar. Esses processos ocorrem por meio da transferência de calor sensível e calor latente, sendo o calor latente de vaporização o responsável pela transferência de massa (evaporação) (Kuehn et al., 1998).

Quanto as classificações de transferência de calor e massa, existem três principais: resfriamento não evaporativo, resfriamento evaporativo e resfriamento combinado.

- **Resfriamento Não Evaporativo:** A transferência de calor ocorre apenas por meio da troca de calor entre a água quente e o ar ambiente, realizando, predominantemente, troca de calor sensível (Treybal, 1981). Nesse processo, a água quente circula dentro da torre, onde entra em contato com um fluxo de ar ambiente, não havendo contato direto entre o fluido refrigerante e o meio a ser refrigerado (sistema fechado). A temperatura do ar é geralmente menor do que a temperatura da água quente, resultando na transferência de calor da água para o ar.

- **Resfriamento Evaporativo:** O processo envolve tanto a transferência de calor quanto a transferência de massa, por meio da evaporação da água. A água quente é distribuída uniformemente pela torre e é exposta a um fluxo de ar ascendente. Também são conhecidas como torres úmidas e realizam a troca de calor principalmente na forma latente. Isso significa que o calor é dissipado diretamente para o ambiente por meio da evaporação da água e pelo aquecimento do ar circundante (Deziani et al., 2015).

- **Resfriamento Combinado:** É uma abordagem que utiliza uma combinação dos métodos de resfriamento não evaporativo e evaporativo. Nesse caso, a água quente é resfriada por troca de calor com o ar ambiente, seguindo para uma segunda etapa onde ocorre o resfriamento evaporativo. Isso permite um resfriamento mais eficiente, especialmente em

condições climáticas variáveis. Assim, busca aproveitar o resfriamento úmido durante os períodos mais quentes e utiliza a capacidade do resfriamento a seco para preservar a água ao longo do restante do ano (Asvapoositkul et al., 2014).

3.4.3 Classificação por Tiragem do Ar

As torres de resfriamento utilizam sistemas de tiragem do ar para garantir a circulação do ar ambiente, promovendo a troca térmica necessária para o processo de resfriamento. Existem dois principais tipos de tiragem do ar: a tiragem natural e a tiragem mecânica.

- **Tiragem Natural:** As torres de tiragem natural podem ser divididas em duas classes: Torres atmosféricas e Torres hiperbólicas (Mierzwa e Hespanhol, 2005).

A tiragem do ar natural, também conhecida como convecção natural, ocorre devido às diferenças de densidade entre o ar quente dentro da torre e o ar mais frio ao redor (torres hiperbólicas) ou pelo movimento das correntes de ar (torre atmosférica).

São altamente dependentes das condições climáticas e requerem locais com ventos consistentes e vigorosos para otimizar a eficácia do processo de resfriamento. Adicionalmente, devido ao seu tamanho, exigem espaços amplos para instalação e incorrem em custos iniciais substanciais (Nemitz, 2017; Foust et al., 1982).

Embora esse sistema seja simples e de baixo custo operacional, ele pode ser menos eficiente em termos de troca térmica, especialmente em torres maiores e em regiões com baixas diferenças de temperatura entre o ar interno e externo.

- Tiragem natural – Torres Atmosféricas: São estruturas de altura considerável e diâmetro reduzido, projetadas para aproveitar as correntes de ar atmosférico como principal agente de resfriamento. Nesse arranjo, o ar se desloca horizontalmente, enquanto a água aquecida flui verticalmente através da torre (Molina, 2009).

- Tiragem Natural – Torres Hiperbólicas: São notáveis pelo seu tamanho, atingindo alturas superiores a 200 metros e diâmetros de cerca de 100 metros (Sampaio, 2013). Nesse contexto, uma chaminé posicionado acima do enchimento induz a movimentação do ar, a diferença de densidades entre o ar quente e úmido no interior da torre e o ar ambiente mais frio é o que gera a circulação de ar ao longo da torre (Jambo, 2008).

- **Tiragem Mecânica:** Demonstram maior eficiência e compacidade, exibindo uma seção transversal menor e menor altura para bombeamento de água na parte superior da

torre. É uma abordagem em que ventiladores ou sopradores são empregados para forçar a circulação do ar através da torre. Proporcionam um controle mais preciso da corrente de ar estabelecida e a temperatura da água de saída, independente das condições ambientais (Veiga, 2010).

A tiragem mecânica pode ser subdividida em tiragem forçada e tiragem induzida. Ambos os métodos de tiragem mecânica oferecem maior controle sobre o fluxo de ar e a eficiência térmica, tornando-os ideais para operações industriais em que um excelente desempenho é essencial.

➤ **Tiragem Mecânica Induzida:** Os ventiladores estão localizados na parte superior da torre, succionando o ar quente e úmido de dentro da torre para o ambiente externo. Isso cria um vácuo que induz a entrada de ar fresco pela base da torre.

➤ **Tiragem Mecânica Forçada:** Os ventiladores estão localizados na parte inferior da torre, empurrando o ar para cima através dos enchimentos, o que intensifica a troca térmica entre a água e o ar.

3.4.4 Classificação por Escoamento do ar em relação à água

O método de escoamento do ar em relação à água desempenha um papel importante na eficiência e no desempenho do processo de resfriamento. Dois métodos predominantes são o fluxo cruzado e o fluxo contracorrente. A escolha depende das condições específicas da aplicação, das demandas de resfriamento e das características do fluido refrigerante.

- **Fluxo Cruzado:** Também conhecido como fluxo lateral, o ar se move perpendicularmente em relação à direção da água, atravessando as aletas do enchimento em um ângulo de 90 graus. Esse método favorece uma distribuição uniforme do ar através das aletas, permitindo um contato eficiente com a água, o que leva à dissipação de calor mais eficaz. Geralmente, o fluxo cruzado é adotado em torres de menor porte e é particularmente útil quando a água tem uma temperatura mais alta e requer um resfriamento mais intenso. Porém, é mais suscetível a retenção de partículas e resíduos em seu sistema de enchimento.

- **Fluxo Contracorrente:** O ar flui verticalmente de baixo para cima, em oposição ao movimento da água que flui de cima para baixo. O ar adentra a torre pelo lado inferior, sendo impulsionado pelo sistema de ventilação e ascendendo verticalmente. Simultaneamente, a água é pulverizada na extremidade superior da torre, dispersando-se e sendo recolhida na bacia localizada na região próxima à entrada de ar (Ferraz, 2008). Isso resulta em um contato direto entre a água quente e o ar frio na entrada da torre, proporcionando uma transferência de calor

altamente eficaz.

3.4.5 Classificação por tipo de enchimento

O enchimento desempenha um papel fundamental na maximização da eficiência da transferência de calor e massa. O objetivo é facilitar e intensificar a troca de calor entre a água e o ar, ampliando a área de contato entre ambos, seja por meio da formação de finas camadas de filme de água ou pela criação de gotículas, de acordo com o tipo de enchimento empregado. Além disso, eles têm a tarefa de garantir uma distribuição uniforme de água ao longo desse processo (Sampaio, 2013).

A escolha entre os tipos de enchimento depende das características específicas do sistema de resfriamento, das condições ambientais e das metas de eficiência energética. Enquanto o enchimento por respingo é vantajoso em termos de resistência a entupimentos e facilidade de limpeza, o enchimento por filme oferece um desempenho térmico mais eficiente e um tamanho mais compacto da torre.

- **Enchimento por Respingo:** Consiste em uma série de lâminas ou painéis dispostos verticalmente na torre. Quando a água quente é distribuída sobre esse enchimento, ela se desloca ao longo das superfícies das lâminas, quebrando-se em pequenas gotículas ou respingos. Para uma operação eficiente, é necessária que as torres estejam niveladas, para que a água escoe de forma homogênea nas tábuas de respingo (Burger, 1994).

- **Enchimento por Filme:** Envolve a disposição de lâminas horizontais com padrões geométricos complexos na torre. A água é distribuída uniformemente sobre o enchimento, formando uma película fina que flui ao longo das lâminas. Esse processo permite uma maior área de superfície de contato entre a água e o ar, facilitando a transferência de calor por convecção.

3.4.6 Balanço De Massa

Nos sistemas de refrigeração, a água atua como fluido refrigerante, cujo propósito é absorver calor do processo. Essa transferência térmica ocorre principalmente por meio de trocadores de calor. A energia capturada pela água nos trocadores de calor é posteriormente liberada na torre de resfriamento, onde a água cede calor e se resfria antes de ser reintegrada ao processo, resultando em uma temperatura de saída mais baixa.

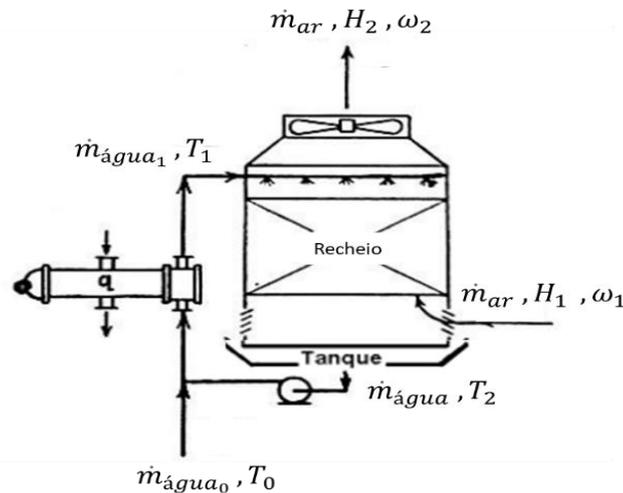
Conforme mencionado previamente, uma parcela substancial da transferência de calor

em uma torre de resfriamento está relacionada à troca de calor latente, que é o resultado da vaporização de parte da água. O restante da remoção de calor provém da troca de calor sensível.

Para estimar as vazões envolvidas nesse processo, é necessário mapear e caracterizar todas as correntes presentes na torre de resfriamento por meio de balanços de massa. No caso específico do sistema em análise, a Figura 5 servirá como base para todos os cálculos efetuados. Nesse contexto, é importante considerar que a vazão da água de reposição engloba a vazão de água evaporada, purgada e arrastada.

Conforme ilustrado na Figura 5, o volume de controle engloba as taxas de fluxo de ar e água do sistema em uma torre de resfriamento que opera em um circuito fechado. A água, previamente resfriada, é retirada do tanque ou bacia da torre ($\dot{m}_{\text{água}}, T_2$) bombeada e direcionada a um trocador de calor de contato indireto. Nesse trocador, a temperatura da água é elevada ($\dot{m}_{\text{água}_1}, T_1$), antes de retornar à torre. Adicionalmente, a água de reposição ($\dot{m}_{\text{água}_0}, T_0$) é introduzida no sistema para compensar a perda principal, decorrente da evaporação de uma fração da água circulante devido à saturação do ar enquanto passa pela torre. Para o ar que entra pela lateral e sai pelo topo da torre, \dot{m}_{ar} é a taxa de fluxo de ar ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$), ω_1 e ω_2 são as umidades específicas do ar de entrada e de saída da torre de resfriamento

Figura 5 – Volume de controle de uma torre de resfriamento, de tiragem induzida, com taxas de fluxos de ar e água.



Fonte: Adaptado de Kern, 1950.

Desse modo, o balanço de massa da água em regime permanente pode ser representado da seguinte forma:

$$\dot{m}_{\text{água}_0} = \dot{m}_{\text{ar}} * (\omega_2 - \omega_1) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{\text{água}_1} = \dot{m}_{\text{água}_0} + \dot{m}_{\text{água}} \quad (3)$$

O balanço de energia foi descrito em termos de vazão de ar:

$$\dot{q} + \dot{m}_{agua_0} Cp T_0 = \dot{m}_{ar}(H_2 - H_1) \quad (4)$$

E para o balanço em termos de variação da temperatura da água, têm-se:

$$\dot{q} = \dot{m}_{agua} Cp (T_1 - T_2) + \dot{m}_{agua_0} Cp(T_2 - T_0) \quad (5)$$

Onde, \dot{q} é a taxa de fluxo de calor, Cp é o calor específico da água de resfriamento e H é a entalpia específica do ar. As taxas de fluxo de ar e de água e as umidades específicas na entrada e saída da torre são consideradas constantes.

Por conveniência, supõe-se que a secção transversal da torre é constante e igual a 1,0 m².

Substituindo-se a equação (4) na (5), têm-se:

$$\dot{m}_{ar}(H_2 - H_1) = \dot{m}_{agua} Cp (T_1 - T_2) + \dot{m}_{agua_0} Cp T_2 \quad (6)$$

Podendo ser dividida pela equação (2), têm-se:

$$\dot{m}_{agua_0} \frac{H_2 - H_1}{\omega_2 - \omega_1} = \dot{m}_{agua} Cp (T_1 - T_2) + \dot{m}_{agua_0} Cp T_2 \quad (7)$$

Pela equação (5):

$$\dot{m}_{agua_0} = \frac{\dot{q}}{(H_2 - H_1)/(\omega_2 - \omega_1) - Cp T_0} \quad (8)$$

A equação (8) revelará a quantidade exigida de água de reposição para uma condição específica de entrada (H_1, ω_1) e de saída (H_2, ω_2) em uma torre de reposição.

Continuando com a análise da transferência de calor, houve a soma dos dois componentes de calor mencionados anteriormente (latente e sensível).

$$\dot{q} = \dot{q}_l + \dot{q}_s \quad (9)$$

Sendo \dot{q}_l o calor latente (difusão da água para o ar) e \dot{q}_s o calor sensível (convecção da água para o ar).

Levando em consideração o calor latente médio de vaporização (λ) da água na torre, têm-se para o calor latente:

$$\dot{q}_l = \dot{m}_{agua_0} \lambda \quad (10)$$

Assim, isolando \dot{q}_s na equação (9) e combinando com as equações (10) e (5), têm-se:

$$\dot{q}_s = \dot{m}_{agua} Cp (T_1 - T_2) + \dot{m}_{agua_0} Cp(T_2 - T_0) - \dot{m}_{agua_0} \lambda \quad (11)$$

Dividindo pela equação (10):

$$\frac{\dot{q}_s}{\dot{q}_l} = \frac{\dot{m}_{agua} Cp (T_1 - T_2) + \dot{m}_{agua_0} Cp(T_2 - T_0)}{\dot{m}_{agua_0} \lambda} - 1 \quad (12)$$

Por fim, combinando as equações (12), (6) e (2), desprezando o termo

($-\dot{m}_{\text{água}_0} C_p T_0$), têm-se:

$$\frac{\dot{q}_s}{\dot{q}_l} \cong \frac{1}{\lambda} \left(\frac{H_2 - H_1}{\omega_2 - \omega_1} \right) - 1 \quad (13)$$

A equação acima ilustra que a razão entre o calor sensível e o calor latente está sujeita às condições de entrada e saída do ar, as quais são conhecidas ou podem ser calculadas (Kern, 1950).

3.4.7 Eficiência

A equação (14) revela uma visão da capacidade da torre em reduzir a temperatura da água de retorno em relação à temperatura de bulbo úmido. Em outras palavras, quanto mais próxima da temperatura de bulbo úmido, maior será a eficiência do equipamento.

$$\text{Eficiência} = \frac{(\text{Temp. água de retorno} - \text{Temp. água resfriada})}{(\text{Temp. água de retorno} - \text{Temp. bulbo úmido})} \times 100 \quad (14)$$

Como dito anteriormente, a temperatura de bulbo úmido representa a temperatura mais baixa que pode ser atingida por meio da evaporação. Esse valor é estabelecido como um parâmetro de projeto e varia de acordo com as condições climáticas históricas da região. De modo geral, considera-se que, sob condições ideais de operação, essa temperatura é a mais baixa que a água resfriada na saída da torre de resfriamento pode alcançar (Dehaghani e Ahmadikia, 2017).

A temperatura da água resfriada corresponde à saída da torre de resfriamento que é direcionada ao processo. Durante a fase de projeto, esse valor é informado aos especialistas em engenharia para que, em conjunto com a carga térmica do processo, a eficiência do sistema como um todo possa ser avaliada. Em sequência, a temperatura da água de retorno está associada ao ganho de energia que a água obtém ao trocar calor com os componentes de produção.

3.4.8 Áreas De Aplicação

As torres de resfriamento são componentes essenciais em diversos processos industriais e sistemas de climatização, sendo responsável pela dissipação de calor. Elas operam através da transferência de calor do líquido circulante para o ar ambiente, reduzindo assim a temperatura do líquido. Aqui estão algumas das principais áreas de atuação das torres de resfriamento:

- **Indústria de Refrigeração e Ar Condicionado:** As torres de resfriamento são amplamente usadas em sistemas de climatização para edifícios comerciais, residenciais e industriais. Elas ajudam a remover o calor indesejado dos sistemas de ar condicionado, permitindo que o ar seja resfriado e distribuído para os espaços internos.
- **Geração de Energia:** Em usinas de energia, seja termelétrica, nuclear ou de energia renovável, as torres de resfriamento são usadas para resfriar a água que é usada como refrigerante nos geradores de vapor. Isso ajuda a manter a eficiência do ciclo de energia, garantindo que a água esteja a uma temperatura adequada para a geração de eletricidade.
- **Indústrias Químicas e Petroquímicas:** Processos industriais nessas áreas muitas vezes geram calor excessivo. As torres de resfriamento são usadas para resfriar os fluidos de processo, prevenindo o superaquecimento e garantindo a segurança e eficiência dos processos.
- **Indústria Metalúrgica:** Fundições e laminações de metais produzem calor significativo. As torres de resfriamento são utilizadas para resfriar a água usada em processos de resfriamento de metal, garantindo que a temperatura seja controlada adequadamente.
- **Indústria de Alimentos e Bebidas:** As torres de resfriamento são usadas para resfriar líquidos em processos de fabricação de alimentos, como a pasteurização. Elas também podem ser encontradas em sistemas de refrigeração de armazenamento a frio.
- **Indústria de Papel e Celulose:** Os processos de fabricação de papel geram uma quantidade significativa de calor. As torres de resfriamento ajudam a manter as temperaturas sob controle durante várias etapas do processo.
- **Indústria Automobilística:** Em fábricas de automóveis, as torres de resfriamento são usadas para resfriar os sistemas de pintura e controlar as temperaturas em máquinas de fabricação.
- **Indústria de Processamento Químico:** O resfriamento é crítico em muitos processos químicos. As torres de resfriamento auxiliam na manutenção das temperaturas ideais em reatores e outros equipamentos.

As torres de resfriamento são empregadas em uma ampla variedade de setores para controlar a temperatura e remover o calor gerado por processos industriais e sistemas de climatização.

4. MÉTODOS

A presente pesquisa delimitou sua abordagem à análise de estudos existentes na literatura que se concentram na compreensão operacional das Torres de Resfriamento, bem como no avanço de otimizações tanto nos processos quanto nos equipamentos, com uma ênfase particular na sua aplicação no contexto industrial.

Para concretizar essa investigação, foi empregado um software especializado que desempenhará um papel fundamental na coleta e análise dos dados relevantes. O Software utilizado foi o StArt (State of the Art through Systematic Review), desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LAPES) do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Figura 6 – Tela inicial do software StArt.



Fonte: Elaborado pela autora.

Através dessa ferramenta, foi possível quantificar a frequência com que o tema foi abordado na literatura, proporcionando avaliações valiosas sobre o seu escopo e tendências.

O cerne da análise repousou-se nas conclusões obtidas a partir da revisão da literatura, com um olhar crítico sobre como essas descobertas contribuem para a otimização do funcionamento das Torres de Resfriamento.

O enfoque recaiu sobre estudos desenvolvidos globalmente ao longo dos últimos 3 anos, especialmente aqueles que estão intrinsecamente ligados a indústrias, com destaque para refinarias. O propósito dessa abordagem é garantir a relevância dos achados para contextos industriais contemporâneos, com ênfase nas práticas e desafios enfrentados pelas refinarias e setores afins.

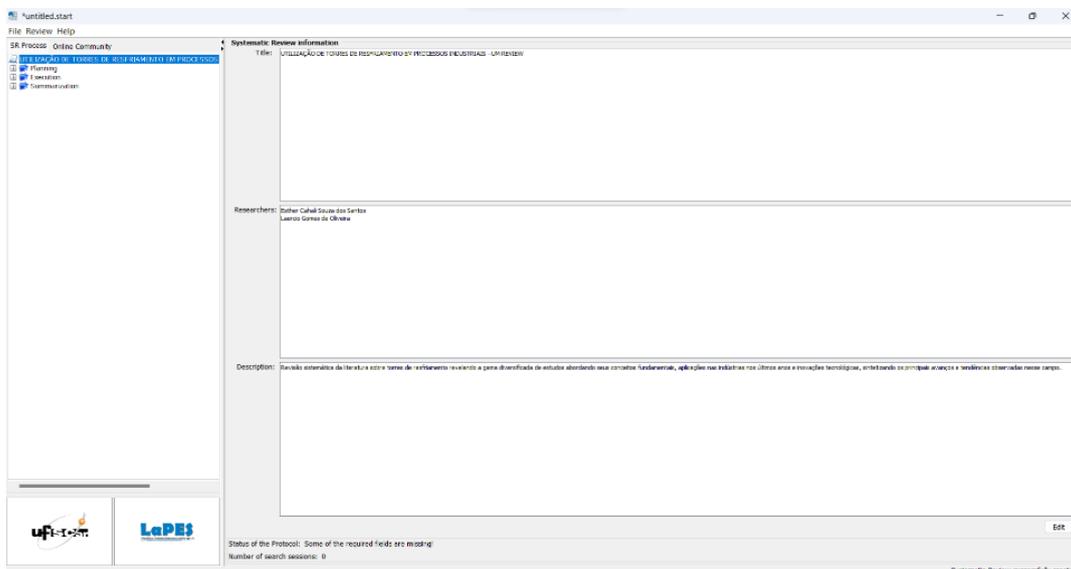
4.1 Software

O software se divide em três etapas, planejamento, execução e sumarização, a primeira consiste no preenchimento do protocolo para busca, por meio da identificação do que será necessário para realizar a revisão, na segunda teremos a fase de identificação dos estudos encontrados (sendo feito fora da ferramenta, com a fase de construir *Strings* nas máquinas de busca para só então carregar os estudos no software), seleção dos que se adequam a nossa linha de pesquisa e a extração das informações que desejamos por meio de formulário e na terceira realizamos as análises dos resultados.

4.2 Estratégia de busca

A princípio foi realizado no software a criação do protocolo por meio do cadastramento das informações básicas como título, autores, descrição, objetivo, palavras-chave, critérios, escolha da base de dados e critérios de avaliação do estudo.

Figura 8 – Criação do protocolo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para os critérios de busca, foi definido:

- Pesquisas desenvolvidas nos últimos 3 anos
- Desenvolvida em inglês
- Desenvolvida em português
- Estudos primários (artigos científicos realizado com o objetivo de coletar dados

e informações originais)

Para os bancos de dados, foram escolhidas 4 plataformas, sendo:

- Engineering Village
- Scielo
- Science Direct
- Scopus

Como condições de exclusão e inclusão do estudo, têm-se:

- (Exclusão) O artigo está em outros idiomas além de português ou inglês
- (Exclusão) O estudo não contempla nenhuma melhoria no equipamento ou processo
- (Inclusão) Inovações no design do equipamento
- (Inclusão) Melhoria no processo da torre

Após finalização do protocolo, seguiu-se para a segunda etapa. Na primeira fase foi realizado a identificação dos estudos, a mesma se deu fora da plataforma e definido as *Strings* que foram utilizadas para busca nos bancos de dados.

A *String* definida foi “Cooling Tower” OR “Fluid Cooler” AND “Process Optimization” OR “Patent” OR “Technologic Innovations” OR “Technological Progress” OR “Process Improvement” OR “Technology Prospecting”. Ela foi aplicada em todos os bancos escolhidos de forma a entender o que melhor se aplica à procura dos dados. Para a coleta dos estudos foram excluídos cartas, editoriais, artigos de revisão, conferências e resumos de reuniões, bem como estudos que não se enquadravam nesses critérios de seleção.

Na segunda fase do processo, seleção e extração, voltou-se à plataforma com os estudos, que foram previamente extraídos por meio da extensão BIBTEX, e procedeu-se para a extração dos que atendiam aos critérios. Inicialmente, o texto completo de cada artigo foi minuciosamente avaliado para determinar sua relevância para a pesquisa, foram selecionados com base nos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos e em seguida classificados em “APROVADO” ou “REPROVADO”.

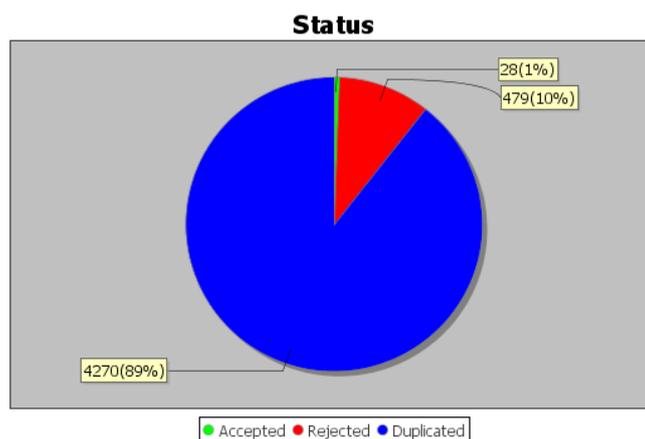
Durante essa avaliação, cada artigo foi pontuado com base na presença das palavras-chave que foram utilizadas nas pesquisas realizadas nos bancos de dados. Aqueles que se alinhavam de forma adequada com as palavras-chave foram considerados para inclusão na

pesquisa, enquanto os demais foram excluídos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa etapa foram extraídos 4.777 estudos, dos quais 4.270 foram classificados como duplicados, sendo apenas 507 avaliados. Dos 507 avaliados 28 foram aprovados para uma segunda revisão (Figura 9).

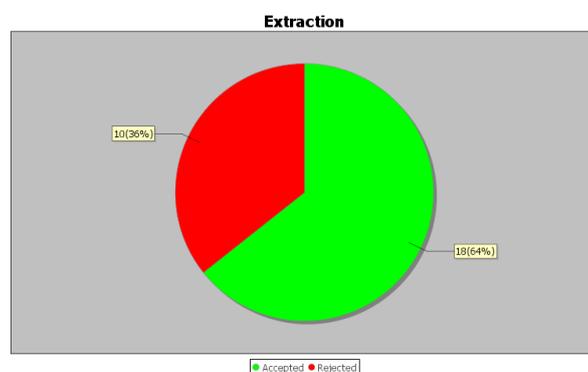
Figura 9 – Seleção dos estudos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os 28, apenas 19 seguiram para extração definitiva (Figura 10), visto que foi realizada novamente a leitura e, assim, uma nova análise dos estudos pré-escolhidos.

Figura 10 - Extração dos estudos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os 18 aceitos, 5 foram por inovações no design do equipamento e 13 por melhoria de processo. Durante o processo de seleção, foram extraídas as informações de melhoria realizada, resultados obtidos e visões futuras de potenciais implementações dessas inovações. Esse exame minucioso permitirá a identificação de padrões, lacunas e oportunidades de melhoria, fornecendo uma base sólida para a formulação de recomendações práticas.

O Quadro 1, a seguir, apresenta um breve resumo dos trabalhos com otimizações em equipamentos que foram discutidos e relatados nesta seção.

Quadro 1 – Lista de estudos com melhoria em equipamentos.

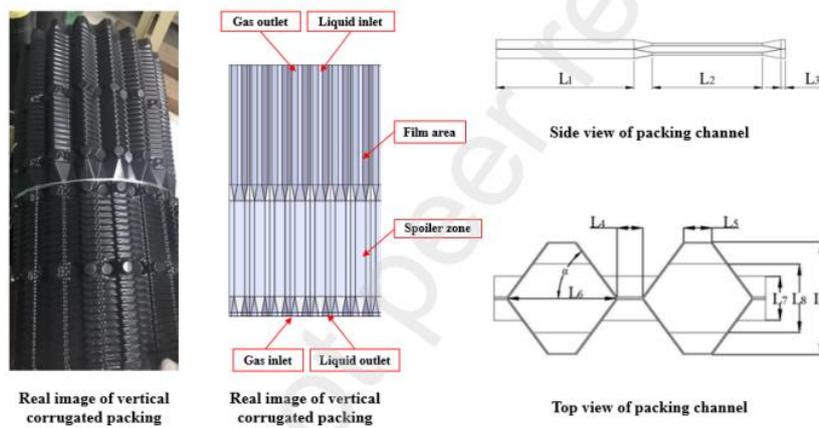
Tipo de Melhoria	Artigo	Resumo da Modificação
Equipamento	Kumar, C. L. M.; Shwetha, K.G.; Shanthappa, B.C.; Manjunatha, K. (2023)	Dois modelos de torres de resfriamento de convecção natural.
Equipamento	Kapote, R.; Vivek, K.; Dorwat, A. (2023)	Para reduzir essas perdas por evaporação, vários tipos de enchimentos são montados no topo da torre de resfriamento, feitos de materiais diferentes, analisados usando CFD e realizada simulação usando rede neural artificial (ANN) no MATLAB para o material mais eficaz.
Equipamento	Xu, W.; Ji, Y.; Yu, Z.; Zhang, L.; Bao, B.; Hu, J.; Li, Y.; Fang, J.; Hu, Y. (2022)	Um novo tipo de enchimento ondulado vertical é proposto para melhorar o desempenho térmico da torre de resfriamento quando a qualidade da água circulante é ruim.
Equipamento	Zhao, R.; Bu, S.; Zhao, X.; Zhang, L.; Xu, W.; Yu, Z.; Fang, J.; Ji, Y.; Hu, Y.; Bao, B. (2021)	Para melhorar o desempenho térmico da torre de resfriamento fechada úmida e resolver o problema da baixa eficiência de transferência de calor, é proposta uma nova tubulação aletada elíptica da torre de resfriamento, e um modelo matemático é estabelecido
Equipamento	Martin, W. E.; McElveen, R.; Holub, R. A. (2020)	Motor que reduza a necessidade de manutenção nas torres, perdas no sistema de acionamento e proporciona uma melhor eficiência geral do sistema.

Fonte: Elaborado pela autora.

Xu et al. (2022) desenvolveram um enchimento composto, com duas partes distintas,

a saber, a área revestida com filme e a área de turbulência. No processo, a água quente de uso industrial é introduzida no sistema através da entrada superior do enchimento e, em seguida, flui para baixo ao longo das superfícies revestidas com filme, formando uma película líquida na área de distribuição de filme. Ao mesmo tempo, o ar é direcionado para o enchimento a partir da entrada inferior, promovendo uma eficaz troca de calor reversa com a película líquida. Uma parte desse filme líquido se fragmenta em gotículas na área de turbulência, aprimorando ainda mais a eficiência da troca de calor com o ar.

Figura 11 – Diagrama esquemático do enchimento corrugado vertical.



Fonte: Xu, W., et. al. (2022).

A estrutura principal do dispositivo criado compreendia quatro componentes essenciais: o corpo da torre, o sistema de circulação de água, o sistema de circulação de ar e o sistema de aquisição de dados. Como resultado dos experimentos realizados na torre de contracorrente úmida sob diferentes velocidades de entrada de ar, densidades de pulverização de água, relação ar-água e alturas de enchimento, as seguintes conclusões foram obtidas:

O novo enchimento vertical corrugado representa uma otimização em relação ao enchimento corrugado tradicional, apresentando um desempenho consideravelmente aprimorado. Sob a mesma velocidade de vento na entrada da torre, a eficiência de resfriamento pode ser aumentada em até 14,23%.

O aumento da relação ar-água resulta em um aumento no número de resfriamento. Isso indica que um aumento na relação ar-água pode aprimorar as propriedades de transferência de calor e massa da torre de resfriamento. Quando o volume de ar é aumentado, um aumento na relação ar-água intensificará a taxa de evaporação da água circulante, reforçando a transferência de calor evaporativa e convectiva na torre, melhorando, assim, o desempenho geral de transferência de calor e massa.

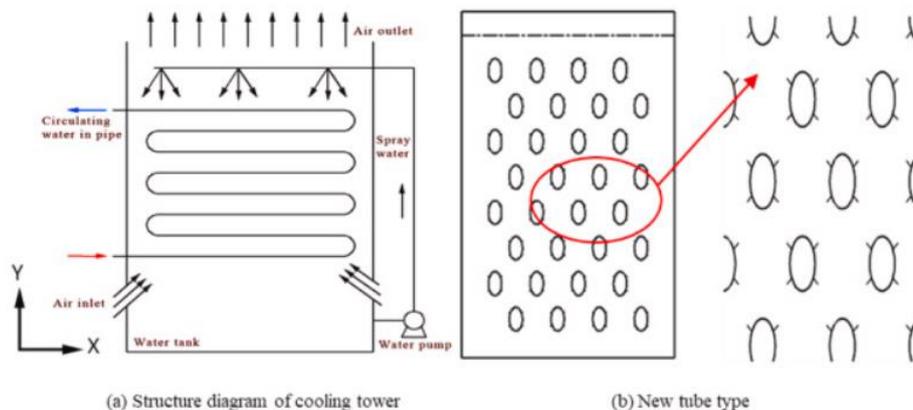
Sob a mesma relação ar-água, o aumento da altura do enchimento resulta em uma

melhoria no desempenho de troca de calor. O aumento na altura do enchimento amplia a área de troca de calor entre o gás e a água, prolonga o tempo de permanência das gotículas no enchimento e, conseqüentemente, torna a torre de resfriamento mais eficaz em termos de transferência de calor.

Zhao et al. (2021) realizaram um estudo com o objetivo de aprimorar o desempenho térmico de torres de resfriamento fechadas e úmidas, visando resolver o problema da baixa eficiência na transferência de calor. Eles basearam seu trabalho em pesquisas anteriores que analisaram a influência de diferentes tipos de tubos de troca de calor no desempenho dessas torres. Para atingir esse objetivo, propuseram uma nova estrutura de tubulação aletada elíptica e desenvolveram um modelo matemático para avaliar seu impacto no desempenho térmico da torre de resfriamento.

O tamanho do tubo de troca de calor no modelo foi determinado com base nas dimensões reais dos tubos de troca de calor em aplicações de engenharia prática. Os parâmetros estruturais fundamentais considerados no cálculo numérico incluíram a altura do modelo, o comprimento, a altura de pulverização, o diâmetro do tubo do trocador de calor (substituído por um círculo sólido), a distância entre os tubos, a espessura da parede do tubo, o comprimento da aleta do novo tubo aletado elíptico, a largura da aleta e o ângulo com relação à linha horizontal.

Figura 12 – Diagrama estrutural da Torre de Resfriamento e a tubulação sugerida.



Fonte: Zhao, et. al. (2021).

Devido à presença de três tipos distintos de fluidos na torre de resfriamento úmida fechada, o processo de transferência de calor nesta torre se torna altamente complexo. Para superar essa complexidade, foram aplicadas simplificações no estudo realizado por Zhao et al. (2021). Essas simplificações não apenas melhoraram a precisão dos cálculos, mas também reduziram o tempo necessário para realizá-los.

No estudo, o processo de troca de calor entre a água e o gás na torre foi tratado como um estado estacionário. A transferência de calor na torre foi considerada como um fluxo

bifásico gás-líquido, em que ambos foram tratados como fluidos incompressíveis. Além disso, o estudo considerou que, uma vez que as gotas de pulverização atingem a parede do domínio de cálculo, elas são capturadas, eliminando assim a presença de um filme líquido na parede.

As conclusões do estudo revelaram que com o aumento contínuo da taxa de fluxo de ar, a distribuição geral do campo de velocidade tornou-se mais uniforme. Observou-se a formação de um fluxo cilíndrico evidente em ambos os lados da parede do tubo, especialmente em altas velocidades do ar. Esse fenômeno de fluxo de ar em torno do novo tubo de aleta elíptica foi particularmente proeminente. Além disso, a velocidade do fluxo em ambos os lados da parede do tubo foi significativamente maior em comparação com os outros tubos de troca de calor, o que fortaleceu a transferência de calor entre o ar e a água de pulverização de alta temperatura.

Além disso, os resultados indicaram que todo o campo de velocidade era uniformemente distribuído, e um fluxo notável ocorria em torno do cilindro em ambos os lados da parede do tubo. Isso se deveu ao alto raio de curvatura do tubo elíptico, que acelerou o fluxo de ar na torre, aumentando, assim, o coeficiente de transferência de calor e o número de Reynolds.

Em comparação com os tubos de troca de calor circulares tradicionais, o novo tubo aletado elíptico demonstrou uma melhoria significativa no desempenho térmico da torre de resfriamento fechada úmida, atendendo às exigências das aplicações práticas e reduzindo o consumo de energia da torre de resfriamento.

O Quadro 2, a seguir, apresenta um breve resumo dos trabalhos com otimizações no processo que foram discutidos e relatados nesta seção.

Quadro 2 – Lista de estudos com melhoria no processo.

Tipo de Melhoria	Artigo	Resumo da Modificação
Processo	Dippenaar, V.; Majozi, T. (2021)	Apresenta um quadro matemático para a síntese e otimização de um sistemas de água de resfriamento (CWS) composto por várias torres de resfriamento que operam com um processo de fundo em lotes.
Processo	Sohrabi, E.; Sohrabi, S.; Iranshahi, D.; Sarmadi, M.; Moraveji, M.; (2021)	Uma nova formulação otimizada para a desinfecção do efluente da Torre de Resfriamento, em um estudo de caso da Usina de Energia de Tarasht

Processo	Wang, F.; Song, Y.; Liu, C.; He, A.; Qiang, Y. (2023)	Desenvolve um sistema de programação ideal que prevê com precisão a tendência de consumo de água do sistema de abastecimento de água e otimizar as instruções de programação e o esquema de operação por meio da interação dinâmica de informações, mapeamento de restrições de processo, condições operacionais intermitentes, ritmo de laminação, dados medidos, etc. entre o espaço físico e o virtual.
Processo	Liu, B.; Wang, Y.; Feng, X.; (2021)	O método de programação com restrições de probabilidade é usado para construir um modelo em condições incertas, onde o nível de confiança indica o grau de violação da restrição. Com o objetivo é minimizar o custo total e obter a configuração ótima da rede de resfriamento simultaneamente.
Processo	Beni, M. H.; Bazofti, M. M.; Mohammadi, A. A.; Mokhtari, H.; Saboohi, Y.; Golkar, B.; Ghandi, A. H. (2021)	Este artigo apresenta um novo método para projetar sistemas de resfriamento híbrido com base na integração de processo, sistema de resfriamento a seco e a úmido e perfis de condições ambientais.
Processo	Ghawash, F., Hovd, M.; Schofield, B. (2022)	Neste estudo, é desenvolvido um modelo matemático detalhado de uma torre de resfriamento de circuito aberto que leva em consideração as características termodinâmicas e hidrodinâmicas do processo.
Processo	Ha, J.; Kim, Y.; Park, K.; Song, Y. (2022)	Este estudo desenvolveu um novo algoritmo de controle da torre de resfriamento a partir da perspectiva da LGR, e a eficácia operacional foi revisada quantitativamente usando o EnergyPlus.
Processo	Yu, Y.; Qi, X.; Hou, X.; Qu, X.; Guo, Q.; Zhu, H. (2022)	Neste estudo, foi estabelecido um modelo de cálculo detalhado baseado no processo de transferência de calor e massa de contracorrente de duas fases entre água salgada e ar.
Processo	Hooper, J.; Languri, E.; Cunningham, G.; Guo, W. (2021)	Uma ferramenta de modelagem foi desenvolvida para realizar uma análise completa de uma torre de resfriamento e suas várias operações, a fim de garantir que a instalação tenha otimizado sua torre de resfriamento.

Processo	Blackburn, L. D.; Tuttle, J. F.; Powell, K. M. (2020)	Este trabalho apresenta uma aplicação inovadora de otimização em tempo real usando aprendizado de máquina e otimização por enxame de partículas em uma torre de resfriamento de fluxo induzido de múltiplas células que atende a uma usina de energia a carvão sob carga variável.
Processo	Nahvi, S.; Polster, S.; Melzer, S.; Stoll, A.; Munnich, M.; Mannstadt, S.; Klimant, P. (2022)	Foi projetado um método que deriva o grau de defeito dos dados de uma torre de resfriamento não defeituosa, buscando melhorar a manutenção reativa e preditiva, estimando a condição real e prevendo o comportamento defeituoso da torre de resfriamento.
Processo	Yu, Z.; Sun, C.; Fang, J.; Zhang, L.; Hu, Y.; Bao, B.; Bu, S.; Xu, W.; Ji, Y. (2021)	Neste estudo, é proposto um sistema de controle preditivo baseado em modelo (MPC) para otimizar a operação de uma torre de resfriamento, levando em consideração as variáveis do processo e as condições ambientais. O MPC utiliza um modelo matemático da torre de resfriamento para prever o desempenho futuro com base nas ações de controle planejadas, como a velocidade do ventilador e a taxa de recirculação de água.
Processo	Agarwal, K. N.; Biswas, P.; Shirke, A. (2022)	Este trabalho apresenta um modelo inovador de torre de resfriamento juntamente com um sistema de controle de aproveitamento de energia com base nas condições climáticas prevalentes, melhorando assim a eficiência geral do sistema.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nos estudos que visam melhorar as torres de resfriamento, há um foco considerável na otimização do processo de resfriamento, com nove deles se concentrando na criação de modelos matemáticos.

Agarwal, e sua equipe (2022) conduziram uma pesquisa com o intuito de diminuir o gasto energético de uma torre usada para resfriar a água proveniente de um forno de recozimento em lotes de um laminador a frio na indústria siderúrgica. Inicialmente, eles desenvolveram um modelo do processo no Aspen Plus.

Em seguida, criaram um modelo correspondente no MATLAB para a torre de resfriamento, o qual foi validado usando informações operacionais da fábrica. Utilizando esse modelo no MATLAB, eles projetaram controladores no Simulink que ajustam a velocidade do ventilador de exaustão e a vazão da bomba com base nas condições climáticas, visando reduzir

o consumo de energia.

Primeiramente, o modelo foi treinado e validado com os dados operacionais fornecidos pela planta. Depois, foi otimizado dinamicamente, resultando em maior eficiência e no número ideal de estágios. Nesse contexto, foram determinados três estágios de equilíbrio como a configuração ótima para a torre de resfriamento, alcançando uma eficiência de 60%.

Para verificar a precisão do modelo no MATLAB, eles usaram o Aspen Plus como referência. Os resultados obtidos tanto no modelo MATLAB quanto no Aspen Plus seguiram a tendência observada experimentalmente. As estratégias de controle aplicadas no modelo do Aspen mostraram que a torre poderia operar com uma redução de até 40% na vazão de água, o que resultou em economia de energia tanto na bomba quanto no ventilador da torre de resfriamento, sem prejudicar o desempenho global.

O modelo desenvolvido foi então testado em uma torre de resfriamento piloto, resultando em economias de energia de 30% tanto na bomba quanto no ventilador. Além disso, ao controlar a taxa de fluxo da água quente da bomba, eles conseguiram reduzir significativamente as perdas por arraste, diminuindo assim a necessidade de reposição de água.

A implementação deste modelo e estratégia de controle em torres de resfriamento industriais oferece diversos benefícios potenciais, incluindo uma redução de 30% no consumo de energia, o que se traduz em economia financeira e menor emissão de CO_2 . Além disso, a diminuição na velocidade da ventoinha resulta em menos perdas por evaporação, reduzindo o consumo global de água.

Com modificações mais específicos, existem três abordagens distintas. A primeira, proposta por Sohrabi et al. (2021), concentra-se na dosagem da água utilizada na torre de resfriamento. A segunda, apresentada por Wang et al. (2023), visa desenvolver um sistema de programação ideal, baseado em gêmeos digitais, para prever com precisão o padrão de consumo de água no sistema de abastecimento de água e otimizar as instruções de programação e o esquema de operação. A terceira, liderada por Nahvi et al. (2022), direciona seus esforços para aprimorar a manutenção reativa e preditiva, com foco na estimativa do estado atual e na previsão de falhas no desempenho da torre de resfriamento.

Dando foco a pesquisa de Nahvi et al. (2022), eles concentraram-se na melhoria da manutenção reativa e preditiva da torre de resfriamento. Ela se baseia na estimativa do estado atual e na previsão de falhas no desempenho da torre. Essa abordagem proativa permite tomar medidas preventivas antes que ocorram problemas significativos, contribuindo para a eficiência geral da torre de resfriamento.

A eficácia e o progresso do sistema foram confirmados por meio de um algoritmo de solução eficaz e rápido, resultando na redução significativa do consumo de energia e do desperdício de água de resfriamento. Além disso, houve controle estável do nível de água no processo de resfriamento, contribuindo para aprimorar a segurança da operação da estação de bombeamento.

Este modelo demonstrou uma evolução contínua e adaptação dos gêmeos digitais ao modelo físico, com alto nível de confiabilidade e viabilidade. Sua aplicação pode ser estendida para o planejamento e otimização da produção em outros processos industriais.

A abordagem incluiu a implementação de um sistema de detecção de mudança de conceito, monitorando o erro de estimativa de um modelo baseado em rede neural de várias camadas. Um aumento nesse erro indicaria uma mudança no comportamento do sistema e um aumento no risco de falha.

Ao analisarmos os cinco estudos centrados no equipamento, fica evidente que a área de pesquisa mais explorada foi a relacionada ao enchimento. Em relação ao processo, dos treze estudos, apenas três não se concentraram na síntese e otimização. Entre os dez que seguiram essa abordagem, apenas um se destacou ao se basear no processo de transferência de calor e massa de contracorrente entre água salgada e ar.

Apesar dos avanços propostos nestes estudos nas áreas investigadas, ainda existe espaço para a realização de novos estudos:

- **Eficiência Energética:** Embora alguns estudos tenham abordado a eficiência energética, ainda há espaço para melhorias. Isso pode incluir o desenvolvimento de algoritmos de controle mais avançados, a integração de fontes de energia renovável para alimentar as torres de resfriamento, a pesquisa de materiais de construção mais eficientes em termos de energia e a inclusão do uso de tecnologias de acionamento de velocidade variável e sistemas de controle avançados.
- **Integração de Fontes de Água Alternativas:** Além de água doce e salgada, outras fontes de água alternativas, como água de reúso, água pluvial ou água de processo, podem ser exploradas para o resfriamento. Pesquisas sobre como integrar essas fontes de água de forma eficiente e econômica são necessárias.
- **Estratégias de Controle Avançadas:** A pesquisa pode se concentrar em estratégias de controle avançadas, como aprendizado de máquina e algoritmos de otimização, para melhorar o desempenho das torres de resfriamento em tempo real, levando em consideração as condições ambientais em constante mudança.

Além destes, ainda pode-se entrar nos ramos:

- Controle de Bioincrustação: Desenvolvimento de métodos de prevenção e controle eficazes para evitar a formação de bioincrustações nas superfícies internas das torres, o que pode reduzir a eficiência do resfriamento.
- Integração com Energias Renováveis: Pesquisa sobre como integrar torres de resfriamento com fontes de energia renovável, como painéis solares ou sistemas de energia eólica, para reduzir o consumo de energia.
- Gerenciamento de Água: Desenvolvimento de métodos mais eficazes de gerenciamento da água usada nas torres de resfriamento, incluindo reciclagem, tratamento e reuso.
- Otimização do Fluxo de Ar: Estudos sobre o “*design*” do sistema de ventilação das torres para melhorar o fluxo de ar e a distribuição uniforme, aumentando assim a eficiência de resfriamento.
- Inteligência Artificial e Análise de Dados: Utilização de técnicas avançadas de IA e análise de dados para otimizar o controle operacional das torres e tomar decisões baseadas em dados em tempo real.

Essas áreas de pesquisa podem contribuir para o desenvolvimento contínuo de torres de resfriamento mais eficientes, confiáveis e sustentáveis, atendendo às crescentes demandas da indústria e preocupações ambientais.

6. CONCLUSÃO

Os estudos abordados apresentam uma ampla gama de contribuições valiosas para o campo das torres de resfriamento e seus processos de otimização. Esses estudos se dividem principalmente em duas categorias: aqueles que se concentram na melhoria do equipamento e aqueles que buscam aprimorar os processos de resfriamento. Ambas as categorias são fundamentais para melhorar a eficiência e a sustentabilidade das torres de resfriamento industriais.

No que diz respeito à otimização do equipamento, os estudos oferecem melhorias valiosas sobre como projetar e melhorar componentes-chave das torres de resfriamento, como o enchimento e coluna de sustentação. Essas inovações visam reduzir o consumo de energia, aumentar a eficiência de resfriamento e minimizar falhas de equipamento. Notavelmente, as melhorias no enchimento, como o uso de designs verticais corrugados e aletados elípticos, demonstraram um aumento significativo no desempenho térmico das torres.

Em relação aos estudos de otimização de processo, eles se concentram em aprimorar a eficiência do resfriamento, muitas vezes por meio de modelos matemáticos detalhados. Esses modelos consideram uma série de variáveis, como salinidade da água, temperatura ambiente, taxa de fluxo de ar e altura do enchimento, para otimizar a operação da torre e minimizar o consumo de água e energia.

Por fim, esses estudos coletivamente contribuem para a eficiência, a sustentabilidade e a confiabilidade das torres de resfriamento industriais. Eles fornecem ideias valiosas para a indústria, demonstrando maneiras de economizar recursos, reduzir o consumo de energia e melhorar o desempenho global desses sistemas críticos para uma ampla gama de aplicações industriais. À medida que as empresas buscam atender a metas de sustentabilidade e eficiência energética, esses estudos desempenham um papel importante na proposta de soluções inovadoras e eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUNHA JUNIOR, I. CA. Transferência de calor e massa de um condensador evaporativo em escala reduzida. Igarss 2014, n. 1, p. 1–5, 2014.

AGARWAL, K. N.; BISWAS, P.; & SHIRKE, A. Novel Model Predictive Control by Hypothetical Stages to Improve Energy Efficiency of Industrial Cooling Tower. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 215, 118899, 2022.

ASVAPOOSITKUL, W.; KUANSATHAN, M. Comparative evaluation of hybrid (dry/wet) cooling tower performance. *Applied Thermal Engineering*, v. 71, p. 83–93, 2014.

BECHER, B.; HILLA. Biography: Documentary/Architecture photographers Bernd and Hilla Becher; *Monovisions Black & White Photography Magazine*, 26/06/2015. Disponível em: <<https://monovisions.com/biography-documentary-architecture-photographers-bernd-and-hilla-becher/>>. Acesso em: 20/08/2023

BENI, M. H.; BAZOFTI, M. M.; MOHAMMADI, A. A.; MOKHTARI, H.; SABOOHI, Y.; GOLKAR, B.; GHANDI, A. H. Water-energy nexus approach for optimal design of hybrid cooling system in direct reduction of iron plant. *Journal of Cleaner Production*, v.287, 2021

BETZ. Handbook of industrial water conditioning. 9ª ed. Treviso: Betz Laboratories, 1991

BLACKBURN, L. D.; TUTTLE, J. F.; POWELL, K. M. Real-time optimization of multi-cell industrial evaporative cooling towers using machine learning and particle swarm optimization. *Journal of Cleaner Production*, v. 271, 2020

BURGER, R. Cooling tower technology: maintenance, upgrading and rebuilding. 3rd ed, The Fairmont Press Inc, India, 1994.

CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N. Cooling Towers - Selection, Design and Practice. [S.l: s.n.], 1981.

CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. Funcionamento de uma Torre de Resfriamento de Água. EPUSP. *Revista de Engenharia Química*. Ano VI, n. 14, 2005.

da SILVA, G. B. Influência das variáveis de operação em torres de resfriamento: uma revisão bibliográfica. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

de OLIVEIRA, E. V. F. Diagnóstico de Eficiência Energética de Uma Torre de Resfriamento de Água da Arcelormittal Inox Brasil. Tese de Mestrado (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

de OLIVEIRA, T. M., DA SILVA, F. R. Estudo Termoeconômico Comparativo Entre A Torre De Arrefecimento E O Air Cooler Para Resfriamento De Gás Natural. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

DEHAGHANI, S. T.; AHMADIKIA, H. Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet/dry approach. Applied Thermal Engineering, Oxford, v. 125, p. 1002–1014, 2017.

DEZIANI, M.; RAHMANI, Kh.; ROUDAKI, M.; KORDLOO, M. Feasibility study for reduce water evaporative loss in power plant cooling tower by using air to heat exchanger with auxiliary Fan. Desalination, v. 406, p. 119-124, 2015.

DIPPENAAR, V.; MAJOZI, T. Integrated Optimization Framework for the Design and Scheduling of Batch Cooling Water Networks. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021

FEMP - FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM. Cooling towers: understanding key components of cooling towers and how to improve water efficiency. Energy Efficiency & Renewable Energy. 2011. Disponível em: <https://www.petroleoenergia.com.br/artigo-tecnico-reforma-de-torres-de-resfriamentoexige-capacidade-tecnologica/>. Acesso em: 12/08/2023.

FERRAZ, F. Torres de resfriamento. Documento técnico, 2008.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das operações unitárias. Editora LTC. 2ª Edição. 1982.

GHAWASH, F., HOVD, M.; SCHOFIELD, B. Model Predictive Control of Induced Draft Cooling Towers in a Large Scale Cooling Plant. IFAC-PapersOnLine, 2022

GHISLIERI, D. Tratamiento de Agua de Sistemas de Enfriamiento. Instituto de Ingeniería Química Tecnología y Servicios Industriales. Disponível em: www.fing.edu.uy/iq/cursos/qica/repart/Aguaenfr.doc. Acessado em: 25/08/2023.

HA, J.; KIM, Y.; PARK, K.; SONG, Y. Energy Saving Evaluation with Low Liquid to Gas Ratio Operation in HVAC&R System. Energies, vol. 15, p. 19, 2022

HOOPER, J.; LANGURI, E.; CUNNINGHAM, G.; GUO, W. A Modeling Tool To Analyze The Performance Of Industrial Cooling Towers. Tennessee Technological University ProQuest Dissertations Publishing, 2021

JAMBO, H. C. M & FÓFANO, S. Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle. 1ª Edição. Editora Ciência Moderna. 372p, 2008

JASIULIONIS, J. A. E. Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água utilizando redes neurais artificiais. Dissertação de mestrado (Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, 2012.

KAPOTE, R., VIVEK, K., DORWAT, A. (2023). To Evaluate the Performance of Cooling Tower Using Different Filters. In: Pradeep Pratapa, P., Saravana Kumar, G., Ramu, P., Amit, R.K. (eds) Advances in Multidisciplinary Analysis and Optimization. NCMDAO 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3938-9_44

KERN, D. Q. Process heat transfer. New York: McGraw-Hill, 1950.

KREITH, F.; BLACK, H. A.; BOHADANA, L. Heat Transfer: Principles and Applications. Cengage Learning, 2017.

KUEHN, T. H.; RAMSEY, J. W.; THRELKELD, J. L. Thermal environmental engineering.3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.

KUMAR, C. L. M.; SHWETHA, K.G.; SHANTHAPPA, B.C.; MANJUNATHA, K. A Study on Seismic Behavior of Hyperbolic Cooling Tower with V and X Columns. In: Pal, I., Kolathayar, S., Tawhidul Islam, S., Mukhopadhyay, A., Ahmed, I. (eds) Proceedings of the 2nd International Symposium on Disaster Resilience and Sustainable Development. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 294. Springer, Singapore.

LEAL, A. L. Coluna de resfriamento de água e umidificação de ar: projeto e construção de equipamento e execução de ensaios experimentais para aulas práticas de engenharia no laboratório de engenharia de alimentos (LEA). João Pessoa, 2016, 57 p. Relatório técnico da disciplina de Estágio Curricular Supervisionado (graduação em Engenharia de Alimentos). Departamento de Engenharia de Alimentos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

LIMA, F. C. Otimização energética de torre de resfriamento: estudo de caso. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, 2019.

LIU, B.; WANG, Y.; FENG, X. Optimization of circulating cooling water systems based on chance constrained programming. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2021

MARQUES, G. I. Avaliação de Torres de Resfriamento de Tiragem Mecânica Forçada e Induzida em um Sistema Industrial. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Santa Cecília, 2016.

MARTIN, W. E.; MCELVEEN, R.; HOLUB, R. A. Benefits of direct drive motors in cooling towers. AIChE Spring Meeting and Global Congress on Process Safety, 2020

MELLO, L. C. DE. Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Universidade de São Paulo, 2008.

MIERZWA, J.; HESPANHOL, I. Água na Indústria: uso racional e reúso. São Paulo, Oficina de Textos, 2005.

MOLINA, C. G. Climatización, Sistemas de Água Sanitária, Humidificadores Evaporativos y Similares. Curso de Mantenimiento Higiênico-Sanitario de Instalaciones de Riesgo Frente a Legionelosis. Academia Abrisqueta. Murcia. 27- 41. 188 p, 2009.

NAHVI, S.; POLSTER, S.; MELZER, S.; STOLL, A.; MUNNICH, M.; MANNSTADT, S.; KLIMANT, P. Enhancing cooling tower performance with condition monitoring and machine learning based drift detection. Procedia CIRP, 2022

NEMITZ, G, V. Prospecção De Tecnologias Para Redução De Consumo De Água Em Sistemas De Resfriamento Em Refinarias. 114 f. Dissertação de Mestrado (Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, A. C. C. T. Estudo de Materiais Alternativos para o Enchimento de Torres de Resfriamento. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, 2012.

OLIVEIRA, J. D. Auditoria em torres de resfriamento em indústrias químicas. 43 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, BA, 2011.

PANNKOKE, T. Cooling tower basic. Journal HPAC Engineering. 1996.

PEREIRA, J. S. Consumo de água do sistema de resfriamento do mangabeira shopping, João Pessoa, PB e viabilidade de reúso da água de descarte para fins não potáveis. Trabalho de Conclusão do Curso (Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira) - Universidade Federal da Paraíba, 2018.

RESFRIAMENTO DE ÁGUA. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Universidade de São Paulo, 2012.

SAMPAIO, F. M. N. MA. Projecto de uma Torre de Arrefecimento de 3 MW de Potência Térmica. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.

SAMPAIO, F. S. Torre de resfriamento modelagem, simulação e testes experimentais para apoio ao ensino de engenharia mecânica. 2013. 171 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SHAPIRO, H. N.; MORAN, M. J.; MUNSON, B. R.; DEWITT, D. P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos. 2005.

SILVA, J. M. P. Estudo do Impacto das Não Conformidades de uma Torre de Resfriamento no seu Custo Total. Dissertação de Mestrado (Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, 2021.

SOHRABI, E.; SOHRABI, S.; IRANSHAHI, D.; SARMADEI, M.; & MORAVEJI, M. A Novel Optimized Formulation for Cooling Tower Effluent Disinfection: Tarasht Power Plant Case Study. Applied Thermal Engineering, 2021.

SOUZA, M. C. DE; FLORES, T. S.; GRACIELLE, N. As Influências das Torres Hiperbólicas nas Usinas Termoelétricas: Um Foco Termonuclear. p. 30–34, 2014.

TREYBAL, R. E. Mass transfer operations. Cingapura: McGraw-Hill, 3° ed., 1981.

U.S. Department of Energy. (2011). Industrial Technologies Program: Cooling Towers.

UNEP – United Nations Environment Programme. Energy Efficiency Guide for Industry in Asia – Electrical Energy Equipment: Cooling Towers. Division of Technology, Industry, and Economics. Sweden, 2006. Disponível em: www.energyefficiencyasia.org. Acesso em: 26/08/2023.

VEIGA, A. A. Estudo do Efeito Biocida do Cloro e do Peróxido de Hidrogênio em Sistemas de Resfriamento com Reúso de Efluente como Água de Reposição. Tese de Doutorado pelo Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química. UFRJ/EQ, 2010

VIEIRA, F.C. Viabilidade Técnica e Econômica do Reaproveitamento de Efluentes de Torres de Resfriamento. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

WANG, F.; SONG, Y.; LIU, C.; HE, A.; QIANG, Y. Multi-objective Optimal Scheduling of Laminar Cooling Water Supply System for Hot Rolling Mills Driven by Digital Twin for Energy-Saving. Journal of Process Control, v. 122, p. 134-146, 2023.

XU, W.; JI, Y.; YU, Z.; ZHANG, L.; BAO, B.; HU, J.; LI, Y.; FANG, J.; & HU, Y. Influence of New Vertical Corrugated Packing on Thermal Performance of Cooling Tower. Journal of Building Engineering, v. 72, 106615, 2022.

YU, Z.; SUN, C.; FANG, J.; ZHANG, L.; HU, Y.; BAO, B.; BU, S.; XU, W.; JI, Y. Water recovery efficiency improvement using the enhanced structure of the mist eliminator. Process Safety and Environmental Protection, v. 154, p. 433-446, 2021.

YU, Y.; QI, X.; HOU, X.; QU, X.; GUO, Q.; ZHU, H. Parametric study of heat/mass transfer performance of seawaterair two-phase counterflow in packing in seawater cooling towers. *Heat Transfer*, 51, 2667 - 2687. 2022

ZHAO, R.; BU, S.; ZHAO, X.; ZHANG, L.; XU, W.; YU, Z.; FANG, J.; JI, Y.; HU, Y.; & BAO, B. Study on Thermal Performance of New Finned Heat Exchange Tube Bundles in Cooling Tower. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 168, 107064, 2021.