

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL DA SILVA BENTO

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO EM TORRES DE
RESFRIAMENTO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**FRANCISCO BELTRÃO
2021**

GABRIEL DA SILVA BENTO

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO EM TORRES DE
RESFRIAMENTO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Influence of variables operation in Cooling Towers: a literature review

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Irede Angela Lucini Dalmolin.

FRANCISCO BELTRÃO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL DA SILVA BENTO

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO EM TORRES DE
RESFRIAMENTO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Alimentos da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 30/novembro/2021

Irede Angela Lucini Dalmolin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gabriel Cassemiro Mariano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Juan Carlos Pokrywiecki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

FRANCISCO BELTRÃO

2021

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e as minhas irmãs por sempre me apoiarem e por não me deixarem desistir de ir atrás dos meus sonhos.

A Professora Iredé Angela Lucini Dalmolin por aceitar o convite de orientação e pela dedicação e auxílio durante a realização desse trabalho.

Aos meus amigos Açucena Lombardo, Sabrina Korb, Hélen Abilhôa, Júlia Souza, Maria Laura Galdino pelas experiências incríveis e pelo apoio durante a graduação.

A todos os meus professores da graduação que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Auxílio Estudantil, que foi fundamental para que eu conseguisse chegar até aqui.

RESUMO

As torres de resfriamento de água são equipamentos amplamente utilizados em refinarias, indústrias químicas e de alimentos para a remoção de calor das correntes de águas residuais e controle da temperatura. O desempenho da troca térmica é de grande importância para a indústria, pois mudanças em relação às especificações de operação descritas no projeto afetam o funcionamento e a eficiência do resfriamento. Assim, o presente trabalho teve como objetivo a definição, através de revisão bibliográfica, das principais variáveis que influenciam a operação e, por consequência, a capacidade de troca térmica de torres durante o resfriamento da água. Dessa forma, observou-se que as características físico-químicas da água de resfriamento e da purga influenciam a capacidade de resfriamento da torre através da formação de corrosões, incrustações e formação de biofilmes, fatores estes que diminuem a área de troca térmica e entopem tubulações e acessórios, reduzindo a eficiência do processo de resfriamento. As variações das correntes de água e ar são ocasionadas por condições operacionais e climáticas do local de instalação da torre e afetam o desempenho da mesma por estarem relacionadas diretamente ao processo de troca térmica da torre durante a formação da interface água-ar no processo de resfriamento.

Palavras-chave: condições de operação; torres de resfriamento; águas residuais.

ABSTRACT

Water cooling towers are widely used for refineries, chemical and food industries in order to remove heat from residual water flow and control the temperature. The heat exchange performance is very important to industry, because of changing the operational specifications defined in the project can directly affect cooling performance. Thus, the purpose of this research was to define, by means of literature review, the main variables which impacts not only on the operation, but also on the capacity of heat exchange of the water cooling towers. Thereby, it was observed that the physicochemical characteristics of cooling water and purge influence the cooling capacity through corrosion, incrustation and biofilm formation by decreasing the heat exchange area and clogging the pipes and accessories and, by consequence, damaging the cooling process efficiency. The variations on water and air flows are caused by operational and climatic conditions from the tower installation site, affecting the tower performance due to the heat exchange process during the interface water-air in the cooling process.

Keywords: operation conditions; cooling tower ; residual water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Torre de resfriamento contracorrente.....	14
Figura 2 – Torre de resfriamento em corrente cruzada.	14
Figura 3 – Esquema de Funcionamento de uma torre de resfriamento.	15
Figura 4 – Transferências de calor em uma gota de água.	16
Figura 5 - Relação entre as temperaturas do ar e água em uma torre de resfriamento contracorrente.	17
Figura 6 – Recheio do tipo <i>splash</i> para torres de resfriamento.	19
Figura 7 – Recheio do tipo filme para torres de resfriamento.....	20
Figura 8 – Fluxograma de etapas de pesquisa para elaboração de revisão bibliográfica.	21
Figura 9 – Enchimento de uma torre de resfriamento limpo, livre da presença de biofilme.....	27
Figura 10 – Enchimento de uma torre de resfriamento com o desenvolvimento de biofilme.....	27
Figura 11 – Principais problemas ocasionados por microrganismos em torres de resfriamento.	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo geral.....	10
2.2	Objetivos específicos.....	10
3	REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1	Torres de resfriamento	11
3.1.1	História das torres de resfriamento.....	11
3.1.2	Conceitos relacionados	12
3.1.3	Tipos de torres de resfriamento.....	13
3.1.4	Princípio de funcionamento	15
3.1.5	Principais componentes	17
<u>3.1.5.1</u>	<u>Eliminador de gotas.....</u>	<u>17</u>
<u>3.1.5.2</u>	<u>Sistema de distribuição de água.....</u>	<u>18</u>
<u>3.1.5.3</u>	<u>Enchimento ou recheio.....</u>	<u>18</u>
<u>3.1.5.4</u>	<u>Ventiladores</u>	<u>20</u>
<u>3.1.5.5</u>	<u>Venezianas.....</u>	<u>20</u>
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1	Água de resfriamento e reposição.....	22
5.1.1	Principais parâmetros da água controlados em sistemas de resfriamento.....	22
5.1.1.1	pH.....	23
5.1.1.2	Dureza.....	23
5.1.1.3	Teor de ferro.....	23
5.1.1.4	Alcalinidade total	23
5.1.1.5	Sílica total.....	23
5.1.1.6	Condutividade e Sólidos Totais Dissolvidos	24
5.1.1.7	Cloretos	24
5.1.1.8	Sólidos suspensos.....	24
5.1.1.9	Microrganismos	24
5.2	Parâmetros de controle da água em sistemas de resfriamento.....	25
5.2.1	Incrustação	25

5.2.2	Corrosão.....	26
5.2.3	Crescimento microbiológico	26
5.3	Corrente de água de circulação	29
5.4	Corrente de ar	29
5.5	Ciclo de concentração da água de circulação	30
5.6	Condições climáticas do local da instalação da torre	30
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A maior parte dos processos industriais requerem remoção de calor para controle de temperatura, e a forma mais comum é o descarte dessa energia para o ambiente através da água ou ar. A água é um meio de transferência de calor favorável devido à sua disponibilidade, elevada capacidade calorífica e baixo custo. De tal forma, as torres de resfriamento de água são utilizadas em plantas de geração de energia elétrica, refinarias, sistemas de refrigeração e indústrias químicas.

A utilização de torres de resfriamento está associada a fatores de redução de custos operacionais e fatores ecológicos, pois o descarte da água logo após a sua utilização traria um grande impacto financeiro com custos de captação de tratamento de água. Além disso, a utilização de um sistema de resfriamento reduz os impactos ambientais, pois a água é resfriada de forma limpa em um circuito fechado e com baixo desperdício, utilizando apenas a reposição para suprir as perdas por arraste, evaporação e purga.

O desempenho térmico da torre é de grande importância para a indústria e pequenas mudanças em relação às especificações de operação descritas no projeto podem provocar implicações no funcionamento e na eficiência do processo. As variáveis que são estabelecidas na especificação de uma torre de resfriamento de água são o fluxo de água aquecida que alimentará a torre, a carga térmica a ser removida, a diferença entre a temperatura de entrada e saída de água e a temperatura de bulbo úmido.

Na literatura encontram-se diversos trabalhos sobre torres de resfriamento, porém, nota-se uma carência de estudos a respeito das características da operação que afetam o desempenho do resfriamento. Portanto, este trabalho teve como objetivo definir as principais variáveis que influenciam na operação e por consequência na capacidade de troca térmica de uma torre de resfriamento de água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Definir as principais variáveis que influenciam na operação e por consequência na capacidade de troca térmica de uma torre de resfriamento de água.

2.2 Objetivos específicos

- Indicar variáveis determinantes para maximizar a troca térmica;
- Propor um resfriamento mais eficiente da água;
- Buscar alternativas para minimizar efeitos de sazonais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Torres de resfriamento

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para a remoção de calor de água proveniente de condensadores de usinas de geração de energia, sistemas de refrigeração e trocadores de calor. A utilização destes equipamentos tem como objetivo o resfriamento de modo limpo e a reutilização da água fornecida, trazendo assim benefícios ambientais e econômicos (VIEIRA, 2011; SAMPAIO, 2013).

Uma torre de resfriamento pode ser vista como uma coluna de transferência de calor e massa, pois ela é projetada para que ocorra um resfriamento por evaporação, onde uma pequena parte da água evapora para resfriar o resto da corrente. Esses equipamentos podem fornecer temperaturas significativamente menores do que radiadores, por exemplo, visto que o limite teórico do resfriamento é a temperatura de bulbo úmido, que em geral é menor do que a temperatura do ar (OLIVEIRA, 2012).

3.1.1 História das torres de resfriamento

A construção da primeira torre de resfriamento do mundo ocorreu na Alemanha em 1894 pelo engenheiro Hans Joachim Balcke. O modelo proposto por Balcke era caracterizado como uma torre de tiragem natural e possuía 12 metros de altura. Dez anos depois tal modelo já possuía mais de 1.400 unidades em funcionamento ao redor do mundo (SAMPALIO, 2013).

O ano de 1930 foi marcado pelo início do uso do perfil hiperbólicos nos projetos de torres e pela construção da primeira torre de resfriamento de água com tiragem mecânica induzida nos Estados Unidos. Em 1950 foram produzidas as primeiras torres no Brasil e iniciou-se o desenvolvimento por Carl Munters dos primeiros recheios, com objetivo de melhorar as taxas de transferência de calor durante o resfriamento. Em 1955, Munters patenteia os primeiros recheios do tipo filme formados por papelão ou folhas de policloreto de vinila PVC, que revolucionaram o mercado, conferindo as torres grande eficiência. A partir da década de 70 houve uma melhora nas tecnologias possibilitando a aplicação de

torres úmidas ou secas e a utilização de sistemas de ventilação em torres de resfriamento (SAMPAIO, 2013).

3.1.2 Conceitos relacionados

Segundo Bordinhão (2018), Freytag (2018) e Tebecherani (2015), existem diversos parâmetros fundamentais utilizados para o monitoramento e modelagem de torres de resfriamento:

- a) Água de resfriamento fria ou de suprimento (CWS): é a água na saída torre após passar pelo resfriamento;
- b) Água de resfriamento quente ou de retorno (CWR): é a água que está entrando na torre, que ainda não sofreu remoção de calor;
- c) Temperatura de bulbo úmido: corresponde a menor temperatura que a água pode atingir na saída do resfriamento, sendo a principal variável, que define o tamanho da torre;
- d) Temperatura de bulbo seco: a temperatura do ar por medição direta;
- e) Purga: água descartada do sistema de resfriamento com objetivo de controlar a concentração de sólidos;
- f) Água de reposição (*make-up*): Água repostada para compensar as perdas por evaporação, arraste pela corrente de ar e purga;
- g) Capacidade térmica: quantidade de calor que a torre pode dissipar para uma dada vazão;
- h) *Approach*: é a diferença de temperatura a água resfriada e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre. O *approach* influencia no desempenho da torre de resfriamento, pois quanto menor o valor, mais próximo da menor temperatura a ser atingida a água estará na saída;
- i) *Range*: diferença de temperatura entre a água de entrada e saída da torre.

3.1.3 Tipos de torres de resfriamento

As torres de resfriamento têm como objetivo o resfriamento de um fluido de trabalho e a forma como ocorre o resfriamento classifica a torre em circuito aberto; em que o fluido é resfriado de forma indireta através de dutos que trocam calor com a torre, ou circuito fechado; onde a troca de calor ocorre de forma direta entre a água e ar, aumentando a eficiência do processo (SAMPAIO, 2013).

Segundo Jasiulionis (2012) e Waki (2009), as torres de resfriamento também podem ser classificadas em torres de ventilação natural, torre de tiragem natural e torre de tiragem mecânica; de acordo com a movimentação do ar.

Nas torres de ventilação natural ocorrem grandes perdas por arraste e a movimentação do ar é induzida por jatos de água em bicos de pulverização, onde o ar movimenta-se horizontalmente, enquanto a água cai verticalmente. Esse é o tipo de torre mais simples, podendo ser constituída ou não de recheio e com seu desempenho determinado a partir da altura e quantidade de bicos de pulverização (JASIULIONIS, 2012; WAKI, 2009).

Nas torres de tiragem natural, a movimentação da corrente de ar ocorre por meio da diferença de densidade entre o ar úmido do interior da torre e do ar do ambiente externo à torre. Elas são extremamente altas, de grande dimensão e limitadas à regiões frias e com incidência de fortes ventos. Sua estrutura possui geometria hiperbólica que cria uma região de baixa pressão na superfície da torre, aumentando a velocidade de escoamento do ar. Além disso, a forma hiperbólica induz que as correntes de entrada de vento fiquem orientadas para o centro (SAMPAIO, 2013).

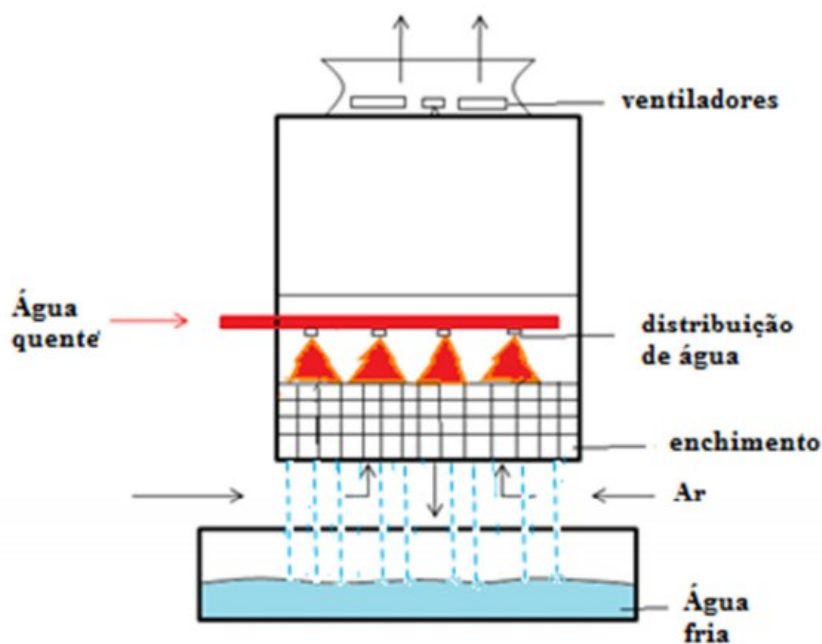
As torres de tiragem mecânica não possuem limitação de localização e são amplamente utilizadas no Brasil. A movimentação de corrente de ar ocorre por meio do uso de ventiladores mecânicos, o que promove um controle da vazão de ar, e por consequência da temperatura de água fria. As dimensões dependem da diferença de temperatura entre a água quente e fria, vazão de água a ser resfriada, diferença de temperatura entre a água quente e a temperatura de bulbo úmido, altura da torre e a quantidade de ar através do recheio (JASIULIONIS, 2012; WAKI, 2009).

Esse tipo de torre ainda podem ser subdivido em torres de tiragem forçada ou induzida. No primeiro tipo, os ventiladores estão posicionados na base da torre, forçando o ar através do enchimento. Elas são caracterizadas pela alta velocidade

de entrada de ar e baixa velocidade de saída, o que a torna suscetível a recirculação do ar quente. No segundo tipo, o ventilador fica posicionado na saída de ar na parte superior da torre, sendo responsável pela retirada do ar, o que minimiza o problema de recirculação do ar quente, porém, nesta posição o ventilador está sujeito a corrosão (JASIULIONIS, 2012; WAKI, 2009).

Segundo Jasiulionis (2012), as torres de resfriamento ainda podem ser classificadas em contracorrente e corrente cruzada, de acordo com a maneira em que ocorre o fluxo de água e ar. Em torres contracorrente o fluxo de ar tem sentido contrário à corrente de água. Como apresentado na Figura 1, os bicos de pulverização são colocados no topo da torre e a entrada de ar ocorre pela base da torre, fazendo com que o contato entre a água e o ar ocorra em sentidos contrários.

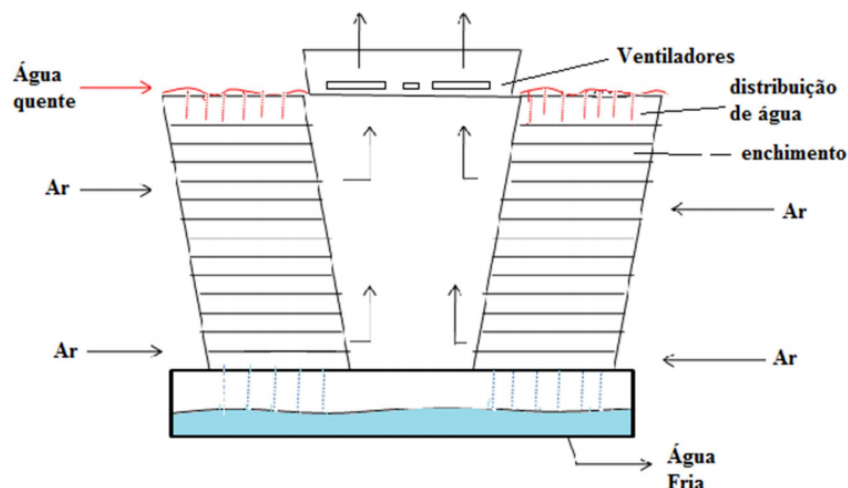
Figura 1– Torre de resfriamento contracorrente



Fonte: Jasiulionis (2012)

A Figura 2 ilustra uma torre em corrente cruzada que possui janelas laterais ao longo da torre, por onde o ar entra e flui perpendicularmente à água quente proveniente do topo da torre.

Figura 2 – Torre de resfriamento em corrente cruzada

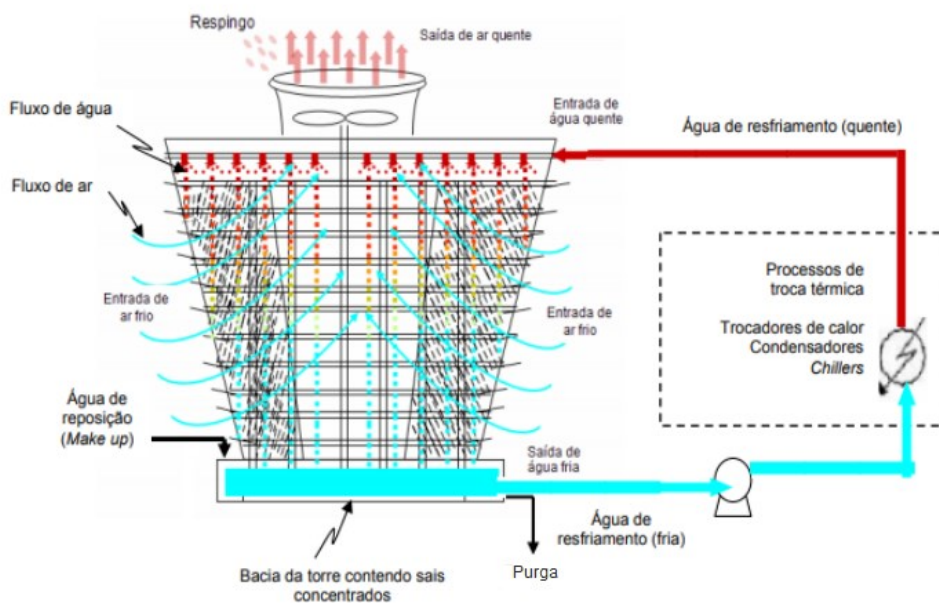


Fonte: Jasiulionis (2012)

3.1.4 Princípio de funcionamento

As torres de resfriamento são equipamentos de operação contínua, onde a água aquecida é bombeada para o topo da torre, sendo aspergida e resfriada através da transferência de calor e massa, conforme a Figura 3. Como essas transferências ocorrem através de superfícies, deseja-se sempre que se tenha a máxima superfície de água exposta. Essa superfície máxima pode ser obtida através do borrifamento de água para formação de gotículas e a utilização de recheio (MENDONÇA, 2019; REIS; SILVEIRA; DOMENI, 2003).

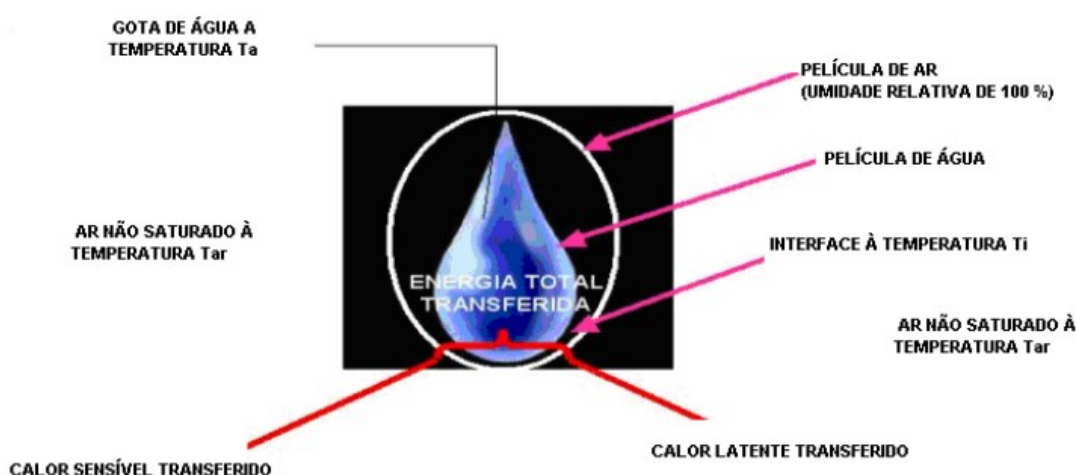
Figura 3 – Esquema de Funcionamento de uma torre de resfriamento



Fonte: Adaptado Silva (2019)

A troca de calor da água de resfriamento com o ar no interior de uma torre operando em contracorrente ocorre por dois tipos de calor: calor sensível e calor latente, sendo necessário considerar os fenômenos no interior e na superfície de uma gota de água, bem como no ar para determinar o balanço de energia, conforme a Figura 4. No sistema água-ar a transferência de calor acontece da fase líquida para a interface líquido-gás e da interface para o ar. Essa carga térmica é definida como calor sensível e causa o aumento da temperatura do ar (OIKAWA, 2012).

Figura 4 – Transferências de calor em uma gota de água



Fonte: Mello (2008)

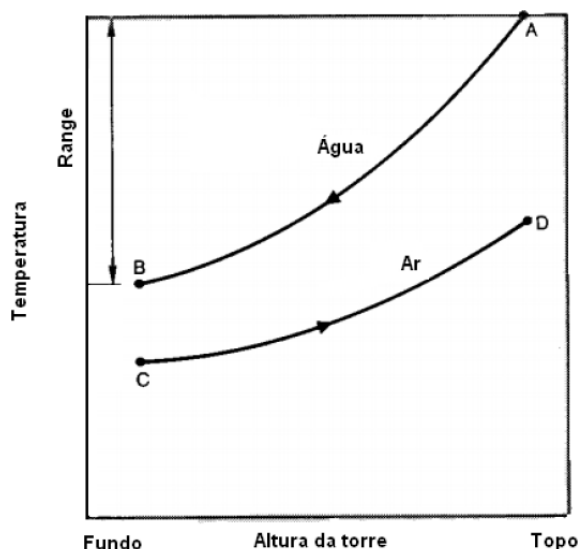
A transferência de massa é resultante de um gradiente de concentração ou de pressão parcial entre a superfície e o ar, e dá-se em consequência do equilíbrio entre essas duas fases. Isso acontece, pois parte da água é induzida a evaporar e vai para o ar aumentando sua umidade, e a parte remanescente tem seu calor latente removido, sendo resfriada. Para que a água seja evaporada, é necessário que a corrente de ar em contato não esteja saturada, podendo também haver casos em que o ar entra saturado na torre e a uma temperatura mais baixa que a da água de retorno. Nesse caso também haverá vaporização do líquido, uma vez que o ar em contato a água mais quente irá se aquecer e deixar de ser saturado (WAKI, 2009; BORDINHÃO, 2018).

A menor temperatura que a água pode atingir no processo de resfriamento é a temperatura de bulbo úmido. Na prática, este valor não é obtido, pois seria

necessário o contato de toda a água com o ar conforme a passagem pela torre, e além disso, seria necessário que as duas correntes permanecessem em contato por um período de máximo, o que implicaria em uma torre de resfriamento com altura infinita. Deste modo, as torres são projetadas com uma folga de no mínimo 3 °C entre a temperatura de saída da água e a temperatura de bulbo úmido do ar, ou seja, para uma região com temperatura de bulbo úmido de 23 °C a mínima temperatura de água fria será próxima de 26 °C (FERREIRA, 2012; WAKI, 2009).

A relação entre as temperaturas do ar e da água durante a passagem na torre de resfriamento em contracorrente é ilustrada na Figura 5, onde as curvas mostram o aumento da temperatura do ar e a queda da temperatura da água e o *range* (WAKI, 2009).

Figura 5 - Relação entre as temperaturas do ar e água em uma torre de resfriamento contracorrente



Fonte: Adaptado de Bell et al.¹ (1990) *apud* Waki (2009)

3.1.5 Principais componentes

3.1.5.1 Eliminador de gotas

Os eliminadores de gotas têm como função eliminar as gotículas da corrente de ar aspirado pelo ventilador, amenizando as perdas na transferência de calor e de

¹ BELL, D. M. et al. **Cooling Tower Performance Prediction and Improvement**. Richland, Washington: Electric Power Research Institute, Inc., v. 1, 1990.

massa. Quanto maior for a potência do ventilador, maior será o arraste. Seu funcionamento é baseado na mudança de direção do fluxo de ar e na força centrífuga que separa as gotículas de água do ar, depositando-as na superfície do eliminador, para que então essa água esorra em direção a bacia de água fria (OLIVEIRA, 2009).

Outra função do eliminador de gotas é a resistência à passagem do ar, ocasionando pressão entre o eliminador e ventilador para uniformizar o fluxo de ar através do enchimento (OLIVEIRA, 2012; SAMPAIO, 2013).

A utilização de recheios tipo respingo influencia a formação de gotas que são facilmente carregadas pelo ar, sendo necessária a instalação de um bom sistema para eliminação de gotas; já nos recheios do tipo laminar ocorre pouca formação de gotas (OLIVEIRA, 2012; SAMPAIO, 2013).

3.1.5.2 Sistema de distribuição de água

Os sistemas de distribuição de água dividem a água em gotículas ou filme, a fim de aumentar a superfície de água exposta ao ar e aumentar a troca de calor. A distribuição é feita com bicos pulverizadores com uma pressão de 1,5 a 7 mmCA (14,7 a 68,6 Pa) ou por gravidade com a utilização de bandeja com furos. Nas torres em corrente cruzada a distribuição é sempre por gravidade e nas torres em contracorrente a distribuição pode ser feita por gravidade ou pressão (OLIVEIRA, 2009).

3.1.5.3 Enchimento ou recheio

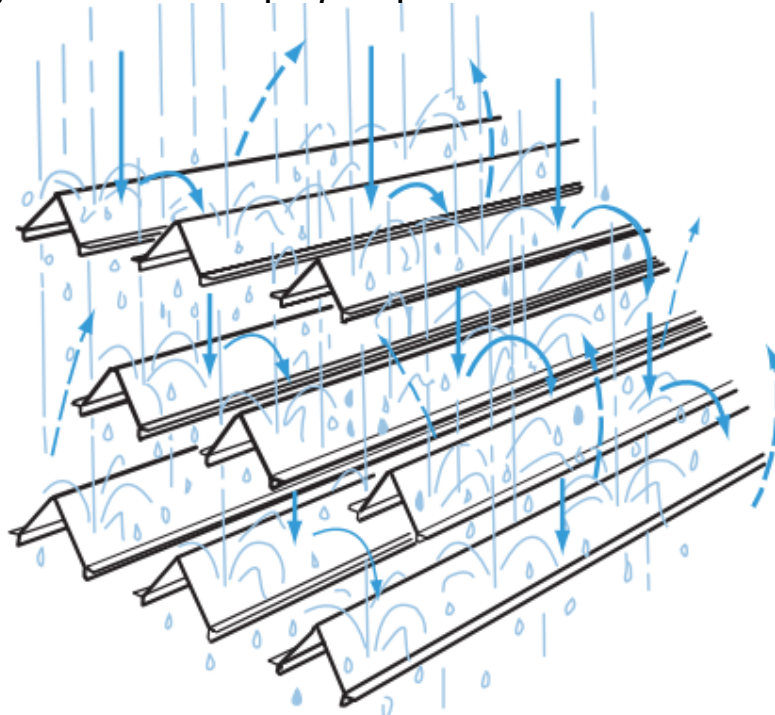
O recheio tem como objetivo aumentar a área disponível na torre, garantindo uma distribuição uniforme da água e do ar para uma quantidade de transferência de calor adequada (SAMPALIO, 2013).

Os recheios podem ser tipo do respingo (*splash*) ou filme. O recheio do tipo respingo promove o movimento da água na forma de cascata por sucessivas barras de abertura paralelas, conforme a Figura 6 (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012).

As barras devem estar dispostas e organizadas horizontalmente para evitar a canalização da água para a extremidade inferior do recheio, evitando assim áreas

desprovidas de água e por consequência de fluxo de calor. Esse tipo de recheio é de fácil manutenção, ideal para água com partículas em suspensão. Permite a redistribuição da água durante seu progresso e é pouco utilizado em torres de corrente cruzada devido à baixa oposição ao fluxo de ar horizontal (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012).

Figura 6 – Recheio do tipo *splash* para torres de resfriamento

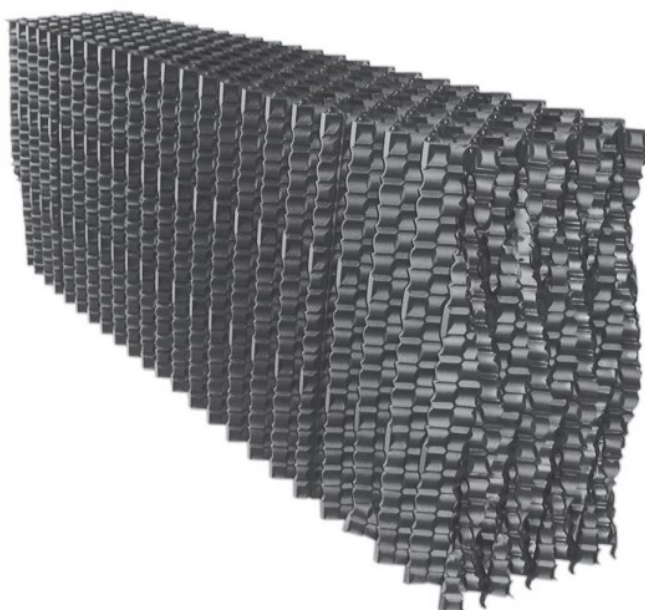


Fonte: SPX COOLING TECHNOLOGIES INC (2012)

O recheio do tipo filme destaca-se por expor uma maior superfície de água dentro de um determinado volume ocupado, escoando a água em películas finas, conforme Figura 7 (SAMPAIO, 2013).

Nesse tipo de recheio a irregularidade da vazão e má distribuição da água inicialmente afetam seu desempenho. Outro problema é a facilidade de acúmulo de sujeiras entre suas placas, que rompem a homogeneidade do processo (SAMPAIO, 2013).

Figura 7 – Recheio do tipo filme para torres de resfriamento



Fonte: SPX COOLING TECHNOLOGIES INC (2012)

3.1.5.4 Ventiladores

Os ventiladores são utilizados em torres de resfriamento de tiragem mecânica com objetivo de movimentar o ar. Empregam-se dois tipos de ventiladores: axial, com fluxo de ar no sentido do eixo, e centrífugos que se caracterizam pelo fluxo de ar perpendicular ao eixo do ventilador. Os ventiladores axiais são os mais utilizados, pois movimentam grandes volumes de ar com baixa pressão, operando a baixo custo (OLIVEIRA, 2012).

3.1.5.5 Venezianas

As venezianas conduzem o ar e o distribuem uniformemente dentro da torre. Elas são instaladas na entrada de ar, diminuindo as perdas de água através da superfície de entrada do ar. O projeto de venezianas depende do tipo de torre e do sistema de distribuição de água utilizado. A sua capacidade retenção está relacionada com a inclinação, largura e espaçamento (OLIVEIRA, 2012).

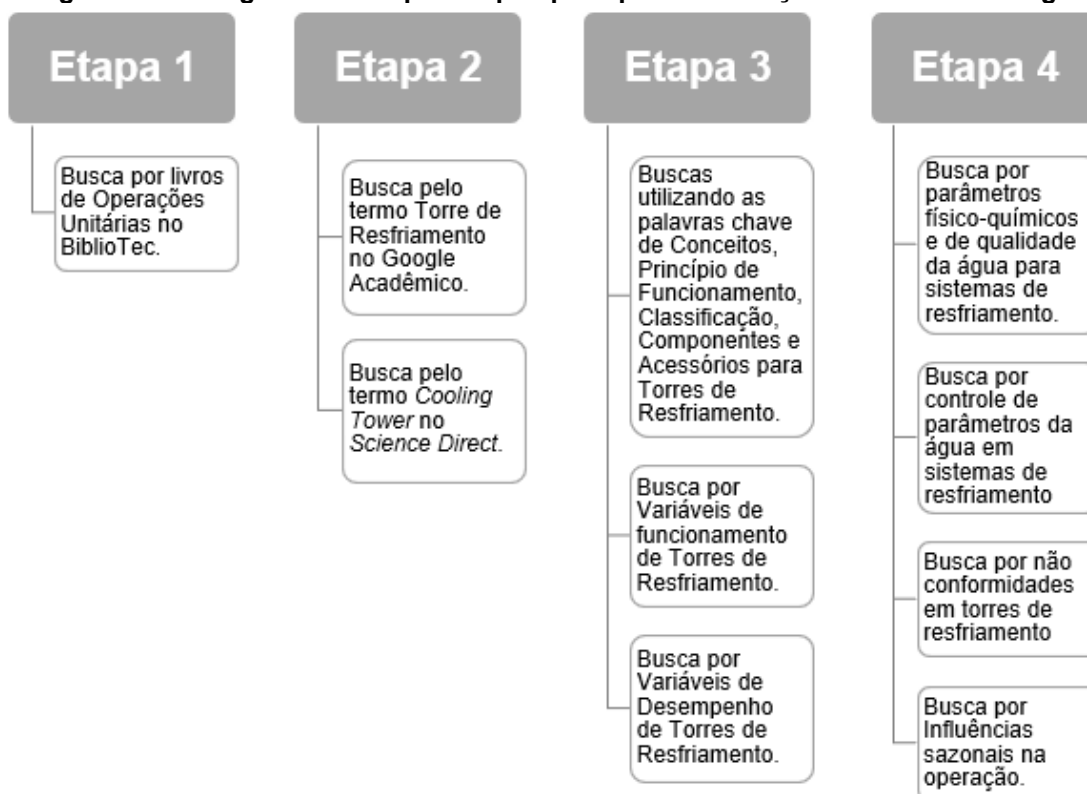
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista a quantidade de fontes de informações disponíveis, foram empregadas estratégias para concentrar a busca pelo tema, evitando o afastamento da proposta da pesquisa. A revisão bibliográfica foi escrita com base em artigos de periódicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses e livros relacionados ao assunto.

A primeira etapa foi a busca de materiais através do *Google Acadêmico*, *BiblioTec* e *Science Direct*, direcionando as buscas com filtros em ordem decrescente do ano de publicação, visando a obtenção de fontes atualizadas. Inicialmente o sistema de Busca Integrada da UTFPR (*BiblioTec*) foi utilizado para a busca de livros relacionados a Operações Unitárias, com objetivo de iniciar a revisão bibliográfica do tema.

A revisão bibliográfica também se fundamentou através da base de dados obtida no *Science Direct* e *Google Acadêmico*, onde utilizou-se inicialmente a busca por palavras-chave “torre de resfriamento” e seu respectivo termo em Inglês, “*cooling tower*”, e posteriormente a busca por termos mais específicos de acordo a Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma de etapas de pesquisa para elaboração de revisão bibliográfica



Fonte: Aatoria Própria (2021)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do levantamento referencial feito na etapa de revisão da literatura, pode-se inferir as principais variáveis de operação que influenciam no processo e desempenho de uma torre de resfriamento, as quais são elencadas a seguir. Posteriormente, apresentam-se possibilidades de técnicas para mitigar problemas em torres de resfriamento advindas de tais variáveis.

5.1 Água de resfriamento e reposição

A qualidade da água utilizada em todo o sistema afeta o desempenho da torre de resfriamento. Quando de baixa qualidade, diminui a capacidade de troca térmica ocasionando entupimento de tubulações, afetando a superfície de recheio e acessórios. Para a diminuir esses efeitos, alguns parâmetros de qualidade da água devem ser controlados (TROVATI, 2004).

5.1.1 Principais parâmetros da água controlados em sistemas de resfriamento

Para garantir o bom funcionamento da torre, alguns parâmetros físico-químicos como o pH, alcalinidade e cloreto são avaliados e controlados com objetivo de diminuir a formação de depósitos, corrosão do equipamento e desenvolvimento de microrganismos (TEBECHERANI, 2015). Os limites definidos para estes parâmetros estão descritos na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1- Parâmetros físico-químicos utilizados para controle de águas residuais.

Parâmetro	Limites
pH	6,0 – 9,0
Alcalinidade Total	350 ppm CaCO ₃
Dureza total	650 ppm CaCO ₃
Cloreto	500 ppm
Sílica Alto Teor	50 ppm
Ferro Total	0,5 ppm
Sulfato	200 ppm
DQO	75 mg/LO ₂

Fonte: Blum (2003)

5.1.1.1 pH

O pH é um indicador de acidez em uma escala que varia de 0 a 14, com zero sendo a acidez máxima. O pH é parâmetro de controle muito importante para águas de resfriamento, pois a corrosão de metais aumenta com o pH abaixo de 4 e a formação de incrustações aumenta a partir de uma faixa mais básica (NALCO, 2014).

5.1.1.2 Dureza

A dureza é determinada pela quantidade de íons de cálcio e magnésio, sendo o cálcio responsável pela maior parte da dureza total. Essa é a principal fonte de formação de depósitos em trocadores de calor, caldeiras, tubulação e torres de resfriamento, pois os sais de cálcio e magnésio tem sua solubilidade diminuída com o aumento da temperatura da água (GONDIM, 2014).

5.1.1.3 Teor de ferro

O ferro está presente na água na forma ferroso e férrico. No estado ferroso o ferro está parcialmente oxidado apresenta boa solubilidade, enquanto no estado férrico ele encontra-se totalmente oxidado de apresenta baixa solubilidade (PENNA, 2009).

5.1.1.4 Alcalinidade total

A alcalinidade total pode ser definida como a capacidade de neutralizar ácidos sem causar perturbações extremas nas atividades biológicas do meio. Em águas de resfriamento, ela está diretamente relacionada com a redução de dureza e prevenção da corrosão (PENNA, 2009).

5.1.1.5 Sílica total

A sílica total é distribuída na forma de sílica reativa e não reativa. A sílica reativa interage com os íons de cálcio e magnésio formando silicatos em altas temperaturas, que se depositam nas áreas quentes do sistema de resfriamento. A sílica não reativa também forma depósitos sedimentares em outras áreas do equipamento (GONDIM, 2014).

5.1.1.6 Condutividade e Sólidos Totais Dissolvidos

A condutividade expressa a facilidade de condução de eletricidade no meio aquoso devido a presença de sais dissolvidos. Uma alta concentração de sais aumenta a condutividade do fluido e por consequência proporciona maior corrosão e incrustação no equipamento. Por isso, a água da purga deve ter uma monitoração contínua dos sólidos dissolvidos e de sua condutividade (PENNA, 2009).

5.1.1.7 Cloretos

O íon cloreto apresenta boa solubilidade e por isso é um constituinte comum na água. Os íons de cloreto aceleram a corrosão de metais, principalmente aços inoxidáveis e mesmo em baixas concentrações (PENNA, 2009).

5.1.1.8 Sólidos suspensos

Os sólidos suspensos representam os materiais sedimentáveis em suspensão. Estes sólidos se depositam na água em repouso causando a formação de incrustações em tubulações e no equipamento, além de favorecer o crescimento microbológico e acelerar o processo de corrosão microbológica (PENNA, 2009).

5.1.1.9 Microrganismos

As bactérias presentes na água de resfriamento podem ser patogênicas ou não patogênicas. Estes microrganismos contribuem para a formação de incrustações através de biofilmes e podem levar corrosão biológica (GONDIM, 2014).

5.2 Parâmetros de controle da água em sistemas de resfriamento

O tratamento de águas provenientes de sistemas de resfriamento é realizado através do emprego de técnicas químicas, físicas ou por uma combinação delas. A escolha do método de tratamento deve se basear em sua eficiência, custos operacionais, efeitos ambientais e legislação de controle (TROVATI, 2004).

A utilização de técnicas de tratamento para águas em torres de resfriamento tem como objetivo a minimização dos parâmetros de controle da água, visando evitar a formação de incrustações, diminuir a corrosão dos componentes da torre e controlar o desenvolvimento de microrganismos (TROVATI, 2004).

A presença de incrustações, processos corrosivos e o crescimento microbiológico afetam o desempenho do sistema de resfriamento e devem ser controlados para que se obtenha um máximo rendimento e vida útil do equipamento, além de uma diminuição nos custos de operação (GONDIM, 2014).

5.2.1 Incrustação

A água encontrada na natureza apresenta diversas substâncias como sais, óxidos e hidróxidos e por influência da temperatura, concentração e pH apresentam solubilidades diferentes. Durante a operação esses compostos podem precipitar de forma aderente na superfície do equipamento, constituindo as incrustações. Além disso a presença de material orgânico, lodo, material microbiológico, produtos de corrosão, sólidos em suspensão e produtos insolúveis provenientes de reações químicas na água também podem se depositar (TROVATI, 2004).

Durante a operação a formação de incrustações é favorecida pela temperatura, alcalinidade, pH, concentração de íons, pressão de escoamento e vazão da água e geralmente os principais responsáveis pela formação de incrustações são os sais de cálcio e magnésio, sílica e silicato e o óxido de ferro (SENEVIRATNE, 2007).

As consequências da presença de incrustações em sistemas de resfriamento de água estão relacionadas com o aumento dos processos corrosivos sob os depósitos, obstrução dos enchimentos e tubulações, entupimento de bicos e dispositivos de destruição de água, promovendo o aparecimento de zonas

preferenciais de escoamento e a diminuição da eficiência do resfriamento (TROVATI, 2004).

Costuma-se fazer uma distinção entre os termos depósitos e incrustações, pois os depósitos caracterizam-se por uma remoção mais fácil e as incrustações por apresentarem uma remoção mecânica ou química. Porém, mesmo que apresentem uma remoção mais fácil, os depósitos também prejudicam a troca térmica e o escoamento da água, e são encontrados principalmente em zonas de baixa vazão de água e nas extremidades inferiores do equipamento (TROVATI, 2004).

Para controlar as incrustações pode ser utilizado a adição de um ácido para redução do pH, remoção da dureza da água, precipitação, aumento da solubilidade, remoção dos sais e outros compostos formadores de incrustações e a utilização de inibidores químicos como modificadores de cristais e dispersantes. Para o controle dos depósitos utiliza-se a técnica de filtração, aumento da velocidade do fluido de resfriamento para eliminar áreas de baixo fluxo e adição de dispersantes químicos (TROVATI, 2004).

5.2.2 Corrosão

A corrosão é caracterizada por um conjunto de reações químicas ou eletroquímicas que resultam em perdas de espessura e/ou alterações nas propriedades dos metais. Portanto a corrosão contribui para falhas no equipamento e redução da transferência de calor devido ao acúmulo dos produtos da corrosão (JAMBO, 2009).

Portanto, para minimizar os problemas da corrosão é importante a escolha de um material atentando-se às condições de operação do equipamento e durante a operação o controle do pH, concentração de sais, condutividade, remoção do oxigênio da água e adição de inibidores de corrosão (MELLO, 2008; TROVATI, 2004).

5.2.3 Crescimento microbiológico

Um das principais causas de perda de eficiência em torres de resfriamento é a proliferação de fungos, bactérias e algas formadoras de biodepósitos no sistema de distribuição de água e recheio. O crescimento de microrganismos favorece a

formação de biofilmes altamente isolantes nas superfícies do recheio da torre, ocasionando na inibição parcial do fluxo de água e a diminuição da capacidade de troca térmica entre a interface água-ar, conforme as Figura 9 e 10 que comparam a obstrução de recheios por biofilmes. Além disso, a presença de biofilmes nos acessórios da torre aumenta do estresse físico na estrutura do equipamento e alguns outros problemas conforme a Figura 11 (BARON, 2015; SILVA, 2009).

Figura 9 – Enchimento de uma torre de resfriamento limpo, livre da presença de biofilme



Fonte: Trovati (2004)

Figura 10 – Enchimento de uma torre de resfriamento com o desenvolvimento de biofilme



Fonte: Trovati (2004)

A água é capaz de remover mecanicamente o material microbiológico depositado no sistema de resfriamento. Dessa forma, recomenda-se a utilização de uma velocidade de fluxo mínima de 0,5 m/s para prevenir o desenvolvimento de biofilmes. Em zonas com velocidades de escoamento inferiores a este valor, recomenda-se a retirada do material sedimentado através de drenos e bacias, para evitar o acúmulo de depósitos (TROVATI, 2004).

Além do controle da velocidade de escoamento da água, pode-se utilizar biocidas e biodispersantes na água para o controle do crescimento de microrganismos (SILVA, 2009; TROVATI, 2004).

A combinação de cloramina ativada por brometo (BAC) com hipoclorito de sódio e água forma um biocidade oxidante moderado muito eficiente para o controle de uma ampla faixa de microrganismos formadores de biofilmes (BEBER, 2012).

A utilização desse biocida é muito eficaz no controle microbiológico da água em sistemas de resfriamento e o seu uso dispõe de uma série de benefícios nos parâmetros físico-químicos da água, aliada a minimização dos efeitos de corrosão localizada e incrustações, com a diminuição da dosagem de hipoclorito de sódio e ácido sulfúrico para correção de pH, sendo estes os principais causadores desses efeitos (CUNHA; SILVA; ALMEIDA, 2021).

Figura 11 – Principais problemas ocasionados por microrganismos em torres de resfriamento

ORGANISMO	CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS PROBLEMAS OCACIONADOS
BACTÉRIAS Aeróbias ou Anaeróbias	Formadoras de depósitos	Formam depósitos densos e aderentes que compromete o fluxo de água e a troca térmica.
	Depositantes de ferro	Ocasionam a oxidação do ferro e a deposição de óxidos insolúveis.
	Nitrificantes	Podem ocasionar corrosão severa.
	Redutoras de Sulfato	Reduzem os sulfatos a sulfetos e podem causar corrosão localizada e severa.
	Anaeróbias corrosivas	São encontradas em biofilmes e depósitos da corrosão ou incrustação. Secretam substâncias corrosivas.
FUNGOS	LEVEDURAS	Causam a degradação da madeira em torres antigas.
	Filamentosos	Podem combinar-se com outros microrganismos e acentuar a formação de depósitos que obstruem tubulações e acessórios.
Algas	Unicelulares e superiores	Podem causar obstrução de bicos de aspersão e tubulações. Podem se depositar sob recheios das torres causando desabamento.

Fonte: Adaptado Trovati (2004)

5.3 Corrente de água de circulação

A corrente de água é uma das principais variáveis operacionais em uma torre de resfriamento, pois ela reflete diretamente nas características da torre. As variações no fluxo de água de circulação são frequentes e geralmente estão relacionadas às necessidades de aumento de carga térmica, problemas mecânicos em bombas ou válvulas responsáveis pelo controle do fluxo de água ou perdas de água por evaporação, arraste e respingos (ÁVILA FILHO *et al.*, 2013).

Para que essa variável não afete o desempenho da torre, recomenda-se que a variação não seja superior a 10% do seu valor de projeto, pois quanto maior a vazão de circulação, menor a troca térmica da torre e por consequência menor a sua eficiência (ASME PTC 2003; KERN, 1950).

5.4 Corrente de ar

Durante a operação a corrente de ar que circula na torre pode variar conforme o aumento da perda de carga causada por depósitos ou incrustações nos enchimentos, variação dos ângulos das pás dos ventiladores, aumento de vibrações, desgastes mecânicos, corrosão das hélices, frequência de lubrificação, variações da potência do motor e falta de manutenção mecânica, impactando assim do desempenho do sistema de ventilação da torre (SILVA, 2021).

Os ventiladores instalados na parte superior da torre são os principais responsáveis pelo fornecimento da corrente de ar para o resfriamento. O processo de troca de calor entre as correntes de água e ar pode ocorrer de duas maneiras: convecção e evaporação. Na convecção a transferência de calor acontece da água para o ar devido a diferença de temperatura. Enquanto na troca de calor por evaporação, a água muda seu estado físico utilizando energia da própria corrente de água, reduzindo assim sua temperatura e sendo responsável pela maior troca térmica do sistema. Por isso, a vazão da corrente de ar é uma variável que influencia diretamente na eficiência da troca térmica entre as correntes de ar e água, e por consequência na eficiência da troca térmica durante o resfriamento de água (SILVA, 2021).

5.5 Ciclo de concentração da água de circulação

Em uma torre de resfriamento é comum que parte da água seja perdida pela própria evaporação decorrente do processo de resfriamento, vazamentos, arrastes, respingos ou pelas manobras de purgas. Essas perdas impactam na concentração dos sais minerais presentes na água, potencializando a formação de incrustações, depósitos e processos corrosivos, que reduzem a eficiência da troca térmica durante a passagem pelo recheio (MONTEIRO *et al.*, 2004).

Por esse motivo, o monitoramento dos ciclos de concentração dos sais é um parâmetro de grande importância para o bom funcionamento da torre, ressaltando assim a relevância da realização de purgas periódicas conforme as características físico-químicas da água que entra na torre (TROVATI, 2007).

5.6 Condições climáticas do local da instalação da torre

O ar atmosférico que entra na torre de resfriamento apresenta diversas propriedades como a temperatura, umidade, temperatura de bulbo úmido, e a torre reage termicamente a cada uma dessas propriedades. Pensando nisso, o desempenho de uma torre de resfriamento varia conforme as propriedades do ar do ambiente, ou seja, com o clima. Durante o ano o valor médio da temperatura ambiente sofre variações e pode ser menor ou maior considerando as condições climáticas do local de instalação da torre. A torre também sofre com diferenças de temperatura durante o tempo de operação (turnos diurnos e noturnos), o que pode fazer com que a temperatura média real de operação fique abaixo ou acima da temperatura estipulada no projeto (CRUZ, 2019).

No verão por exemplo, a temperatura de saída da água de resfriamento e a temperatura entrada do ar na torre são mais altas, comprometendo assim a transferência de calor por calor sensível, pois baseia-se no gradiente de temperatura entre a água e o ar. Enquanto no inverno ocorre ao contrário, o ar entra na torre com uma temperatura mais baixa e a temperatura de saída de água da torre também é mais baixa (CORTINOVIS; SONG, 2005).

Para que a temperatura da água de saída da torre seja constante, ou seja, para que a carga térmica dentro da torre não sofra variações, pode-se variar a vazão de água que entra na torre de resfriamento, utilizando vazões mais altas para torres

operando no verão e vazões mais baixas para torres que operam no inverno (CORTINOVIS; SONG, 2005).

Considerando clima subtropical de algumas regiões do Brasil, pode-se observar durante o inverno uma variação de até 20 °C da temperatura de projeto da torre, visto que o cálculo dessa temperatura é realizado para os dias mais quentes de operação, ou seja, o verão. Para contornar esse problema, além da diminuição do fluxo de água, pode-se aplicar uma variação do fluxo de ar fornecido pelo sistema de ventilação da torre, através de uma redução desse fluxo para os dias mais frios. Se o fluxo não for reduzido, a torre passará a resfriar a água em uma temperatura abaixo da temperatura estimada no projeto, o que pode perturbar processos que utilizam águas provenientes de torres para o resfriamento (PONTES; YAMAUCHI; SILVA, 2019).

A direção dos ventos também é uma característica muito importante para a operação, pois influencia na formação de neblina (*fog*). A formação de neblina acontece quando, após a troca térmica, o ar quente e úmido que deixa a torre contamina o ar que está entrando na torre, tornando o ar supersaturado, o que dificulta a aspersão do ar de saída (EVANS, 1980)

A entrada de ar supersaturado na torre de resfriamento afeta principalmente o resfriamento por transferência de massa, onde parte da água é induzida a evaporar e vai para o ar aumentando a sua umidade, enquanto a outra parte da água tem seu calor latente removido, sendo resfriada. Porém, para que a água seja evaporada durante esse processo, é necessário que a corrente de ar em contato não esteja saturada (WAKI, 2009; BORDINHÃO, 2018).

Portanto, a formação de neblina, afeta a capacidade de resfriamento de água da torre, sendo necessário então um estudo em relação à direção dos ventos para que estes não auxiliem na formação de neblina na torre (CORTINOVIS, SONG; 2005).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do levantamento realizado no referencial teórico e das discussões pode-se elencar à qualidade da água de resfriamento e de reposição, corrente de água de circulação, corrente de ar, ciclos de concentração da água e as condições climáticas do local de operação como as principais variáveis que influenciam na operação e no desempenho de torres de resfriamento.

A qualidade da água de resfriamento e de reposição afetam diretamente a eficiência do resfriamento através da diminuição da superfície de troca térmica durante o processo de formação de incrustações, corrosão e biofilmes. Por isso, destaca-se a necessidade de monitoramento dos parâmetros da purga através de análises físico-químicas e o controle através da adição de ácidos, inibidores de corrosão e biocidas para que a capacidade de troca térmica da torre seja mantida.

Do ponto de vista operacional, podem ser realizadas algumas variações nos fluxos das correntes de água e ar devido às condições climáticas ou operacionais do local de instalação da torre. Porém para que estas variáveis não afetem o desempenho do processo sugere-se que a variação da corrente de água não seja superior a 10% do valor estabelecido no projeto e que a velocidade mínima de 0,5 m/s para evitar a formação de biofilmes durante a operação.

A variação da corrente de ar deve ser realizada através do controle da velocidade dos ventiladores visando uma redução da velocidade para épocas mais frias e um aumento para períodos mais quentes para que a capacidade de troca térmica da torre seja mantida constante durante todas as estações do ano.

Portanto, para que a torre não opere subdimensionada nas estações mais frias do ano, sugere-se a utilização de sistemas de controle para as vazões de água e ar, visando sempre a manutenção da capacidade de troca térmica da torre durante sua operação.

REFERÊNCIAS

ASME PTC 23-2003; **Atmospheric Water Cooling Equipment** – Performance Test Codes. American Society of Mechanical Engineers. Na American National Standard, 2003.

ÁVILA FILHO, S., RODRIGUES, Z., KALID, R. A., NASCIMENTO, V. Good practices in cooling towers: comparison between industrial audits. *In: Cooling Technology Institute Annual Conference*. Corpus Christi, Texas, 2013.

BARON, C; HAMMOND, S. Improvement system performance and reduce system corrosivity using a novel biocide for cooling towers. *In: Cooling technology institute annual conference, 2015, Louisiana. Anais [...]*, 2015.

BEBER, A. J. Controle microbiológico avançado para torres de resfriamento. *In: ABTCP, 2012. São Paulo, 2012, São Paulo: ABTCP, Anais [...]*, 2012.

BELL, D. M. *et al. Cooling Tower Performance Prediction and Improvement*. Richland, Washington: Electric Power Research Institute, Inc., v. 1, 1990.

BLUM, J. R. C. Critérios e padrões de qualidade da água. *In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reuso de água*. São Paulo: Manole, 2003. p. 125–172.

BORDINHÃO, C. **Avaliação operacional da troca de recheio de uma torre de resfriamento**. 2018. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. **Energy efficiency in electrical utilities**. 4 ed. New Delhi, Bureau of Energy Efficiency, 2015.

CRUZ, C. E. P. **Automação de torres de resfriamento**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2019.

CUNHA, J. A. C.; SILVA, L. A. V.; ALMEIDA, T. O. Estudo do tratamento microbiológico de água em torres de resfriamento com uso de cloroamina ativada por brometo. *In: CONTEC: Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia, 2021, Anais [...]*, 2021.

EVANS, F. L J. **Equipment design handbook for refineries and chemical plants**. Vol.2., Houston: Gulf Publishing, 1980.

FERREIRA, A. K. **Torre de Resfriamento Didática**. 2012. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2012.

FREYTAG, C. **Avaliação do desempenho de uma torre de resfriamento industrial**. 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em

Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

GONDIM, N. M. **Alternativas para redução do consumo de água e energia em sistemas de água de resfriamento e geração de vapor em refinarias de petróleo do Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. **Corrosão: fundamentos, monitoração e controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

JASIULIONIS, J. A. E. **Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água utilizando redes neurais artificiais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

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

MELLO, A. G. B. **Influência da Deformação Plástica na Corrosão de Aço Carbono, Aço Inoxidável e Cobre em Sistemas de Resfriamento**. 2008. Dissertação (mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)-Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MELLO, L. C. **Influência de variáveis de processamento no desempenho de torres de resfriamento**. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia Química)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

MENDONÇA, A. M. O. **Estudo do comportamento térmico da torre de resfriamento da indústria de cimento apodi – unidade Quixeré**. 2019. 54. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

MONTEIRO, J.P., MAGRINI, A., SZKLO, A.S., NUNES, R.T.S. Gerenciamento de água na indústria de refino de petróleo e as perspectivas de reuso. *In: 12º Congresso Acadêmico sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro (CADMA)*, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

NALCO COMPANY. **The Nalco Water Handbook**. 3 rd ed. New York: McGrawHill Professional. 2009.

OIKAWA, E. H. **Avaliação de um sistema industrial de resfriamento de água**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

OLIVERIA, A. C. C. T. **Análise da utilização de gargalos e fios de garrafa pet como enchimento de torres de resfriamento**. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

- OLIVERIA, A. C. C. T. **Estudo de materiais alternativos para o enchimento de torres de resfriamento**. 2012. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- PENNA, K. S. F. **Remoção do óleo do meio filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- PONTES, Ricardo FF; YAMAUCHI, Willian M.; SILVA, Evelin KG. Analysis of the effect of seasonal climate changes on cooling tower efficiency, and strategies for reducing cooling tower power consumption. **Applied Thermal Engineering**, v. 161, p. 114148, 2019.
- REIS, J. A.; SILVEIRA, J. L.; DOMENI, P. E. **Economia de energia elétrica em torres de resfriamento**. Guaratinguetá, 2003. Disponível em: <<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/EUE%20B-245.pdf>>. Acesso em: 05 de maio de 2020.
- 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.
- SANTOS, J. A. **Simulação do sistema de pré-resfriamento de uma planta de fracionamento de ar utilizando os simuladores DWSIM e CHEMSEP**. 2015. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- SENEVIRATNE, M. **A practical approach to water conservation for commercial and industrial facilities**. Burlington: Elsevier, 2007.
- SILVA, J. M. P. **Estudo do impacto das não conformidades de uma torre de resfriamento no seu custo total**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Escola Politécnica da UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.
- SILVA, H. C. Engenharia Ambiental e Sanitária: interfaces do conhecimento 2. v. 2. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.
- SPX COOLING TECHNOLOGIES INC. Purposes and types of fill: cooling tower heat transfer. **Thermal Science**, Overland Park, 2012.
- TEBECHERANI, R. **Estudo de catalisadores eletroquímicos para o tratamento de água de uma torre de resfriamento em uma indústria química no vale do Paraíba**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.
- TROVATI, Joubert; **Tratamento de Águas Industriais: Sistemas de Resfriamento**. São Paulo: Industrias Corona, 2004.

VIEIRA, F. C. **Viabilidade Técnica e Econômica do Reaproveitamento de Efluentes de Torres de Resfriamento**. 2011. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WAKI, R. **Montagem e avaliação de uma torre de resfriamento para uso em atividades de ensino de graduação**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.