

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

MAÍRA CONCEIÇÃO SERGIO DE SOUZA MELO

**MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE DE ÁGUAS DE SISTEMA DE
RESFRIAMENTO – ÍNDICE DE RYZNAR E LANGELIER**

JOÃO PESSOA – PB

2024

MAÍRA CONCEIÇÃO SERGIO DE SOUZA MELO

**MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE DE ÁGUAS DE SISTEMA DE
RESFRIAMENTO – ÍNDICE DE RYZNAR E LANGELIER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Química Industrial da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento aos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Química Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Rennio Felix de Sena

JOÃO PESSOA – PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M528m Melo, Maira Conceição Sergio de Souza.
MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE DE ÁGUAS DE SISTEMA DE
RESFRIAMENTO - ÍNDICE DE RYZNAR E LANGELIER / Maira
Conceição Sergio de Souza Melo. - João Pessoa, 2024.
40 f. : il.

Orientação: Rennio Felix de Senna.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Langelier; Ryznar; torre de resfriamento;
incrusta. I. Senna, Rennio Felix de. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

MAÍRA CONCEIÇÃO SERGIO DE SOUZA MELO

**MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE DE ÁGUAS DE SISTEMA DE
RESFRIAMENTO – ÍNDICE DE RYZNAR E LANGELIER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Química Industrial da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento aos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Química Industrial.

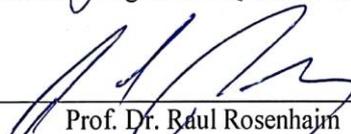
Aprovado em: 11 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. RENNIO FELIX DE SENA

Orientador – Departamento de Engenharia Química/ Centro de Tecnologia/ UFPB



Prof. Dr. RAUL ROSENHAIM

Examinador – Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. FRANKLIN PESSOA AGUIAR

Examinador – Universidade Federal da Paraíba

A minha mãe,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar comigo em cada momento e me abençoar com o dom da vida.

Aos meus professores, que contribuíram significativamente para a minha formação com os seus ensinamentos.

Ao meu orientador, professor Dr. Rennio Felix de Sena, pela orientação, apoio, sugestões e reuniões durante a realização deste trabalho.

Aos meus familiares por sempre me apoiarem, em especial à minha mãe, Karla Morgana Barbosa de Souza, e à minha avó, Sônia Jeronimo Barbosa, pelos valores, amor e por me ensinarem que a educação e os estudos são as portas do mundo.

Aos meus amigos, que fizeram parte dessa caminhada e tornaram o percurso mais leve.

Nosso caráter é o resultado da nossa conduta.

Aristóteles

RESUMO

A água é um dos principais insumos para a vida na Terra, estando presente em diversas atividades diárias e sendo indispensável para a sobrevivência. No meio industrial, ela é utilizada em diversos processos, como na fabricação de alimentos, lavagem de equipamentos e em trocas térmicas em sistema de resfriamento. Estes sistemas são compostos principalmente por bombas e unidades resfriadoras, como a torre de resfriamento e o chiller. A água desempenha um papel central nesse processo e requer monitoramento constante, pois, dependendo do seu acondicionamento e tratamento, podem ocorrer os fenômenos de corrosão e incrustação nos equipamentos, afetando a eficiência do processo como consequência. Para garantir a qualidade da água, este trabalho analisou amostras de três torres de resfriamento — Torre S, Torre P e Torre M — durante o período de cinco meses, aplicando os Índices de Saturação de Langelier (LSI) e de Estabilidade de Ryznar (RSI), que ajudam a identificar e quantificar tendências corrosivas ou incrustantes da água. Além disso, foram realizadas análises físico-químicas, como a medição de temperatura, pH, sólidos totais dissolvidos, dureza de cálcio e alcalinidade total. A obtenção dos resultados dessas análises é crucial para determinar o pH de saturação da água e para interpretar os índices de Langelier e Ryznar. A Torre S apresentou altas concentrações dos parâmetros analisados em quatro dos cinco meses de estudo, resultando em valores de 1,08 e 2,78 para LSI no primeiro e quarto meses, apresentando uma tendência à incrustação, porém -0,64 no terceiro mês, onde a água apresentou uma tendência corrosiva. Para o RSI, a amostra indicou uma tendência balanceada (não estava corrosiva ou incrustante), com valores de 6,24 e 6,45 no segundo e terceiro meses, e 4,09 no quinto, apresentando uma tendência corrosiva. A Torre P apresentou concentrações baixas em algumas análises e exibiu valores de LSI como -0,52 e -1,25 no primeiro e quarto meses, caracterizando a água como corrosiva, e 9,82 e 9,25 de RSI no quarto e quinto meses, indicando uma tendência à corrosão. A Torre M exibiu resultados como 1,05 e -0,29 segundo LSI no primeiro e terceiro meses, indicando uma tendência à incrustação e balanceada. Entretanto, nesses meses de estudo, a amostra exibiu valores de 6,3 e 8,48 para RSI, caracterizando uma tendência balanceada e corrosiva. Conclui-se que as torres S e M apresentaram valores semelhantes durante o período de estudo, indicando caráter incrustante para LSI e, para RSI, balanceado e incrustante em boa parte dos meses analisados. As amostras da Torre P apresentaram uma tendência à corrosão em quase todos os meses de estudo, segundo LSI, e em todos para RSI.

Palavras-chaves: Langelier; Ryznar; torre de resfriamento; incrustação.

ABSTRACT

Water is one of the essential resources for life on Earth, present in various daily activities and indispensable for survival. In the industrial sector, it is used in numerous processes, such as food manufacturing, equipment cleaning, and thermal exchanges in cooling systems. These systems mainly consist of pumps and cooling units, such as cooling towers and chillers. Water plays a central role in these processes and requires constant monitoring, as its conditioning and treatment can lead to corrosion and scaling phenomena in equipment, ultimately affecting process efficiency. To ensure water quality, this study analyzed samples from three cooling towers—Tower S, Tower P, and Tower M—over a five-month period, applying the Langelier Saturation Index (LSI) and the Ryznar Stability Index (RSI), which help identify and quantify corrosive or scaling tendencies of the water. Additionally, physicochemical analyses were conducted, including measurements of temperature, pH, total dissolved solids, calcium hardness, and total alkalinity. Obtaining results from these analyses is crucial for determining the water's saturation pH and interpreting the Langelier and Ryznar indices. Tower S exhibited high concentrations of the analyzed parameters in four of the five study months, resulting in LSI values of 1.08 and 2.78 in the first and fourth months, indicating a tendency towards scaling. However, it showed -0.64 in the third month, where the water presented a corrosive tendency. For RSI, the sample indicated a balanced tendency (not corrosive or scaling), with values of 6.24 and 6.45 in the second and third months, and 4.09 in the fifth month, indicating a corrosive tendency. Tower P showed low concentrations in some analyses, with LSI values of -0.52 and -1.25 in the first and fourth months, characterizing the water as corrosive. Its RSI values were 9.82 and 9.25 in the fourth and fifth months, indicating a corrosion tendency. Tower M exhibited results of 1.05 and -0.29 according to LSI in the first and third months, indicating a tendency towards scaling and balance. However, during these months, the sample showed RSI values of 6.3 and 8.48, characterizing a balanced and corrosive tendency. In conclusion, Towers S and M showed similar values throughout the study period, indicating a scaling character for LSI and, for RSI, balanced and scaling in most of the analyzed months. Samples from Tower P exhibited a tendency towards corrosion in nearly all study months according to LSI, and in all for RSI.

Keywords: Langelier, Ryznar, cooling tower, scaling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Esquema de um sistema de resfriamento aberto.....	16
Figura 3.2 - Sistema de resfriamento semiaberto.	17
Figura 3.3 - Sistema de resfriamento fechado.	17
Figura 3.4 - Chiller á água.....	18
Figura 3.5 - Torre de resfriamento com contracorrente de ar.	19
Figura 3.6 - Torre de resfriamento com corrente cruzada de ar.	19
Figura 3.7 - Torre de resfriamento.....	21
Figura 4.1 – Torre de resfriamento da marca Körper.	26
Figura 4.2 – Torre de resfriamento da marca Alfaterm.	27
Figura 4.3 – Medidor Weytoll multifuncional digital portatil.....	27
Figura 4.4 – Esquema da análise de Dureza de Cálcio.	28
Figura 4.5 – Esquema da análise de Alcalinidade Total.	29
Figura 5.1 – Gráfico do Índice de saturação Langelier referente a torre de resfriamento S	32
Figura 5.2 – Gráfico do índice de estabilidade de Ryznar referente a torre de resfriamento S...32	
Figura 5.3 – Gráfico do Índice de saturação Langelier referente a torre de resfriamento P.	34
Figura 5.4 – Gráfico do Índice de estabilidade de Ryznar referente a torre de resfriamento P. .34	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Interpretação do Índice de Saturação de Langelier (LSI).....	25
Tabela 3.2. Interpretação do Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI).....	25
Tabela 5.1 – Valores obtidos após a realização das análises da torre de resfriamento S em 5 meses.....	30
Tabela 5.2 – Valores de pHs e os índices de Langelier e Ryznar em 5 meses de ensaio a torre de resfriamento.....	31
Tabela 5.3 - obtidos após a realização das análises da torre de resfriamento P em 5 meses.	33
Tabela 5.4 – Valores de pHs e os índices de Langelier e Ryznar em 5 meses de ensaio a torre de resfriamento P.	33
Tabela 5.6 – valores obtidos após a realização das análises da torre de resfriamento M durante 5 meses.....	35
Tabela 5.7 – Valores de pHs e os índices de Langelier e Ryznar em 5 meses de ensaio a torre de resfriamento P.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CWR Água de resfriamento quente ou de retorno
- CWS Água de resfriamento fria ou de suprimento.
- LSI Índice de Saturação de Langelier
- PPM Parte por milhão
- PPT Parte por trilhão.
- RSI Índice de Estabilidade de Ryznar
- STD Sólidos totais dissolvidos
- TORRE S Torre de Resfriamento S
- TORRE P Torre de Resfriamento P
- TORRE M Torre de Resfriamento M
- EDTA Etilenodiaminotetracético

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 SISTEMA DE RESFRIAMENTO.....	16
3.2 TROCADORES DE CALOR (<i>CHILLER</i>).....	17
3.3 TORRE DE RESFRIAMENTO	18
3.4 CORROSÃO E INCRUSTAÇÃO	21
3.5 ÁGUA NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO.....	22
3.6 ÍNDICES DE ESTABILIDADE DA ÁGUA – LANGELIER E RYZNAR.....	23
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 AMOSTRAGEM	26
4.2 ANÁLISE DE TEMPERATURA, PH E SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS	27
4.3 ANÁLISE DE DUREZA DE CÁLCIO	28
4.4 ANÁLISE DE ALCALINIDADE TOTAL	28
4.5 pH DE SATURAÇÃO (pH _s)	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1 RESULTADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO S.....	30
5.2 RESULTADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO P.....	32
5.3 RESULTADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO M.....	34
REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Mierzwa e Hespanhol (2005), a água é um recurso fundamental para a vida no planeta e essencial para a sobrevivência. Além de sua importância em diversas atividades humanas, que lhe conferem valores culturais, sociais e econômicos, a água desempenha um papel crucial em vários processos industriais, incluindo a fabricação de produtos, a lavagem de equipamentos e as trocas térmicas.

Dentre os processos industriais de troca térmica que utilizam água, destacam-se os sistemas de resfriamento ou refrigeração que são predominantemente constituídos por uma combinação de bombas e unidades resfriadoras de líquidos (Fonseca, 2019). Esses sistemas são empregados em grandes instalações, como shoppings, hotéis e centros comerciais, além de encontrarem aplicação em ambientes industriais, particularmente nas linhas de produção (Del'Antonio; Noventa; Feres Junior, 2017).

Os sistemas de resfriamento podem ser classificados em abertos, semiabertos e fechados. Nos sistemas abertos, há uma elevada demanda de água, uma vez que esta passa por todo o processo de troca térmica e, em seguida, é descartada (Pereira, 2018). Já nos sistemas semiabertos e fechados, a água é conduzida diretamente para a torre de resfriamento, onde recebe os tratamentos necessários. Posteriormente, é transportada para o chiller por meio de tubulações, sendo este responsável pelo resfriamento do fluido refrigerante, que, neste caso, é a própria água. Nos sistemas semiabertos e fechados, a água condensada retorna à torre de resfriamento (Fonseca, 2019).

Nos sistemas semiabertos, devido à continuidade dos ciclos operacionais, é necessário reabastecer a água para compensar as perdas ocorridas durante o processo, como a evaporação (Tebecherani, 2015).

Como resultado, ocorre um aumento na concentração de sólidos dissolvidos e suspensos na água. Essas altas concentrações, aliadas às condições do processo, podem provocar problemas de deposição (incrustação) e corrosão, comprometendo, consequentemente, a eficiência do sistema (Nalco, 2009). Tais problemas têm o potencial de causar a parada de um sistema de resfriamento, bem como das unidades e equipamentos que dele dependem, de forma direta ou indireta (Pereira, 2007).

Para analisar essa problemática, foram desenvolvidos diversos índices que auxiliam na avaliação da qualidade da água. Entre esses índices, destacam-se o Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) e o Índice de Saturação de Langelier (LSI). O LSI é amplamente utilizado para avaliar o potencial de corrosão ou incrustação em sistemas contendo carbonato, uma vez que

está diretamente relacionado ao pH da água (Souza et al., 2019). Por sua vez, o RSI avalia o potencial de incrustação de uma solução aquosa e é considerado uma extensão do LSI, pois também prevê a possível corrosividade de águas que não formam incrustações (Millette et al., 1980).

Com base nesses fatos, o presente trabalho tem como objetivo aplicar os Índices de Estabilidade de Ryznar e Langelier em amostras de águas provenientes de três torres de resfriamento de um sistema semiaberto ao longo de um período de cinco meses, com o propósito de avaliar a sua possível tendência à incrustação e corrosão.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Utilizar os índices de Saturação de Langelier (LSI) e de Estabilidade de Ryznar (RSI) em águas de torres de resfriamento de um sistema semiaberto, para analisar as tendências de incrustação e corrosão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar amostras de água de três torres de resfriamento de redes de supermercados, durante cinco meses, realizando ensaios de pH, Dureza de Cálcio, Alcalinidade Total, Temperatura e Sólidos Totais Dissolvidos.
- Determinar e calcular o pH de saturação da água.
- Obter os índices LSI e RSI utilizando a aplicabilidade do pH de saturação do Carbonato de Cálcio (CaCO_3) e o pH da água.

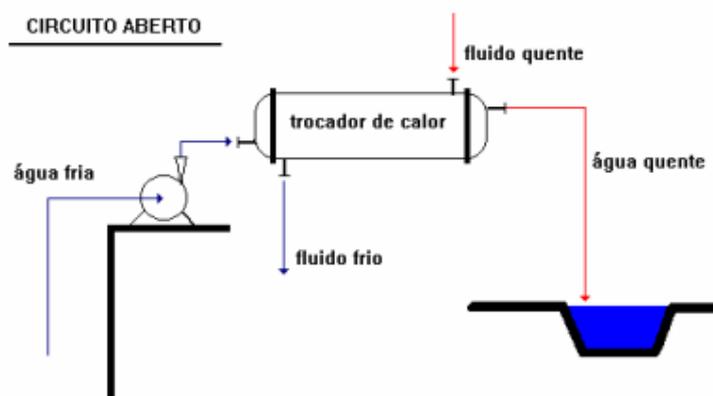
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SISTEMA DE RESFRIAMENTO

O sistema de resfriamento é um componente vital em processos industriais que envolvem a absorção de calor. Geralmente, utiliza-se água como fluido para a transferência térmica. Os elementos fundamentais desses sistemas incluem as torres de resfriamento e os trocadores de calor. Os trocadores de calor desempenham um papel crucial ao permitir a transferência térmica entre correntes de fluido frio e quente sem que estas entrem em contato direto (Vicente, 2018).

Os sistemas de resfriamento podem ser classificados em aberto, semiaberto e fechado. O Sistema Aberto é utilizado quando há uma abundância de água disponível, pois a água utilizada no processo é descartada após a transferência térmica ser realizada. No entanto, este método tem como desvantagem a geração de "poluição térmica", além de exigir fontes abundantes de água. Portanto, é comumente empregado em ambientes como plataformas de petróleo, navios e outras aplicações industriais que têm acesso a grandes volumes de água (Travoti, 2004).

Figura 3.1 - Esquema de um sistema de resfriamento aberto

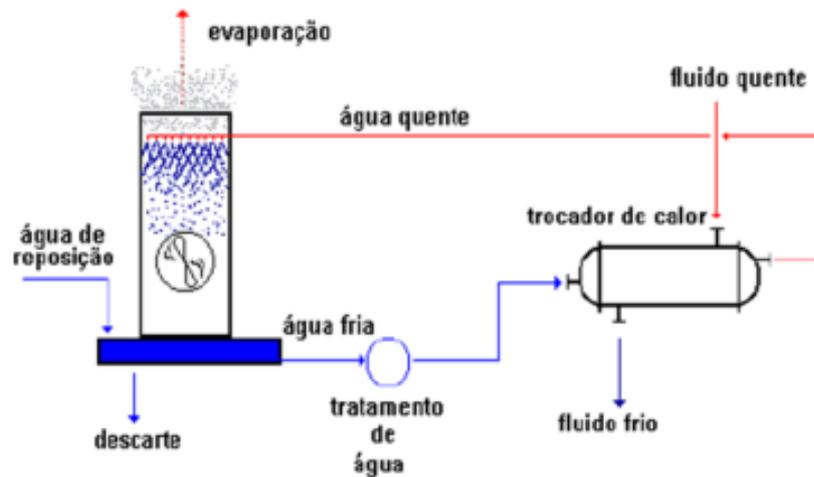


Fonte: Mancuso (2001).

No Sistema Semiaberto, a água aquecida pelo trocador de calor entra na torre de resfriamento, onde sua temperatura é reduzida por uma corrente de ar, permitindo o seu reuso. Nesse tipo de processo, devido à evaporação, arraste e purga, ocorrem perdas de água ao longo do processo, o que demanda a reposição do líquido. Essa reposição é necessária para

manter o nível adequado de água no sistema e garantir sua eficácia contínua (Vicente, 2018).

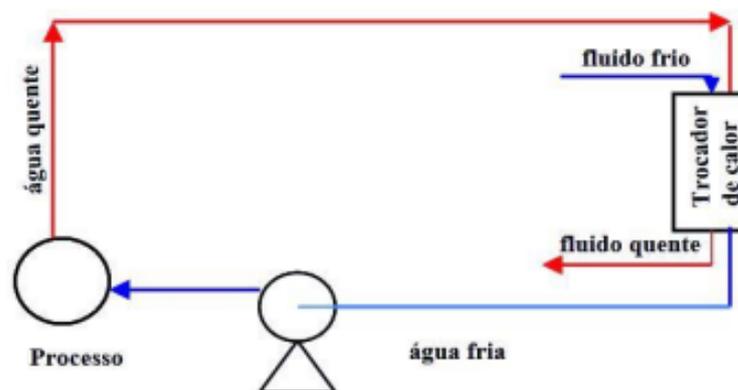
Figura 3.2- Sistema de resfriamento semiaberto.



Fonte: Mancuso (2001).

No sistema fechado, não há perda de água durante o processo, tornando-o ideal para aplicações em que a água precisa ser mantida em temperaturas específicas, sendo elas mais elevadas ou de menor temperatura, diferentes das usuais. Após a troca térmica, a água é resfriada em um trocador de calor e retorna ao processo, sem necessidade de reposição (Travoti, 2004).

Figura 3.3 - Sistema de resfriamento fechado.



Fonte: Mancuso, apud Santos (2011).

3. 2 TROCADORES DE CALOR (*CHILLER*)

Esse tipo de máquina térmica tem como objetivo principal resfriar a água, que por sua vez é utilizada para regular a temperatura do ambiente. Além do controle de temperatura, o

chiller (figura 3.4) também desempenha funções essenciais na filtragem do ar, na manutenção da umidade relativa, na renovação e na circulação do ar no ambiente (Kriek, 2020).

O *chiller* é composto de um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador e o seu sistema apresenta dois circuitos: um de refrigeração e um circuito de água (Kriek, 2020).

O líquido refrigerante (água) é bombeado para um evaporador, onde absorve o calor do líquido a ser resfriado. Nesse processo, os líquidos não entram em contato direto ocorrendo então a troca térmica. O líquido refrigerado é então conduzido para o *fan coil* através de tubulações e bombas, onde circula na serpentina do equipamento. Simultaneamente, o equipamento extrai o ar do ambiente por meio de um ventilador, forçando-o a passar pela serpentina. Devido à água fria, o ar é resfriado enquanto passa pela serpentina e é devolvido ao ambiente (Del' Antonio;Noventa; Feres Junior, 2017).

Figura 3.4 - Chiller á água.



Fonte: Daike Brasil.

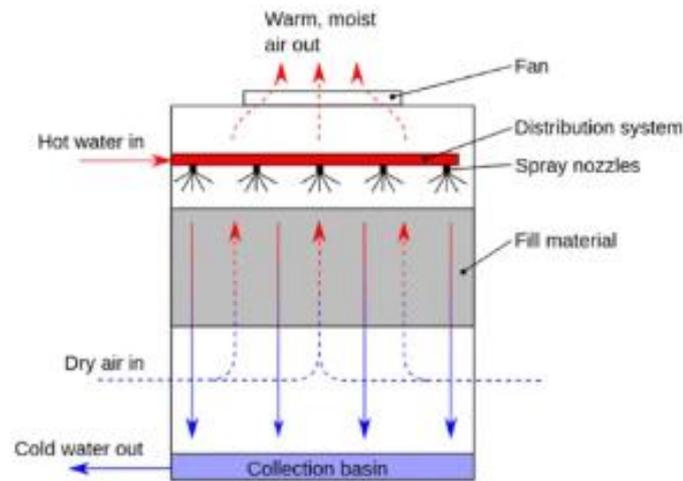
3.3 TORRE DE RESFRIAMENTO

Segundo Fosenca (2019), a principal função de uma torre de resfriamento é justamente, resfriar a água condensada do *chiller*, utilizando o ar atmosférico.

Há uma variedade de tipos e tamanhos de torres de resfriamento, cada uma sendo aplicada de acordo com o sistema em questão, com vantagens e desvantagens específicas (Trovati, 2004).

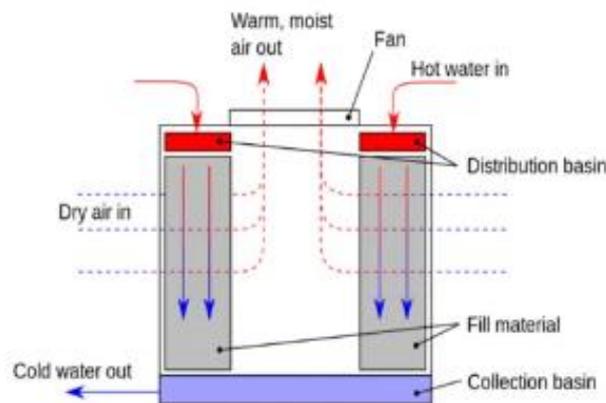
Na ampla gama de opções, estão as torres de contracorrente, caracterizadas pelo fluxo de ar ascendente de baixo para cima. Por outro lado, as torres de corrente cruzada se destacam pelo cruzamento das correntes de ar nas laterais da estrutura (Fonseca, 2019).

Figura 3.5 - Torre de resfriamento com contracorrente de ar.



Fonte: EnergyPurse

Figura 3.6 - Torre de resfriamento com corrente cruzada de ar.



Fonte: EnergyPurse.

Para entender o funcionamento de uma torre, é importante conhecer alguns conceitos e definições:

Temperatura de bulbo seco: é a temperatura do ar ambiente sem levar em consideração a umidade, ou seja, sem influencia do vapor de água presente (Cortinovis; Song, 2005).

Temperatura de Bulbo úmido: é a temperatura atingida, que não está em equilíbrio termodinamico, por uma pequena porção de água, em contato com uma corrente contínua de ar (Cortinovis; Song, 2005).

Água de resfriamento fria ou de suprimento (CWS): é a água que sai da torre de

resfriamento após passar pelo processo de troca térmica e está pronta para ser utilizada no suprimento do processo industrial (Freitag, 2018).

Água de resfriamento quente ou de retorno (CWR): é a água que está entrando na torre de resfriamento, ainda não tendo passado pelo processo de troca térmica. Essa água é proveniente do processo industrial e está aquecida devido ao calor removido durante o processo (Freitag, 2018).

Approach: a diferença entre a temperatura da água que sai da torre de resfriamento e a temperatura de bulbo úmido (Burguer, 1994)

Arraste (*Drift*): Perda de água de circulação devido ao arraste de gotículas durante a exaustão do ar nas paredes laterais da torre (Mello, 2008).

Make up: reposição da água que foi perdida por evaporação, arraste, purga e vazamentos na torre (Mello, 2008).

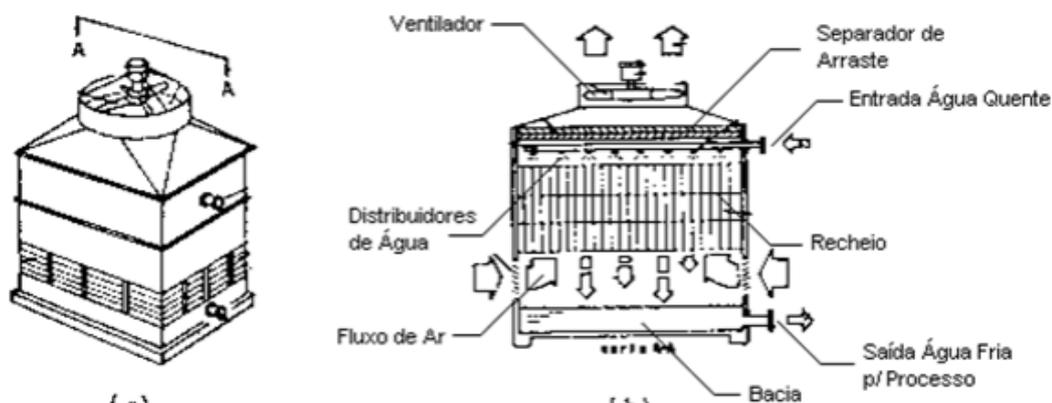
Respingos de água (*Blow-out*): água perdida pelo vento ou arraste por meio da exaustão do ar ou “respingos”. (Mello, 2008).

Purga (*Blow-down*): remoção periódica de uma fração da água da torre de resfriamento para evitar a concentração de sólidos resultante da evaporação contínua da água (Mello, 2008).

A água a ser resfriada é bombeada até o topo da torre e distribuída por bicos aspersores. Dentro da torre, passa por uma série de placas em formato de colmeia, que possuem caminhos sinuosos. É esta colmeia que permite a transferência uniforme da água quente, por toda a extensão da torre (Pereira, 2018).

A principal fonte de resfriamento da água na torre de resfriamento, é a evaporação de uma parte dela que é recirculada na torre. Esse processo de evaporação retira calor latente da água que flui ao longo da torre, causando sua diminuição de temperatura. Ao final a água fica reservada na bacia da torre, onde recircula de volta para o *chiller*. A transferência de massa da água para o ar ocorre devido à tendência de equilíbrio entre as duas fases em contato. A evaporação é responsável por cerca de 80% do resfriamento da água, enquanto os restantes 20% são atribuídos à diferença de temperatura entre o ar e a água (Cortinovis; Song, 2005).

Figura 3.7 - Torre de resfriamento.



Fonte: Travoti (2004).

Atualmente, as indústrias veem a torre de resfriamento como uma maneira de reduzir os custos operacionais e promover práticas ambientalmente conscientes. Isso se deve ao fato de que em sistemas fechados há uma mínima perda de água, o que contribui para a sustentabilidade hídrica e para a redução do impacto ambiental (Mello, 2008).

3.4 CORROSÃO E INCRUSTAÇÃO

Segundo Gentil (2011), a corrosão refere-se à deterioração de um material, frequentemente metálico, devido à ação química ou eletroquímica do ambiente, podendo ocorrer com ou sem a presença de esforços mecânicos adicionais.

Para Nalco (1979), a corrosão pode ser entendida como a deterioração de um metal devido à sua reação com o ambiente ao seu redor. A água é frequentemente usada como fluido de transferência térmica, o que torna comum problemas de corrosão e formação de depósitos nos sistemas de resfriamento associados a ela. Gases dissolvidos como oxigênio, dióxido de carbono, amônia e cloro, íons dissolvidos como cálcio, magnésio, cloretos, sulfatos e bicarbonatos, além de sólidos suspensos, conferem à água uma natureza mais corrosiva em comparação com água desmineralizada.

Quando um metal é imerso em uma solução agressiva, ocorre um processo de equilíbrio de dissolução. Nesse processo, os elétrons gerados pela reação anódica migram através do metal por condução até serem consumidos pelos íons na região catódica. Isso resulta na oxidação do metal e na redução dos íons presentes na solução (Merchi; Souza, 2021).

Existem três tipos principais de corrosão: Corrosão ácida, que ocorre em ambientes

com baixo pH e resulta no desgaste gradual do material. Corrosão localizada, também conhecida como *pitting*, causada pela presença de oxigênio na água, levando à formação de pequenas perfurações localizadas no equipamento. Corrosão galvânica, que ocorre quando dois materiais diferentes estão em contato em um sistema, resultando em uma reação eletroquímica que acelera a corrosão de um dos materiais (Matos, 2016).

Já a incrustação, refere-se à formação de depósitos minerais nas paredes dos tubos, o que pode resultar em diversos problemas, como diminuição na taxa de transferência de calor, restrições ao fluxo do fluido e até mesmo o desenvolvimento de processos corrosivos (Pereira, 2007).

As incrustações se formam quando os sais minerais dissolvidos na água de resfriamento atingem o seu produto de solubilidade e precipitam. Os mais comuns incluem carbonatos e silicatos de cálcio e magnésio, além de sulfato de cálcio (Garcia, 2000).

Existem três tipos fundamentais de depósitos: incrustações verdadeiras que tem origem em sólidos inicialmente dissolvidos na água que em condições como alteração de pH ou temperatura, a solução pode se tornar saturada e ao ultrapassar o seu limite de solubilidade ela atinge o seu estado de supersaturação, formando então um crescimento cristalino nas tubulações de difícil remoção. Depósitos sedimentares, causados por sólidos em suspensão que inicialmente estão dispersos na água e com a baixa velocidade de fluxo, sofrem sedimentação. E por último os depósitos tipo incrustação, que são precipitados formados no seio da massa líquida, decantados como depósitos sedimentares, causados na maioria das vezes por tratamentos incorretos (Pereira, 2007).

3.5 ÁGUA NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

A água, quando está pura, consiste em moléculas que estão associadas por meio de ligações de hidrogênio. No entanto, quando outros tipos de substâncias estão presentes, ela passa a apresentar impurezas, como sais, ácidos, bases e gases, que podem estar dissolvidos ou em suspensão. Dependendo do uso pretendido, é necessário armazená-la de forma específica para evitar problemas como corrosão e incrustação (Gentil, 2011).

A água de resfriamento apresenta diversas características que podem promover a oxidação dos metais, resultando na corrosão dos equipamentos. Além disso, os sais dissolvidos e os sólidos em suspensão na água de resfriamento, combinados com certas propriedades físico-químicas e operacionais do sistema, contribuem para a formação de depósitos e incrustações (Matos, 2016).

Os principais responsáveis pela formação de incrustações em sistemas de resfriamento são os sais de cálcio e magnésio, como carbonato de cálcio (CaCO_3), sílica solúvel (SiO_2) e silicatos (SiO_3^{2-}) e óxidos de ferro que são originados de processos corrosivos (Travoti, 2004).

Para que a torre de resfriamento tenha um bom funcionamento, é importante o controle e a monitoramento de alguns parâmetros químicos da água, como pH, dureza, alcalinidade total, condutividade, sólidos totais dissolvidos (STD), já que estão diretamente ligados aos principais problemas em águas de resfriamento (Tebecherani, 2015).

Existem diversas técnicas e métodos para tratar a água de resfriamento, sejam eles químicos, físicos ou a junção de ambos. A escolha do tratamento se baseia em sua eficiência e no seu custo fixo e operacional, tendo como os principais objetivos evitar a formação de incrustações, minimizar os processos corrosivos e controlar o desenvolvimento microbiológico (Travoti, 2004).

3.6 ÍNDICES DE ESTABILIDADE DA ÁGUA – LANGELIER E RYZNAR

Em ambientes aquosos, os índices de estabilidade são frequentemente empregados como parâmetros para avaliar a tendência corrosiva ou incrustante da água. A tendência corrosiva da água está associada à sua interação com o ferro e ligas metálicas de baixa resistência, enquanto a tendência incrustante está relacionada à formação de incrustações cálcarias ou carbonato de cálcio (CaCO_3) (Pereira, 2007).

Devido à problemática a cerca da qualidade da água, foram criados índices que mensuram a capacidade corrosiva ou incrustante da água como forma de monitoramento. Entre eles estão o Índice de Saturação de Langelier (LSI) e o Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) (Souza, 2019).

Inicialmente, os índices de Langelier e Ryznar foram concebidos para estabelecer uma escala do potencial de uma solução aquosa em criar depósitos de sais ou corroer equipamentos, com base em sua composição utilizando parâmetros de fácil medição. O índice de Langelier é qualitativo, já que dois tipos diferentes de água podem apresentar o mesmo valor de LSI, indicando se a solução está supersaturada ou não com carbonato de cálcio, enquanto o índice de Ryznar é quantitativo, procurando quantificar a relação entre a saturação do CaCO_3 e a formação de crosta alcalina (Grades, 2004).

Apesar do índice de Langelier ser amplamente utilizado como indicador da corrosividade da água, ele não está diretamente relacionado com a corrosão, mas com o depósito de uma película de carbonato de cálcio, que pode isolar componentes de um sistema

que está em contato direto com a água. Quando essa película não é formada, a água é considerada agressiva podendo então ocorrer a corrosão (Cavazzana, 2011).

O cálculo de Langelier é derivado de conceitos teóricos de saturação do carbonato de cálcio na água, onde é feito a partir da diferença entre o pH da água e o pH de saturação (pH_s) que é calculado quando a água estiver saturada em carbonato de cálcio (Perez, 2011). Segundo Souza (2019), Para determinar o pH_s é realizado as seguintes análises: temperatura, sólidos dissolvidos totais (STD), concentração de Ca²⁺ e alcalinidade, sendo determinado pela equação a seguir:

$$LSI = pH - pH_s \quad (1)$$

Onde o pH_s é calculado da seguinte forma:

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (2)$$

$$A = \frac{(\log[STD] - 1)}{10} \quad (3)$$

$$B = -13,12 \times [\log(T + 273,15)] + 34,55 \quad (4)$$

$$C = \log [Ca^{2+}] - 0,4 \quad (5)$$

$$D = \log [Alcalinidade] \quad (6)$$

Notas:

[STD] é a concentração de sólidos dissolvidos totais em mg/L;

T é a temperatura da água em °C;

[Ca²⁺] é a concentração de Ca²⁺ como mg CaCO₃/L;

Um valor positivo do índice de Langelier indica que a água possui potencial para precipitar carbonato de cálcio, sugerindo um potencial incrustante. Quando o índice é zero, ocorre um equilíbrio de saturação: a água não dissolverá nem precipitará excessivamente CaCO₃, evitando a formação de crostas e corrosão. Um valor negativo no índice indica que não há formação de precipitados protetores, o que significa que a água tem tendência à corrosão (Betz, 1991).

Para interpretação de dados é utilizada a tabela 3.1 a seguir, que mostra a tendência da água em função dos valores do índice de saturação de Langelier:

Tabela 3.1- Interpretação do Índice de Saturação de Langelier (LSI).

Valores de LSI	Possível tendência da água
>4	Incrustação Extremamente severa
3 a 4	Incrustação Moderada
1 a 3	Incrustação Suave
0,5 a 1	Incrustação Muito Suave
-0,5 a 0,5	Balanceado
-0,5 a -2	Corrosão Suave
-2 a -5	Corrosão Moderada
< -5	Corrosão Severa

* Balanceada - não apresenta tendências a incrustação ou corrosão.

Fonte: Cavazzanna, 2012

O Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) é uma medida prática que estende o conceito do índice de Langelier. Ele visa oferecer uma correlação mais precisa entre os resultados teóricos e aqueles observados na prática, especialmente no que diz respeito à formação potencial de carbonato de cálcio. Ao considerar a quantidade de carbonato de cálcio que poderia ser formada, o índice de Ryznar indica a corrosividade de águas que não têm propensão à incrustação (Souza, 2019). Ele pode ser calculado pela seguinte equação:

$$RSI = 2.pHs - pH \quad (7)$$

Tabela 3.2 - Interpretação do Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI).

Valores de RSI	Possível tendência da água
<4	Incrustação Severa
4 a 5	Incrustação Forte
5 a 6	Incrustação Leve
6 a 7	Balanceado
7 a 7,5	Corrosão Moderada
7,5 a 9	Corrosão Forte
>9	Corrosão Severa

Fonte: Cavazzanna, 2012

4 METODOLOGIA

Esta seção da pesquisa detalha os equipamentos, instrumentos e insumos utilizados, bem como a metodologia aplicada, para a realização dos experimentos laboratoriais em águas de diferentes torres de resfriamento. Durante o tempo de estudo, foi analisado os parâmetros como: Temperatura, pH, Sólidos Totais Dissolvidos, Dureza Total e Alcalinidade Total, para a obtenção do pH de saturação (pHs). Com base nessas análises, foram calculados os índices de Ryznar e Langelier para avaliar as tendências corrosivas ou incrustantes das águas. Todos os testes foram realizados em um laboratório externo à universidade.

4.1 AMOSTRAGEM

Inicialmente, as amostras de água das três torres de resfriamento distintas, foram coletadas por um técnico sem vínculo com a universidade ao longo de cinco meses. Estas foram armazenadas em garrafas plásticas lacradas de 500 mL, cada uma identificada com as siglas S, P e M, correspondentes às torres, além da data da coleta. A Torre de Resfriamento S (Torre S) apresenta o formato redondo, da marca Körper, com dimensões de 3,30 m de largura e 4,80 m de altura, e uma lâmina de água de 45 cm, podendo atingir a um volume de 420 mil litros. As Torres de Resfriamento P e M (Torre P e Torre M) apresentam o formato quadrado, da marca Alfaterm, com largura de 3,80 m e altura de 6,0 m, e uma lâmina de água de 40 cm. O volume de água em cada uma dessas torres também pode chegar a 420 mil litros.

Figura 4.1 – Torre de resfriamento da marca Körper.



Fonte: TR Representações.

Figura 4.2 – Torre de resfriamento da marca Alfaterm.



Fonte: Alfaterm.

4.2 ANALISE DE TEMPERATURA, PH E SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS

As análises de temperatura, pH e sólidos totais dissolvidos, foram realizadas em loco com o auxílio de um medidor *Weytoll* multifuncional digital portatil, que é um instrumento de teste combinando e foi previamente ajustado. Para realizar os ensaios, será necessario apenas uma aliquota da amostra. Esse equipamento apresenta as funções de medição, temperatura, pH e STD, onde a temperatura é lida em grau Celcius (°C) e os sólidos totais dissolvidos em ppm (parte por milhão) ou ppt (parte por trilhão).

Figura 4.3 – Medidor Weytoll mutifuncional digital portatil.

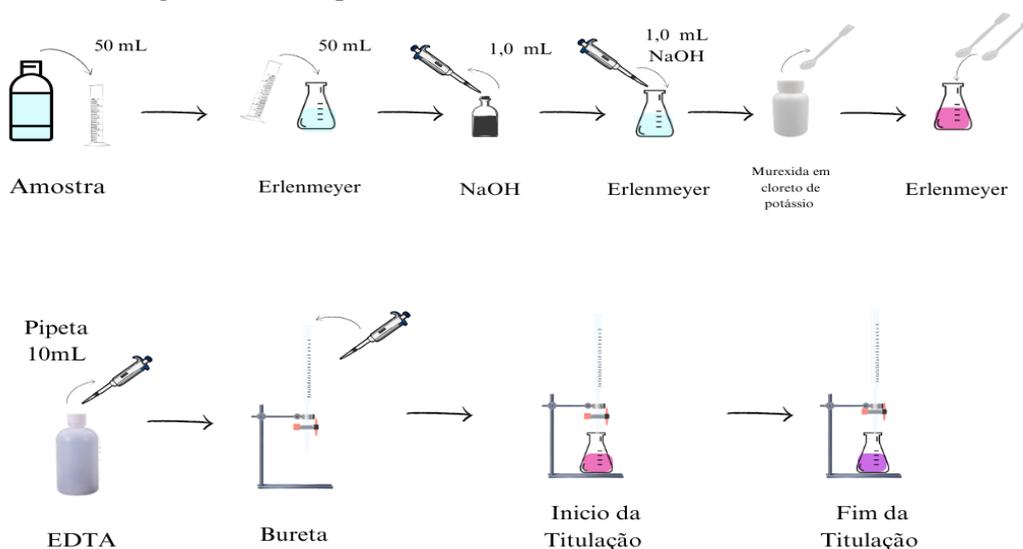


Fonte: Google Fotos.

4.3 ANÁLISE DE DUREZA DE CÁLCIO

Para realizar a análise de dureza de cálcio, foi coletado 50 mL de amostra com o auxílio de uma proveta, transferida para um Erlenmeyer de 125 mL. O método aplicado é o titulométrico, onde o EDTA (etilenodiaminotetracético) será o titulante. No Erlenmeyer além da amostra, foi adicionado 1 mL da solução de hidróxido de sódio (NaOH) com o auxílio de uma pipeta de 1 mL, para o ajuste do seu pH. Em seguida, adicionou-se 50 mg do reagente murexida em cloreto de potássio como indicador, com o auxílio de uma espátula, que conferiu uma coloração rosada à amostra. O EDTA é adicionado na bureta com uma pipeta de 10 mL dando início a titulação, até o ponto de viragem onde a coloração da amostra mudou de rosada para violeta. O volume de EDTA utilizado foi registrado e, posteriormente, multiplicado por 20, este fator é determinado pela metodologia para calcular a dureza de cálcio (AlfaKit).

Figura 4.4 – Esquema da análise de Dureza de Cálcio.



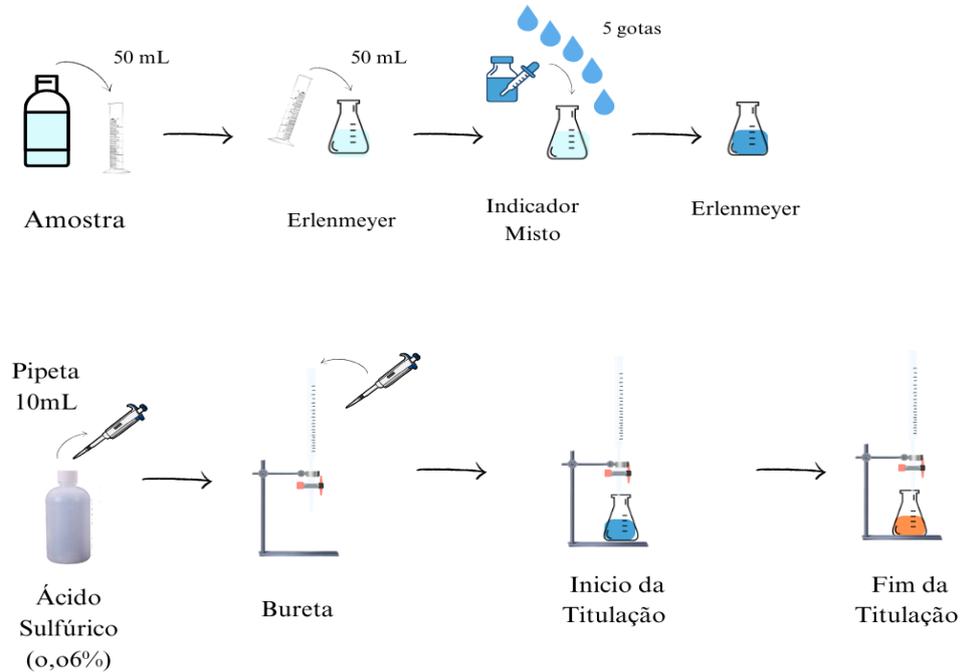
Fonte: Autoria própria (2024).

4.4 ANÁLISE DE ALCALINIDADE TOTAL

Para a análise de alcalinidade, utilizou-se 50 mL da amostra, medidos com uma proveta e transferidos para um Erlenmeyer de 125 mL. A titulação foi realizada com uma solução de ácido sulfúrico a 0,06% (v/v), adicionada à bureta com uma pipeta de 10 mL. Adicionou-se 5 gotas de um indicador misto em álcool etílico, composto por vermelho de metila e verde de bromocresol, ao Erlenmeyer contendo a amostra. Inicialmente, a solução apresentou uma coloração azul. A titulação é realizada até o ponto de viragem, quando a cor muda de azul para salmão. O volume de ácido sulfúrico gasto é registrado e, em seguida, é

multiplicado por 56, que é o fator específico determinado pela metodologia utilizada (AlfaKit).

Figura 4.5 – Esquema da análise de Alcalinidade Total.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.5 pH DE SATURAÇÃO (pH_s)

O pH_s foi determinado após a realização das análises de temperatura, sólidos totais dissolvidos, dureza de cálcio e alcalinidade total. Com os valores obtidos, foram aplicadas as fórmulas correspondentes, conforme mencionado anteriormente, e os cálculos foram realizados utilizando o software Microsoft Excel. Assim, foram obtidos os índices de saturação de Langelier (equação 1) e Ryznar (equação 7).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a realização dos ensaios descritos anteriormente, nas amostras de água das torres de resfriamento S, P e M, respectivamente, durante cinco meses, os valores obtidos foram anotados e organizados em tabelas para melhor interpretação e visualização. Em seguida, foi possível calcular o pH de saturação de cada amostra referente aos meses analisados como também, os índices de saturação de Langelier e Ryznar. É importante destacar que não existe uma legislação específica para águas de sistemas de resfriamento, logo não há valores máximos permitidos para os parâmetros.

5.1 RESULTADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO S

Após o término do período de análise, foi possível observar na tabela 5.1, que houve variação em todos os parâmetros durante os cinco meses referente a torre de resfriamento S. Do primeiro ao segundo mês, os valores de pH, temperatura, sólidos totais dissolvidos e dureza de cálcio tiveram um pequeno aumento. Entretanto, o valor da alcalinidade total reduziu, inicialmente a amostra apresentou um resultado de 252 mg/L de CaCO₃ e posteriormente de 140 mg/L de CaCO₃.

Tabela 5.1 – Valores obtidos após a realização das análises da torre de resfriamento S em 5 meses.

Torre S					
Parâmetros	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês
pH	8,4	8,5	7,09	9,39	9,49
Temperatura	32,4	34,4	32,4	32,4	36,3
STD	425	490	151	570	349
Dureza de cálcio	122	152	38	360	196
Alcalinidade Total	252	140	67,2	448	436,8

Fonte: autoria própria (2024).

No terceiro mês, houve uma diminuição brusca dos resultados em todos os parâmetros, com exceção da temperatura que retornou ao valor do primeiro mês. O pH passou a apresentar um resultado de 7,09, caracterizando a água agora como neutra. No quarto e quinto mês, o pH tem um aumento significativo, com valores de 9,39 e 9,49 respectivamente. A temperatura permaneceu em 32,4 °C e posteriormente aumentou para 36,3 °C, sendo esse o maior valor dos meses de estudo. Os valores de STD indicaram um aumento

de sua concentração no quarto mês de análise em relação ao anterior, assim como a dureza de cálcio e a alcalinidade total, entretanto no mês seguinte, houve uma diminuição desses parâmetros.

É importante salientar que o aumento do pH e das concentrações de dureza de cálcio e alcalinidade total, tornam o meio mais propício para a formação da película protetora de CaCO_3 nas paredes da torre de resfriamento, fazendo com que a água tenha uma tendência maior a incrustação e menor a corrosão, isso pode ser observado na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de pHs e os índices de Langelier e Ryznar em 5 meses de ensaio a torre de resfriamento S.

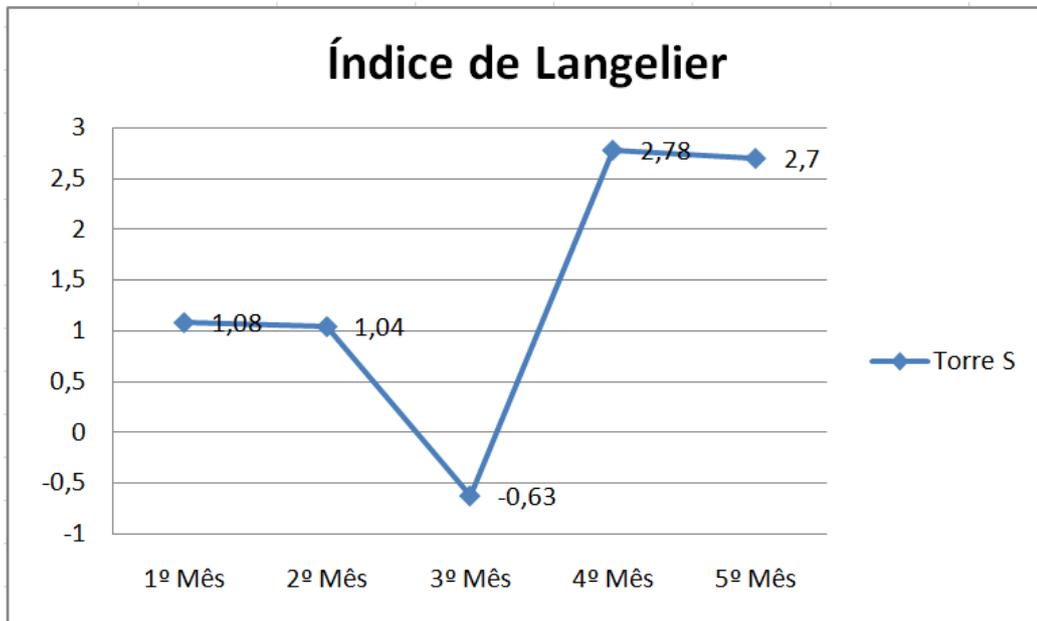
Torre S						
Parametros	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês	Média
pH	8,4	8,5	7,09	9,39	9,49	8,57
pHS	7,32	7,46	7,73	6,61	6,79	7,1
LSI	1,08	1,04	-0,63	2,78	2,7	1,39
RSI	6,24	6,42	6,45	3,83	4,09	5,40

Fonte: autoria própria (2024).

Foi possível observar que nos meses iniciais, onde a amostra apresentou um pH alcalino, é favorável para o crescimento da película de CaCO_3 nas paredes internas da torre de resfriamento, indicando que a água está com uma tendência a incrustação suave, segundo o índice Langelier, porém balanceado para Ryznar. No terceiro mês onde o pH está neutro, a água foi classificada como corrosiva de acordo com o índice de Langelier e balanceada segundo Ryznar. Entretanto, no quarto e quinto mês de análise, a água apresentou um pH extremamente alcalino e o pHs adquiriu valores que indicaram uma tendência a incrustação para LSI e RSI.

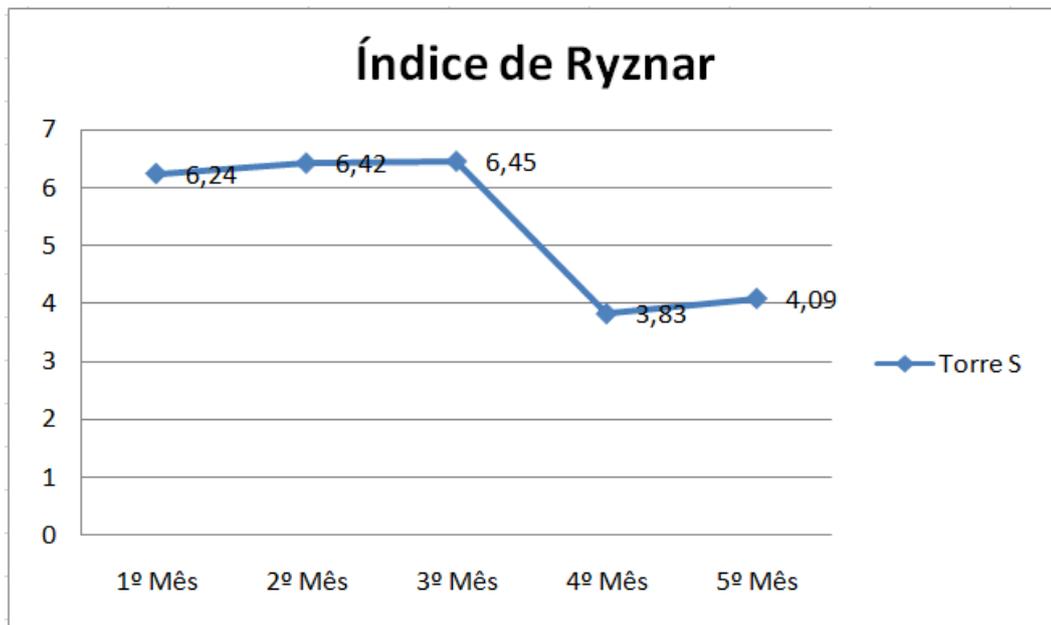
Esses resultados podem ser observados nos gráficos das imagens 5.1 e 5.2, onde indicam as tendências corrosivas e incrustantes da água em estudo.

Figura 5.1 – Gráfico do Índice de saturação Langelier referente a torre de resfriamento S.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 5.2 – Gráfico do índice de estabilidade de Ryznar referente a torre de resfriamento S.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 RESULTADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO P

Durante os meses de estudo, as amostras referentes a torre de resfriamento P, apresentaram valores com baixas concentrações referente aos parâmetros analisados (Tabela 5.3). Foi possível observar que as concentrações de pH permaneceram entre 7,32 a 8,4. A amostra indicou temperaturas elevadas, entretanto o segundo mês exibiu um valor 28,4 °C ,

sendo essa a menor temperatura. Os valores de STD apresentaram alterações duante todo o periodo de análise. Entretanto, as concentrações de dureza de cálcio e alcalinidade total, ambas lidas em mg/L de CaCO₃, apresentaram baixos resultados em todos os cinco meses.

Tabela 5.3 - obtidos após a realização das análises da torre de resfriamento P em 5 meses.

Torre P					
Parametros	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês
pH	7,5	8,2	8,4	7,32	7,65
Temperatura	30,1	28,4	29,5	29,7	29,9
STD	300	210	225	139	211
Dureza de cálcio	72	56	48	34	34
Alcalinidade Total	89,6	67,2	67,2	50,4	78,4

Fonte: autoria própria (2024).

Isso pode ser observado na tabela 5.4, onde segundo o LSI a água apresentou um carater corrosivo em três dos cinco meses analisados, sendo o segundo e o terceiro mês indicando que a água foi classificada como balanceada. Para RSI a amostra apresentou uma tendencia corrosiva forte/severa nos cinco meses analisados. Segundo esses dados, houve uma grande probabilidade da não formação do filme protetor nas paredes da torre de resfriamento P, já que a água apresentou baixas concentrações de CaCO₃ durante o tempo de estudo.

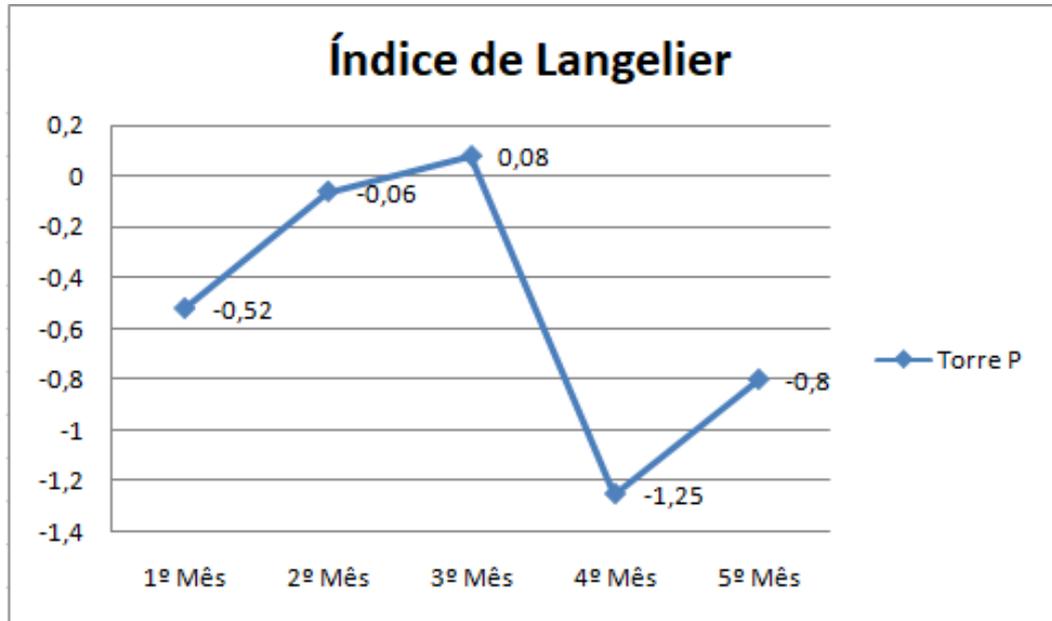
Tabela 5.4 – Valores de pHs e os índices de Langelier e Ryznar em 5 meses de ensaio a torre de resfiramento P.

Torre P						
Parametros	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês	Média
pH	7,5	8,2	8,4	7,32	7,65	7,81
pHs	8,02	8,26	8,32	8,57	8,45	8,32
LSI	-0,52	-0,06	0,08	-1,25	-0,8	- 1,67
RSI	8,54	8,32	8,24	9,82	9,25	8,83

Fonte: autoria própria (2024).

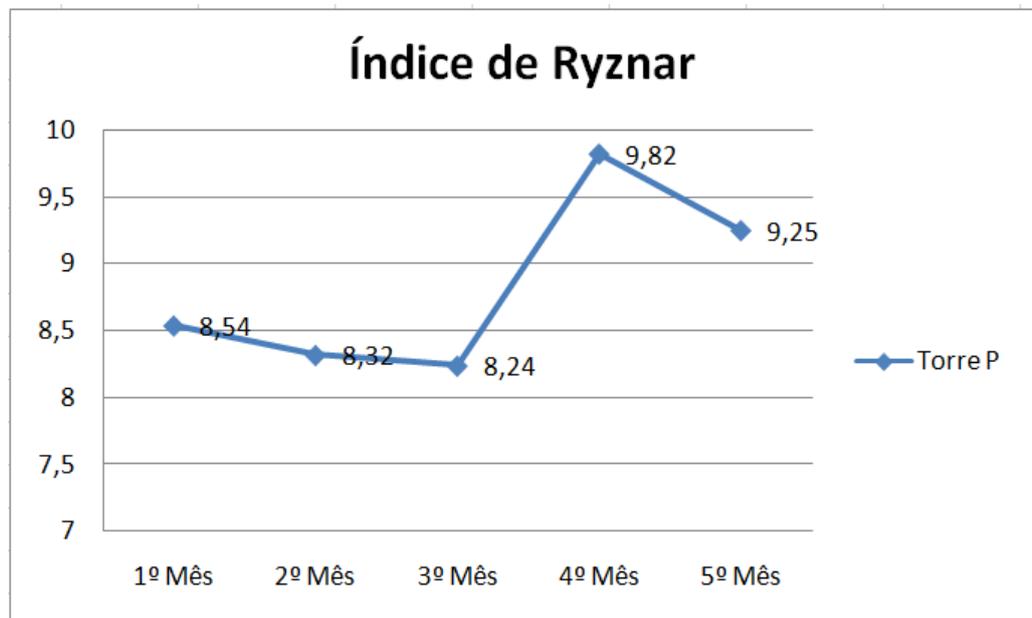
Nas imagens 5.3 e 5.4, também é possível observar esses resultados.

Figura 5.3 – Gráfico do Índice de saturação Langelier referente a torre de resfriamento P.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 5.4 – Gráfico do Índice de estabilidade de Ryznar referente a torre de resfriamento P.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.3 RESULTADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO M

A tabela 5.6, indica os valores dos parametros analisados da torre de resfriamento M, em que o pH apresentou uma pequena variação, sendo o terceiro mês a trazer o menor

resultado. A temperatura permanece na faixa de 29 °C durante os três primeiros meses, diminuindo para 28,6 °C a partir do quarto mês. A concentração de STD foi reduzindo nos meses de análise e só apresentou um aumento no último mês. A dureza de cálcio e a alcalinidade total indicaram nos dois primeiros meses, valores altos, entretanto no terceiro mês, houve uma diminuição brusca de concentração, sendo está aumentada nos últimos meses de estudo.

Tabela 5.6 – valores obtidos após a realização das análises da torre de resfriamento M durante 5 meses.

Torre M					
Parametros	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês
pH	8,4	8,8	7,9	8,37	7,95
Temperatura	29,3	29,0	29,0	28,6	28,8
STD	575	485	325	211	264
Dureza de cálcio	122	126	52	212	420
Alcalinidade Total	274,4	319,2	89,6	235,2	655,2

Fonte: autoria própria (2024).

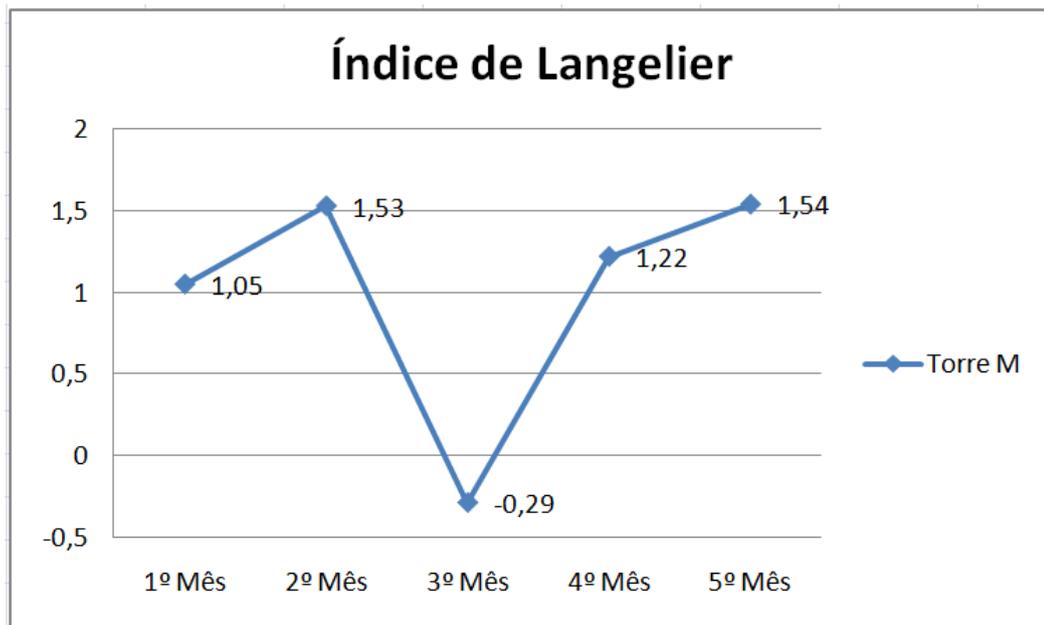
Segundo a tabela 5.7, nos primeiros meses a água a foi classificada em uma incrustação suave para LSI e passou de balanceada para uma incrustação leve para RSI. No terceiro mês, entretanto, a água apresentou a classificação balanceada segundo o índice de saturação de Langelier e uma tendência a corrosão forte conforme o índice de Ryznar. Esse fato, pode ter sido influenciado em virtude das baixas concentrações de dureza de cálcio e alcalinidade total durante esse período. A partir do quarto mês a água voltou a ser caracterizada como incrustante suave segundo o LSI e de incrustação leve para forte segundo RSI.

Tabela 5.7 – Valores de pHs e os índices de Langelier e Ryznar em 5 meses de ensaio a torre de resfriamento M.

Torre M						
Parametros	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês	Média
pH	8,4	8,8	7,9	8,37	7,95	8,28
pHs	7,35	7,27	8,19	7,15	6,41	7,27
LSI	1,05	1,53	-0,29	1,22	1,54	1,01
RSI	6,3	5,74	8,48	5,93	4,87	6,26

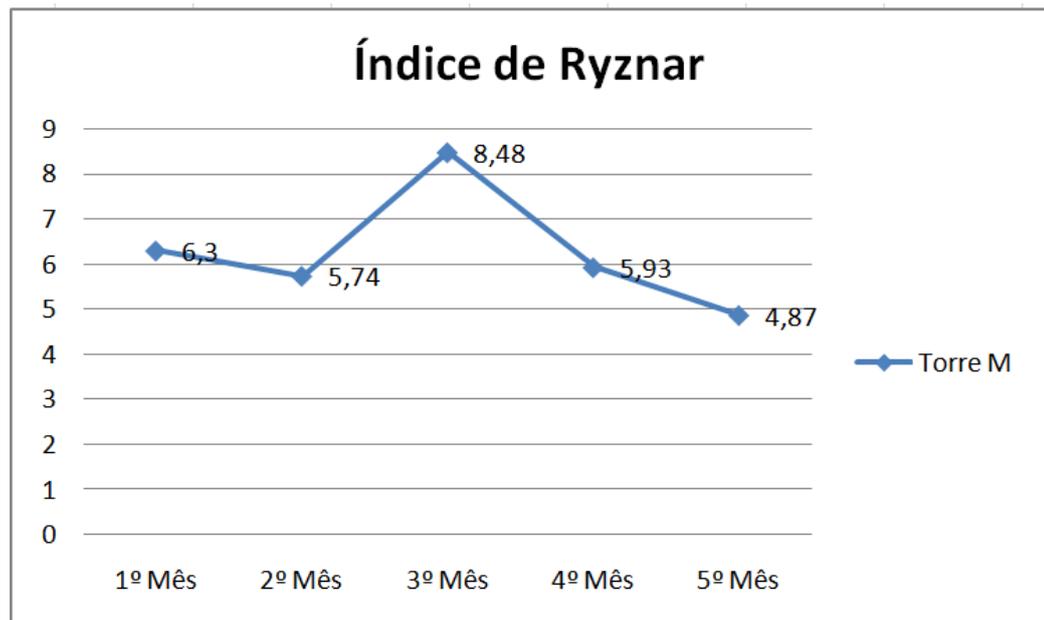
Fonte: autoria própria (2024).

Figura 5.5 - Gráfico do Índice de saturação Langelier referente a torre de resfriamento M.



Fonte: autoria própria (2024).

Figura 5.6 – Gráfico do Índice de estabilidade de Ryznar referente a torre de resfriamento M.



Fonte: autoria própria (2024).

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram uma variação entre as torres S e M comparadas com a torre P. Para as torres S e M, a média de LSI foi de 1,39 e 1,01, respectivamente, indicando uma tendência a incrustação suave, e para RSI de 5,40 e 6,29, apontando um caráter de incrustação leve e balanceado. Já a torre P, apresentou resultados em LSI de -1,67 e RSI de 8,83 similares aos resultados encontrados por Zortéa (2020), cujos valores mostraram uma tendência elevada para corrosividade.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou amostras de três torres de resfriamento distintas, durante um período de cinco meses, a fim de estudar as possíveis tendências a corrosão e incrustação com o auxílio dos índices de Saturação de Langelier e de Estabilidade de Ryznar. Portanto, conclui-se:

- As torres S e M, apresentaram valores similares durante o período de estudo, obtendo algumas variações nas concentrações dos parâmetros analisados. Notou-se também, que as águas destas, apresentaram um caráter incrustante para LSI e para RSI, balanceado e incrustante em boa parte dos meses analisados. Observou-se que no terceiro mês em ambas as torres, apresentaram baixas concentrações em relação aos outros meses analisados. Esse fato pode ter ocorrido decorrente de possíveis erros como o de troca de amostras.

- Entretanto, as amostras da torre P apresentaram uma tendência a corrosão em quase todos os meses de estudo, segundo LSI e em todos para RSI. É importante salientar que essas amostras, obtiveram baixos valores de dureza de cálcio e alcalinidade total, influenciando diretamente nas concentrações de CaCO_3 presente na água e conseqüentemente na não formação da película protetora de CaCO_3 nas paredes da torre.

REFERÊNCIAS

- ALFAKIT. **Dureza de cálcio**. Disponível em: <<https://alfakit.com.br/produto/unikit-lab-dureza-total-calcio-e-magnesio/>>. Acesso em: 1 maio. 2024.
- BURGER, ROBERT. **Cooling tower technology: maintenace, upgrading and rebuilding**. 3^a ed. The Fairmont Prees, Inc. India. 1994. 234 p.
- CAVAZZANA, G.H. **Análise da Corrosividade e Incrustação das Águas subterrâneas na Região Urbana de Campo Grande – MS**. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, 2011.
- CORTINOVIS, GIORGIA FRANCINE e SONG, TAH WUN. **Funcionamento de uma torre de resfriamento de água**. Revista de Graduação da Engenharia Química, v. 6, n. 14, p. 5-10, 2005.
- DEL'ANTONIO *et. al* . **Sistema de refrigeração por meio de água gelada. Ensaio & Diálogos**, Rio Claro, v. 10, n. 1, p. 197-224, jan./dez. 2017.
- FONSECA, P.P. **Avaliação de cenário alternativo para sistema de condensação de um complexo multiempresarial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- FREYTAG, C. **Avaliação do desempenho de uma torre de resfriamento industrial**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- GARCIA, P. C. **Apostila Tratamento de água de resfriamento**. BetzDearborn, 2000.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 1, 1; 2011.
- GRADES, E. Des A. **Modelling and Simulation of CO₂ Release in Multiple-Effect Distillers for Seawater Desalination**. Dissertation (Doktor – Ingenieur). Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Tafilah, Jordanien, 2004. p 78-84.
- KRIECK, G.A. **Eficiência energética em bombas de água gelada de um sistema de climatização com chillers**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle de Automação) - Departamento de Engenharia de Controle, Automação e Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2020.
- MACEDO, J. A. B. **Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e bromatológicas**. - 3^aed. CRQ-MG. Belo Horizonte, MG, 2005; pg. 41.
- MATOS, R. S. **Refrigeração**, Universidade Federal do Paraná, 2016.
- MELLO, L.C. **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de Resfriamento**. 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MERCHI, H. R.; SOUZA, M. C. **Avaliação dos índices de incrustação e corrosividade em água de reúso usada em sistemas de resfriamento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. 2005.

MILLETTE, J. R.; HAMMONDS, A. F.; PANSING, M. F.; HANSEN, E. C.; CLARK, P. J. **Aggressive water: Assessing the extent of the problem**. Journal (American Water Works Association), v. 72, n. 5, p. 262-266, 1980

NALCO. **Guide to cooling Water System Failure Analysis**, 1ª edição, 1979

NALCO COMPANY. **The Nalco Water Handbook**. 3 rd ed. New York: McGrawHill Professional. 2009. 1280 p.

NBR - 12622- Águas - **Determinação de Dureza Total** - Método Titulométrico do EDTA-Na.

NBR - 13736 - Água - **Determinação de alcalinidade** - Métodos potenciométricos e titulométricos.

PEREIRA, C. A. **Tecnologia mais limpa aplicada ao tratamento de água em sistemas de resfriamento abertos com recirculação**. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

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

PEREZ, J. L. **Investigação da qualidade e da estabilização química da água distribuída na cidade de Brodowski-SP**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2011.

SOUZA *et.al.* **Variação Em Índices De Tendência À Corrosão E Incrustação Em Reservatório Do Trópico Semiárido**. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2019, Fortaleza. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/VIII-063.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SOUZA, S. O. **Variação de índices iônicos em reservatórios no sertão cearense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

Standard Métodos for The Examination of Water and Wastewater. 21º Ed. 2005, 2340 C.2 - 37 - Método Titulométrico de Complexação.

Standard Métodos for The Examination of Water and Wastewater. 21^o Ed. 2005, 2320 B. 2 – 27.

TEBECHERANI, R. **Estudo do uso de catalisadores eletroquímicos para o tratamento de água de uma torre de resfriamento em uma indústria química no vale do Paraíba.** Monografia (Graduação em Engenharia Química), Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

TROVATI, J. **Tratamento de Água de Resfriamento.** Curso On-line – Tratamento de Água (Sistemas de Resfriamento), São Paulo, 2004.

VICENTE, A.C. **Uso de ácido peracético como biocida em tratamento de água de torre de resfriamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos), Programa Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ZORTÉA, J.B. **Estudo do meio corrosivo e da corrosão de diferentes aços carbono em água clarificada de uma planta de tratamento de água industrial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.