

OSVALDO  
ARISTON  
RODRIGUES DO  
NASCIMENTO

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE  
UMA TORRE DE REFRIGERAÇÃO  
INDUSTRIAL**



Relatório de Estágio do Mestrado em  
Engenharia Biológica e Química

**ORIENTADORA**

Professora Doutora Raquel Duarte

**SUPERVISOR**

Engenheiro João Ferreira

OSVALDO  
ARISTON  
RODRIGUES DO  
NASCIMENTO

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE  
UMA TORRE DE REFRIGERAÇÃO  
INDUSTRIAL**

**JÚRI**

*Presidente:* Professora Doutora Maria de Lurdes  
de Figueiredo Gameiro, ESTBarreiro/IPS

*Supervisor:* Engenheiro João Ferreira, ADP  
Fertilizantes, S.A.

*Vogal:* Doutor José Augusto Dâmaso Condeço,  
C<sup>5</sup>Lab – Sustainable Construction Materials  
Association





## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela força necessária à conclusão deste percurso, marcado por momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais, António do Nascimento e Rebeca Rodrigues, à minha família em geral, aos meus amigos e colegas pelo apoio e ajuda direta ou indireta durante a jornada que culmina com este momento.

Agradeço à coordenação do Curso de Mestrado em Engenharia Biológica e Química, especialmente às professoras, Raquel Duarte e Lurdes Gameiro, à empresa ADP Fertilizantes e especialmente aos engenheiros: João Ferreira e Hugo Carapinha.







## **RESUMO**

O presente trabalho foi realizado nas instalações industriais da ADP Fertilizantes, no âmbito do estágio curricular referente ao Curso de Mestrado em Engenharia Biológica e Química. O objetivo do estágio foi o estudo do Desempenho Térmico da Torre de Refrigeração do Tipo Contracorrente.

O presente trabalho divide-se em duas fases, designadamente:

A primeira, a análise económica dos biocidas hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ), utilizado no ano de 2018, e dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), utilizado no ano de 2020 no tratamento da água de refrigeração, com base nos dados fornecidos de consumos de produtos no tratamento de água de refrigeração e, através dos quais foi possível verificar que o hipoclorito de sódio apresenta um custo mais alto que um sistema misto à base de hipoclorito de sódio e dióxido de cloro.

A segunda fase baseou-se no estudo do desempenho térmico da torre de refrigeração 5 (TR5) de uma forma simplificada, comparando os dados fornecidos pela Empresa Esindus Portugal - Soluções Técnicas Industriais, Unipessoal, Lda. e os dados obtidos.

Através de análises comparativas entre os dados do projecto e os dados coletados durante o estudo, observou-se que a torre apresentou uma eficiência térmica inferior à projectada. As condições climática mais quentes e húmidas de 2020 impactaram negativamente o desempenho dos ventiladores, resultando em um aumento no consumo elétrico dos ventiladores (69,4A em 2020 e 67,8A em 2018). A capacidade de dissipação de calor foi inferior ao esperado (  $6,2^\circ\text{C}$  em 2020 e  $10^\circ\text{C}$  em 2018)







## **ABSTRACT**

This internship was carried out at the ADP Fertilizantes industry as part of the curricular internship of the Master's degree in Biological and Chemical Engineering. The internship aimed to study the Thermal Performance of the Cooling Tower.

This work was divided into two phases, the first phase being the economic analysis of the biocides sodium hypochlorite ( $\text{NaClO}$ ), used in 2018, and chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ), used in 2020 in the treatment of cooling water, based on the data provided on consumption of products in the treatment of cooling water, through which it was possible to verify that sodium hypochlorite has a higher cost than a mixed system based on sodium hypochlorite and chlorine dioxide.

The second phase was based on the study of the thermal performance of the TR5 cooling tower in a simplified way, comparing the data provided by the company Esindus Portugal - Soluções Técnicas Industriais, Unipessoal, Lda and the data obtained.

Through comparative analyzes between project data and data collected during the study, it was observed that the tower presented a thermal efficiency lower than that designed. The hotter and more humid weather conditions of 2020 negatively impacted fan performance, resulting in an increase in fan electrical consumption (69.4A in 2020 and 67.8A in 2018). The heat dissipation capacity was lower than expected (6.2°C in 2020 and 10°C in 2018)



## Índice Geral

Agradecimentos.....	i
<i>Resumo</i> .....	iii
<i>Abstract</i> .....	v
1. Apresentação da Empresa (ADP-Fertilizantes).....	6
1.1. História do grupo ADP .....	6
1.2. Descrição da Unidade Fabril do Lavradio (UFAL) .....	7
1.3. Estrutura da ADP Fertilizantes.....	8
1.4. Objetivo do Trabalho.....	9
2. Introdução.....	10
2.1. Classificação das torres de refrigeração ou de arrefecimento.....	11
2.1.1. Relativamente ao método de transferência de calor.....	11
2.2. Componentes Principais de uma Torre de Refrigeração Contracorrente .....	14
2.2.1. Estrutura e revestimento exterior.....	14
2.2.2. Sistema de Distribuição.....	14
2.2.3. Tipos de Enchimento.....	16
2.2.4. Eliminador de deriva ou separador de gotas .....	17
2.2.5. Ventiladores .....	18
2.2.6. Bacia.....	18
2.2.7. Persiana.....	18
2.2.8. Bombas.....	18
2.2.9. Purga .....	18
2.2.10. Reposição (“make-up”).....	19
2.3. Parâmetros importantes para o desempenho da Torre de Refrigeração.....	19
2.4. Princípio de Funcionamento de uma torre de Refrigeração .....	20
2.5. Processo de transferência térmico e mássico da torre de refrigeração .....	21
2.6. Balanço de massa e energia baseando-se na teoria de Merkel.....	22
2.7. Principais problemas em um sistema de refrigeração .....	26
2.7.1. Incrustação e deposição .....	26
2.7.2. Corrosão .....	27
2.7.3. Contaminação Biológica.....	28
2.8. Água de Compensação .....	29
2.9. Tratamento de água de refrigeração.....	30
2.10. Critério na escolha do Biocida para o tratamento da água de refrigeração .....	31
2.10.1. Biocidas .....	32

2.10.2.	Biocidas oxidantes À base de cloro.....	32
2.10.3.	Comparação dos Biocidas (Dióxido de cloro e Hipoclorito de sódio).....	33
2.10.4.	Mecanismo de Ação dos Biocidas.....	34
2.10.5.	Cinética da desinfeção.....	35
2.10.6.	Hipoclorito de Sódio.....	36
2.10.7.	Dióxido de cloro.....	37
2.11.	Descrição da Torre de Refrigeração 5.....	39
2.11.1.	Características Técnicas da Torre de Arrefecimento TR5.....	40
2.12.	Sistema de monitorização de controlo e dosagem da TR5.....	41
2.13.	Principais objetivos da aplicação do dióxido de cloro em conjunto do hipoclorito de sódio na torre 5 (TR5).....	42
3.	Parte experimental dos custos económicos dos biocidas utilizados no tratamento da água de refrigeração na torre 5 (T5).....	43
4.	Parte experimental do estudo térmico da torre de refrigeração.....	45
4.1.	Descrição dos procedimentos experimentais.....	45
4.2.	Resultado experimental do desempenho térmico da Torre de refrigeração 5.....	46
4.2.1	Resultados experimentais dos consumos elétricos dos ventiladores.....	50
5.	Conclusão e propostas futuras.....	52
5.1.	Proposta futuras.....	53
6.	bibliografia.....	54
7.	Anexo.....	57

## Índices de figuras

Figura 1 - Organigrama de ADP Fertilizantes - [2].....	8
Figura 2-Esquema das torres de refrigeração não- evaporativa e evaporativa de tiragem mecânica [7] .....	11
Figura 3- Esquemas de diferentes tipos de torres de refrigeração evaporativas [7] .....	13
Figura 4- Componentes principais de uma torre de refrigeração contracorrente de tiragem induzida [8] .....	14
Figura 5-Sistemas distribuição por gravidade [9] .....	15
Figura 6 - Sistemas distribuição por pressão.[9] .....	15
Figura 7- Sistemas de distribuição rotacional [9].....	15
Figura 8 - Barras de respingo de madeira e de plástico [10] .....	16
Figura 9 - Enchimentos do tipo de filme [10] .....	17
Figura 10- Eliminador de deriva ou separador de gotas [11].....	17
Figura 11- Relação temperatura da água vs temperatura do ar numa torre de refrigeração contracorrente [6].....	20
Figura 12:Representação esquemática de transferência térmico e mássico no enchimento [18] .....	21
Figura 13 - Relação da corrente água-ar no fundo da torre (a), (b) e no topo da torre (c)[19] .....	22
Figura 14 - Esquema representativo da Teoria de Merkel [20].....	23
Figura 15- Principais problemas em sistemas de refrigeração. [24] .....	26
Figura 16 - a) Corrosão generalizada; b) Corrosão localizada( <i>pitting</i> ) [25].....	28
Figura 17 - Diagrama de concentração (%) de compostos clorados em função do pH em meio aquoso [[41].....	37
Figura 18: Variação da Temperatura do Termómetro Húmido e o rendimento com a Temperatura da água de Refrigeração em condições de verão .....	47
Figura 19: Variação da Temperatura do Termómetro Húmido e o Rendimento com a Temperatura da Água de Refrigeração em condições de inverno.....	47
Figura 20: Curvas do Desempenho Térmico da Torre de Refrigeração no Período de Verão de 08-2018.....	48

## Índices de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Evolução cronológica de ADP fertilizantes [2].....	6
<b>Tabela 2:</b> Cronograma das estimativas das atividades desenvolvidas no decorrer do estágio na ADP-Fertilizantes. No período de estágio de junho a dezembro de 2020 .....	9
<b>Tabela 3:</b> Exemplo dos caudais de compensação relativamente aos fatores de concentração determinados pela Aguaciclo [28] .....	30
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros físico-químicos da A.R[29].....	31
<b>Tabela 5:</b> Eficácia dos biocidas Hipoclorito e dióxido de cloro em diferentes micro-organismos e os subprodutos finais [33]. .....	33
<b>Tabela 6:</b> Eficiência do cloro e do dióxido de Cloro na eliminação da legionella pneumofilae [40] .....	36
<b>Tabela 7:</b> Características técnicas da torre de refrigeração TR5 [43] .....	40
<b>Tabela 8:</b> Análise económica do tratamento misto .....	43
<b>Tabela 9:</b> Análise económica do tratamento exclusivo .....	44
<b>Tabela 10:</b> Tabela de desempenho térmico da torre de refrigeração TR5 no período de verão .....	46
<b>Tabela 11:</b> Tabela de desempenho térmico da torre de refrigeração TR5 no período de Inverno.....	46
<b>Tabela 12:</b> Dados de Temperatura de A.R. F bacia e Caudal de entrada da torre de agosto de 2020 para uma Temperatura de Termómetro. Húmido de 19,7°C.....	48
<b>Tabela 13:</b> Dados de Temperatura de A.R. F bacia e caudal de entrada da torre de agosto de 2018 para uma Temp.Termóm. Húmido de 19 °C.....	48
<b>Tabela 14 -</b> Dados ambientais e as respetivas temperatura média da água de refrigeração	49
<b>Tabela 15:</b> Dados do consumo elétrico dos ventiladores no período de verão (agosto de 2020), considerando diferentes temperaturas de bolbo húmido.....	50
<b>Tabela 16:</b> Dados do consumo elétrico dos ventiladores no período de verão (agosto de 2018), considerando diferentes temperaturas de bolbo húmido.....	51
<b>Tabela 17-</b> Parentros climaticos relacionados aos resultados dos ventiladores.....	52
<b>Tabela 18:</b> fórmulas utilizadas para determinar as principais variáveis para o estudo do desempenho térmico. ....	57

**Símbolos, Siglas e Abreviaturas**

**a** – Área específica de transferência por unidade de volume da torre ( $m^2/m^3$ )

**ARF** – Água de refrigeração fria

**AR** – Água de refrigeração ou Água de alimentação

**CUF** - Companhia União Fabril

**C<sub>pw</sub>** – Calor específico da água (kJ/kg °C)

**DBPs** – Disinfection By-Products (Produtos de Desinfecção Secundários)

**FTP** – File Transfer Protocol ( Protocolo de Transferência de Arquivos )

**G** – Caudal mássico de ar (kg ar/h)

**H<sub>ar1</sub>** - entalpia específica de saturação do ar(kJ/kg)

**HAAs** – Ácidos Haloacéticos

**KaV/L** – Característica da Torre (kg ar/kg H<sub>2</sub>O)

**K<sub>G</sub>** - coeficiente global volumétrico de transferência de calor e mássico(  $W.m^{-3}.K^{-1}$ )

**L** – Caudal mássico de água (kg água/h)

**m<sub>ar</sub>** – Caudal de ar de entrada na torre (kg/h)

**ORP** - Oxidation-Reduction Potential (Potencial de Oxidação-Redução) (mV)

**Q** – Calor (kW)

**R** – Range (°C)

**SOPAC** - Unidade Fabril de Setúbal

**T<sub>1</sub>** – Temperatura de entrada água na torre (°C)

**T<sub>2</sub>** – Temperatura de saída da água da torre (°C)

**TBH**- Temperatura do termómetro húmido (°C)

**TBS**- Temperatura do termómetro seco (°C)

**THMs** – Trihalometano

**TR 5**- Torre de Refrigeração 5

**UFAL** - Unidade Fabril de Adubos do Lavradio

**UFAA** - Unidade Fabril de Adubos de Alverca

**UFC's** – Unidades Formadoras de Colónias

**ω**– Humidade relativa

# 1. Apresentação da Empresa (ADP-Fertilizantes)

## 1.1. HISTÓRIA DO GRUPO ADP

A ADP-Fertilizantes, S. A. é uma empresa de capital privado cujas origens remontam ao Século XIX, com a criação da Companhia União Fabril (CUF) por Alfredo da Silva, com o objetivo de desenvolver a produção de adubos e produtos químicos para a agricultura (ADP Fertilizantes, 2015). A CUF atingiu o seu auge de produção no início dos anos 80, com a integração de duas grandes empresas adubeiras em Portugal, pertencentes aos grupos Quimigal e Sapec. A CUF ocupava uma posição de destaque na produção e comercialização de fertilizantes na Europa, especialmente na Península Ibérica [1]. Em 2009, o grupo José de Mello efetuou um acordo com o grupo espanhol Fertibéria, para esta adquirir a Nova AP, empresa de fabrico de produtos químicos industriais utilizados na produção de fertilizantes. Na sequência desta aquisição, a empresa alterou a sua denominação social para ADP-Fertilizantes, S.A.[2]. Atualmente, a ADP Fertilizantes é responsável por três unidades fabris, nomeadamente a Unidade Fabril de Adubos de Alverca (UFAA), onde se encontra a sede, a Unidade Fabril de Setúbal (SOPAC) e a Unidade Fabril de Adubos do Lavradio (UFAL), onde foi desenvolvido este trabalho. De um modo geral, o desenvolvimento da ADP Fertilizantes pode ser organizado em várias etapas cronológicas:

**Tabela 1:** Evolução cronológica de ADP fertilizantes [2].

Cronologia	EVENTOS
1898-1926	Criação da companhia união fabril que inicia a produção de adubos e produtos químicos. A exploração das minas de pirite e a produção de fertilizantes a partir do ácido sulfúrico.
1941-1957	Criação da Amoníaco Português, com o início da produção de amoníaco sintético, ácido sulfúrico, sulfato de amónia e fertilizantes. A criação da Amoníaco Português, com o início da produção de amoníaco sintético, ácido sulfúrico, sulfato de amónia e fertilizantes
1977 – 1989	Nacionalização da CUF, Amoníaco Português e Nitratos de Portugal e criação do Grupo Quimigal. A criação da SAPEC AGRO, SA, englobando todas atividades ligadas à agricultura do Grupo SAPEC.
1991 –1997	Constituição da Quimigal Adubos a partir da divisão de Adubos do grupo Quimigal. Criação da ADP- Adubos Portugal, SA resultante da privatização da Quimigal Adubos com a integração das atividades de Adubos sementes da SAPEC AGRO.
1999 – 2009	Parceria, assente na distribuição de 50% pelas partes, entre o Grupo José de Mello e o Grupo SAPEC. Aquisição da CUF-Adubos Portugal S.A, pelo Grupo Fertibéria, alterando a sua denominação social para ADP Fertilizante S.A.

A ADP Fertilizantes produz e comercializa produtos para a agricultura e produtos para a indústria química. De entre os produtos produzidos pela ADP Fertilizantes, destacam-se os utilizados para a agricultura, tais como: adubos clássicos e adubos específicos. Podem ser adubos sólidos, líquidos claros, líquidos foliares ou bioestimulantes. Os adubos clássicos são produtos que apresentam elevados teores de elementos nutritivos, sobretudo macronutrientes principais, tais como nitrogénio, fósforo e potássio, que podem ser elementares ou compostos. Os adubos clássicos atuam sobre as culturas de forma essencialmente direta porquanto permitem uma maior absorção dos nutrientes [1]. Os adubos específicos são produtos adaptados de adubos clássicos que permitem ao agricultor melhores resultados. Estes adubos têm na sua composição, além dos macronutrientes primários (nitrogénio, fósforo e potássio), os macronutrientes secundários, como cálcio, magnésio e enxofre, e ainda micronutrientes, como ferro, manganês, zinco, cobre, boro, molibdénio, cloro ou mesmo matéria orgânica.

Além da produção e comercialização de produtos para a agricultura, a ADP Fertilizantes também produz e comercializa produtos para a indústria química, nomeadamente: ácido nítrico, solução amoniacal, soluções de nitrato de amónio, ureia em *spray*, ureia técnica e outros produtos inerentes à atividade industrial. Estes produtos têm aplicabilidade diversa na indústria, por isto, devem possuir pureza e qualidade elevadas [1].

## 1.2. DESCRIÇÃO DA UNIDADE FABRIL DO LAVRADIO (UFAL)

A Unidade Fabril de Adubos do Lavradio (UFAL) situa-se no Parque Industrial da Baía do Tejo, S.A., no Lavradio. Caracteriza-se pela localização junto ao Rio Tejo, o que viabiliza o seu funcionamento como entreposto de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), pois recebe amoníaco por navio e o expede por transporte rodoviário e/ou ferroviário. A capacidade de armazenamento disponível para o amoníaco é superior a 33000  $\text{m}^3$ , dividida entre vários tanques. A maior parte do stock é armazenada num tanque cuja capacidade é de 30000  $\text{m}^3$ , operado pela Alkion Terminal Lisbon, multinacional operadora de portos, e parceira da ADP Fertilizantes na movimentação de amoníaco. [1]

Esta capacidade de armazenamento permite que a UFAL receba navios de grande capacidade, enviados pelas empresas produtoras de amoníaco pertencentes ao Grupo Fertibéria, situadas na Espanha e na Argélia. Também lhe confere a capacidade de movimentação ferroviária e rodoviária de aproximadamente 4000  $\text{m}^3$  de amoníaco por semana, para abastecer, não só, as fábricas da UFAA, em Alverca, e da SOPAC – Sociedade Produtora de Adubos Compostos, em Setúbal, empresas do Grupo Fertibéria em Portugal, como também para fornecimento à Bondalti, S.A., em Estarreja. [1]

Conforme mencionado anteriormente, sobre os principais produtos da ADP Fertilizantes, eles são produzidos através das fábricas da UFAL. As fábricas, para a produção de ácido nítrico e solução de nitrato de amónio a 90%, funcionam em laboração contínua, enquanto as restantes funcionam em regime descontínuo, nomeadamente a produção de solução amoniacal e soluções azotadas. [1] As principais áreas fabris da ADP fertilizantes são:

- ❖ Fábrica de ácido nítrico;
- ❖ Fábrica de solução amoniacal;
- ❖ Fábrica de soluções de nitrato de amónio;
- ❖ Fábrica de soluções azotadas;

### 1.3. ESTRUTURA DA ADP FERTILIZANTES

A ADP Fertilizantes está estruturada por várias direções e departamentos, de forma a responder eficientemente os clientes.

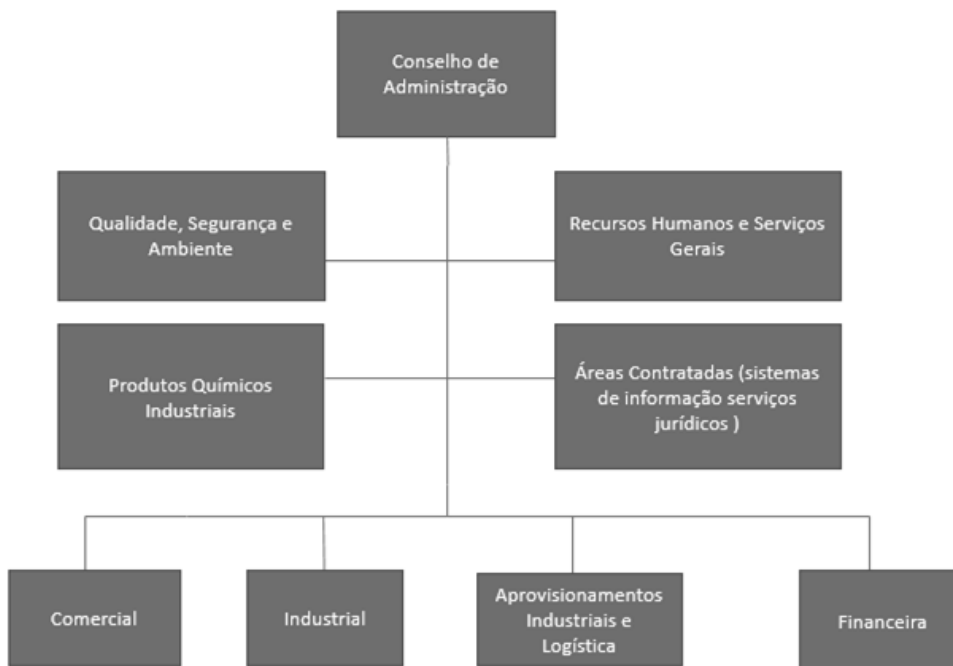


Figura 1 - Organograma de ADP Fertilizantes - [2]

#### 1.4. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo do desempenho da Torre de Refrigeração 5 (TR5) do tipo contracorrente, constituída por três células e três que permite um controlo mais eficiente dos caudais de ar e água, ajustando-se melhor as diferentes condições, os ventiladores axiais de velocidade variável, o estudo do fluxo (contacto ar-água) e a avaliação do seu funcionamento físico-químico e biológica

Durante o estágio, efetuaram-se algumas tarefas de acordo com a calendarização apresentada abaixo:

- 1) Pesquisas de fontes bibliográficas para o estudo dos processos tecnológicos das torres de refrigeração;
- 2) Análise técnica-económica dos tratamentos efetuados;
- 3) Acompanhamento do funcionamento da torre de refrigeração;
- 4) Estudos do desempenho térmico da torre de refrigeração 5 (TR5).

**Tabela 2**-Cronograma das estimativas das atividades desenvolvidas no decorrer do estágio na ADP-Fertilizantes. No período de estágio de junho a dezembro de 2020

#### MESES

ATIVIDADES	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	x	x					
2			x		x		
3			x	x			x
4			x	x		x	x

## 2. INTRODUÇÃO

Geralmente nos processos industriais, gera-se calor que precisa de ser extraído e dissipado para manter a eficiência e a vida útil dos equipamentos. Em muitos desses processos, utiliza-se a água como elemento de refrigeração, como é o caso das indústrias química, petroquímica e em centrais termoelétricas. As torres de refrigeração são componentes que integram muitos sistemas de refrigeração, proporcionando conforto ou refrigeração do processo numa gama ampla de aplicações. O calor é dissipado para a atmosfera através do processo evaporativo onde o ar e a água quente entram em contacto direto para que ocorra o arrefecimento (transferência de calor). Em termos técnicos, as torres de refrigeração são projetadas com base em uma carga de refrigeração especificada. A carga de refrigeração é determinada pela quantidade de calor que precisa ser extraída de um determinado processo e deve ser eficiente em suas operações, conseguindo extrair calor de maneira eficaz.[4]

As torres de refrigeração são usadas para rejeitar o calor através do processo natural de evaporação. A água circulante e quente é enviada para a torre de refrigeração, onde uma parte dela é evaporada no ar que passa através da torre. À medida que a água evapora, o ar absorve o calor, o que diminui a temperatura da água restante. Este processo fornece uma refrigeração significativa para o fluxo de água restante que é coletado na bacia da torre, onde pode ser bombeada de volta ao sistema para extrair mais calor do processo permitindo, assim, que grande parte da água seja usada repetidamente para atender à demanda de refrigeração.

A rejeição da água utilizada num processo de refrigeração é uma prática ambiental insustentável, uma vez que a água, nestes casos, apresenta uma temperatura elevada e a sua rejeição nestas condições provocaria impacto na flora e na fauna subaquática local. Além disso, considerando os desafios para obtenção de água potável, a reutilização da água em torres de refrigeração é o meio mais viável do ponto de vista económico, reduzindo o uso de produtos utilizados no tratamento da água de refrigeração, otimizando o controlo de perdas e a minimização da produção de efluentes desperdiçados. A quantidade de calor que pode ser extraída da água para o ar está diretamente ligada à humidade relativa do ar. A humidade relativa é definida como a razão entre a quantidade de vapor de água existente em uma certa massa de ar atmosférico e a massa de água presente no ar completamente saturado. Assim, o ar com menor humidade relativa tem maior capacidade de absorver a água através da evaporação do que o ar com maior humidade relativa, simplesmente porque existe menos vapor de água no ar.[3]

Por exemplo, considerando as torres de refrigeração em dois locais diferentes - um em Atlanta, Geórgia, e outro em Albuquerque, Novo México. A temperatura do ar ambiente nesses dois locais pode ser semelhante, mas a humidade relativa do ar em Albuquerque, em média, será muito menor do que a de Atlanta. Portanto, a torre de refrigeração em Albuquerque será capaz de extrair mais calor do processo e funcionará a uma temperatura mais baixa porque o ar seco do deserto possui uma capacidade maior de absorção da água quente [4]. Comparando com Lavradio, sítio onde foi feito o estudo da torre de refrigeração com as cidades mencionadas em cima, a localidade de Lavradio apresenta um clima mediterrâneo: quente e seco no verão, tendo assim, uma humidade relativamente mais baixa, e uma maior capacidade de absorver vapor de água comparando com as cidades de Atlanta e Geórgia que apresentam um clima subtropical húmido resultando num verão quente e húmido que dificulta a eficiência da torre de refrigeração.

## 2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS TORRES DE REFRIGERAÇÃO OU DE ARREFECIMENTO

As torres de refrigeração são classificadas segundo o seu princípio de funcionamento. Estes modelos podem ser classificados de acordo com o método de transferência de calor (torres evaporativas e não evaporativas), de acordo com o processo de fornecimento de ar para a torre (tiragem natural e tiragem forçada) e ainda de acordo com a direção dos caudais de ar e de água (contracorrente e corrente cruzada).[5]

### 2.1.1. RELATIVAMENTE AO MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Independentemente do método de transferência de calor nas torres de refrigeração, as torres de refrigeração são instaladas essencialmente para dissipar o calor em processos industrial. Ambas as torres têm as suas aplicações específicas, a escolha entre elas depende de fatores como as eficiências térmicas, custos operacionais, impacto ambiental e disponibilidade da água

- Arrefecimento evaporativo: nas torres de refrigeração evaporativa, o principal efeito de refrigeração deve-se à evaporação que ocorre quando o ar e a água entram em contacto direto. [6]

- Arrefecimento não-evaporativo: A circulação da água ocorre através de tubos. A transferência de calor dá-se através de calor sensível, onde o calor da água é transferido para o ar, sem que haja mudança de fase (sem evaporação). As torres de arrefecimento não-evaporativa dissipam menos calor no processo de refrigeração, consomem menos água em comparação às torres evaporativas. As torres não-evaporativas são mais recomendáveis a regiões de escassez de água, embora sejam menos eficazes em comparação a torres de resfriamento evaporativas. [6]

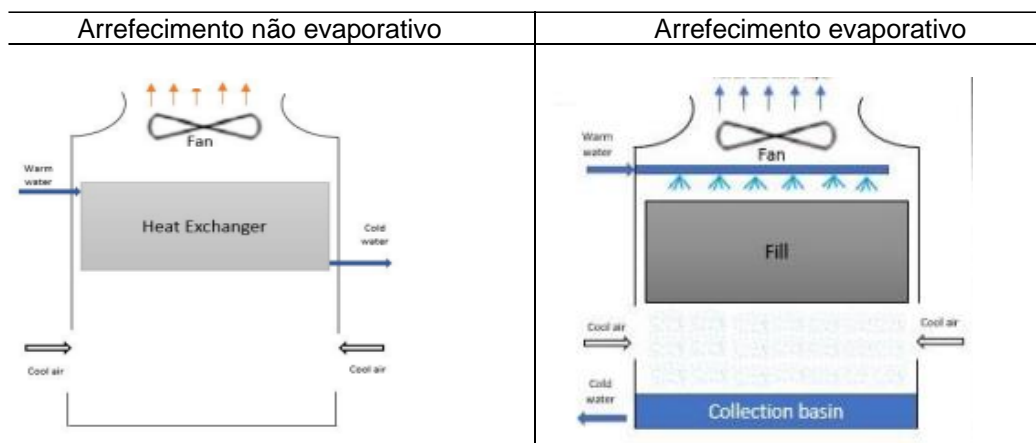


Figura 2-Esquema das torres de refrigeração não-evaporativa e evaporativa de tiragem mecânica [7]

#### 2.1.1.1. RELATIVAMENTE AO FORNECIMENTO DE CAUDAL DE AR E A DIREÇÃO DOS CAUDAIS DE AR E ÁGUA

O fornecimento do caudal de ar e a direção dos caudais de ar e água são parâmetros críticos para o desempenho das torres. O caudal de ar é essencial para transferência de calor, permitindo que o calor da água aquecida seja dissipada para atmosfera. Um caudal de ar adequado maximiza a eficiência na torre de refrigeração.

**Contracorrentes:** o caudal de água movimenta-se no sentido descendentes enquanto o ar no sentido ascendente. Essa movimentação dos caudais permite uma maximização da troca térmica entre a água e o ar [6].

**Correntes Cruzadas:** os dois fluidos escoam-se em correntes perpendiculares. A configuração do enchimento é de tal forma que o caudal de ar circula na horizontal à medida que atravessa o caudal ascendente da água [6].

**Convecção forçada:** nas torres de convecção forçada, descritas na figura 3, o ar circula pela ação de ventiladores nela incorporados, e podem ser caracterizadas por uma tiragem forçada quando o ventilador insufla o ar através da torre, ou por uma tiragem induzida quando o ventilador extrai o ar através das torres. Diferentes das torres de convecção natural, as torres de convecção forçada, usam um ou vários ventiladores para fornecer um caudal conhecido de ar pela torre. Assim, seu desempenho térmico tende a uma maior estabilidade e é afetado por menos variáveis psicrométricas do que o das torres de convecção natural. A presença de ventiladores também fornece um meio de regular o caudal de ar, para compensar a mudança atmosférica e condições de carga, por manipulação da capacidade - velocidade do ventilador.[6]

**Convecção natural:** as torres de tiragem natural, descritas na figura 3, usam chaminés de betão muito grandes, são projetadas para mover o ar naturalmente através da estrutura sem o uso de ventiladores. O movimento do ar na torre baseia-se na densidade entre o ar quente (menos denso) dentro da torre e o ar frio, exterior, (mais denso). Devido ao grande tamanho, por exemplo (152 metros altura e 122 metros de diâmetro) são utilizadas em geral para caudais grandes ( $>750\text{m}^3/\text{min}$ ), em centrais termoelétricas.[6]

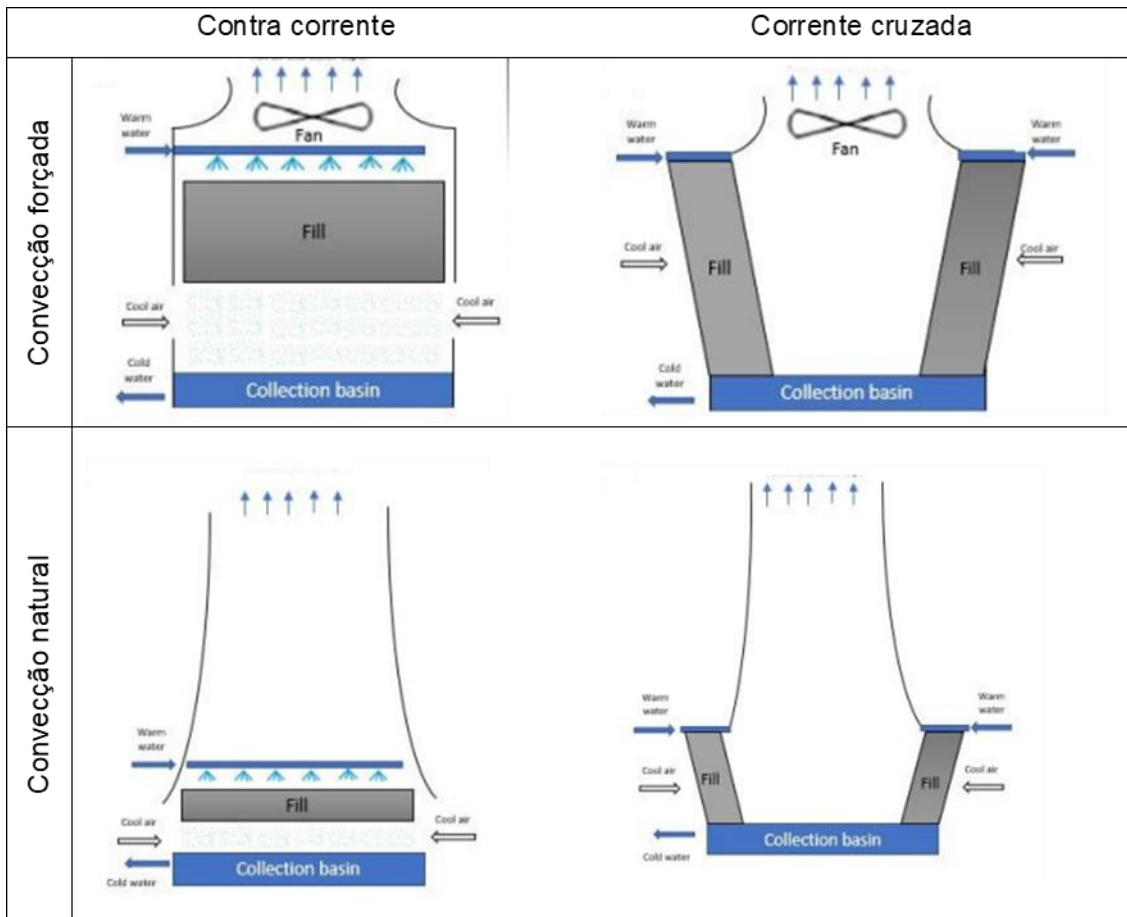


Figura 3- Esquemas de diferentes tipos de torres de refrigeração evaporativas [7]

## 2.2. COMPONENTES PRINCIPAIS DE UMA TORRE DE REFRIGERAÇÃO EVAPORATIVO CONTRACORRENTE

Neste ponto, serão descritos os principais e os mais importantes componentes de uma torre de refrigeração evaporativa contracorrente como se visualiza na figura.

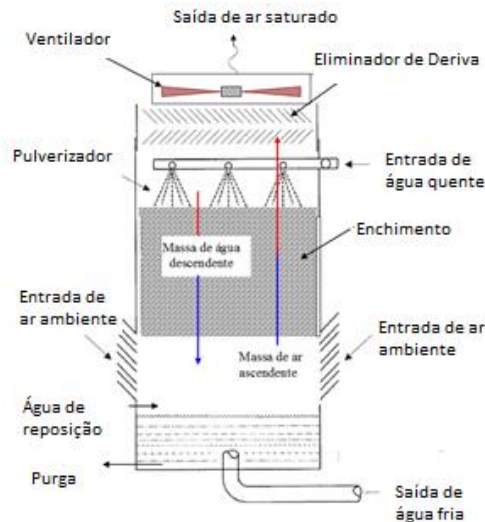


Figura 4- Componentes principais de uma torre de refrigeração contracorrente de tiragem induzida [8]

### 2.2.1. ESTRUTURA E REVESTIMENTO EXTERIOR

A estrutura de uma torre de refrigeração evaporativa deve ser capaz de suportar os equipamentos no seu interior. Deve ser, também, capaz de suportar o peso da água que circula no seu interior e suportar as condições meteorológicas adversas. A estrutura deve ser estanque, resistente à corrosão devido o ambiente húmido e químico, e possuir propriedades retardantes ao fogo [9].

### 2.2.2. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas de distribuição são geralmente feitos de tubos e bicos de PVC (policloreto de vinil). Existem 3 tipos: por gravidade, por pressão e rotacional.

- Por gravidade

O sistema de distribuição por gravidade é utilizado, normalmente, nas torres de fluxo cruzado. Consiste em “risers” ou dispersores verticais de água quente que alimentam uma bacia de betão aberta por onde a água flui por gravidade através do orifício. A sua principal vantagem consiste na manutenção eficiente das bandejas abertas que pode ser realizada inclusive com a torre em operação [9].

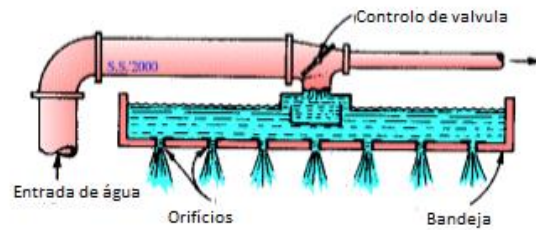


Figura 5-Sistemas distribuição por gravidade [9]

- Por pressão

Sistema por pressão: é usado principalmente em torres que possui tubagem cruzada com dispersores para baixo. É constituído por um coletor central, do qual parte uma série de ramais laterais e simétricos, de tal forma que a rede formada cobre a superfície da torre, repartindo o caudal de água de forma homogénea, conforme esquematizado na figura 6 [9]

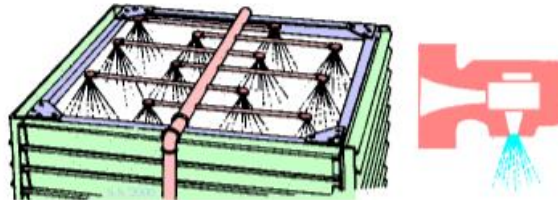


Figura 6 - Sistemas distribuição por pressão.[9]

- Distribuição Rotacional

Os distribuidores rotacionais possuem um coletor vertical central com braços horizontais que cobrem diametralmente, a estrutura da torre, que deve ser necessariamente circular. O movimento do braço é produzido devido a uma força de reação ao movimento de saída da água sob pressão através dos pulverizadores, que formam um determinado ângulo com a vertical.[9]



Figura 7- Sistemas de distribuição rotacional [9]

### 2.2.3. TIPOS DE ENCHIMENTO

O enchimento é um dos componentes mais importantes de uma torre de refrigeração. A sua finalidade é o aumento do tempo de permanência da água no interior da torre e o aumento da superfície de transferência de calor. As duas classificações básicas de enchimento são o tipo de respingo e o tipo de filme. Ambos os tipos de enchimento são constituídos por materiais de PVC. Embora qualquer um destes tipos possam ser aplicados em configuração de fluxo corrente cruzado ou contra corrente, as torres contracorrente tendem ao uso quase exclusivo de enchimentos de tipo filme porque aumentam a área de superfície disponível para a troca de calor e massa entre o ar e o líquido. As torres de fluxo cruzado, por outro lado, fazem uso de qualquer um dos tipos com a mesma facilidade, ocasionalmente em conjunto. [10]

- Enchimento do tipo respingo ou *splash*

O enchimento do tipo respingo ou splash, é um equipamento fundamental em torres de refrigeração, pois desempenham um papel crucial na eficiência do processo de troca de calor entre a água e o ar. O enchimento do tipo respingo são geralmente feitos de materiais PVC, que são resistentes a corrosão e tem boa durabilidade na qual apresentam superfícies que permitem a formação de gotículas de águas que facilitam a área de contacto com o ar melhorando a evaporação e, conseqüentemente, o arrefecimento da água. O enchimento com respingos é caracterizado por perdas reduzidas de pressão de ar e não conduz ao entupimento. A confiabilidade do desempenho de longo prazo requer que as barras de respingo sejam apoiadas em centros próximos e que os materiais de suporte sejam tão inertes quanto possível. A ripa de madeira tratada predominou por muitos anos como material de barra de respingo devido à sua resistência, durabilidade, disponibilidade e custo relativamente baixo. Atualmente, os plásticos têm ganhado predominância. [10]

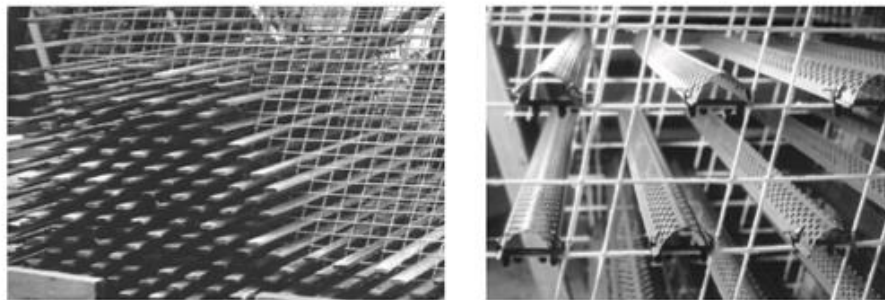


Figura 8 - Barras de respingo de madeira e de plástico [10]

- ENCHIMENTO DO TIPO FILME

O enchimento do tipo filme faz com que a água se espalhe em uma película fina, fluindo sobre grandes áreas verticais, para promover a exposição máxima ao fluxo de ar. Ele tem a capacidade de fornecer, capacidade de refrigeração mais eficaz no mesmo espaço, mas é extremamente sensível à má distribuição de água, bem como ao bloqueio de ar e turbulência que um sistema de suporte mal projetado pode perpetuar. O projeto geral da torre deve garantir um fluxo uniforme de ar e água em toda a área de enchimento. O espaçamento uniforme das folhas de enchimento é fundamental para garantir que a torre de refrigeração opere de maneira eficiente proporcionando os níveis adequados de refrigeração e

contribuindo para a operação sustentável e económica, o uso de enchimento de filme deve ser evitado em situações em que a água circulante pode ser contaminada com detritos.[10]

O enchimento estruturado de filme pode ser feito de qualquer material que seja capaz de ser fabricado ou moldado em folhas moldadas, com uma superfície formada conforme exigido pelo projeto para direcionar o fluxo de ar e água. Como o PVC é inerte à maioria dos ataques químicos, tem boas características de resistência, é leve, tem uma baixa taxa de propagação de chama e pode ser facilmente moldado na forma necessária, é atualmente o material mais popular [10].

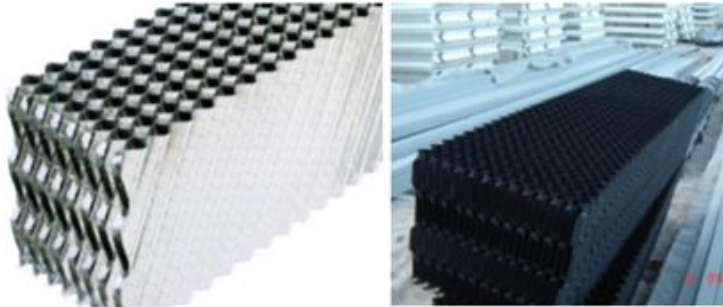


Figura 9 - Enchimentos do tipo de filme [10]

#### 2.2.4. ELIMINADOR DE DERIVA OU SEPARADOR DE GOTAS

O eliminador de deriva tem como finalidade diminuir a quantidade de água perdida na forma de gotas de pequenas gotas arrastadas pelo ar. A perda de água é minimizada pelos separadores de gotas ou eliminadores, que obrigam o ar mudar repentinamente de direção. Os defletores são feitos de madeira, metal ou plástico. Embora não seja possível eliminar totalmente o arraste de água, um sistema bem projetado resulta em perda de água inferior a 0,2% da água em circulação. Os eliminadores de gotículas de água estão localizados na saída de ar: acima, nas torres de contracorrente e ao lado, nas torres de fluxo cruzado [11].

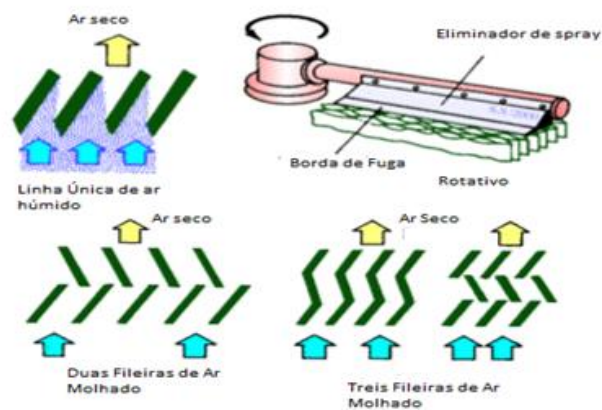


Figura 10- Eliminador de deriva ou separador de gotas [11]

### 2.2.5. VENTILADORES

São utilizados nas torres de arrefecimento de tiragem forçada com o objetivo de promover a circulação de ar. Existem vários tipos de ventiladores e, dependendo das necessidades, os ventiladores poderão variar de diferentes diâmetros para atender as necessidades e condições operacionais e se constituir-se por lâminas de diferentes tamanhos. Também, a posição do ventilador poderá variar entre radial e axial. Adicionalmente, os ventiladores poderão estar acoplados a rotores que possuam uma ou múltiplas velocidades de rotação. Convém salientar que a escolha do tipo de ventilador, bem como de rotor, influencia tanto o consumo energético como o nível de ruído emitido pela torre [12].

### 2.2.6. Bacia

A bacia de água fria, situada abaixo da torre, recolhe e armazena a água antes de ser bombeada de volta para a fábrica, também pode receber diretamente a água em circulação (RE círculo). É fornecida com ligações: entrada e saída de reposição, enchimento rápido, transbordamento, respiro (ou "vent"), drenagem e purga de fundo. Bacias de grandes torres de utilidades são geralmente feitas de betão. São dimensionadas para permitir a operação da torre por várias horas ou continuamente [12].

### 2.2.7. PERSIANA

As persianas são posicionadas para direcionar o ar que entra na torre de refrigeração e perda de água por respingo. Devem ser projetadas com inclinação, largura e espaçamento apropriados. Portanto, o dimensionamento das persianas varia com o tipo de torre. Em todos os casos, devem ser suficientemente resistentes a condições atmosféricas corrosivas. Geralmente, quanto maior o espaçamento entre as persianas, o ar entra de forma menos controlada, o que reduz a eficácia do direcionamento da corrente de ar e pode resultar em maior dispersão de gotas de água[12].

### 2.2.8. BOMBAS

As bombas são equipamentos externos importantes para a recirculação de água na torre, consomem uma fração importante da potência requerida para o sistema de arrefecimento, a escolha da bomba depende normalmente do caudal e da altura manométrica requerida. A utilização de duas bombas é comum em instalações de grande capacidade: uma em serviço, e outra de reserva.[13]

### 2.2.9. PURGA

A purga tem como o principal objetivo a eliminação contínua ou intermitente de uma pequena quantidade de água que circula na torre com propósito de prevenir um excesso de concentrações de sólidos devido à evaporação da água.[13]

### 2.2.10. REPOSIÇÃO (“MAKE-UP”)

A reposição (MAKE-UP) tem como o principal objetivo a reposição de água que foi perdida por evaporação, arraste, purga e vazamento é expressa com uma percentagem de vazão mássica em circulação. Normalmente, é controlada por uma válvula, uma boia e outros sistemas de controlo de nível, instalados na bacia da água da torre. [13]

## 2.3. PARÂMETROS IMPORTANTES PARA O DESEMPENHO DA TORRE DE REFRIGERAÇÃO

Existem diversas variáveis que são de extrema importância para a monitorização e projeto das torres de refrigeração:

- ❖ Temperatura de Termómetro Húmido: a temperatura de termómetro húmido mede essencialmente quanto de vapor de água atmosférica pode-se reter nas condições climáticas atuais. Uma temperatura de bolbo húmido mais baixa significa que o ar está mais seco e que pode reter mais vapor de água do que uma temperatura de termómetro húmido mais alta.[12]
- ❖ Temperatura de Termómetro Seco: é a temperatura ambiente do ar, que é medida por termómetros convencionais. No gráfico psicrométrico, é designada como temperatura seca para a distinguir da temperatura isobárica.[11]
- ❖ Humidade Absoluta: é definida como a massa de vapor de água contida em um volume de ar. A humidade é expressa em gramas de água por metro cúbico de ar ( $\text{g/m}^3$ ) [11]
- ❖ Humidade Relativa: A humidade relativa é a razão entre a quantidade de vapor de água existente em uma certa massa de ar e aquela que ele teria se estivesse saturado à mesma temperatura, logo, também é a razão entre  $P_v$  e  $P_{sat}$ . [14]

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (1)$$

- ❖ Diferença entre Temperaturas, “Cooling range”: é a diferença entre a temperatura de água quente e a temperatura de água fria. O range é um factor importante porque define a eficiência com que a torre consegue transferir o calor da água para o ambiente [15]
- ❖ Aproximação (“*Approach*”): é a diferença de temperatura entre a água que cai na bacia da torre e a temperatura de bolbo húmido do ar que entra na torre). O desempenho de uma torre de refrigeração também é influenciada pela *approach*, pois quanto menor o seu valor, mais próximo da menor temperatura possível de ser atingida estará a água que sai da torre, portanto, mais próxima estará do desempenho da torre do limite termodinâmico [15].
- ❖ Ar Saturado: É o ar que não pode aceitar mais vapor de água a uma dada temperatura. Uma gota a esta temperatura levaria a condensação e o novo ar arrefecido também seria saturado.[11]

## 2.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA TORRE DE REFRIGERAÇÃO

O conhecimento das variáveis descritas anteriormente não é apenas imprescindível, bem como condiciona o funcionamento adequado de uma torre de refrigeração, sendo as de maior importância, as variáveis ambientais, tais como: a temperatura do termómetro húmido e a temperatura de bolbo seco.

Numa torre de arrefecimento evaporativa, a principal contribuição para o arrefecimento da água é dada pela evaporação por parte dessa água de recirculação na torre. A evaporação da água causa a diminuição da temperatura da água que escoar ao longo da torre de arrefecimento. Isso ocorre porque a água para evaporar precisa de calor latente, e esse calor é retirado da própria água que escoar pela torre. A evaporação de parte da água é responsável por aproximadamente 80% do arrefecimento da água. A diferença de temperatura entre o ar e a água é responsável pelos outros 20 % do arrefecimento (troca de calor sensível) [16].

O aumento do caudal de ar e água causa um aumento da turbulência na temperatura, o que favorece a transferência de calor e massa. No entanto, a partir de um determinado ponto, o contacto entre a água e o ar torna-se ineficiente, podendo ocorrer, por exemplo, excessivo arraste de água pela corrente de ar ou a dificuldade de se formar filmes na superfície do enchimento que favorecem a transferência de massa. Desta maneira, os caudais água e ar da torre são limitados pelo tipo de enchimento empregado [6].

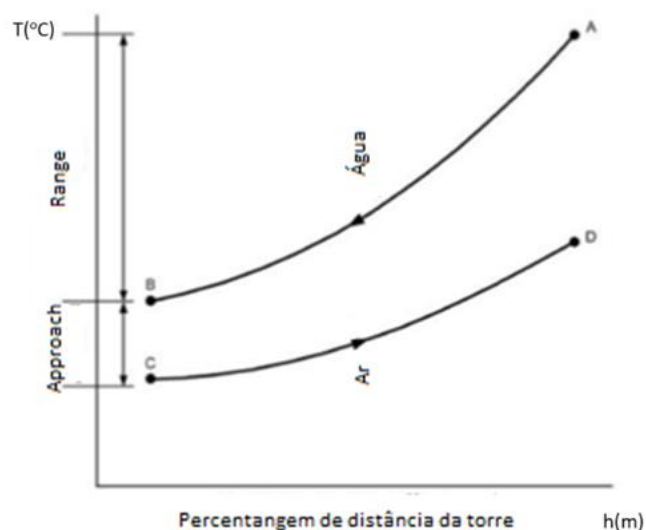


Figura 11- Relação temperatura da água vs temperatura do ar numa torre de refrigeração contracorrente [6]

Na figura 11, podemos observar a relação entre as temperaturas do ar e da água numa torre contracorrente. A temperatura da água cai de A para B, enquanto a temperatura do bolbo húmido do ar aumenta de C para D. A diferença de temperatura da água entre a entrada e a saída (*range*) é o intervalo (A-B). A diferença entre a temperatura de saída da água e a temperatura do termómetro húmido do ar de entrada, ou seja, B-C, é o *approach*, que representa um valor de capacidade da torre. A temperatura do termómetro húmido é a temperatura mais baixa que o ar pode atingir por evaporação. [6]

## 2.5. PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICO E MÁSSICO DA TORRE DE REFRIGERAÇÃO

No processo de funcionamento da torre de refrigeração, descrito anteriormente, a água quente entra em contacto com a corrente de ar fria, promovendo, desta forma, a transferência de calor da fase líquida para o gás, através da evaporação de parte da água para o ar não saturado. Vários indicadores influenciam o processo de transferência de calor e transferência de massa. Entre eles estão as taxas de fluxo de massa de água e ar, humidade relativa e temperatura do ar que entra na torre de resfriamento, a água que entra na torre de resfriamento, a velocidade do vento e a pressão atmosférica [17].

Os processos de ambas as transferências ocorrem no enchimento dominante da torre conforme mostra a figura 12. A taxa de fluxo de massa de água diminui a partir do topo do preenchimento linearmente até o fundo do enchimento. Quando a água entra em contato com o ar através do enchimento, a temperatura da água diminui devido ao calor extraído da água para o ar e à evaporação de uma ligeira porção de água. O ar que entra tem um alto potencial para aceitar o calor extraído por transferência de calor por convecção e evaporação. A entrada de ar contém baixo teor de massa de água representada pela razão de humidade. O baixo valor da taxa de humidade na parte inferior significa a capacidade de aceitar água evaporada mais significativamente do que o ar na parte superior. Esta condição fez com que a água evaporada diminuísse junto com o enchimento. O calor extraído da água para o ar também diminuiu junto com a enchimento porque o calor transferido é dominante por evaporação [17]

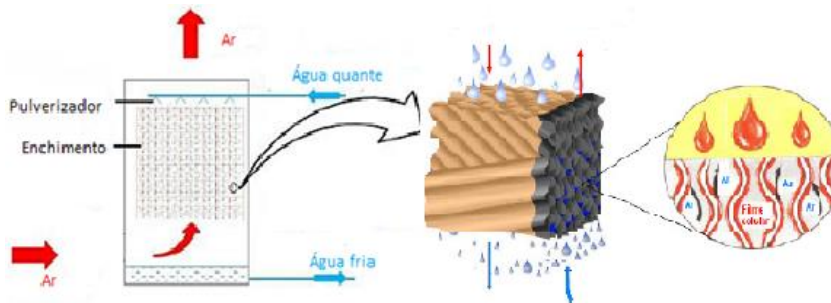


Figura 12: Representação esquemática de transferência térmico e mássico no enchimento [18]

Analisando as representações mostrada na figura 13, o fundo e o topo de uma torre de refrigeração com escoamento de água - ar em contracorrente. O fundo está representado na figura 13(a); neste ponto, o ar entra com uma temperatura possivelmente maior que a temperatura da água, mas a água será resfriada, pois a temperatura da interface é menor do que a temperatura da água. A humidade na interface é maior do que a média do gás, isto constitui a força motriz para a transferência de massa do vapor de água para o ar. Há casos em que, no fundo da torre, a temperatura do ar que entra é menor do que a temperatura da água que sai, conforme a figura 13(b), mas ainda acima da temperatura da interface. Mesmo assim, prevalece a ocorrência da transferência de calor sensível através do filme de gás, embora em menor escala, pois a força motriz diminui. A figura 13(c) representa o topo de uma torre de refrigeração. No topo, a água de entrada está quente porque vem do processo e o ar está em princípio com humidade relativamente elevada, pois já percorreu todo o enchimento da torre, trocando calor e massa com a água em contracorrente. Mas estes dois fluidos, ao

entrarem em contacto, provocam o seguinte fenómeno: a água que entra com a temperatura maior do que a temperatura do ar cede calor para o ar, elevando a sua temperatura e sua pressão de vapor, diminuindo conseqüentemente a humidade relativa. Com isto, por outro lado, ocorre a evaporação em contacto com este gás, resfriando assim a água líquida [19].

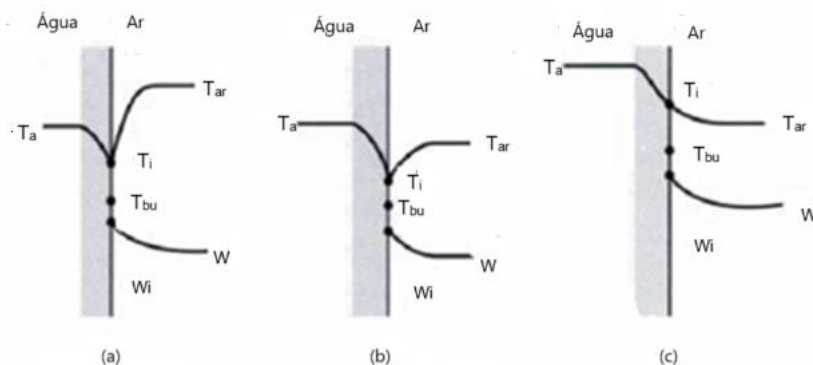


Figura 13 - Relação da corrente água-ar no fundo da torre (a), (b) e no topo da torre (c)[19]

## 2.6. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA BASEANDO-SE NA TEORIA DE MERKEL

O primeiro modelo para torres de resfriamento foi desenvolvido pelo alemão Merkel em 1926. A Teoria de Merkel é a mais utilizada para torres de refrigeração e considera, como força motriz no processo, a diferença de entalpia, sendo que, a equação de Merkel nos permite avaliar a característica de uma torre de refrigeração. Nesta teoria, são considerados os coeficientes de transferência de calor sensível e de transferência de massa em um único coeficiente global, baseando-se no facto de que o calor é transferido da água para o ar por convecção e por evaporação, como pode ser visto na equação 2.[20]

$$dQ_{total} = dQ_{convecção} + dQ_{evaporação} \quad (2)$$

Onde  $dQ_{total}$  é o calor total trocado, e  $dQ_{convecção}$  e  $dQ_{evaporação}$  são os calores trocados por convecção e evaporação, respetivamente.

No processo de convecção, o calor é transferido da água para o ar em virtude do gradiente de temperatura entre o ar e a água. Logo, tem-se a equação

$$dQ_{convecção} = h_{conv} (T_{água} - T_{ar}) dA \quad (3)$$

onde  $h_{conv}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W m^{-2} °C^{-1}$ ],  $T_{água}$  ( $°C$ ) é a temperatura da água,  $T_{ar}$  ( $°C$ ) é a temperatura do ar e  $dA$  ( $m^2$ ) é a área de troca térmica.

As principais simplificações realizadas no modelo de Merkel [18], que reduzem os cálculos a um procedimento relativamente simples, são as seguintes:

- ❖ Toda a gotícula de água está envolta por uma película de ar saturado à mesma temperatura da água, e o cálculo das transferências de calor e massa consideram a interface entre o ar e essa película;
- ❖ A redução no caudal de água devido à perda por evaporação não é considerada nos balanços de massa e energia, isto é, a vazão de água é constante; [20]

- ❖ O número de Lewis,  $Le$ , que correlaciona os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, é igual a 1. [21]

A Teoria de Merkel resume-se na afirmação de que toda transferência de calor, dentro de uma torre de refrigeração, ocorre por difusão e posterior troca térmica por convecção entre a água e o ar. A Figura 14 apresenta esquematicamente os principais fenômenos e variáveis que são utilizados na dedução da Teoria de Merkel. [20]

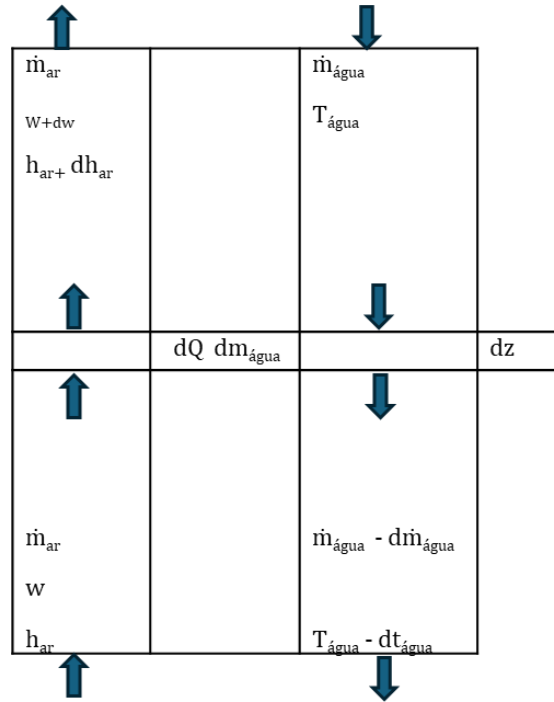


Figura 14 - Esquema representativo da Teoria de Merkel [20]

A transferência da água para a corrente gasosa ocorre por dois mecanismos. O primeiro é a difusão das moléculas de água para o ar pela interface. O segundo é o arraste das moléculas de água pela corrente de ar que normalmente é gerada pela ação de ventiladores. Logo, o calor retirado da torre por evaporação pode ser representado por [20].

$$dQ_{evaporação} = h_m Lc (w_2 - w_1) dA \quad (4)$$

onde  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $Lc$  é o calor latente de vaporização da água ( $\text{kcal kg}^{-1}$ );  $w_1$  e  $w_2$  representam a humidade específica do ar antes de entrar em contato com a água e a humidade do ar saturado, respetivamente, e  $dA$  é a área de troca térmica ( $\text{m}^2$ ). A energia recebida pelo ar neste processo pode ser expressa por:

$$dQ = \dot{m}_{ar} dH_{ar} \quad (5)$$

onde  $\dot{m}_{ar}$  é o caudal mássica do ar ( $\text{kg s}^{-1}$ ) e  $dH_{ar}$  é a variação da entalpia do ar ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ). Esta variação de entalpia ocorre em virtude do calor sensível e do calor latente recebidos pelo ar em virtude da troca térmica com a água. Sendo assim, pode-se aproximar o valor de  $H_{ar}$  como sendo:

$$H_{ar} = C_{p_{ar}} T_{ar} + Lc w_{ar} \quad (6)$$

onde  $C_{p_{ar}}$  ( J/kg.°C) é o calor específico do ar a pressão constante,  $T_{ar}$  (°C) é a temperatura do ar e, por fim,  $w_{ar}$  é a humidade específica do ar. Além disso, o calor transferido da água para o ar pode ser expresso por:

$$dQ = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} dT_{agua} \quad (7)$$

onde  $C_{p_{agua}}$  ( J/kg.°C) é o calor específico da água,  $\dot{m}_{agua}$  (kg/s) é o caudal mássico da água e  $dT_{agua}$  (°C) é a variação da temperatura da água.

Utilizando a aproximação de Merkel citada anteriormente, na qual se considera que não existem perdas de massa de água por evaporação, ou seja, a massa de água é constante na torre de refrigeração, chega-se à seguinte equação:

$$dQ = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} dT_{agua} = h_{conv} (T_{\acute{a}gua} - T_{ar}) dA + h_m Lc (w_2 - w_1) dA \quad (8)$$

Por fim, como o Fator de Lewis é definido como a correlação entre a difusividade térmica e difusividade mássica, tem-se a seguinte expressão:

$$L_e = \frac{h_{conv}}{h_m C_p} \quad (9)$$

Utiliza-se a aproximação de Merkel que considera que  $Le=1$ , aproximando que a facilidade da transferência de calor por convecção é a mesma para a transferência de massa por evaporação.

Portanto, chega-se à seguinte equação:

$$dQ = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} dT_{agua} = h_m C_p (T_{\acute{a}gua} - T_{ar}) dA + h_m Lc (w_2 - w_1) dA \quad (10)$$

Obtendo-se assim:

$$dQ = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} dT_{agua} = h_m [(C_p T_{\acute{a}gua} + Lc w_2) - (C_p T_{ar} + Lc w_1)] dA \quad (11)$$

Substituindo a equação (6) na equação (9), obtém-se:

$$dQ = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} dT_{agua} = h_m (H_{arsat} - H_{arseco}) dA \quad (12)$$

onde  $H_{arsat}$  e  $H_{arseco}$  representam a entalpia do ar saturado e a entalpia do ar seco. Como não é possível calcular o real estado do ar na saída, Merkel assumiu que o ar deixando a torre estava saturado com vapor de água. A partir da equação 12 obtém-se

$$\frac{h_m dA}{\dot{m}_{\acute{a}gua}} = \frac{C_{p_{\acute{a}gua}} dT_{\acute{a}gua}}{H_{arsat} - H_{arseco}} \quad (13)$$

A equação (13) é conhecida como equação de Merkel. Com a integração desta, obtém-se

$$\frac{KaV}{L} = \frac{h_m a_p A_p z}{\dot{m}_{\acute{a}gua}} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{Cp_{\acute{a}gua} dT_{\acute{a}gua}}{Har_{sat} - Har_{seco}} \quad (14)$$

Além disso, pode-se fazer a aproximação de que na faixa de temperatura de operação de uma torre de refrigeração, o  $Cp_{\acute{a}gua}$  permanece constante. Logo, a Equação de Merkel na forma integrada pode ser expressa por:

$$\frac{KaV}{L} = Cp_{\acute{a}gua} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT_{\acute{a}gua}}{Har_{sat} - Har_{seco}} \quad (15)$$

onde  $a_p$  representa a área específica do preenchimento da torre ( $m^2 m^{-3}$ );  $A_p$  representa a área da secção transversal do enchimento ( $m^2$ ) e  $z$  representa a altura da torre de refrigeração ( $m$ ). O termo  $KaV/L$  é um parâmetro adimensional que representa o coeficiente de desempenho da torre. O termo  $Ka$  ( $kg m^{-3} s^{-1}$ ) é o resultado entre o produto de  $K$  (coeficiente total de transferência calor,  $kg^{-1} m^{-2}$ ) e a área de transferência de calor por unidade de volume  $a$ , em  $m^2 m^{-3}$ . Já o termo  $L$  representa a vazão mássica de água na torre, em  $kg s^{-1}$ . O lado direito da equação depende somente das propriedades do ar e da água, sendo independente das dimensões da torre. [20]

Dependendo dos dados fornecidos pelo fabricante da torre de refrigeração, a característica da torre pode ser determinada por uma equação mais simples. A equação relaciona ao caudal de água e ar com a característica da torre

$$\frac{KaV}{L} = C \left( \frac{L}{G} \right)^{-n} \quad (16)$$

Onde o valor de  $KaV/L$  é determinado pela equação de Merkel. O valor constante de  $C$  depende do projeto da torre ou do local da curva característica, uma representação gráfica que descreve a relação entre o caudal de ar ( $L$ ) e o caudal de água ( $G$ ) em  $L/G=1$ . O valor de  $n$  também depende do projeto da torre e é chamado de inclinação. Este valor é obtido através de experimento [22].

## 2.7. PRINCIPAIS PROBLEMAS EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

As torres de refrigeração são sistemas dinâmicos por causa da natureza de sua operação e ao ambiente em que funcionam. Alguns sistemas das torres ficam do lado de fora, expostos para o meio ambiente, o que os torna suscetíveis à sujeira e aos detritos transportados pelo vento. A sua estrutura também é um local privilegiado para pássaros e insetos para viver, devido ao ambiente quente e húmido. Estes fatores apresentam também uma ampla gama de questões operacionais que devem ser compreendidas e conseguir garantir uma temperatura ideal de desempenho e confiabilidade de ativos. Os problemas que mais afetam normalmente a eficiência da torre conforme ilustrado na imagem abaixo, são causados pela má qualidade da água. A corrosão, em particular, é a preocupação mais séria na indústria atualmente, pois pode deteriorar metais rapidamente e causar graves perdas económicas [23]

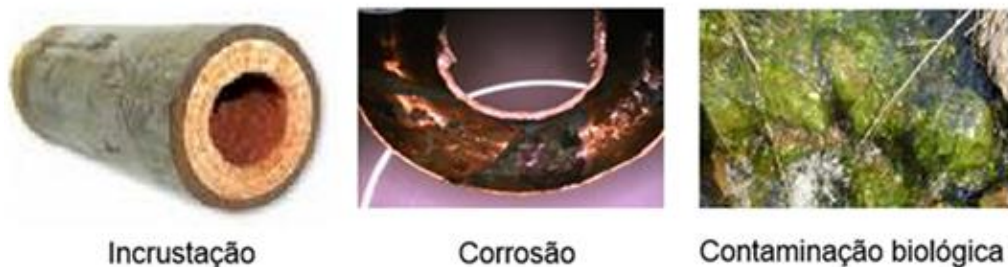


Figura 15- Principais problemas em sistemas de refrigeração. [24]

O contato do com o sistema origina outro problema, dado que o ar contém uma grande quantidade de impurezas devido à poluição, que se transferem para a água. Outro problema é a exposição solar da maior parte da superfície de transferência, isto promove o crescimento de bactérias, algas e fungos, causando obstruções que reduzem o fluxo e, conseqüentemente, a transferência de calor. Além disso, a presença de espécies de Legionella devido ao controle biológico deficiente na água de recirculação é particularmente preocupante por conta do potencial de emissões de aerossol das torres de refrigeração. O Cooling Tower Institute (CTI) propôs que os operadores da torre de refrigeração devem monitorizar a Legionella regularmente e sugeriu que a contagem de bactérias heterotróficas planctónicas na água seja mantida abaixo de  $10^4$  unidades formadoras de colónias (UFC) / ml e a contagem de bactérias heterotróficas sésseis nas superfícies abaixo de  $10^5$  UFC /  $\text{cm}^2$  para reduzir os riscos à saúde e operacionais.[23]

### 2.7.1. INCRUSTAÇÃO E DEPOSIÇÃO

A incrustação geralmente é definida como um acúmulo de material ou depósitos na torre de refrigeração que podem afetar o desempenho da torre de refrigeração. Uma incrustação é causada quando os sistemas de refrigeração são operados por períodos mais longos, ignorando o cronograma de limpeza. Além disso, a incrustação é o acúmulo de matérias suspensas nas superfícies da torre de refrigeração que surgem da água, do ar e também da função do próprio sistema, conforme indicado abaixo. [25]

- ❖ Água: lama / lodo, orgânicos naturais, sólidos dissolvidos, microrganismos, coagulantes, floculantes, fosfatos;
- ❖ Ar: poeira, microrganismos, gases, amônia, sulfeto de hidrogênio, dióxido de enxofre, etc.

- ❖ Sistema: produtos de corrosão, reagentes inibidores, contaminantes do processo.

A água de refrigeração normalmente contém uma quantidade excessiva de íons minerais, como cálcio e magnésio devido à evaporação da água e tornando-a dura. Quando a água com altas temperaturas dentro do equipamento de transferência de calor, o cálcio e íons de bicarbonato precipitam devido a uma queda repentina na solubilidade, formando incrustações duras em superfícies de transferência de calor. O grau de incrustação é comum em indústrias que utilizam equipamentos de transferência de calor usando água não tratada como meio de refrigeração. Um problema de dimensionamento em um sistema de recirculação de aquecimento ou refrigeração de água pode ser reconhecido por um ou mais dos seguintes sintomas [25]:

- ❖ Redução da taxa de transferência de calor;
- ❖ Redução do fluxo de água;
- ❖ Bloqueio parcial ou completo de dutos e tubos condensadores.

É importante referir que o grau de incrustação nem sempre está relacionada com a temperatura. A incrustação de carbonato de cálcio e sulfato de cálcio ocorre em superfícies não aquecidas quando as respectivas solubilidades são excedidas na água bruta. As superfícies metálicas são locais ideais para a nucleação do cristal devido às suas superfícies rugosas e às baixas velocidades adjacentes à superfície. As células de corrosão na superfície do metal produzem áreas de alto pH, que promovem a precipitação de muitos sais em água de refrigeração. Uma vez formados, os depósitos de incrustações iniciam a nucleação adicional e o crescimento do cristal prossegue a uma taxa acelerada. O controle de incrustações pode ser obtido por meio da operação do sistema de refrigeração em condições subsaturadas ou pelo uso de aditivos químicos. [25]

### 2.7.2. CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como a degradação de um metal por reações químicas e eletroquímicas com o meio envolvente. Em circuitos de refrigeração, a corrosão causa falhas nos equipamentos, o que resulta num custo económico acrescido, e, numa perda de capacidade de transferência de calor, devido à formação de incrustação causada pela acumulação de produtos que possam acelerar o processo de corrosão. Como resultado, alguns componentes do sistema precisam ser substituídos ao longo do tempo. O oxigénio presente na água vai acelerar os problemas relacionados com este fenómeno. Em circuitos fechados, este acaba por ser consumido deixando de ser um problema. No entanto, em sistemas abertos, há uma exposição contínua, existindo sempre uma elevada disponibilidade de oxigénio, acabando estes sistemas por serem mais propícios a problemas associados à corrosão [26].

Normalmente a corrosão é classificada como uniforme ou localizada. A corrosão uniforme é a perda de material uniformemente ao longo da superfície do metal. É o tipo mais comum de corrosão e é causada por uma reação eletroquímica que resulta na deterioração de toda a superfície exposta de um metal. No caso da corrosão localizada, que tem como alvo uma área de estrutura metálica, sendo a corrosão por picada um dos tipos de corrosão localizada que mais afeta as torres de refrigeração. Esta acaba por formar cavidades ou furos no material, ocorrendo fugas do fluido circulante. Para além de potenciais fugas, existem outros problemas associados, como é o caso da redução de transferência de calor. Sendo que, o início deste tipo de corrosão é influenciado por fatores metalúrgicos e estruturais, fatores ambientais,

fenómenos de polarização e a presença de produtos químicos corrosivos, como o cloro. Para o aço inoxidável, alto teor de cloretos, altas temperaturas e baixo pH são promotores da corrosão por *pitting* [26].

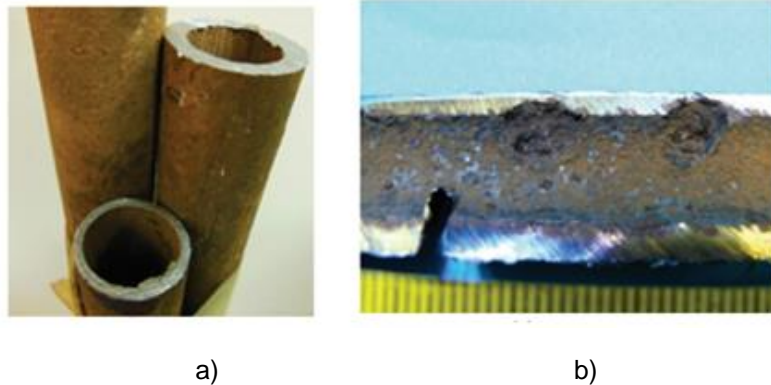


Figura 16 - a) Corrosão generalizada; b) Corrosão localizada(*pitting*) [25]

De forma geral, a corrosão pode ser controlada ou mitigada em circuitos de refrigeração, através do controlo do pH do fluido de arrefecimento, do uso de inibidores de corrosão e de materiais resistentes ao meio envolvente [26].

### 2.7.3. CONTAMINAÇÃO BIOLÓGICA

A atividade microbiológica consiste na presença de microrganismos que vivem e crescem no sistema de refrigeração. As torres de refrigeração apresentam um ambiente perfeito para a atividade biológica devido ao calor: ambiente húmido. Existem duas categorias distintas de atividade biológica no sistema de torre. O primeiro sendo planctónico, que é a bioatividade suspensa, ou por outras palavras, flutuando em solução. O outro é bio sésil crescimento, que é a categoria dada a todas atividades biológicas, biofilmes ou bio incrustação que adere a uma superfície no sistema de refrigeração. Os Biofilmes são problemáticos por vários motivos. Eles têm propriedades isolantes fortes, e contribuem para a incrustação e corrosão, e os bio-produtos que eles criam vão contribuir para mais atividade microbiológica. Eles podem-se encontrar dentro, e ao redor da estrutura da torre ou podem ser encontrados em superfícies de permutadores de calor e nas tubagens do sistema. Além disso, biofilmes e algas são problemáticos porque são difíceis de eliminar. A monitorização cuidadosa dos tratamentos através de biocidas, juntamente com medições de rotina da atividade biológica são importantes para garantir que a bioatividade seja controlada e limitada em todo o sistema de refrigeração [23].

É importante referir que, os microrganismos também contribuem para o surgimento de corrosão por *pitting* - uma das formas de corrosão mais catastróficas ocorridas nos sistemas de torres de refrigeração, conforme referido anteriormente. Globalmente, 20% da corrosão é causada pela presença de microrganismos. Num sistema de torre de refrigeração, existem diferentes tipos de microrganismos presentes, como bactérias (bactérias redutoras de metais, (MRB), bactérias depositantes de metais (MDB), bactérias redutoras de Sulfato (SRB), bactérias produtoras de sulfito (SPB), bactérias produtoras de ácidos (APB), fungos e algas. A SRB é a bactéria mais perigosa porque pode gerar ácido sulfúrico diretamente da alta população bacteriana que contribui para a rápida e extrema taxa de corrosão dos metais [23].

Outra forma de contaminação biológica (atrás referida) é a presença de *Legionella*, sendo a variante “*pneumofilae*” a mais perigosa para a saúde humana. As torres de refrigeração

podem constituir um meio de dispersão deste microrganismo para o meio ambiente, através dos aerossóis libertados nas saídas de ar. Existe legislação própria acerca deste assunto, que contém vários procedimentos e obrigações no tratamento da água das torres de refrigeração, nomeadamente a adição controlada de agentes biocidas.

## 2.8. ÁGUA DE COMPENSAÇÃO

Devido às perdas por arraste, evaporação e purga na torre de refrigeração, há necessidade de compensar essas perdas com água proveniente da linha de furo, cuja composição é passível de evolução ao longo do tempo. A função da água de reposição é compensar a quantidade retirada por evaporação e purga. Como regra geral, a quantidade de água de reposição é de aproximadamente 1,33% - 2% do fluxo total de circulação da torre de refrigeração. O termo usado para comparar a dureza da água circulante e a da água de reposição é o nº de ciclos de concentração. Por exemplo, 2 ciclos de concentração indicam que a água em circulação é duas vezes mais dura que a água de reposição. Se a água de reposição continha 100 ppm, a água circulante conteria 200 ppm. Para evitar essa concentração prejudicial, é necessário limitar os ciclos de concentração [27].

- ❖ A quantidade de água evaporada na torre está em proporção direta ao calor que a torre remove. Aproximadamente, como regra prática, a taxa de evaporação é de cerca de 1% do fluxo circulante total. Teoricamente, para cada 10.000.000 kCal de calor rejeitado, a quantidade de evaporação chega a 1,8 m<sup>3</sup>. Uma relação empírica usada frequentemente é:

$$\text{Perda por evaporação (m}^3/\text{h)} = 0,00085 \times 1,8 \times \text{caudal (m}^3/\text{h)} \times dT(^{\circ}\text{C}) \quad (17)$$

- ❖ As perdas por descarga dependem dos ciclos de concentração, ou seja dos níveis de cloro (ou condutividade) na água de circulação na torre e os níveis de cloretos (ou condutividade) na água e das perdas por evaporação;
- ❖ *Operações de purga ou descarga de fundo, "Blow Down"* - Como resultado da evaporação/condensação da água, o nível de sólidos (e sólidos dissolvidos) na água circulante na torre de refrigeração aumenta. Para manter um nível controlado de sólidos na água, deve ser realizada uma purga deliberada periódica. Essa quantidade é determinada por um nível predefinido de condutividade elétrica da água que constitui um indicador do nível de sais na água.

$$\text{Purga (Blow Down)} = \text{Perdas por Evaporação} / (\text{FC} - 1) \quad (18)$$

Importa salientar que o fator de concentração (FC) é importante para o dimensionamento de caudais de dosagem de produtos químicos e estudo económico do tratamento. É importante entender a relação entre os fatores de concentração e os caudais de compensação determinados. Para entendermos esta relação, a tabela 3 fornecida pela AGUACICLO apresenta a relação do fator de concentração em função das características operacionais

mesinadas anteriormente, bem como as devidas correções, baseadas no conhecimento da AGUACICLO sobre as condições reais de funcionamento do sistema evaporativo [28].

**Tabela 3:** Exemplo dos caudais de compensação relativamente aos fatores de concentração determinados pela Aguaciclo [28]

	FC=2	FC=3	FC=4	FC=5
<b>Perdas por Evaporação (m<sup>3</sup>/h)</b>	28			
<b>Perdas líquidas totais (m<sup>3</sup>/h)</b>	28	14	9	7
<b>Caudal de compensação (m<sup>3</sup>/h)</b>	56	42	37	35

## 2.9. TRATAMENTO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Toda água tem alguma concentração de sólidos dissolvidos ou suspensos. Quando a água evapora, como acontece em um sistema de refrigeração, os sólidos dissolvidos são deixados para trás. Entre os sólidos dissolvidos na água, encontram-se os sais de magnésio e cálcio, comumente avaliados quanto à dureza, e outros sólidos e gases em diferentes combinações aumentando a concentração na água restante. O tratamento da água pode reduzir o impacto dos sólidos e da matéria biológica. Entretanto, as impurezas tornam-se muito concentradas após um certo ponto, face a isto, os sólidos e a matéria biológica devem ser removidos do sistema para evitar danos graves [29].

Para evitar a corrosão e a formação de incrustações, depósitos e bio depósitos, é necessário um programa de tratamento da água de refrigeração. O tratamento consiste na monitorização e dosagem de produtos químicos com capacidade de inibir a corrosão, inibidores de incrustação, dispersantes e tratamentos físicos (por meio de purgas) entre outros. Dessa maneira, é possível otimizar a segurança e a eficiência dos equipamentos. Portanto, o principal problema da água em uma torre de refrigeração é tratado da seguinte maneira [28]:

- ❖ Introduzindo produtos químicos que evitam a corrosão e precipitação de sólidos dissolvidos, dispersantes e anti-corrosivos)
- ❖ Adicionando produtos para controlo biológico (por exemplo, biocidas à base de cloro)
- ❖ Controlo de pH/alcalinidades. Monitorizando os valores de pH e alcalinidades dentro dos parâmetros determinados pelo programa de tratamento efetuada pela dosagem de ácido sulfúrico para maximizar o poder de oxidação do cloro livre;
- ❖ Por meio de purga limitadora da concentração de sólidos, os ciclos de concentração que são definidos como a razão de concentração entre os sólidos dissolvidos da água circulante e a água de reposição.

Sempre que possível, o tratamento da água deve ser feito em contínuo de modo a assegurar um bom serviço do sistema de água de refrigeração, sem incrustações, sem desenvolvimento biológico e com a adequada proteção anticorrosiva. Deve-se elaborar um programa de tratamento com o fornecedor de produtos, de forma a cumprir as funções

mencionadas. Os parâmetros físicos, químicos e biológicos devem ser controlados por análises periódicas de modo a garantirem-se os valores estabelecidos na Tabela 4 [29]

**Tabela 4:** Parâmetros físico-químicos da A.R[29]

Parâmetros	Unidades	Limites	Periodicidade
<b>Físico-químicos da A. R</b>			
<b>PH</b>		7,3 a 7,9	Contínuo
<b>Alcalinidade T</b>	mg/l CaCO <sub>3</sub>	≤150	Semanal
<b>Dureza T</b>	mg/l CaCO <sub>3</sub>	≤ (Fc x compens)	Semanal
<b>Ortofosfato</b>	mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	5 a 10	Semanal
<b>Cloro</b>	mg/l Cl	0,6 a 0,8	Contínuo
<b>Dióxido de Cloro</b>	mg/l ClO <sub>2</sub>	0,4 a 0,6	Contínuo
<b>Ferro</b>	mg/l Fe <sup>2+/3+</sup>	≤0,1	Semanal
<b>Cloretos</b>	mg/l Cl	≤150	Semanal
<b>Condutividade</b>	µS/cm	≤1200	Contínuo
<b>ORP</b>	mV	400 a 450	Contínuo

## 2.10. CRITÉRIO NA ESCOLHA DO BIOCIDA PARA O TRATAMENTO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Embora a necessidade de utilização de biocidas não tenha diminuído, a sua aplicação e seleção tem sofrido restrições cada vez maiores nas últimas décadas, sendo que estas restrições surgem devido a dois problemas fundamentais: a toxicidade dos produtos utilizados e o seu impacto ambiental. A eficácia dos produtos deve ser sustentada por testes laboratoriais apropriados e por testes em campo. A utilização errada de biocidas, além de dispendiosa, não conduz ao resultado esperado. Deste modo, é importante que a seleção dos biocidas seja feita corretamente. A escolha correta do desinfetante a utilizar sujeita-se a vários parâmetros, tais como [30]:

- ❖ O biocida deve ser ativo contra uma vasta gama de microrganismos;
- ❖ A sua toxicidade deve ser elevada, a baixas concentrações, para os microrganismos alvo, e possuir toxicidade baixa para as restantes formas de vida;
- ❖ Deve ser biodegradável;
- ❖ Não deve ser corrosivo para materiais e equipamentos;
- ❖ Deve ser estável mesmo em presença de alterações de pH e de temperatura;
- ❖ A presença de materiais orgânicos ou inorgânicos não deve interferir com a eficiência do biocida;
- ❖ Deve ser compatível com outros aditivos (inibidores da corrosão, por exemplo);
- ❖ É necessário ter em conta os custos associados à utilização do biocida; sendo que a parte económico-financeira tem um peso elevado na escolha do biocida, pelo que tem

de apresentar resultados positivos de desinfecção a custo acessível e oferecer condições seguras de armazenamento, transporte e uso;

- ❖ É importante que se tenha em conta a segurança respeitante à saúde, ao armazenamento, ao manuseamento, às implicações ambientais e aos efeitos toxicológicos.

#### 2.10.1. BIOCIDAS

Biocidas são os desinfetantes mais utilizados no tratamento da água da torre de refrigeração, sendo estes definidos como compostos não estáticos que anulam ou inibem o crescimento e/ou a atividade metabólica microbiana. Os problemas causados pelo crescimento microbiano não controlado podem variar de riscos à saúde, degradação de produtos químicos, desenvolvimento de biofilmes, perdas de transferência de calor, restrição de fluxo e corrosão sob depósito. Assim sendo, é fundamental que o regime de tratamento com biocida seja corretamente implementado e que se realizem verificações regulares a fim de garantir que a população microbiana, em uma ampla gama de sistemas de refrigeração, seja mantida sob controlo. O controlo do crescimento microbiano é geralmente alcançado garantindo que os sistemas sejam limpos, evitando a contaminação dos sistemas e doseado com um biocida em uma base contínua [31].

Os biocidas podem ser divididos em dois grupos principais; biocidas oxidantes e biocidas não oxidantes: os biocidas oxidantes (como hipoclorito de sódio, dióxido de cloro) simplesmente oxidam as células microbianas e matam a maioria dos microrganismos, incluindo bactérias, algas, fungos e leveduras. Os biocidas não oxidantes como (compostos de amónio quaternário, Bronopol, THPS, DBNPA e Gluteraldeído) matam os microrganismos normalmente interrompendo o metabolismo do organismo ou danificando a parede celular. Os biocidas trazem como vantagens a velocidade de ação rápida, amplo aspeto de aplicação em várias classes de microrganismos, conseguem agir como bio-dispersantes, embora não seja tão eficiente como os próprios bio-dispersantes [31].

#### 2.10.2. BIOCIDAS OXIDANTES À BASE DE CLORO

O cloro e derivados têm sido os desinfetantes químicos mais utilizados no tratamento de águas. Em particular pelos seus custos mais baixos em comparação com os outros desinfetantes no mercado, quer a nível de reagentes, quer a nível de implementação de equipamentos, utilizando uma tecnologia relativamente simples na sua produção. Este tem ainda sido atrativo pela sua eficiência na inativação de uma larga gama de micro-organismos patogénicos, as concentrações residuais da desinfecção são facilmente quantificadas e tem tido um histórico de sucesso em termos de desinfecção ao longo dos anos de utilização. Porém, por ser um componente oxidante, sua utilização traz como desvantagem a corrosão de partes do sistema que estão em contato direto com o biocida. O uso diversificado do biocida à base de cloro, para fins de desinfecção, é tipicamente comum [32].

- ❖ Cloro Elementar ( $\text{Cl}_2$ );
- ❖ Hipoclorito de sódio ( $\text{NaOCl}$ );
- ❖ Dióxido de Cloro ( $\text{ClO}_2$ ).

Importante salientar que o tratamento com biocida à base de cloro na água de refrigeração aumenta a taxa de corrosão do metal, aumentando o potencial de oxidação da água e aumentando a concentração de iões cloreto. A concentração de cloro na água pode ser monitorizado indiretamente pelo controlo do ORP. As propriedades altamente oxidantes do

cloro aumentam o ORP da água, portanto, a taxa de corrosão dos metais aumenta. Deste modo, para controlar a corrosão, é importante manter a concentração de cloro livre abaixo de 0,3 ppm para minimizar o efeito corrosivo do cloro [32].

**Tabela 5:** Eficácia dos biocidas Hipoclorito e dióxido de cloro em diferentes micro-organismos e os subprodutos finais [33].

Desinfetante	Eficaz contra	Produção de subprodutos da desinfecção
<b>Cloro (Hipoclorito)</b>	Bactérias	Trihalometanos
	Vírus	Ácidos haloacéticos
<b>Dióxido de cloro</b>	Bactérias	Clorito
	Cryptosporidium	Clorato
	Giardia	Ácidos haloacéticos
	Vírus	

### 2.10.3. COMPARAÇÃO DOS BIOCIDAS (DIÓXIDO DE CLORO E HIPOCLORITO DE SÓDIO)

O dióxido de cloro tem a vantagem de não reagir com a maioria dos compostos orgânicos, não produzindo assim compostos orgânicos clorados passíveis de serem nocivos ao ambiente. No caso do hipoclorito de sódio, não se verifica isto, ocorrendo a reação com grande parte da matéria orgânica presente na água e a produção de produtos secundários da desinfecção.

O baixo potencial de oxidação do dióxido de cloro significa que ele pode penetrar no biofilme e, adicionalmente, remove ferro e manganês da água precipitando-os. Ao remover ferro da água, dificulta o crescimento e a proliferação da Legionella. O dióxido de cloro tem sido comprovado como o produto químico mais eficaz contra o biofilme, e apresenta um nível mais baixo na dosagem para a mesma eficácia contra bactérias e fungos quando comparado com qualquer outro desinfetante padrão como cloro, iodo, bromo, peróxido de hidrogénio, compostos de amónio quaternário, glutaraldeído e formulações de ácido fenólico e peroxiacético [34]. No entanto, apresenta a desvantagem, na eficiência do gerador e a dificuldade de otimização pode fazer com que o excesso de cloro seja alimentado no ponto de aplicação, que pode potencialmente formar DBPs substitutos de halogénio. Os custos associados à formação, amostragem e testes de laboratório para clorito e clorato são altos. O equipamento é normalmente alugado e o custo do clorito de sódio é alto. O gás dióxido de cloro é explosivo, por isso deve ser gerado e medido no local. O dióxido de cloro decompõe-se à luz do sol, o que pode levar à produção de odor desagradável em alguns sistemas [35].

O hipoclorito de sódio está disponível a um preço mais baixo, porém apresenta desvantagens económicas a longo prazo e a nível ambiental, devido à deterioração dos equipamentos e à formação de DPB com um potencial tóxico maior. Pela literatura, o dióxido de cloro apresenta a mesma eficiência, mesmo com uma concentração mais baixa, em comparação ao hipoclorito de sódio, além de reduzir a corrosão dos componentes do sistema de refrigeração. Ao reduzir o nível de cloro residual, é possível de forma garantir a desinfecção, o que implica uma redução no consumo de biocida utilizado para o tratamento da mesma água [35].

#### 2.10.4. MECANISMO DE AÇÃO DOS BIOCIDAS

Os biocidas apresentam diferentes mecanismos de atividade, sendo que, o dióxido de cloro é um desinfetante extremamente eficaz, que mata rapidamente bactérias e vírus. O dióxido de cloro é um oxidante, não um agente de cloração. O  $\text{ClO}_2$  penetra na parede celular e reage com os aminoácidos do citoplasma dentro da célula, matando o micro-organismo. O subproduto dessa reação é o clorito, que é inofensivo para os humanos. Alguns estudos indicam ainda a interferência do  $\text{ClO}_2$  na permeabilidade da membrana exterior e citoplasmática das células. Esta alteração resulta assim na libertação, por parte da célula, de componentes vitais [36].

O uso do dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) como alternativa aos clorados convencionais aumentou em popularidade nos últimos 20 anos devido à sua alta capacidade oxidativa, estabilidade em uma ampla faixa de pH, eficácia antimicrobiana e formação limitada de subprodutos tóxicos. Portanto, é um forte reagente para atacar ligações de dissulfureto em aminoácidos que estão presentes nas membranas das bactérias e de outro material biológico. O dióxido de cloro é também eficaz na eliminação do biofilme, por ter uma capacidade de difundir neste e eliminar as bactérias que aí se encontram [37].

No caso do uso do hipoclorito de sódio, como descrito anteriormente a inativação e/ou destruição é realizada maioritariamente pelo ácido hipocloroso. Este é uma molécula de reduzidas dimensões, tendo a capacidade de atravessar com facilidade a membrana celular, reagindo com o conteúdo plasmático, causando a inibição de enzimas responsáveis pelos processos de oxidação-redução no metabolismo celular, causando a sua paragem, levando a célula à morte. Mas, na maioria dos casos, as bactérias não se encontram sozinhas na água, agregando-se e depositando-se numa superfície, formando um biofilme. A maioria dos biocidas enfrenta dificuldades em penetrar no biofilme devido à polissacarídea produzida por bactérias, como as pseudomonas. No caso do o hipoclorito de sódio, ele só consegue oxidar a camada superficial do biofilme, uma vez que reage principalmente com açúcares inertes presentes nessa camada, devido ao seu elevado potencial de oxidação. No caso do bioincrustação e no controlo de algas, o cloro é mais eficaz a concentrações mais baixas comparativamente ao dióxido de cloro, devido maioritariamente ao seu potencial de oxidação-redução. No entanto, o dióxido de cloro apresenta-se como um biocida eficaz no controlo de algas atacando o anel de pirrol da clorofila, deixando o anel inativo. Como as algas não conseguem funcionar sem clorofila, acabam por morrer [38].

O hipoclorito de sódio apresenta um comportamento oxidativo bastante diferente do dióxido de cloro, o mecanismo de reação de oxidação predominante para o dióxido de cloro prossegue através de um processo conhecido como a atração de eletrões, em vez de substituição ou adição oxidativa (como em agentes de cloração, como cloro ou hipoclorito). Isso significa que os compostos orgânicos clorados, como THMs e HAAs, não são produzidos como resultado da desinfecção com dióxido de cloro [38]

## 2.10.5. CINÉTICA DA DESINFEÇÃO

Um dos fatores mais importantes para determinar a eficiência do biocida utilizado é o fator C (concentração do biocida) e t (tempo de contato do biocida com o organismo). Este fator é característico para cada agente de desinfeção e para cada microrganismo que se pretende eliminar. Em 1908, a Sra. Harriet Chick descobriu que a desinfeção pode ser descrito por uma reação de primeira ordem [39]:

$$\frac{dN}{dt} = -k.N \quad (19)$$

ou

$$\ln \frac{N}{N_0} = k \times t \quad (20)$$

N = concentração de organismo [l / m<sup>3</sup>]; N<sub>0</sub> = concentração inicial de organismo [l / m<sup>3</sup>];

t = tempo [s]; k = constante de taxa [1 / s]

A constante de velocidade k varia dependendo do desinfetante, concentração de desinfetante, microrganismo e temperatura. A taxa de inativação dos microrganismo também é influenciado pela capacidade do desinfetante de penetrar na parede celular atingir os centros vitais da célula. Cada espécie de microrganismo, portanto, terá uma diferente sensibilidade a cada desinfetante. Essa relação é descrita como Lei de Chick. O Sr. Herbert Watson, também 1908, propôs sua lei de desinfeção que em muitos casos, a constante empírica n pode ser assumida como 1. Isso significa que, para uma inativação solicitada, um determinado valor Cxt é necessário, em que tempo(t) e concentração(C) são igualmente importantes [39].

$$C^n \times t = K_r \quad (21)$$

C = concentração de desinfetante [mg / l]; n = constante empírica [-]; t = tempo [s]

K<sub>r</sub> = valor empírico para uma percentagem de inativação (por exemplo, 99%)

A combinação de ambas as leis (com n = 1) dá a lei de Chick-Watson

$$\ln \frac{N}{N_0} = K_{CW} \times C \times t \quad (22)$$

K<sub>CW</sub> = letalidade específica [l / mg. s]

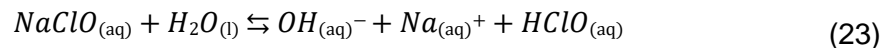
**Tabela 6:** Eficiência do cloro e do dióxido de Cloro na eliminação da legionella pneumofilae [40]

Biocidas	Organismo	T(°C)	PH	Ct <sub>99,99%</sub>
<b>Cloro (Hipoclorito)</b>	Legionella pneumofilae	25	8	210
<b>Dióxido de Cloro</b>	Legionella pneumofilae	30	8	0,4

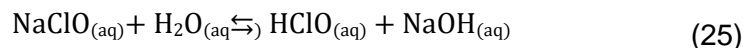
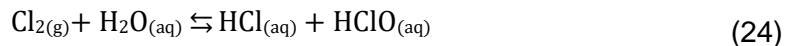
Baseando-se em caso de estudo, conforme mostra a tabela 6, o dióxido de cloro é mais eficaz que o hipoclorito de sódio na eliminação da bactéria Legionella Pneumofilae, tendo o seu valor de Ct mais reduzido.

#### 2.10.6. HIPOCLORITO DE SÓDIO

O hipoclorito de sódio é produzido aquando da dissolução de cloro gasoso em hidróxido de sódio. Apresentando-se sob a forma de uma solução aquosa, com aproximadamente 15% (w/w) de cloro ativo. A estabilidade da solução depende da concentração de cloro ativo, luz, PH, temperatura e duração do armazenamento, visto que vai sofrendo perdas de cloro ativo ao longo do tempo [34].



A ação biocida dos compostos clorados, com exceção do dióxido de cloro, está baseada na formação do ácido hipocloroso (HClO) resultante da adição de cloro à água de acordo com as equações 24 e 25 [41].



Independentemente da fonte de cloro, o pH afeta muito a funcionalidade e o seu poder de inibição devido à natureza de equilíbrio do HClO na água:



O hipoclorito  $ClO^-$  é um biocida muito mais fraco do que o HClO, provavelmente porque a carga no ião  $ClO^-$  não permite que ele penetre nas paredes celulares. A eficiência do processo de cloração é extremamente dependente do pH, restringindo assim a operação a valores menores que 8 como pode ser observado na figura 17. O processo de cloração deve ser efetuado numa faixa de pH onde predomina o ácido hipocloroso ou seja, pH 4-6. O ião hipoclorito também possui ação biocida, porém não é tão efetivo [41].

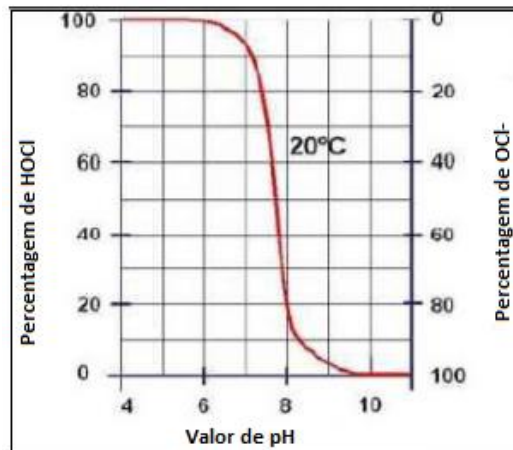


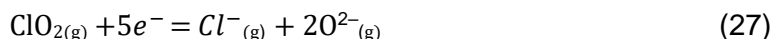
Figura 17 - Diagrama de concentração (%) de compostos clorados em função do pH em meio aquoso [[41]

Em pH mais alto, a concentração de ácido hipocloroso diminui e com isso a ação biocida. O pH ótimo está na faixa de 6 a 7,5. Em pH 8,3-9,5, o cloro se torna menos eficaz como biocida oxidante. pHs abaixo de 6 não são aplicados em sistemas devido ao perigo potencial de corrosão [42].

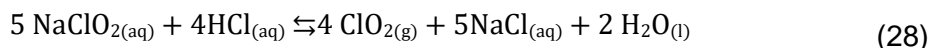
#### 2.10.7. DIÓXIDO DE CLORO

O dióxido de cloro,  $\text{ClO}_2$ , é um composto químico formado pela combinação de oxigênio e cloro, no qual o cloro está no estado de oxidação +4. Comparado com o cloro livre, que tem um estado de oxidação +1 (como no caso de do hipoclorito e de iões hipoclorito), o dióxido de cloro tem propriedades de desinfecção diferentes e gera subprodutos distintos quando utilizados no tratamento da água. Uma das grandes vantagens do dióxido de cloro é que, ao contrário de outros desinfetantes à base de cloro, não produz níveis significativos de subprodutos orgânicos halogenados, como acontece com o cloro e o cloramine. No entanto, o dióxido de cloro reage com vários constituintes da água, como compostos orgânicos e iões inorgânicos, formando subprodutos inorgânicos como o clorito ( $\text{ClO}_2^-$ ) e o clorato ( $\text{ClO}_3^-$ ). O dióxido de cloro é um composto oxidante forte, o que significa que pode ser eficaz no controle de ferro, manganês e compostos que causam gosto e odor na água. Por isso, tem sido utilizado em muitos países europeus como desinfetantes secundários para melhorar a qualidade da água. O dióxido de cloro é altamente solúvel em água, especialmente em baixas temperaturas, e é eficaz em uma faixa de pH de 5 a 10. Isso o torna uma opção versátil para diferentes tipos de tratamento de água.

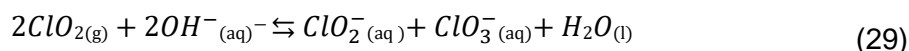
Por exemplo, o dióxido de cloro não produz efeitos significativos níveis de subprodutos orgânicos halogenados. O dióxido de cloro forma subprodutos inorgânicos (clorito e iões clorato) após sua reação com constituintes da água, como composto orgânico, micróbios e iões inorgânicos. O dióxido de cloro é um oxidante forte que pode ser usado para controlar o ferro, o manganês e compostos que causam gosto e odor. Também tem sido usado como um secundário desinfetante em muitos países europeus. O dióxido de cloro é altamente solúvel em água (particularmente em baixas temperaturas) e é eficaz em uma faixa de valores de pH (pH 5–10). Teoricamente, o dióxido sofre cinco mudanças de valência na oxidação em ião cloreto [35].



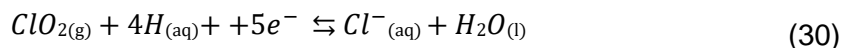
No entanto, na prática, o dióxido de cloro raramente é reduzido completamente para ião cloreto. Acredita-se que o dióxido de cloro inativa microrganismos através da oxidação direta de tirosina, metionil ou proteínas contendo cisteína, que interfere em importantes regiões estruturais de enzimas metabólicas ou proteínas de membrana. No tratamento de água, o dióxido de cloro tem a vantagem de ser um desinfetante forte, mas não formando THMs ou oxidando brometo a bromato [35]. A concentrações muito elevadas reage violentamente com agentes redutores, no entanto, é estável numa solução diluída que esteja longe de fontes de radiação UV. O dióxido de cloro não pode ser comprimido e vendido comercialmente, por ser explosivo quando se excedem concentrações 10% (v/v) em ar, sendo assim gerado no local de aplicação. Devido à sua dificuldade de armazenamento e manuseamento, mesmo estando numa solução aquosa. O dióxido de cloro é difícil de armazenar e manusear, mesmo em soluções aquosa. Por isso, em vez de ser armazenado diretamente, é produzido através de um gerador de dióxido de cloro. Esse processo envolve a reação de dois reagentes: ácido clorídrico(HCl) e clorito de sódio (NaClO<sub>2</sub>) [30].



Como foi referido, o pH vai ser fulcral na determinação dos produtos secundários aquando do uso de dióxido de cloro e este pode ainda ter o seu poder de oxidação reduzido consoante as condições do sistema. Assim, em condições alcalinas, o dióxido de cloro reage com os íons hidróxidos presente na água, formando o clorito e clorato, preferencialmente [37].



Em soluções ácidas o produto predominante secundário da desinfecção vai ser o cloreto:

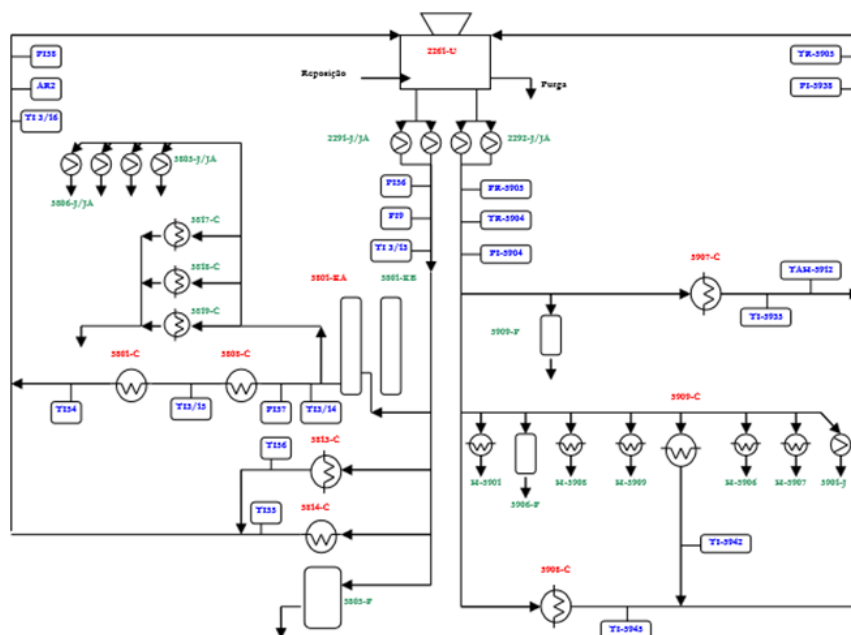


Produtos secundários, clorito, clorato e cloreto, a pH's usuais no tratamento de águas, normalmente estão sob condições estáticas a 25°C, aproximadamente 50 a 70% do dióxido de cloro origina clorito e 30% é convertido em cloratos e cloretos. A distribuição de cloritos e cloratos depende do pH, da razão de consumo e dose de dióxido de cloro introduzida, da eficiência da reação de geração de dióxido de cloro e das reações fotoquímicas. No entanto, ocorre preferencialmente a formação de cloratos a valores de pH elevados e na presença de luz UV [37].

## 2.11. DESCRIÇÃO DA TORRE DE REFRIGERAÇÃO 5

A Torre de Refrigeração 5 (TR5) que serve a área de nitratos foi fornecida pela empresa Esindus Portugal - Soluções Técnicas Industriais, Unipessoal, Lda e erigida em 2017. Na sua conceção, considerou-se um excesso de 10% em relação à atual necessidade de Água de refrigeração, estando, portanto, preparada para uma eventual expansão da capacidade produtiva. Na seção, abaixo será feito um resumo da descrição da então torre de refrigeração 5 (TR5). [43]

A Torre de Refrigeração 5 (TR5) trata um caudal de cerca de 1900 m<sup>3</sup>/h, é constituída por três células e três ventiladores axiais de velocidade variável. O fluxo (contacto ar-água) é de tipo contracorrente com entradas de ar perpendiculares à direção dominante dos ventos. O enchimento é do tipo “grelhas” em vários andares. A água de retorno das duas fábricas é dirigida e vai alimentar um coletor que ramifica em 3 adutores principais, no topo de cada célula da torre, e daí para os tubos distribuidores ou coletores secundários que alimentam, por sua vez, os dispersores. O sistema inclui, para além das linhas de alimentação (A.R.) e retorno de água de Refrigeração (A.R.Q.), as Bombas (sendo 1 de reserva) para servir as fábricas de: Ácido Nítrico (2291J + JR), e Solução de Nitrato de Amónio (2292J + JR). Os equipamentos utilizadores de A.R. são permutadores de calor, serpentinas, potes arrefecedores, câmaras de arrefecimento de bombas ou outros. O esquema principal dos circuitos é apresentado na Fig.24. A A.R. é bombada da bacia da Torre para as fábricas a uma pressão de 6 – 8 bar. O retorno da água quente à Torre (A.R.Q.), é conduzido por coletores individuais e controlada a pressão a cerca de 0,7 bar. Os dispersores promoverão a dispersão da água em finas gotas que, ao caírem, contactarão em contracorrente (efeito “splash”) com o caudal de ar induzido pelos ventiladores. [43]



compensar as perdas por evaporação, purga do sistema, arraste e outros, o sistema é alimentado por água de furo com um caudal de compensação normal 45 - 60 m<sup>3</sup>/h, através de uma válvula que controla automaticamente o nível da bacia. Por outro lado, a evaporação tende a concentrar a água em circulação, havendo uma válvula automática de purga e 4 válvulas de fundo da bacia da TR5 (uma em cada célula e outra na parte de alimentação às bombas) para purga manual, de maneira a manter o conteúdo salino dentro dos limites, tendo em conta as análises de rotina. Relativamente ao ar, este entra pela parte inferior pelo efeito induzido (provocado pelo ventilador situado na cobertura da Torre) e passa através dos vários níveis de enchimento contactando com o fluxo de água descendente onde é aquecido e saturado, saindo posteriormente pela parte superior. [43]

#### 2.11.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA TORRE DE ARREFECIMENTO TR5

**Tabela 7:** Características técnicas da torre de refrigeração TR5 [43]

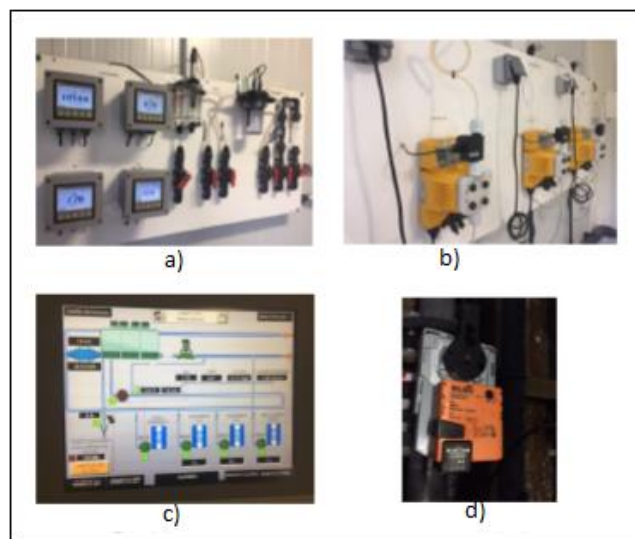
Torre de Refrigeração	TR5 (dados de projeto)
<b>Tipo</b>	contracorrente
<b>Caudal de circulação (Q em m<sup>3</sup>/h)</b>	2000
<b>Temperatura de entrada de água</b>	38° C
<b>Temperatura de saída de água</b>	28° C
<b>Gradiente térmico</b>	10° C
<b>Temperatura ambiente seca</b>	28°C
<b>Temperatura ambiente bolbo húmido</b>	18,2/22°C (manhã); 19,5/27°C (tarde)
<b>Humidade relativa (projeto)</b>	50% a 20°C
<b>Pluviosidade média anual</b>	635,8 mm/ano
<b>Pluviosidade máxima horária</b>	50,0 mm/hora
<b>Direção predominante do vento</b>	Norte / Oeste
<b>Velocidade do vento</b>	45 m/seg. (nível do solo)
<b>Perdas por evaporação (teórico)</b>	28,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Caudal de purga e arraste (teórico)</b>	14,3 m <sup>3</sup> /h
<b>Caudal de compensação (projeto)</b>	42,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Fator de concentração (projeto)</b>	3

## 2.12. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE CONTROLO E DOSAGEM DA TR5

A crescente escassez de água forçou muitas operações industriais a usar mais água bruta ou reciclada. Isto representa desafios porque a água bruta e reciclada pode conter altas cargas orgânicas e níveis mais elevados de contaminação bacteriana. O uso de oxidantes convencionais, como o cloro, aumenta a reatividade com contaminantes orgânicos e reduz os ativos disponíveis para o controlo microbiano. Como resultado, níveis significativamente mais elevados de cloro precisam ser dosados para manter o controle microbiológico adequado. Uma dose maior de cloro significa maior contribuição de cloreto, o que pode causar um maior potencial de corrosão. Também pode resultar em um aumento no potencial de formação de AOX/ THM e comprometer as limitações de descarga, resultando em violações do decreto lei da União Europeia 98/83/CE [42]. Para cumprir com os parâmetros devidamente descritos anteriormente da água de refrigeração, é necessária uma monitorização de controlo e dosagem. Sendo que, a estação de tratamento da água de refrigeração da torre TR5 é constituída por [31]:

- ❖ Contador volumétrico emissor de impulsos, na linha de água de compensação, para controlo da dosagem de inibidor de corrosão/incrustação;
- ❖ Sonda e controlador de dióxido de cloro para regulação do gerador de  $\text{ClO}_2$ ;
- ❖ Sonda e controlador de cloro para regulação da dosagem do composto de cloro;
- ❖ Sonda e controlador de ORP - Sonda e controlador de pH para regulação da dosagem de ácido sulfúrico;
- ❖ Sonda e controlador de condutividade para regulação do caudal de purga por acionamento de válvula motorizada. - Sonda e controlador de corrosão instantânea;
- ❖ Filtro automático de água de leitura das sondas. - Autómato de gestão e controlo de dosagens de produtos de tratamento;
- ❖ Modem para controlo remoto dos parâmetros e bombas doseadoras.

Importa salientar que todo o equipamento de controlo e dosagem na estação de tratamento de água é montado em módulo autónomo.



**Figura 25 - a)** controladores e sondas; **b)** bombas doseadora; **c)** Painel de controlo; **d)** válvula monitoriza de pulga [31]

### 2.13. PRINCIPAIS OBJETIVOS DA APLICAÇÃO DO DIÓXIDO DE CLORO EM CONJUNTO DO HIPOCLORITO DE SÓDIO NA TORRE 5 (TR5)

Atualmente, os inibidores raramente são usados na forma de compostos únicos. É mais comum que formulações feitas de dois ou mais inibidores sejam utilizadas. Isso ocorre porque os inibidores individuais são eficazes apenas com um número limitado de metais e a proteção do sistema multimetal requer a presença de mais de um inibidor. Além disso, produtos químicos com características diferentes (por exemplo, inibição anódica e catódica) complementam sua deficiência entre si, de modo que a eficácia do inibidor misto aumenta. Assim, a concentração de dosagem pode ser reduzida significativamente, reduzindo o custo operacional e os impactos ambientais causados por produtos químicos [42].

Segundo o relatório fornecido pela Aguaciclo, a adição de hipoclorito de sódio tem como objetivo aumentar o potencial oxidante do meio, garantindo uma barreira sanitária adequada sem necessidades de concentração elevadas de dióxido de cloro. O dióxido de cloro atua como biocida e germicida ao interferir no metabolismo celular do microorganismo. Embora o dióxido de cloro também contribua para o aumento do potencial redox do meio, mas esse não é o seu principal mecanismo de desinfecção. Assim, uma pequena adição pode rapidamente aumentar o ORP do meio tornando o processo de desinfecção mais econômico e eficiente. A adição do dióxido de cloro na TR5 tem, os seguintes objetivos [30]:

- ❖ Obtenção de uma capacidade desinfetante adequada e expressa na manutenção de um potencial redox (ORP) entre 400 e 500 mV;
- ❖ Obtenção de bons níveis de assepsia, expressa por valores de ufc's de mesofilos inferiores a 1000ufc/ml;
- ❖ Manutenção de ausências de bactérias Legionella;
- ❖ Manutenção de ausência de crescimento de bacterióticos nas superfícies internas do sistema de água de refrigeração;
- ❖ Manutenção de índices de turvação das águas baixas;
- ❖ Obtenção das metas anteriormente indicadas, com o mínimo custo econômico, ou seja, com a menor concentração de dióxido de cloro possível;
- ❖ Não alterar de forma significativa o teor de cloretos livres na água de refrigeração.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL DOS CUSTOS ECONÓMICOS DOS BIOCIDAS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO NA TORRE 5 (TR5)

Os biocidas à base de cloro, além da sua eficiência como desinfetante, de fácil manuseamento, devem ser de fácil acesso, ou seja, económicos e ecológicos. Neste capítulo, fez-se um breve estudo económico com base nos biocidas utilizados no tratamento da torre de refrigeração TR5 com base nos dados de consumo no ano de 2019, sendo que durante algum período no tratamento da água de refrigeração utilizava-se exclusivamente hipoclorito de sódio. Posteriormente, foi proposto um tratamento misto com hipoclorito de sódio e dióxido de cloro. Essa análise económica foi feita avaliando os preços dos biocidas.

Relativamente ao estudo económico, os dados usados foram recolhidos pelos operadores da torre de refrigeração, incluindo os níveis dos biocidas em litro(L) e o consumo dos biocidas em litro por dia(L/d). Após a aquisição dos dados em excel, o que facilitou na realização de cálculos através de funções simples, como: SOMA(Consumo inicial:Consumo final) , para calcular o consumo total e MULTIPLICAÇÃO(Consumo total\*Preço) para determinar o consumo dos custos mensal dos biocidas. Após o cálculo do custo mensal, foi possível comparar os dois tipos de tratamentos, permitindo identificar o mais económico. Comparou-se também a eficiência do uso dos biocidas mistos usado atualmente (hipoclorito de sódio e dióxido de cloro), e o exclusivo (Hipoclorito de sódio ) usado em 2019. Também foram tidos em conta os factores de concentração existentes na água de refrigeração.

**Tabela 8:** Análise económica do tratamento misto

Produto	Função	Preço	Preço	Densidade	Consumo	Custo
		€/L	€/Kg	kg/m <sup>3</sup>	(m <sup>3</sup> /mês)	(€/mês)
<b>Ácido Clorídrico AC9</b>	Reagentes para produção do ClO <sub>2</sub>	0,26			0,5	130
<b>Clorito de Sódio CS 7,5</b>	Reagentes para produção do ClO <sub>2</sub>	0,58			0,5	290
<b>Hipoclorito Sódio</b>	Biocida Oxidante		0,46	1.290	1	593,4
<b>Total</b>						1.013,4

**Tabela 9:** Análise económica do tratamento exclusivo

Produto	Função	Preço	Preço	Densidade	Consumo	Custo	Custo*(FC=1,9)
		€/L	€/Kg	kg/m <sup>3</sup>	(m <sup>3</sup> /mês)	(€/mês)	(€/mês)
<b>AT 732</b>	Anti-incrustante; anticorrosivo	3,3		1.190	0,08	264	
<b>Hipoclorito Sódio</b>	Biocida Oxidante		0,46	1.290	2,5	1.483,50	
<b>Total</b>						1.747,5	3.320,3

A análise económica comparando os tratamentos mistos e exclusivo conclui que o tratamento misto é mais económico. Além da vantagem financeira, o tratamento misto também apresenta benefícios técnicos, como maior eficiência na limpeza dos circuitos, melhor aspeto da torre, menor turbidez da água e menor sensibilidade à contaminação por NH<sub>3</sub>. Embora a concentração da água pode variar ao longo do tempo, foi feito um ajuste com a concentração real (1,9), o que resulta num custo total de 3.3320,50€ para o tratamento exclusivo, comparando com 1.013,00€ para o tratamento misto.

## 4. PARTE EXPERIMENTAL DO ESTUDO TÉRMICO DA TORRE DE REFRIGERAÇÃO (TR5)

### 4.1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As torres de refrigeração, apesar de serem equipamentos amplamente utilizados na indústria, apresentam dificuldade em encontrar metodologias para avaliar o desempenho térmico durante a operação. O desempenho térmico de uma torre de refrigeração é principalmente influenciado pelas condições climáticas, especialmente pela temperatura ambiente do termómetro húmido e humidade relativa do ar.

O desempenho térmico da torre de refrigeração TR5 foi avaliada através da realização de vários testes, que incluíram a medição das temperaturas da água de refrigeração em cada células da torre, durante a tarde, especificamente às 14h. Este horário foi escolhido porque as fábricas de ácido nítrico e nitrato de amónio apresentavam maior carga de trabalho neste período.

Além disso, foram feitas medições da temperatura do ar saturado à saída de cada ventilador durante o inverno. Ambos os procedimentos experimentais foram realizados com a ajuda de um termómetro. Para a recolha de dados sobre o consumo elétrico, foi utilizado o sistema de supervisão e controlo, que tem como base o autómato da sala de controlo elétrico.

O sistema de supervisão dispõe de três interfaces (HMI de ecrã tátil): na sala de controlo, e outras duas nas salas de controlo das fábricas de nitrato de amónio e ácido nítrico.

Recolheram-se dados ambientais como:

- ❖ Temperatura do termómetro húmido, humidade relativa, através de uma estação meteorológica online [ftp://e\\_01210766:766+e@ftpserver.meteo.pt/EMA](ftp://e_01210766:766+e@ftpserver.meteo.pt/EMA), visto que os dados são disponibilizados diariamente numa área de FTP.

Assim, foram analisados vários parâmetros meteorológicos para determinar o desempenho da torre de refrigeração TR5 tais como:

- ❖ Temperatura de termómetro húmido;
- ❖ Humidade relativa;
- ❖ *Approach* (aproximação);
- ❖ Range (gama de arrefecimento);
- ❖ Eficiência (Rendimento);
- ❖ Taxa de perda de calor.

A partir da obtenção destes parâmetros, elaborou-se gráficos conforme mostram as Figuras 18 e 19 para a obtenção de informações relevantes sobre o comportamento da torre de refrigeração com a variação da temperatura do termómetro húmido e à compreensão do desempenho térmico da torre de refrigeração, como se mostra na secção seguinte. É importante referir que os dias para a recolha de dados foram baseados em dias de cargas altas e nas condições ambientais dentro dos possíveis extremos, a saber:

- ❖ Dias quentes com altas Húmidades
- ❖ Dias frios, com baixas Húmidades

#### 4.2. RESULTADO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DA TORRE DE REFRIGERAÇÃO 5

Nesta secção, foram avaliadas duas situações para o desempenho térmico da torre de refrigeração. A primeira, através de medições diretas em cada célula da torre de refrigeração, e a segunda, com base nas curvas características da torre de refrigeração, fornecidas pela Esindus. É importante referir que, para o estudo do desempenho térmico, os dados apresentados nesta secção foram recolhidos em diferentes condições. A tabela 10 apresenta os dados recolhidos durante o verão, entre agosto e setembro, enquanto a tabela 11 mostra os dados recolhidos no inverno, no mês de dezembro.

**Tabela 10:** Tabela de desempenho térmico da torre de refrigeração TR5 no período de verão

Datas	Caudal da água m <sup>3</sup> /h	Caudal da água Kg/h	Carga da fábrica kg/h	Range	Approach	A.R.Q. °C	A.R.F. °C	Termóm.Húmido °C	Rendimento %	Q Kw/h
10/08/21	1950	1,95E+07		4,9	5,5	30,2	25,3	19,8	47	1,11E+04
17/08/21	1950	1,95E+07	9400	5,5	3,5	31,5	26,0	22,5	61	1,25E+04
18/08/21	1950	1,95E+07	9200	5,2	4,5	31,2	26,0	21,5	53	1,18E+04
03/09/21	1950	1,95E+07	9350	5,0	5,5	30,0	25,0	19,5	48	1,18E+04
04/09/21	1960	1,96E+07	9350	5,3	7,3	30,0	24,8	17,5	42	1,14E+04
17/09/21	1940	1,94E+07	9000	5,8	6,0	31,3	25,5	19,5	49	1,42E+04
17/09/21	1940	1,94E+07	9550	6,2	5,4	31,3	25,1	19,7	54	1,36E+04

**Tabela 11:** Tabela de desempenho térmico da torre de refrigeração TR5 no período de Inverno.

Data	Caudal da água m <sup>3</sup> /h	Caudal da água Kg/h	Carga da Fábrica Kg/h	Range	Approach	A.R.Q. °C	A.R.F. °C	Termóm.Húmido °C	Rendimento %	Q Kw/h
22/12/2020	1930	1,93E+07	9200	6,9	10,3	32,2	25,4	15,6	40,2	1,55E+04
23/12/2020	1930	1,93E+07	6570	6,9	14,0	32,2	24,8	13,4	33,0	1,34E+04
28/12/2020	1830	1,83E+07	6370	6,3	10,0	31,6	25,3	15,3	38,6	1,66E+04
29/12/2020	1820	1,82E+07	9950	4,8	14,5	29,8	25,0	12,5	25,1	1,02E+04
30/12/2020	1820	1,82E+07		5	12,1	30,38	25,0	12,9	31,0	1,14E+04

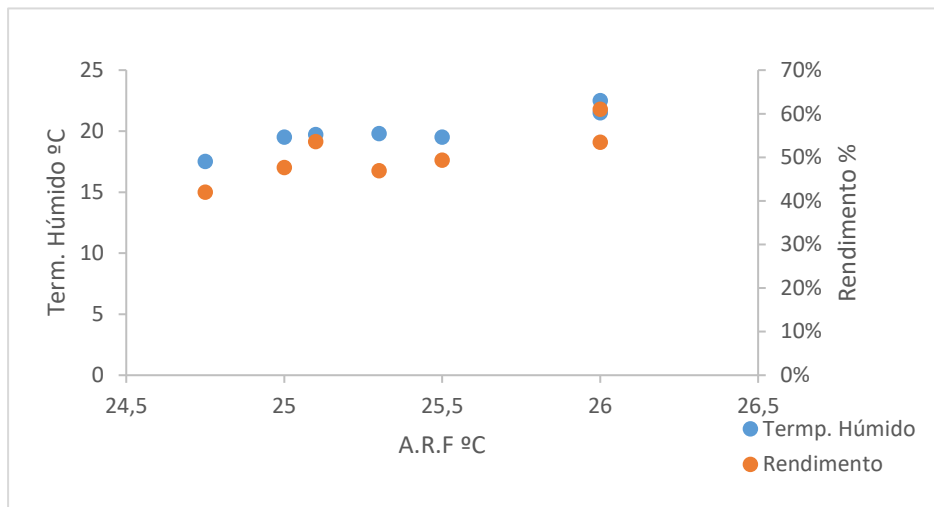


Figura 18: Variação da Temperatura do Termómetro Húmido e o rendimento com a Temperatura da água de Refrigeração em condições de verão

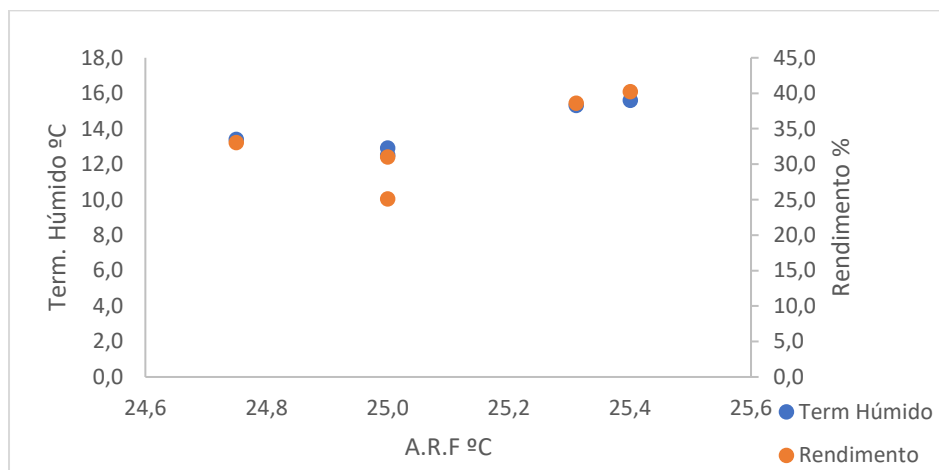


Figura 19: Variação da Temperatura do Termómetro Húmido e o Rendimento com a Temperatura da Água de Refrigeração em condições de inverno

As figuras 18 e 19 mostram o impacto da variação da temperatura do termómetro húmido e do rendimento da torre de refrigeração durante o verão e o inverno.

Na figura 18, observamos que a temperatura do termómetro húmido no verão é relativamente alta, atingindo 21,5 °C. Isso indica que o ar ambiente contém uma quantidade significativa de vapor de água, o que teoricamente, pode reduzir a eficiência da torre de refrigeração. A alta quantidade de vapor de água no ar dificulta a troca térmica na torre. No entanto, apesar do ambiente quente e húmido, a torre conseguiu remover uma quantidade de calor, alcançando um rendimento de 61% e uma temperatura de água de refrigeração de 26 °C. Isso ocorreu porque a diferença de temperatura entre a água e o ar foi suficiente para permitir uma troca térmica.

Na figura 19, no inverno, a temperatura do termómetro húmido mais alta foi de 15,5 °C, indicando que o ar ambiente estava mais seco e com maior capacidade de absorver vapor de

água, em comparação com o verão. O ar também tem maior capacidade de arrefecer a água, resultando numa temperatura de água de refrigeração de 25°C. A menor temperatura do termómetro favorece o processo de evaporação, o que teoricamente deveria aumentar a eficiência da torre. No entanto, na prática, a torre de refrigeração apresenta um rendimento baixo de 31%. Isso ocorreu porque a diferença de temperatura entre a água e o ar não foi suficientemente grande para remover uma troca térmica eficiente

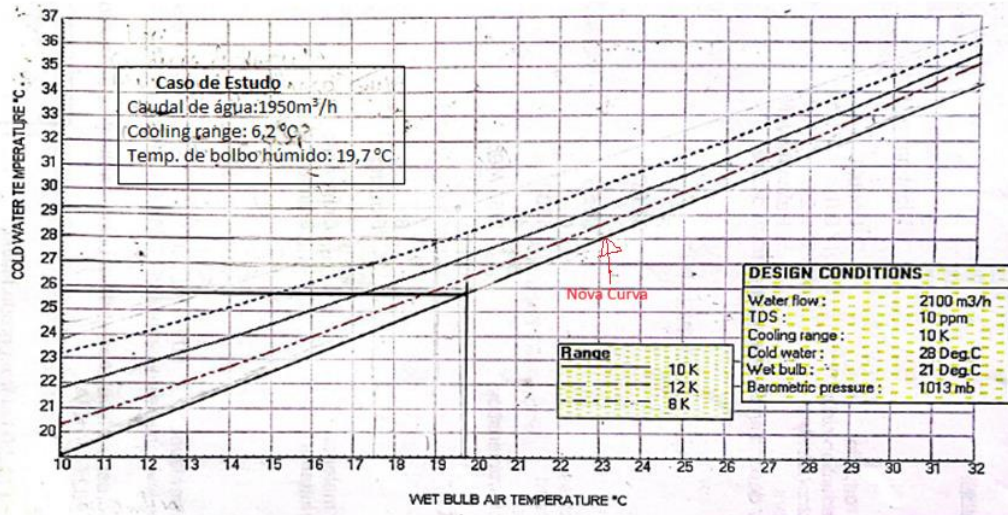


Figura 20: Curvas do Desempenho Térmico da Torre de Refrigeração no Período de Verão de 08-2018

A figura 20 apresenta as curvas de desempenho da torre de refrigeração com base as especificações do projecto, e a nova curva, traçada com base os dados obtidos, Foi necessário verificar qual seria a temperatura esperada da água de refrigeração, utilizando a nova curva característica, que foi traçada de forma simplificada. Para isso, utilizou-se um *cooling range* de 6,2 °C e temperatura de termómetro húmido de 19,7°C. Com base nestes dados, a temperatura da água de refrigeração esperada é de 25,8 °C.

**Tabela 12:** Dados de Temperatura de A.R. F bacia e Caudal de entrada da torre de agosto de 2020 para uma Temperatura de Termómetro. Húmido de 19,7°C.

Designação das Células	Temperatura A.R. bacia (°C)	Caudal de entrada (estimado) m³/h
<b>A</b>	26,7	645
<b>B</b>	26,9	680
<b>C</b>	28,4	610
<b>Média</b>	27,3	1950

**Tabela 13:** Dados de Temperatura de A.R. F bacia e caudal de entrada da torre de agosto de 2018 para uma Temp.Termóm. Húmido de 19 °C.

Designação das Células	Temperatura A.R. bacia (°C)	Caudal de entrada (estimado) m³/h
<b>A</b>	25,7	630
<b>B</b>	25,8	660
<b>C</b>	26,2	610
<b>Média</b>	25,9	1900

De acordo a tabela 12 (no nosso caso de estudo), foi realizada a média dos resultados, utilizando a média simple, considerando que o caudal é aproximadamente igual nas três células da torre. A temperatura da água de refrigeração à saída da torre, durante o mês de Agosto de 2020, que foi recolhida diretamente em cada bacia da torre, com ajuda de um termómetro convecional, A temperatura média da água de refrigeração foi de 27,3 °C, que é superior à temperatura média de 25,9 °C em Agosto de 2018, conforme mostra a tabela 13.

O caudal de 1900m<sup>3</sup>/h, distinto do nominal (2100m<sup>3</sup>/h), verificou-se que, na curva de performance da torre fornecida pela Esindus (figura 20), a temperatura esperada para um termómetro húmido de 19,7 °C (de forma a simplificar as linhas) seria de 25,8 °C. Este valor é ligeiramente abaixo do real, conforme mostra a tabela 12, podemos concluir que esta diferença de temperatura tem a ver com as variações sazonais das condições ambientais, tais como; a temperatura do termómetro húmido e a humidade relativa.

**Tabela 14** - Dados ambientais e a respetivas temperatura média da água de refrigeração

	Dados de especificação	Caso de estudo
<b>Temp.Term. Húmido (°C)</b>	19	19,7
<b>Temperatura média da A.R. bacia (°C)</b>	25,9	27,3
<b>Caudal médio da água de refrigeração(m<sup>3</sup>/h)</b>	1900	1950

## 4.2.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS CONSUMOS ELÉTRICOS DOS VENTILADORES

Neste capítulo, foi feita uma comparação do consumo elétrico dos ventiladores entre os dados fornecido pela Ensidus em de agosto de 2018, e dados obtidos em agosto de 2020, tendo em conta os dados ambiental e considerando que os ventiladores estavam a funcionar com a sua capacidade máxima de 100%

**Tabela 15:** Dados do consumo elétrico dos ventiladores no período de verão (agosto de 2020), considerando diferentes temperaturas de bolbo húmido

<b>Células TR5</b>				
<b>2261J A</b>	Intensid.Corrente(A)	59,5	71,5	71,63
Velocidade	%	90	100	100
Vibrações	mm/s	4,9	5,1	5,7
abert. Válv. Caudal ind	%	60	90	78
Temp. A.R. bacia ind	°C	25,7	26,7	25,85
<b>2261J B</b>	Intensid.Corrente(A)	62	67,5	67,62
Velocidade	%	95	100	100
Vibrações	mm/s	7,8	8,3	7,1
abert. Válv. Caudal ind	%	100	100	100
Temp. A.R. bacia ind, °C	°C	24,9	26,9	26,05
<b>2261J C</b>	Intensid.Corrente(A)	59,3	69,1	69,13
Velocidade	%	90	100	100
Vibrações	mm/s	5,8	7,2	6,9
abert. Válv. Caudal ind	%	70	90	78
Temp. A.R. bacia ind,	°C	25,2	28,4	26,1
<b>Dados Ambientais</b>				
Temp.Termóm. Húmido	°C	19,1	22,5	19,4
Humidade Relativa	%	53	75	63

**Tabela 16:** Dados do consumo elétrico dos ventiladores no período de verão (agosto de 2018), considerando diferentes temperaturas de bolbo húmido

<b>Células TR5</b>				
<b>2261J A</b>	Intensid.Corrente(A)	36,3	66,6	47,6
Velocidade	%	60	100	80
Vibrações	mm/s	2,2	2,8	2,7
abert. Válv. Caudal ind	%	70	70	70
Temp. A.R. bacia ind	°C	29,6	25,7	26,2
<b>2261J B</b>	Intensid.Corrente(A)	37,4	67,2	66,2
Velocidade	%	60	100	100
Vibrações	mm/s	2,6	3,3	3,7
abert. Válv. Caudal ind	%	100	100	100
Temp. A.R. bacia ind,	°C	29,9	25,8	25
<b>2261J C</b>	Intensid.Corrente(A)	51,9	69,6	52
Velocidade	%	80	100	80
Vibrações	mm/s	3,1	3,5	3,1
abert. Válv. Caudal ind	%	70	70	70
Temp. A.R. bacia ind	°C	28,2	26,2	25,8
<b>Dados Ambientais</b>				
Temp.Termóm. Húmido	°C	18,7	18,8	18,2
Humidade Relativa	%	71	74	43

De acordo os dados recolhidos para a avaliar do consumo elétrico dos ventiladores no verão, verificou-se que o consumo médio nominal nos dias em que os ventiladores operam a 100% foi inferiorer ao consumo máximo admissível de 80,9 A. Em 2020, o consumo médio foi de 6,9 A, e em 2018 foi de 67,8, conforme apresentado no relatório com dados característicos dos ventiladores fornecidos pela Esindus [44]. Podems concluir que o aumento da temperatura do termómetro humido e da húmidade relativa em 2020 contribuiu para o aumento do consumo eletrico. Com o ar mais quente e húmido, a torre de refrigeração torna-se menos eficiente em transferência de calor da água para o ar. Como resultado, os ventiladores têm de trabalhar mais intensamente para garantir que o ar continú a circular de forma adequada, o que leva ao aumento o consumo eletrico

**Tabela 17-** Parâmetros climáticos relacionados aos resultados dos ventiladores

	Dados fornecidos	Caso de estudo
<b>Velocidade (%)</b>	100	100
<b>consumos médios (A)</b>	67,8	69,4
<b>Temp.Termóm. Húmido (°C)</b>	18,8	22,5
<b>Humidade Relativa</b>	74	75

## 5. CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

Neste capítulo, descrevem-se as principais conclusões das etapas deste relatório de estágio, bem como a enumeração de algumas perspetivas futuras.

O estudo da performance térmica da torre de refrigeração concretizado nesta dissertação, foi realizado de uma forma que, em certos aspetos, como a determinação de uma nova curva característica da torre, se reconhece ter sido algo simplista, devido à metodologia utilizada e aos dados experimentais recolhidos, que não foram suficientes para determinar uma nova curva característica da torre de refrigeração.

Com base nos dados obtidos na realização da análise económica, conclui-se que os tratamentos mistos (dióxido de cloro e Hipoclorito de sódio) apresentam um menor custo económico total mensal de 1.013,00 €/mês e maior benefício para torre, quando comparado com o tratamento exclusivo (Hipoclorito de sódio), com um custo económico de 3.320,25

€/mês, quando ajustado com o seu fator de concentração real de 1,9, o que garantiu que os cálculos dos custos estivessem baseados em condições reais. Com base na literatura e nos relatórios da Aguaciclo, pode concluir-se que o tratamento misto foi uma boa escolha, tanto a nível de eficiência, como a nível económico comparado com o tratamento anterior. De facto, o tratamento simultâneo com os 2 biocidas permite aproveitar e somar as vantagens de cada um, demonstrando um efeito biocida mais completo e duradouro.

Relativamente ao estudo térmico da torre de refrigeração, podemos concluir que o caso de estudo apresenta um desempenho térmico relativamente inferior comparando com os dados de especificação. Embora a temperatura do termómetro húmido seja mais baixa no caso de estudo (21 °C vs 19,7 °C), o que poderia também favorecer o desempenho da torre de refrigeração, porém uma maior variação de temperatura (coling range) geralmente indica uma maior capacidade de dissipação de calor. A variação de temperatura nos dados de projecto (10 °C), indica que a torre está projectada para um desempenho de resfriamento mais eficaz, já que é capaz de reduzir a temperatura da água em intervalo de 10°C em comparação com o nosso caso de estudo (6,2°C)

Com base na comparação entre os consumos eléctricos dos ventiladores a partir dos dados fornecidos (figura 16) e obtidos (Figura 17), verificou-se um aumento ligeiro no consumo nominal dos ventiladores operando na sua capacidade máxima de 100%, mas mantendo-se o consumo máximo admissível segundo o relatório característico dos ventiladores. Pode-se concluir que a diferença no consumo eléctrico entre os anos de 2018 e 2020 reflete nas condições climáticas ligeiramente mais quentes e mais húmidas em 2020, o que exigiu mais

consumos dos ventiladores. A temperatura do termómetro humido de 22,5°C e humidade relativa de 75% em 2020 foram alguns dos factores mais influente, já que podemos considerar que limitou a eficiência do processo de troca térmica, aumentando o consumo eléctrico de 69,4A em 2020 e 67,8A em 2018. Embora a diferença de humidade relativa seja pequena nos dois casos (74% em 2018 e 75% em 2020), é importante referir que a humidade em 2020 também contribuiu para a diminuição da capacidade de troca térmica do sistema de refrigeração.

### 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Em relação às perspectivas futuras, centrar-se-ão nalguns pontos cuja conclusão não foi possível e em trabalhos que podem vir a ser implementados.

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Verificar se a margem de consumo se mantém, efetuando as mesmas leituras e análise num período de inverno com a torre a 100%;
- Verificar se existe material ou instrumentos adequados para a metodologia proposta para o estudo da performance térmica;
- A utilização de um modelo matemático simples para determinar  $K_a$ , e a relação L/G sem a necessidade de recorrer a software, em alternativa, recomenda-se a adoção de um modelo que aceita a utilização de instrumentos de medição relativamente simples e que são normalmente encontrados nas indústrias;
- Que se faça um novo estudo experimental com algumas condições de operação, tais como a manutenção constante do caudal de água e da carga térmica da fábrica. Para isto, deve-se primeiramente assegurar as condições de equipamentos, designadamente o sistema de distribuição de água livre de obstruções, o enchimento livre de obstruções, a aferição das condições climáticas, especialmente durante o teste, as condições climáticas devem ser estáveis.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] – Domingas Caculo Miguel, (2019) “Reciclagem das pulgas amoniacaís das fábricas de ácido nítrico na produção de amónio”.
- [2] – “Adp-fertilizantes”.[online]. [www.adp-fertilizantes.pt/](http://www.adp-fertilizantes.pt/). consulta efectuada aos 5/07/2020
- [3] - Marcelo Silveira Dantas Lizarazu, “Otimização Multiobjectivo Aplicada a Eficiência Energética de Torres de Resfriamento”
- [4]- Cooling Towers: “Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency”
- [5] - Renata Waik. “Sistema e processos químicos, montagem e avaliação de uma torre de arrefecimento para o uso de atividade para o ensino de graduação”
- [6] -<https://www.mechanicalbooster.com/2020/03/what-is-cooling-tower.html/induced-draft-cooling-tower>. Consulta efectuada aos 18/08/2020
- [7] – Saeed Ghoddousi, “Advancing Water Conservation in Cooling Towers through Energy-Water Nexus”
- [8] – Federal Energy Management Program cooling tower, (2011): “Understanding key components of cooling towers and how to improve water efficiency. U.S.Department of Energz”. Consultado aos 20/10/2022
- [9]- Legionella risk – identification and analysis. (2020). Health. “[www.health.vic.gov.au](http://www.health.vic.gov.au). Consultado efectuada aos 18/Agosto/2020.
- [10]- John C. Hensley “Cooling Tower Fundamentals Compiled from the knowledge and experience of the entire SPX Cooling Technologies staff. Edited by John C. Hensley Second Edition Published by SPX Cooling Technologies, Inc. Overland Park, Kansas USA
- [11] - Raquel Duarte, 2016. Material Escolar de Equipamento e Sistema Industrial, consulta efectuada aos 01/08/2020
- [12] – Ranjan, T.k. 2018. Cooling tower performance. M.Tech.(Thermal), RKDF College of Engineering, SRK University
- [13]- CTI. Site internet. Disponível : consulta efectuada em dezembro/2013.
- [14] – Perry, R. H.; Green, D. W. Perry’s. 1997 “Chemical Engineers Handbook. 7 th ed”
- [15] - CTI JOURNAL. 2014 “The Cooling Technology Institute”, Consulta efetuada: 20/04/2020
- [16] - TROVATI, 2004 Joubert. “Tratamento de Água de Resfriamento”. consulta efectuada aos 07/04/2020
- [17] -. Abdul Aziz Rohman Hakim1, 2020. “Analysis of Heat and Mass Transfer on Cooling Tower Fill”
- [18] – Valentín del Olmo Duarte “Simulación de Torres de Refrigeración Húmedas”. Proyecto Fin de Carrera Diseño-Universiad Carlos III de Madrid.
- [19] - MELLO, L. (2008). “Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento.

- [20] -Mario Llano-Restrepo, Robinson Monsalve-Reyes “Modeling and simulation of counterflow wet-cooling towers and the accurate calculation and correlation of mass transfer coefficients for thermal performance prediction” [online]. <http://www.elsevier.com/locate/ijrefrig>
- [21]- Serna-González, M.; Ponce-Ortega, 2010 “optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling towers”. Chemical Engineering Research and Design.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Perry's, 1997 “Chemical Engineers” Handbook. 7 th ed., McGraw Hill, Nova York,
- [22]- Amin Jodat “ An Evaluation of Heat and Mass Transfer in Open Counter Flow Cooling Towers” Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Iran.
- [23] – Seenivasan Kokilaramani, 2020 “Microbial influenced corrosion of processing industry by re-circulating waste water and its control measures”
- [24]- André Tranvancas, 2015 “Jornada Técnica Sobre Prevenção e Controlo de Legionella”.
- [25] - [online] <https://www.suezwatertechnologies.com/> consulta efectuada aos 06/01/2021
- [26]- Willem Faes, Steven Lecompte, “Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers”
- [27] - A. Bhatia, “HVAC Energy Conservation through Cooling Water Treatment”
- [28] – Technical Information for Cooling Towers Using Recycled Water 2009, [online]. <https://docslib.org/doc/8623095/technical>
- [29] – ADP fertilizantes. “Programas de Tratamentos de Água Acondicionamento Físico-químico Bacteriológico Acteriológico
- [30]- Sofia Buenaventura Crespo “Determinação de concentrações mínimas bactericidas em biofilmes do biocida cloreto de benzalcónico” Tese de Mestrado-Universidade de Lisboa, Faculdade de Medicina Veterinária.
- [31] – Boiler Chemicals “cooling water Treatment”, [online]. <https://www.bwater.co.uk/biocide-Consulta> efetuada aos 19/03/2021
- [32] – Gupta, A. & Muench,S.(2021). Advanced chlorine technology for cooling towers. Process Cooling. “<https://www.process-cooling.com/articles/87550>” – consulta efectuada aos 30/Janeiro/2021
- [33] – Anabela Carina Novais Ascensão, “Desenvolvimento de um método inovador para o controlo de biofilmes”. Tese de Mestrado-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto”.
- [34] - Pratima Bajpai, 2015 [online] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles> “The Control of Microbiological Problems
- [35] – Ana Luís Raminhos de Melo “Comparação da Eficiência entre NaOCl e ClO<sub>2</sub> no Tratamento da Água Utilizada no Circuito de Refrigeração Principal na Central Termoelétrica do Ribatejo”; Tese de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.
- [36] - Ginny Moore, Jimmy Walker,(2014) “in Biofilms in Infection Prevention and Control”, [online] <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/chlorine-dioxide>, , consulta efectuada aos 08/março/2021
- [37] - David F. Bridges, Alison Lacombe, and Vivian C. H. Wu, “Integrity of the Escherichia coli O157:H7 Cell Wall and Membranes After Chlorine Dioxide Treatment”, consulta efectuada aos 11/março/2021

- [38] – Scotmas Group, “ClO<sub>2</sub> Advantages over other oxidising biocides”, [online] <https://www.scotmas.com/chlorine-dioxide/clo2-advantages-over-other-oxidisingbiocides>. consulta efectuada a 12/Mar/2021
- [39]- “Disinfectants and Oxidants Guidance Manual (EPA 1999) and Water treatment: Principles and design (MWH 2005)”.
- [40]- Dupuy M, Mazoua S, Berne F, Bodet C, 2011 Jan “Efficiency of water disinfectants against Legionella pneumophila and Acanthamoeba”.
- [41] - João Artur Caron Pavão “Controle Microbiológico nas Águas de Resfriamento Industrial
- [42]- European Commission DG ENV / RIVM, (2003). “Supplement to the methodology for risk evaluation of biocides Harmonisation of Environmental Emission Scenarios for biocides used as preservatives for liquid cooling systems”
- [43] - Manual de Operação U.2261 Torre de Refrigeração 5
- [44] – Relatório sobre análise de testes à torre de refrigeração ADP-Fertilizantes Lavradio, verificado através do DCS

## 7. ANEXO

**Tabela 18:** fórmulas utilizadas para determinar as principais variáveis para o estudo do desempenho térmico.

CAUDAL MÁSSICO DE ÁGUA	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>Q_m = Q_v \times \rho_{\text{água}}</math> (Kg/h)</li> </ul>
COOLING RANGE	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R = T_{A.R. Q} - T_{A.R. F}</math> (°C)</li> </ul>
APPROACH	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>App = T_{A.R. F} - T_{\text{Termóm. Húmido}}</math></li> </ul>
RENDIMENTO	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R = \frac{R}{R - App} \times 100\%</math> (%)</li> </ul>
TAXA DE PERDA DE CALOR	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>Q = \dot{m} \times cp \times \Delta T</math> (Kj/h)</li> </ul>

