SUMÁRIO

RESUMO 10

ABSTRACT 11

1 - INTRODUÇÃO 12

2 - OBJETIVO DO PROJETO 14

2.1 - Objetivo Geral 14

2.2 - Objetivo Específico 14

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15

3. 1 – Histórico das Torres de Resfriamento 15

3.2 - Psicrometria 18

3.2.1- Ar Úmido 18

3.2.2 - Umidade Específica ou Absoluta 19

3.2.3 - Umidade Relativa 20

3.2.4 - Temperatura de Bulbo Seco 20

3.2.5 - Temperatura de Bulbo Úmido 20

3.2.6 - Temperatura de Ponto de Orvalho 21

3.2.7 – Entalpia Específica 21

3.2.8 - Grau de Saturação 21

3.2.9 - Volume Específico 22

3.3 -Torre de resfriamento 22

3.3.1- Classificação em Relação a Transferência de Calor 23

3.3.2- Classificação em Relação ao Enchimento da Torre de Resfriamento 27

3.3.2.1– Enchimento por Respingo 28

3.3.3- Classificação em Relação ao Fornecimento de Ar 29

3.3.4- Classificação em relação ao fluxo de ar com a corrente de água 33

3.4- Componentes básicos das torres de resfriamento mecânica 33
3.4.1– Carcaça 35
3.4.2-Sistema de Distribuição de Água 35
3.4.3 – Enchimento..... 36
3.4.4– Eliminadores de Gotas 37
3.4.5– Ventiladores e Motores 39
3.4.6– Bacia de Água Fria 39
3.4.7 – Venezianas 39
3.4.8– Serpentinas 40
3.5.1 - Teoria do Conjunto Fuzzy..... 41
3.5.2- Funções de Pertinência 42
3.5.3 - Variáveis linguísticas..... 44
3.5.4 - Base de regras..... 44
3.5.5- Fuzzyficação 45
3.5.6 - Inferência 46
3.5.7 - Defuzzyficação 46
3-6 - Computação fluidodinâmica (CFD)..... 46
3.6.1 - Equações do Movimento..... 47
3.6.2 – Definição da Geometria..... 48
3.6.3 – Geração da Malha Computacional 48
3.6.4 – Pré-Processamento 49
3.6.5 – Processamento 49
3.6.6– Pós-Processamento 50
4 – METODOLOGIA 51
4.1 - Planta de Troca Térmica 51
4.2 - Descrição do Equipamento 53
4.3- Modelagem física e matemática do processo 56

4.4- Energia Térmica a Rejeitada 57

4.5 - Coeficiente Global de Transferência 58

4.5.1- Coeficiente Global de Transferência de Calor –Método Clássico... 58

4.5.2- Coeficiente de Transferência de Calor Entre o Fluído Refrigerante e a Superfície Interna dos Tubos 59

4.5.3- Coeficiente de Transferência de Calor Entre a Superfície Externa dos Tubos e a Água 60

4.5.4- Coeficiente de Transferência de Massa 61

4.5.5 - Coeficiente Global de Transferência – Experimental 62

4.6.4 - Efetividade 62

4.7 - Computação Fluido Dinâmica (CFD) Aplicada a Torre de Resfriamento 68

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES 71

5.1 – Aplicação da Lógica Fuzzy na Tore de Resfriamento 75

5.1.1 - Variável Linguística de Entrada 75

5.1.2 - Vazão 76

5.1.3 - Umidade 77

5.1.4 – Temperatura da água dos Bicos Aspersores 78

5.1.5 - Temperatura do Ar 79

5.1.6 - Temperatura de Saída 80

5.1.7- Superfície de resposta 80

5.2- Aplicação da fluidodinâmica computacional 85

6 – CONCLUSÕES 90

7- REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 92

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Fotografia da primeira torre de resfriamento projetada por Blacke. 16
Figura 2 - Modelos antigos de torres de resfriamento..... 17
Figura 3 - Psicrômetro Giratório 21
Figura 4 - Relação entre as temperaturas der água e do ar em uma torre de resfriamento em contracorrente..... 24
Figura 5- Torre de resfriamento aberta..... 26
Figura 6 - Torre de resfriamento fechada ou combinada..... 27
Figura 7 - Esquema do funcionamento da torre tipo respingo. 28
Figura 8 - Funcionamento de um enchimento do tipo filme 29
Figura 9 - Esquema de funcionamento de uma torre de resfriamento atmosférica. 30
Figura 10 -Torre de resfriamento hiperbólica..... 31
Figura 11 - Principais componentes de uma torre de resfriamento de contato direto(evaporativa) 34
Figura 12 - Principais componentes de uma torre de resfriamento de contato indireto (não-evaporativa). 34
Figura 13 - Carcaça de uma torre de resfriamento retangular. 35
Figura 14 - Bicos aspersores 36
Figura 15 - Enchimento respingo em formato retangular. 37
Figura 16 -Enchimento do tipo filme. 37
Figura 17 - Funcionamento do eliminador de gotas. 38
Figura 18 - Eliminador de gotas 38
Figura 19 - Venezianas de uma torre de resfriamento. 40
Figura 20 - Comportamento da lógica clássica e Fuzzy..... 43
Figura 21 - Funções de Pertinência. 43
Figura 22 - Variáveis Linguísticas 44
Figura 23 -Domínio bidimensional e uma célula quadrilateral. 49
Figura 24 - Sistema de troca térmica utilizado para obter os dados do trabalho52
Figura 25 - Torre de resfriamento em circuito fechado..... 54
Figura 26 - Módulo tanque/ventilador..... 55
Figura 27 - Volume de controle para a construção do balaço de massa e energia. 56

Figura 28 - Implementação do sistema fuzzy 63

Figura 29 - Parâmetros e Condições de contorno utilizadas nas simulações.... 69

Figura 30 - Apresentação da malha hibrida da serpentina no mesh de 0,005. 29.a - Malha de uma região da serpentina, 29.b - Zoom da malha – da serpentina 70

Figura 31 - Vazão de Recirculação do sistema de 4 torres juntas no mês de outubro de 2018. 72

Figura 32 - Relação da temperatura de entrada X Calor Rejeitado X Efetividade Térmica 74

Figura 33 - Temperatura de Entrada X Temperatura de Saída 74

Figura 34 - Função de pertinência para temperatura da água de entrada na serpentina. 76

Figura 35 -Função de pertinência para vazão de entrada da água na serpentina 77

Figura 36 - Função de pertinência para umidade. 78

Figura 37 - Função de pertinência para temperatura da água nos bicos aspersores. 79

Figura 38 - Função de pertinência para temperatura do ar. 80

Figura 39 - Função de pertinência para temperatura da água de saída. 80

Figura 40 - Gráfico 3D temperatura de entrada da água(°C) X Vazão de entrada da água(m³/h). 82

Figura 41 - Gráfico 3D temperatura de entrada da água(°C) X Umidade(%). . 83

Figura 42 - Gráfico 3D temperatura de entrada da água(°C) X Temperatura da água dos bicos aspersores(°C). 84

Figura 43 -Gráfico 3D temperatura de entrada da água X Temperatura de ar. 85

Figura 44 - Representação da passagem do fluido no tubo..... 86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de Projeto 57
Tabela 2 - Funções de Pertinência.....65
Tabela 3- Regras para variáveis de vazão e temperatura de entrada da água.....66
Tabela 4- Regras para variáveis de temperatura da água nos bicos aspersores e a temperatura da água ao entrar na serpentina.....67
Tabela 5: Regras para variáveis de temperatura do ar na entrada com a temperatura de entrada da água na serpentina.....68
Tabela 6: Regras para variáveis Umidade relativa com a temperatura de entrada da água.....69
Tabela 7 - Dimensões da serpentina da Torre de Resfriamento Combinada.....69

LISTA DE NOTAÇÕES

P: Pressão da Solução

T: Temperatura (°C)

n: Número de mols da mistura

M: Massa da mistura (Kg)

M: Peso Molecular da mistura

R: Constante dos gases

V: Volume da mistura

P_a: Pressão parcial do ar seco

P_V: Pressão parciais do vapor d'água

y_V : Fração molar de vapor d'água na mistura de ar seco e vapor d'água

W: Umidade específica ou absoluta

M_a: Massa de vapor d'água

M_V: Massa de ar seco

P_R : Pressão relativa

P_{sat} : Pressão de vapor da misturada saturada

T_{PO}: Temperatura de ponto de orvalho

H: Entalpia

μ: Grau de saturação

C_{pa}: Constante do valor do calor especifico

ρ : Densidade

$\vec{V}$: Velocidade do fluido

q_x'' : Fluxo térmico(W/m^2)

k : Condutividade térmica (W/(m.K)),

Q: Quantidade de calor (cal ou J)

C: Calor específico (cal/g°C ou J/kg°C)

Q_L : Calor latente (cal ou J)

Q: Calor a ser removido (Kcal/h)

$\dot{m}$: Vazão mássica de recirculação do fluido refrigerante (Kg/h)

h: Entalpia do fluido refrigerante (Kcal/Kg)

$\dot{c}_p$: Capacidade calorífica específico do fluido refrigerante (Kcal/Kg*°C)

ΔT: Variação de temperatura do fluido refrigerante (°C)

$\dot{m}_{ar}$: Vazão mássica de ar seco que passa através do resfriador (kg/s)

$h_{ar,sai}$: Entalpia de saída do ar (kJ/kg)

$h_{ar,ent}$: Entalpia de entrada do ar (kJ/kg)

$\dot{m}_{águab}$: Vazão mássica da água de reposição (kg/s)

$h_{águab}$: Entalpia da água na bacia (kJ/kg)

$i_{r,sai}$: Entalpia de saída do fluido refrigerante (kJ/kg)

$i_{r,ent}$ Entalpia de entrada do fluido refrigerante (kJ/kg)

i_{wr} Entalpia da água de reposição (kJ/kg)

k_T: Condutividade térmica do tubo (W/(m.ºC))

d_{int} : Diâmetro interno do tubo (m)

d_{ext}: Diâmetro externo do tubo (m)

d_m: Diâmetro médio do tubo (m)

L: Espessura do tubo (m)

h_{int}: Coef. transferência de calor entre o fluído refrigerante e a superfície interna do tubo [W/(m².ºC)]

h_{ext}: Coef. transferência de calor entre a superfície externa dos tubos e a água (W/(m².ºC))

Nu_r: Número de Nusselt do fluído refrigerante

Re_r: Número de Reynolds do fluído refrigerante

Pr_r: Número de Prandtl do fluído refrigerante

Re_r : Número de Reynolds do fluído refrigerante

Pr_r: Número de Prandtl do fluído refrigerante

M_r : Viscosidade dinâmica do fluído refrigerante (N.s/m²)

μ_w: Viscosidade dinâmica da água (N.s/m²)

μ_{ar} : Viscosidade dinâmica do ar (N.s/m²)

u_0: Velocidade do ar na menor seção transversal (m/s)

k_w: Condutividade térmica da água (W/(m.ºC))

A : Área de troca térmica [m²]

$i_{TBU,ent}$: Entalpia do fluído refrigerante na temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do trocador (kJ/kg)

RESUMO

Atualmente as empresas investem em tecnologias sofisticadas com foco na obtenção de processos produtivos menos onerosos e mais eficientes. Visto isso as ferramentas computacionais vêm ganhando espaço devido ao seu baixo custo de implantação, alta precisão e eficiência em reprodução de condições operacionais complexas, para avaliar as principais variáveis e as interferências dessas no funcionamento de equipamentos. Esse projeto, portanto, objetivou por meio da ferramenta fluidodinâmica computacional e a lógica fuzzy respectivamente analisar o funcionamento de uma serpentina e a torre de resfriamento combinada. Pela lógica fuzzy, observou-se que a torre opera acima da sua capacidade de projeto em relação a vazão de água desmineralizada que entra na serpentina, todavia devido as demais variáveis estarem abaixo das especificações de projeto, a temperatura de saída somente foi acima da permitida em um ponto. A planta não apresenta eficiência dentro das objetivadas em seu projeto, visto que o *range* de temperatura máximo seria 15°C, e este não foi observado, sendo um range máximo obtido de 9°C. Pela computação fluidodinâmica observou-se a malha híbrida se adequou a geometria e apresentou uma análise eficiente do sistema real.

Palavra Chave: Torre de resfriamento, Lógica Fuzzy e Computação Fluidodinâmica

ABSTRACT

Today, companies invest in sophisticated technologies focused on obtaining less costly and more efficient production processes. Given that computational tools have been gaining space due to their low implementation cost, high precision and reproduction efficiency of complex operating conditions, to evaluate the main variables and interferences of these in the operation of equipment. This project, therefore, objected through the computational fluid dynamics tool and the fuzzy logic respectively to analyze the operation of a serpentine and the combined cooling tower. By fuzzy logic, it was observed that the tower operates above its design capacity in relation to the flow of demineralized water that enters the serpentine, however due to the other variables being below the design specifications, the output temperature was only above the allowed at one point. The plant does not present efficiency within the objectives in its project, since the maximum temperature range would be 15 ° C, and this was not observed, being a maximum range obtained of 9 ° C. By the fluid dynamics computation it was observed the hybrid mesh adapted to the geometry and presented an efficient analysis of the real system.

Keyword: Cooling Tower, Fuzzy Logic and Fluid Dynamics

1 - INTRODUÇÃO

A segunda guerra mundial, trouxe com seu fim avanços tecnológicos na área industrial, com equipamentos robustos e produções em escala maior (CAUSA OPERARIA, 2018). Com o passar dos anos e a acedência da globalização, as plantas industrias evoluíram e os equipamentos aumentaram a sua capacidade unitária, de modo a obter um melhor desempenho da fábrica com menor custo operacional (ANTONIO *et al.*, 2005). Em muitas plantas industrias há a geração de energia térmica, devido a vários fatores, como processos que necessitam de fornecimento de energia, excesso de horas de trabalho do equipamento e das reações produzidas no processo. Muitas vezes esta energia deve ser extraída e dissipada, para isso as indústrias utilizam a água como um dos elementos de resfriamento de processos e equipamentos (KULKARNI, 2018).

A água é amplamente empregada para resfriamento, pois além de sua abundância no planeta ela apresenta um calor específico relativamente elevado, tornando-a própria para as operações de resfriamento (JASIULIONIS, 2012). Após retornar do processo está água apresenta temperaturas mais elevadas, devido a absorção de energia térmica gerada em excedente no processo. Descartar uma água oriunda de resfriamento em um corpo d'água acarreta sérios impactos a fauna e flora aquática, tais como mortandade de seres vivos e desequilíbrio no ecossistema, tornando-se assim esta opção inviável do ponto de vista ambiental (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

A industrias buscam incessantemente economia operacional e produções sustentáveis, logo torres de resfriamento presentes em algumas estações de tratamento de água, são equipamentos adotados para remover a carga térmica de grandes volumes de água (CYCLOS ÁGUAS, 2018). São dispositivos econômicos e ambientalmente limpos de resfriar a água que será reutilizada no processo de resfriamento em plantas operacionais (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2016). Elas também podem ser aplicadas em restaurantes, grandes hotéis e shoppings(LEO SAMUEL; NAGENDRA; MAIYA, 2018).

A escassez da água atingiu diversos ramos dos setores industriais, associada ao seu uso em grandes volumes nas indústrias de alimentos, bebidas, de obtenção de energia elétrica, siderúrgicas, petroquímicas, dentre outras, seja de forma direta para obtenção do produto final, ou de maneira indireta, por exemplo no resfriamento(ANA, 2019). Logo, a utilização da água acarreta de maneira direta um aumento considerável no valor do produto final. As empresas estão investindo em ferramentas computacionais, que

auxiliam nas avaliações da eficiência e problemas operacionais das plantas, para que o consumo de água diminua (OIKAWA, 2012).

De acordo Muñoz e colaboradores, (2015) *softwares* vem adquirindo um papel cada vez mais importante na forma como a indústria funciona, isso na parte de capacidades e funcionalidades críticas para empresas, em diferentes campos de atuação. De acordo Gejdoš, (2015) a vantagem de se fazer uso de ferramentas estatísticas é que elas identificam os efeitos dos processos que causam variabilidade não naturais que resultam em erros e abaixa a qualidade nos processos industriais e materiais (CENGEL; CIMBALA, 2017).

As técnicas computacionais auxiliam na avaliação da eficiência energética das plantas industriais (WANG; ZHANG; *et al.*, 2018). Na literatura, observasse que apresentam baixo custo de implementação, nota-se resultados excelentes, além de ajudar nas tomadas de decisões(MALISKA, 2004). Para aplicação destas são necessárias coletas de dados qualitativos e quantitativos suficientes para descrição do processo e implementação em *softwares* para obtenção de resultados satisfatórios (NASCIMENTO, 2014). Logo, devesse realizar estudos frequentes para diminuir erros operacionais e aumentar a eficiência das torres de resfriamento. Sendo essa relacionada com a troca térmica entre a água e a massa de ar que passa no interior da torre (ÇENGEL; CIMBALA, 2007)

A ferramenta computacional que analisa e prevê o comportamento fluidodinâmico é a ferramenta numérica conhecida por *Computational Fluid Dynamics* (CFD), onde a mesma possibilita a análise e o entendimento do comportamento de escoamentos de sistemas multifásico, como o caso da serpentina da torre de resfriamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Uma outra ferramenta computacional utilizada é a lógica Fuzzy, que atualmente é muito emprega visto, que não utilizada a lógica tradicional que possibilita somente a utilização binária, de 0 ou 1 (DIAS, 2010). Ela é uma ferramenta que utiliza uma variação em um dado intervalo, logo sua aplicação apresenta uma varredura completa de todos os dados utilizados sem deixar alguma região sem analise (DIAS, 2010).

A utilização de sistemas que analisam e preveem o comportamento das torres de resfriamento, são importantes para sanar problema operacionais e são fundamentais para tomadas de decisões, otimização operacional e energética de um sistema de resfriamento.Deste modo, este trabalho tem como objetivo aplicar duas ferramentas

computacionais na simulação dos fenômenos ocorridos em uma torre de resfriamento combinado.

2 - OBJETIVO DO PROJETO

2.1 - Objetivo Geral

Aplicar técnicas da Fluidodinâmica Computacional (CFD) e da Lógica Fuzzy na simulação dos fenômenos ocorridos em uma torre de resfriamento combinado.

2.2 - Objetivo Específico

Para tal, podem-se elencar os objetivos específicos no estudo de uma torre de resfriamento de contato indireto:

- ✓ Aplicar as técnicas da lógica fuzzy para avaliar as variáveis de temperatura de entrada e saída;
- ✓ Realizar os balanços pertinentes aos cálculos de taxa de evaporação;
- ✓ Realizar o monitoramento das principais variáveis pertinentes a operação da torre de resfriamento.
- ✓ Aplicar técnicas de fluidodinâmica computacional para avaliar o perfil de temperatura e vazão em uma serpentina de uma torre de resfriamento combinada;

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. 1 – Histórico das Torres de Resfriamento

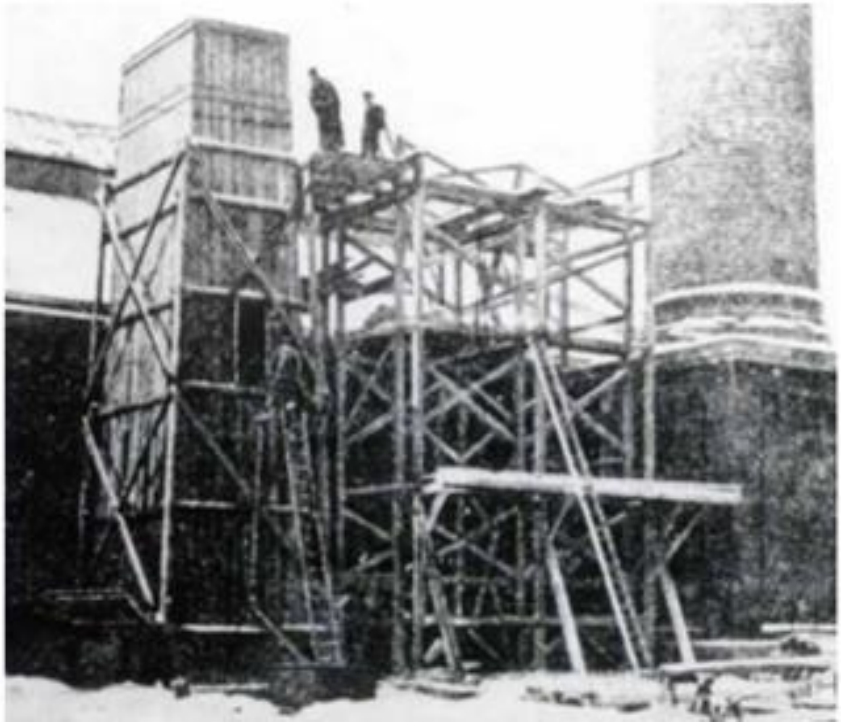
O Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA em sua resolução de número 430, de 13 de maio de 2011, específica as características de um efluente com condições para ser descartado em um corpo d'água, dentre os parâmetros físico-químicos, foi mensurado o da temperatura. Para um efluente ser lançado em um corpo d'água sua temperatura deve estar abaixo de 40°C, porém no ponto de despejo e de mistura a temperatura não pode exceder 3°C, do corpo d'água receptor(CONAMA, 2011). Para atender esta legislação as industrias atualmente apresentam equipamentos sofisticados em estações de tratamento de água. Todavia, para que se chegasse a este nível de tecnologia houve uma evolução de processos e equipamentos(CARVALHO; BARCELLOS; HENTZ, 2016)

No passado efluentes com elevada carga térmica, absorvida em processos de resfriamento, eram destinados a grandes lagos, lagoas e canais, que eram construídos artificialmente. O efluente ficava acondicionado por um tempo variável até atingir a temperatura almejada e determinada de acordo com a especificidade de cada indústria. A demanda de área era grande, pois é o contado do ar com efluente que ocasiona o resfriamento, logo quanto maior a área de contado ar/água, menor seria o tempo de resfriamento(SAMPAIO, F. S., 2013). Com este empecilho, foi incorporado a estes lagos, lagoas e canais, pulverizadores com objetivo de aumentar a área de contato da água com o ar atmosférico, diminuindo assim a demanda por área e melhorando a taxa de resfriamento. A inserção de pulverizadores eliminou a necessidade da troca térmica ocorrer somente via calor sensível e da área de troca ocorrer somente na camada superior dos lagos, lagoas e canais (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981).

A pulverização realizada para baixo obteve resultados de temperaturas menores que as pulverizações realizadas no sentido oposto. Este processo começou a apresentar limitação pelo aumento do consumo de água, para resfriamento de processos e equipamentos (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010). Após a revolução industrial com a operação de equipamentos de grande porte e o superaquecimento de tais sistemas, levou a indústria a buscar aperfeiçoamentos nas técnicas de resfriamento das plantas operacionais (DELTA, 2015). Para suprir estas necessidades, há aproximadamente 120 anos quando surgi a primeira torre de resfriamento industrial(CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981).

Muitas divergências existem sobre o local e o construtor da primeira torre de resfriamento. Alguns estudiosos afirmam que a primeira torre foi projetada por George Stocker em 1898, sendo ela uma torre de resfriamento do tipo atmosférico construída a base de madeira, com paredes em persianas de madeira implantada em volta de um tanque de atomização. Em versões opostas, outros estudiosos afirmam que a primeira torre de resfriamento foi projetada pelo engenheiro alemão Hans-Joachim Blacke, em 1894, com altura de 12 m e seria do tipo atmosférico (Figura1) e foi construída pela empresa Elektrizitäts AG de Nuremberga (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010).

Figura 1 - Fotografia da primeira torre de resfriamento projetada por Blacke.

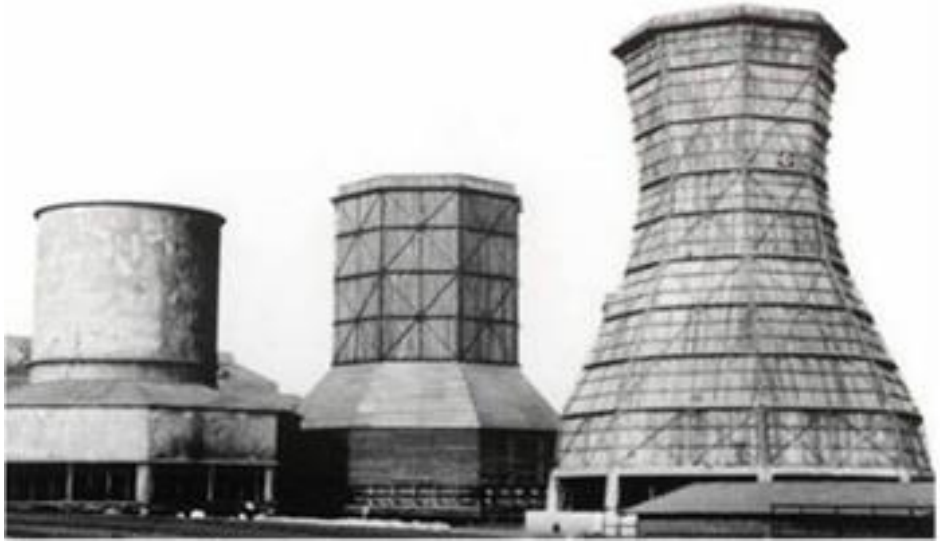


Fonte: adaptado de Sampaio, 2010

Após o aparecimento das torres evaporativas do tipo atmosférica, surgiu as torres hiperbólicas, ambas operam por tiragem natural e estão implantadas em centrais termoelétricas, a Figura 2 ilustra modelos antigos de torres de resfriamento de tiragem natural. Na década de trinta surgiram as primeiras torres de resfriamento evaporativas com tiragem de ar mecânica induzida ou forçada(SAMPAIO, F. S., 2013). Após a segunda guerra mundial as torres atmosféricas tornaram-se pouco utilizada, todavia as hiperbólicas são amplamente estudadas e apresentam atualmente grandes avanços tecnológicos. Em relação a torres não-evaporativas (seca) e as torres híbridas estas

apresentam registros de implantação nas décadas de 70 e 80 respectivamente (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010). Em 1964 foi construído nos EUA torres em módulos ou series com objetivo de aumenta a capacidade das plantas operacionais.

Figura 2 - Modelos antigos de torres de resfriamento



Fonte: Adaptado de Sampaio, 2013

Com a evolução dos estudos da hidrodinâmica e da mecânica, as técnicas de resfriamento foram aperfeiçoadas, com a inserção de ventiladores para aumentar a taxa de circulação e remoção da dependência somente das correntes de ar naturais(SAMPAIO, F. S., 2013). O foco central de todos os estudos e evoluções para resfriamento de águas fundamenta-se em aumentar o tempo de contato do ar com a água e elevar a eficiência da troca térmica (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981).

No Brasil a primeira torre de resfriamento foi construída em 1905 em madeira, pela empresa Alpina. Nesta mesma época Carl Munters desenvolveu e patenteou os enchimentos tipo filme para torres, objetivando aumento na taxa de transferência de calor (SAMPAIO, F. S., 2013)

Atualmente, o mercado de torres de resfriamento é dominado pelo Estados Unidos e Europa(WANG; LYU; *et al.*, 2018). Existem diversificados modelos de torres, desde torres que atendam uma demanda exorbitante a baixíssimas vazões. Há necessidade constante de projetar torres de resfriamento que envolvam menor impactos ambientais.(OLIVEIRA, V. F., 2010)

Modernos sistemas de torres são projetados para recuperar 98% de água, que será recirculada ao processo levando ao aumentado do número de ciclos de

concentração(MENNEKES, 2018). Logo, sistemas de filtração avançados que melhoram as características físico-química da água, eliminando substâncias nocivas e acúmulo de minerais na água, são amplamente utilizados, evitando que gotículas que evaporam para a atmosférica não ocasionem impacto ambiental (DELTA, 2015).

3.2 - Psicrometria

A palavra psicrometria deriva de psicrômetro, criado em 1825 por *Ernest Ferdinand August* com objetivo de nomear o termômetro de bulbo úmido que ele utilizava em suas pesquisas (POZZOBON, 2015). A psicrometria é o ramo da ciência destinado ao estudo das propriedades físicas e termodinâmicas da mistura entre gases e vapor d'água (SAMPAIO, F. S., 2013). O conhecimento psicrométrico é essencial para analisar a eficiência e projetar equipamentos como ar condicionado, torres de arrefecimento (torres de resfriamento) e demais processos industrias que necessitem de controle do conteúdo de vapor no ar (SHAPIRO *et al.*, 2005). A modelagem de um processo de torres de resfriamento envolve a manipulação de diversas variáveis psicrométricas (WAKI, 2009).

Os principais parâmetros estudos na psicrometria são: umidade específica, umidade absoluta, umidade relativa, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, Temperatura de ponto de orvalho, entalpia específica, grau de saturação, volume específico (POZZOBON, 2015). Estas propriedades serão abordadas mais profundamente a seguir.

3.2.1- Ar Úmido

A mistura binária de ar seco e vapor d'água é definida pelo termo ar úmido, onde o ar seco é considerado como um componente puro. Avaliando o comportamento da mistura total e de cada componente da mistura eles se comportam como gases ideais no estado aqui considerado (POZZOBON, 2015).

Um sistema que consiste em ar úmido ocupando um volume V à pressão de mistura P e à temperatura T. Admite-se que a mistura total obedece à equação (3.1) dos gases ideais. Onde n , m e M representam respectivamente o número de mols, massa e a massa molecular da mistura, e $n = \frac{m}{M}$ é utilizado para relacionar a massa molar e a massa da mistura (SHAPIRO *et al.*, 2005)

$$P = \frac{n\bar{R}T}{V} = \frac{m(\frac{\bar{R}}{M})T}{V} \tag{3.1}$$

A pressão da mistura é a soma das pressões parciais do ar seco e do vapor d'água. A pressão total da mistura, P, é igual a soma das pressões parciais, equação (3.2), que cada gás exerceria se ocupasse isoladamente o volume do reservatório, V, que contém a mistura e estivesse a temperatura, T da mistura. Isso é conhecido como ***modelo de Dalton*** (SAMPAIO, F. S., 2013)(SHAPIRO *et al.*, 2005)**.**

$$P = P_a + P_V \tag{3.2}$$

Onde e P_a e P_V representam respectivamente a pressão parcial do ar seco e do vapor d'água, estas pressões são expressas pelas equações (3.3 e 3.4) dos gases ideais.

$$P_a = \frac{n_a \bar{R} T}{V} = \frac{m_a (\frac{\bar{R}}{M_a}) T}{V} \tag{3.3}$$

$$P_V = \frac{n_V \bar{R} T}{V} = \frac{m_V (\frac{\bar{R}}{M_V}) T}{V} \tag{3.4}$$

Normalmente a concentração de vapor d'água é inferior à de ar seco, realizando a manipulação matemática $\frac{P_V}{P}$, obtemos a equação (3.5).

$$P_V = y_V P \tag{3.5}$$

Onde, $y_V = \frac{n_V}{n}$ é a fração molar de vapor d'água na mistura de ar seco e vapor d'água,

A concentração de vapor d'água no ar úmido vária de zero, no ar seco, a um máximo que é dependente da pressão e da temperatura, quando a mistura é saturada (SHAPIRO *et al.*, 2005).

3.2.2 - Umidade Específica ou Absoluta

A umidade específica (W), equação 3.6, é definida como a razão entre a massa de vapor d'água e a massa do ar seco do volume em estudo (SHAPIRO *et al.*, 2005).

$$W = \frac{\text{massa de vapor d'água}}{\text{massa de ar seco}} = \frac{m_V}{m_a} \tag{3.6}$$

Frequentemente costumasse expressar a umidade em termos de pressões parciais e pesos moleculares, equação 3.7.

$$W = \frac{m_V}{m_a} = = \frac{M_V\, p_V}{M_a p_a} \tag{3.7}$$

3.2.3 - Umidade Relativa

A composição do ar úmido pode também ser descrita em termos de umidade relativa, que é a razão entra a pressão parcial de vapor na mistura gás-vapor e a pressão de vapor da mistura saturada(P_{sat}), do líquido na temperatura do gás, expressa pela equação (3.8) (ARAUJO, 2015).

$$P_R = \left[\frac{X_V}{X_{sat}}\right]_{t,p} = \left[\frac{P_V}{P_{sat}}\right]_{t,p} \tag{3.8}$$

A umidade relativa expressa quanto o ar está próximo da saturação. Um ambiente com o ar saturado terá uma umidade relativa de 100%. O vapor d'água que é incorporado após a saturação do ar irá ser condensado (WAKI, 2009).

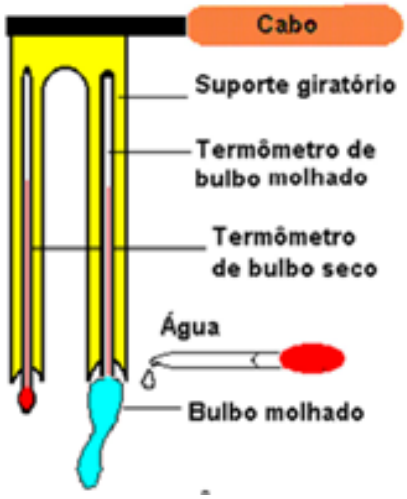
3.2.4 - Temperatura de Bulbo Seco

A temperatura de bulbo seco é a temperatura da mistura de ar e vapor d'Água obtida pela medição com um termômetro convencional. Esta variável não será influenciada pela umidade absoluta ou relativa do ar (SAMPAIO, F. S., 2013).Frequentemente o termômetro de bulbo seco e colocado próximo ao de bulbo úmido para forma o instrumento chamado psicrômetro (SHAPIRO *et al.*, 2005).

3.2.5 - Temperatura de Bulbo Úmido

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura da mistura de ar-vapor, atingida por um processo de resfriamento evaporativo. O calor será dissipado através da evaporação, gerando assim o resfriamento, logo há a diminuição da temperatura da mistura ar-vapor(JUNIOR, I. CA. A., 2014). O método de medição desta temperatura ocorre com um termômetro convencional, onde o bulbo é envolto por um pedaço de tecido (Figura 3), geralmente gaze, embebido em água destilada e exposto a uma corrente de ar não saturada. Este termômetro é acoplado em um psicrômetro giratório. Este aparelho é composto por dois termômetros, sendo eles um de bulbo úmido e o outro de bulbo seco, ambos serão acoplados a um suporte giratório. A plataforma inicia as rotações e a temperaturas serão consideradas após a finalização das oscilações visualizadas(JASIULIONIS, 2012).

Figura 3 - Psicrômetro Giratório



Fonte: adaptado de Jasiulionis, 2012

3.2.6 - Temperatura de Ponto de Orvalho

A temperatura de ponto de orvalho (T_{po}) é a temperatura onde iniciasse a condensação quando ocorre a diminuição da temperatura a uma pressão constante do ar. Com a diminuição da temperatura ocorre perda de vapor d'água por condensação, todavia a umidade relativa permanece 100%.(SAMPAIO, F. S., 2013)

3.2.7 – Entalpia Específica

A entalpia (H) é uma propriedade termodinâmica definida como a soma da energia interna de um sistema, (U) e do produto entre a pressão (P) e o volume (V) do sistema, expressa pela equação 3.9:

$$\mathrm{H} = \mathrm{U} + \mathrm{PV} \tag{3.9}$$

3.2.8 - Grau de Saturação

O grau de saturação é definido como a razão entre a umidade absoluta e a umidade absoluta quando o ar está no estado de saturação (W_{sat}). Este cálculo é realizado para pressão e temperatura e pressão constantes, equação 3.10 (POZZOBON, 2015).

$$\tilde{\mu} = \left[\frac{W}{W_{sat}}\right]_{t,p} \tag{3.10}$$

3.2.9 - Volume Específico

O volume específico é o volume ocupado por unidade de massa (WAKI, 2009).

3.3 -Torre de resfriamento

Dentre os diversos setores da indústria, alguns apresentam maior consumo de água, como na utilização para dissipar energia térmica produzida em equipamentos durante sua operação (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011). Para controle destes processos há a necessidade de remoção desta energia térmica excedente. Todavia, por questões econômicas as indústrias utilizam este calor para realizar outros processos na sua planta operacional, que necessitem de energia térmica. Após esgotadas todas as formas de reutilização desta energia, ela deve ser dissipada para o ambiente, onde os meios mais utilizados para tal função são o ar e a água (WAKI, 2009). Este meio é o mais empregado como agente de transporte da carga térmica produzida em plantas industriais devido a suas propriedades físico-químicas e abundância (NUNES, 2014).

Torres de resfriamentos são equipamentos utilizados para remoção de carga térmica presente na água para o ar atmosférico, seu princípio de funcionamento está baseado na troca simultânea de energia térmica e massa (MELLO, 2008).

Este tipo de equipamento dissipa energia térmica via calor sensível e latente (MARQUES, 2016). A maior contribuição para o resfriamento da água quente, cerca de 80%, ocorre quando a água perde calor latente para atmosfera, através da evaporação, que consiste na transferência de massa da fase líquida (água) para fase gasosa (ar) (SOUZA; FLORES; GRACIELLE, 2014). Há também uma contribuição pequena, cerca de 20 %, do resfriamento irá ocorrer pela perca de calor sensível, através do delta de temperatura entre o ar e a água (MARQUES, 2016).

As torres de resfriamento na indústria auxiliam na redução de custos operacionais e fatores ambientais, pois uma caraterística importante é a baixa reposição de água que ocorre somente devido a perca de água ocasionada pela evaporação, purga e arraste (OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012). As purgas devem ocorre para evitar a concentração de sais que podem ocasionar incrustações, corrosões do equipamento e proliferação de micro-organismos, estes fatores diminuem a eficiência da torre (MELLO, 2008). O arraste ocorre através da perda de água, na forma de névoa, que é carregada para fora da torre através do vento (MAIA, 2013).

A eficiência da planta de resfriamento está associado diretamente a duas variáveis que merecem destaque, a temperatura de saída da água resfriada deve estar próxima a de

bulbo úmido e a garantia da remoção da carga térmica do processo deve ser efetiva (MELLO, 2008). Para que processos de resfriamento se tornem mais eficientes, atualmente existem diversos tipos de torres e muitos estudos acadêmicos foram e estão sendo realizados com objetivo de alcançar resultados de troca térmica com variações de temperatura maior com menor tempo de retenção hidráulica e em menor área para construção (RODRIGUES, 2018).

Existem diferentes tipos de torres de resfriamento, cada carga térmica deve ser devidamente estudada e quantificada para escolha do melhor tipo a ser utilizado (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011).

A torres de resfriamento são classificadas em relação a algumas variáveis: método de transferência de calor, tipo de preenchimento ou recheio, fornecimento de ar e o fluxo de ar em relação ao processo de transferência da água (VENKATESH, 2015).
Classificação da Torres de Resfriamento:

- **Relação a Transferência de Calor:**
  - ✓ Úmida(evaporativo);
  - ✓ Seca(não-evaporativo)
- **Relação ao Enchimento:**
  - ✓ Por respingo;
  - ✓ Por filme.
- **Relação ao Fornecimento de Ar:**
  - ✓ Tiragem Natural;
  - ✓ Tiragem Mecânica
- **Relação a Corrente de Ar com a Corrente de Água:**
  - ✓ Fluxo cruzado;
  - ✓ Contracorrente.

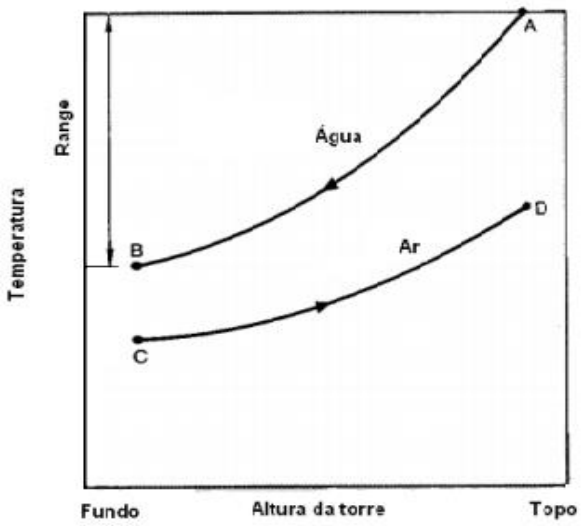
3.3.1- Classificação em Relação a Transferência de Calor

A transferência de energia térmica ocorre pelo mecanismo de gradiente de temperatura e de concentração. No sistema ar-água, a transferência de calor ocorre na interface água-ar, e posteriormente para o ar. Está carga térmica e denominada de calor sensível, resultante do gradiente de temperatura e responsável pelo aumento da temperatura do ar (QURESHI; ZUBAIR, 2007). A menor temperatura que pode se obter na saída do fluido é a temperatura de bulbo úmido do ar de entrada. Todavia, isto não ocorre na prática, pois seria necessário que o ar infiltrado na torre entrasse em contato

com toda a água e que este contato ocorresse em maior tempo, o que necessitaria de uma torre com alturas superdimensionadas. Logo as torres são dimensionadas para que a temperatura de saída da água em relação a temperatura de bulbo úmido obtenham aproximações, sendo este valor normalmente maior que 3°C. (WAKI, 2009)

As curvas da figura 4 expressa o comportamento da temperatura da água, que diminui, e do ar, que aumenta. A diferença entre a temperatura de entrada e saída da água na torre de resfriamento é denominada de range. A diferença de temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre e a temperatura da água fria é denominada de *approach*. Para um dimensionamento e análise de desempenho eficaz é necessário avaliar as variáveis, vazão de entrada de água quente, *range*, *approach* (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010).

Figura 4 - Relação entre as temperaturas der água e do ar em uma torre de resfriamento em contracorrente.



Fonte: adaptado de SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010

As torres de resfriamento são classificadas em relação a transferência de calor por evaporação (úmida) e convecção (seca). A torre de resfriamento úmida tem como princípio de funcionamento a evaporação. O resfriamento evaporativo ocorre devido uma parcela da corrente água evaporar, quando em contato com uma corrente de ar, acarretando assim a diminuição da temperatura da água (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010).

Neste caso a água está em contato direto com ar atmosférico o que proporciona a transferência de massa e energia térmica simultaneamente. O ar na saída apresentara maior temperatura e úmida, quase próxima a saturação (JUNIOR, R. C. DE L., 2011).

Estes tipos de torres são empregados amplamente nas indústrias, pois elas permitem coeficientes de transferência de calor elevadas (WAKI, 2009).

As torres de resfriamento a seco, a dissipação de calor não irar por convecção, ou seja pela transferência de calor sensível (LÖFGREN, 2015). No resfriamento não-evaporativo, o fluido quente passa internamente a tubulações, e a energia térmica é dissipada para a tubulação e atrás do calor sensível para o ar que é aspirado por ventiladores, ou seja é um trocador de calor indireto (JUNIOR, R. C. DE L., 2011). A união entre a transferência de calor a seco e úmida é chamada de resfriamento combinado (*Wet-dry cooling towers*)(SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011)

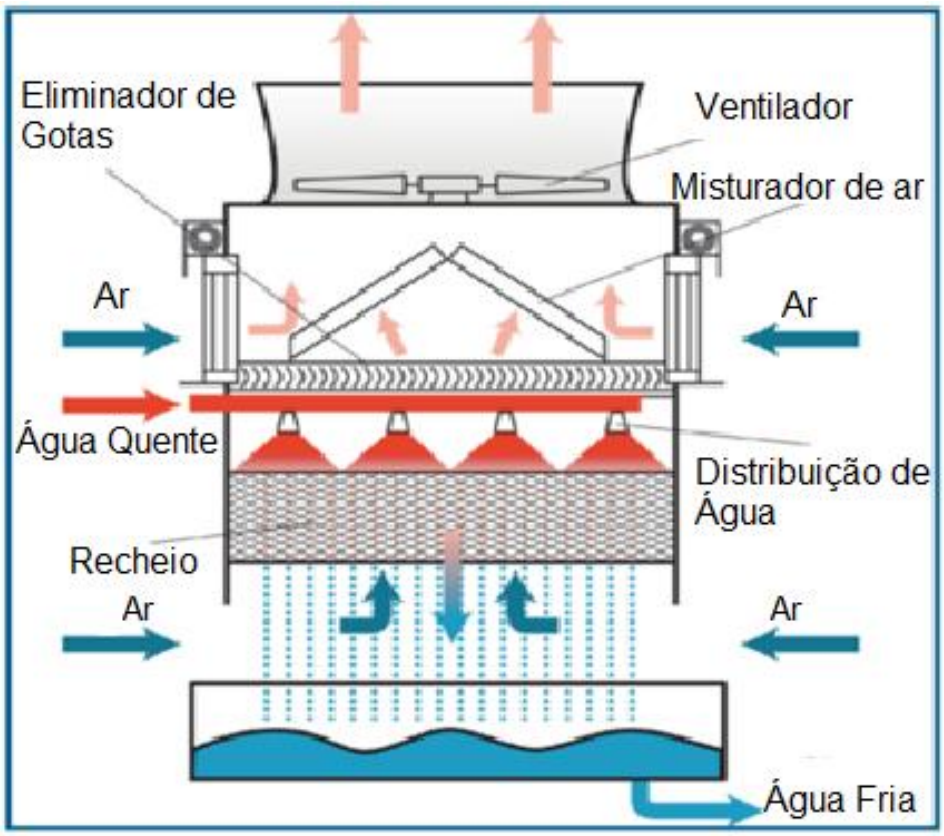
3.3.1.1- Sistema de Torres de Resfriamento Aberto (wet cooling tower)

As torres de resfriamento em circuito aberto são assim classificadas pois o fluido quente entra na torre onde é aspergida e percorre por um labirinto, denominado enchimento, até a base da torre, pela ação da gravidade. Este labirinto irá proporcionar um maior contato da água quente com o ar frio, onde resultara em um ar aquecido e uma pequena parte da água ira evaporar, o restante irá cair da bacia de recolhimento na temperatura necessária para recirculação na planta operacional para absorver mais calor, o ar quente em conjunto com a água evapora é dissipada para atmosfera.(OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012).

Este tipo de torre (Figura 5) apresenta como componentes estruturais, o sistema de distribuição de água, retentor de gotas, carcaça e enchimento. O sistema de distribuição de água tem por finalidade uma distribuição homogênea sobre o empacotamento, este tem como objetivo maximizar a área de contato da água com o ar e assim proporcionando a evaporação e transferência de energia térmica (KARA, 2010). A água que foi utilizada em um determinado processo industrial de resfriamento volta para a torre com alta carga térmica absorvida e é distribuída uniformemente no topo da torre. As plataformas de distribuição podem ser constituídas de bicos pulverizadores ou somente de uma série de furos que irá aspergir a água quente sobre a estrutura da torre (WAKI, 2009).

Comercialmente existe diferentes geometrias de tipos de enchimento. Após a passagem da água pela torre ela cai em cascata em uma bacia coletora que fica localizada na parte inferior da torre. Esta água fria pode ser bombeada para um novo destino, no processo industrial de onde foi oriunda, para resfriamento. (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011)

Figura 5- Torre de resfriamento aberta



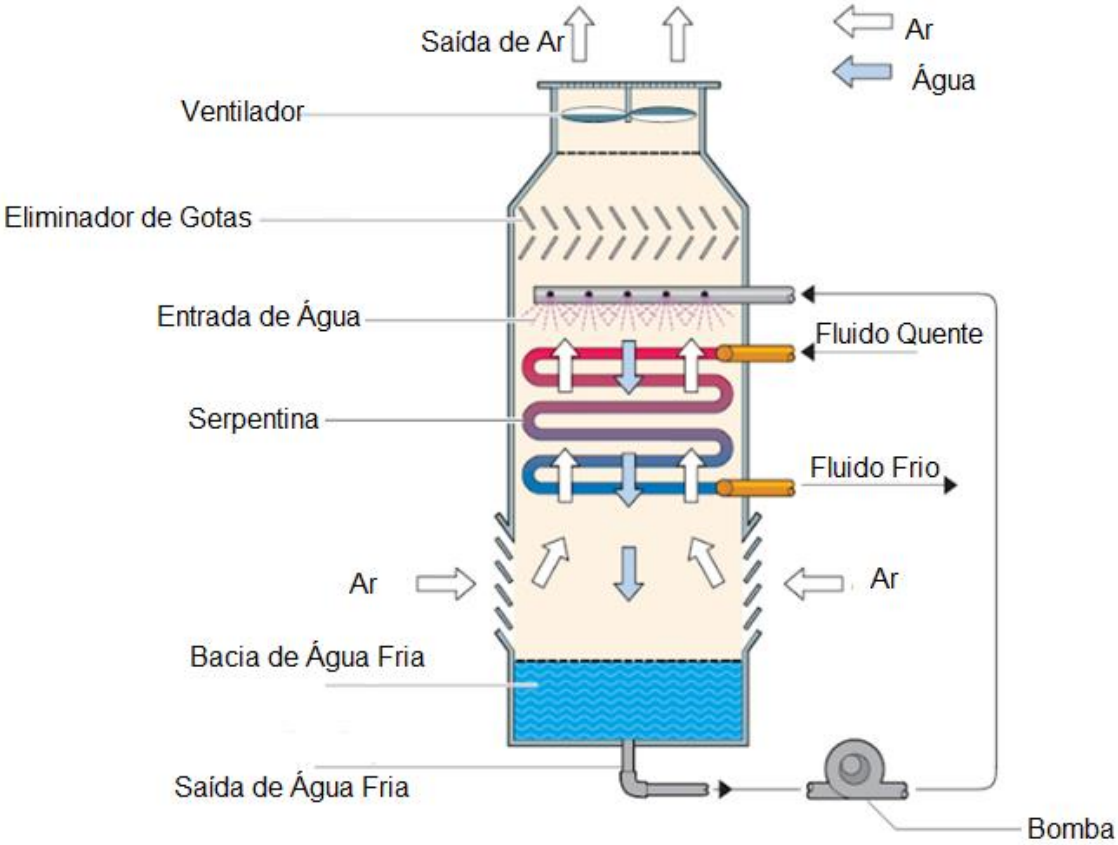
Fonte: adaptado de Energy of Department, 2011.

3.3.1.2- Sistema de Torres de Resfriamento Fechado (wet-dry cooling towers)

As torres de resfriamento fechadas (Figura 6) são assim denominadas pois o fluido a ser resfriado não entra em contato direto com o ar (OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012). A água com elevada temperatura entra na torre onde é distribuída em tubos capilares com menor diâmetro, denominados de serpentinas, escoa internamente as serpentinas e não tem contato com o ar atmosférico, evitando assim possíveis contaminações. Sobre estas serpentinas é aspergida água que entra em contato direto com ar e por evaporação ocorre a dissipação do calor, ela cai em uma bacia de recolhimento e recircula externamente a torre e retorna ao topo da mesma para novamente ser aspergida sobre as serpentinas (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

No sistema de distribuição por tubulação o material de construção deve ser resistente, como exemplo o aço, por onde passa a água quente. O fluido a ser distribuído por tal aparato deve apresentar boa qualidade, pois caso contrário pode ocorrer entupimento da tubulação, incrustações e crescimento de algas (HUICHÃO *et al.*, 2018)

Figura 6 - Torre de resfriamento fechada ou combinada



Fonte: adaptado de MENNEKES, 2018

3.3.2- Classificação em Relação ao Enchimento da Torre de Resfriamento

O objetivo do enchimento da torre é aumentar a dissipação de energia térmica, proporcionando maior tempo de contato entre a água e o ar. O material de enchimento deve apresentar alta resistência a deterioração, resistência baixa ao fluxo de ar e ser de fácil instalação (MARQUES, 2016). O primeiro material utilizado como recheio em torres foi o amianto, atualmente devido as questões ambientais, de saúde e com o surgimento de outros tipos de matérias como o cloreto de polivinila (PVC) este tipo de material foi subistiuído. Avaliando a necessidade primordial de transferência de energia térmica, a ressitência a corrosão, a necessidade de fornece um escoamento em formato de filme e o fornecimento de material , o material amplamente utilizado atualmente é o PVC (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

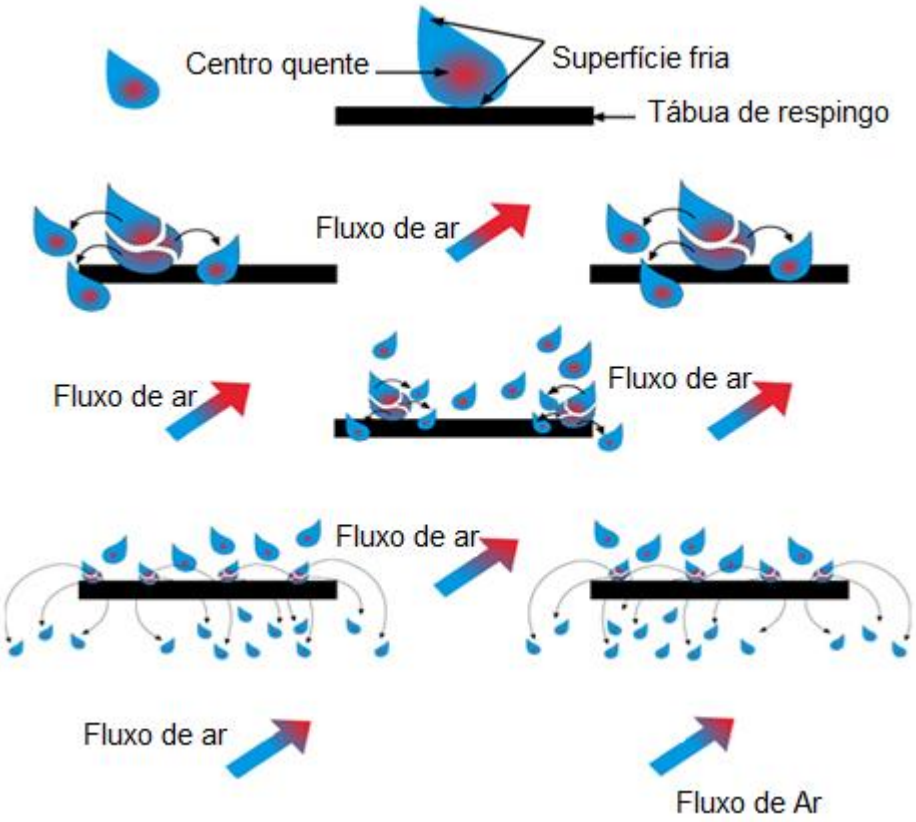
O enchimento deve ser construído para facilitar a passagem do ar e da água de maneira homogenia. De acordo com a configuração, o material de enchimento pode ser subdividido em duas categorias, por respingo e por filme(ÂNGELO; DA, 2006).

3.3.2.1– Enchimento por Respingo

O enchimento de torres de resfriamento por respingo, foi o primeiro tipo de recheio utilizado. Atualmente ele é estruturado em barras horizontais construídas em PVC, seu funcionamento consiste em fracionar a água que entra na torre através dos bicos aspersores, onde os respingos de água descem do nível alto para um baixo. O ar movimentasse em fluxo cruzado, ou contracorrente (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

O respingo promove um maior contato entre o ar e água, este evento ocorre através das barras posicionadas estrategicamente para provocar repetições na interrupção do escoamento da água, provocando respingos nas próximas barras e o contato do ar com a água. Para uma operação eficiente a instalação é necessária que as torres estejam niveladas, para que a água escoe de forma homogênea nas tábuas de respingo. A Figura **7** ilustra o escoamento da água pelas tábuas de respingo (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

Figura 7 - Esquema do funcionamento da torre tipo respingo.

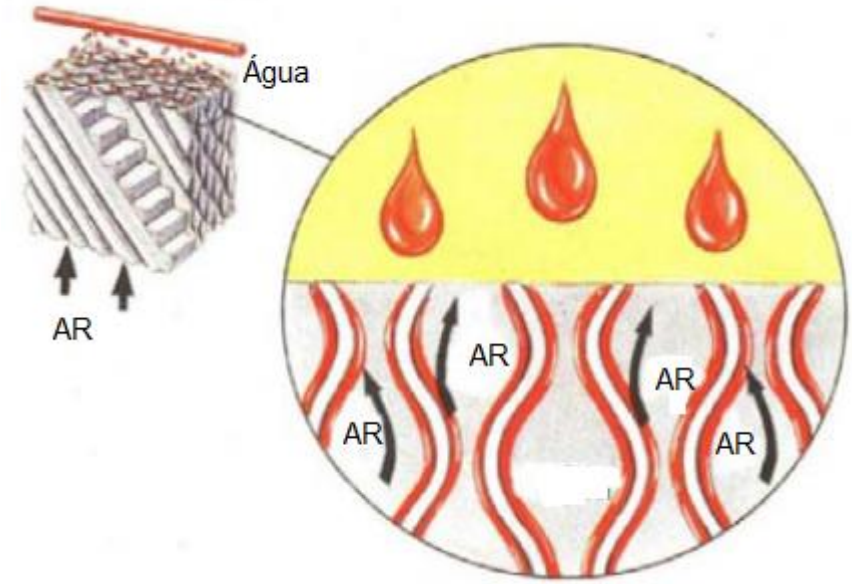


Fonte: adpatado EVAPCO, 2018

3.3.2.2- Enchimento por Filme

O enchimento por filme foi introduzido em 1960. Este filme, consiste em um meio físico que fornece uma grande área para escoamento do fluido, sendo o perfil de escoamento em finos filmes (ÂNGELO; DA, 2006). Com uma grande área de contato fornecida entre o ar e a água observasse um grande resfriamento evaporativo. O preenchimento por filme apresenta baixo custo de investimento e maior eficiência de processo que o por respingo (VENKATESH, 2015). Este apresenta maior eficiência em função de uma menor demanda por espaço físico. Todavia, águas que apresentam sólidos em suspensão devem utilizar o enchimento em respingo, pois este tipo de fluido pode causar entupimento ou incrustações e assim diminuindo a área de passagem da água e a troca térmica (KARA, 2010). A Figura 8 ilustra o escoamento em filme através do recheio e o contato com o ar.

Figura 8 - Funcionamento de um enchimento do tipo filme



Fonte: Adaptado de ANTONIO *et al.*, 2005

3.3.3- Classificação em Relação ao Fornecimento de Ar

As torres de resfriamento podem ser classificadas segundo ao fornecimento ou método de circulação do ar na torre em tiragem natural e tiragem mecânica ou forçada (MARQUES, 2016).

3.3.3.1- Torre de Tiragem Natural

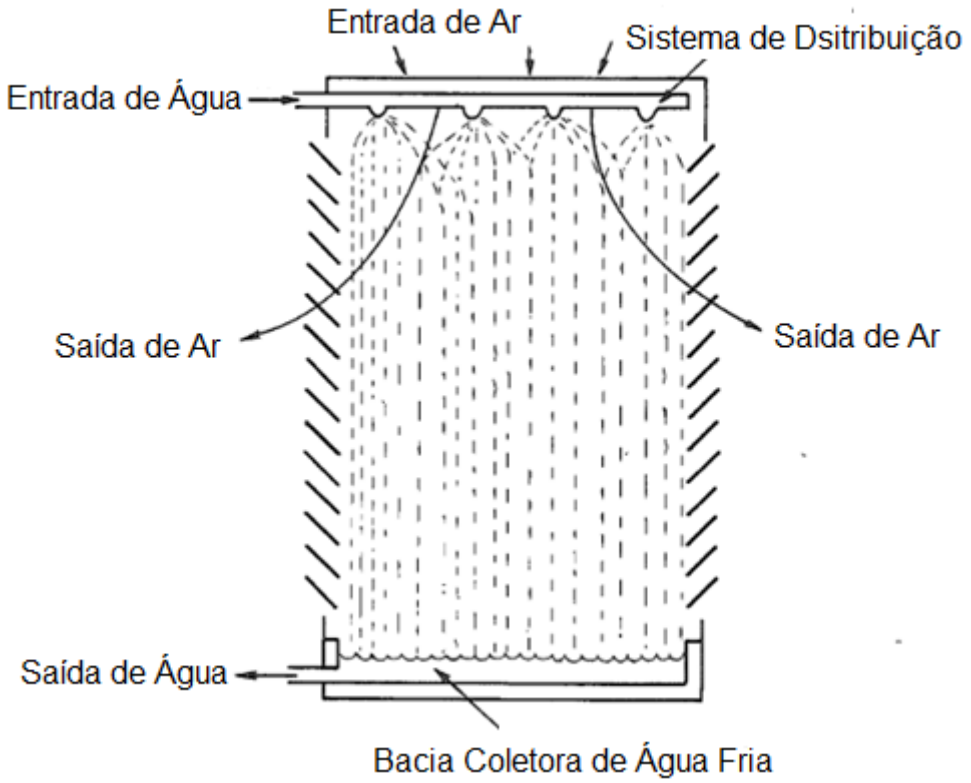
As torres de tiragem natural apresentam duas subclassificações, as atmosféricas e as hiperbólicas. A eficiência de tais torres está associada ao clima e o local de operação. (MARQUES, 2016). Locais onde a água é escassa o projeto de torres naturais são extremamente viáveis, visto que os demais tipo de torres necessitam de uma demanda de água para resfriamento (DONG *et al.*, 2018).

3.3.3.1.1- Torre de Resfriamento Atmosféricas

Nas torres de resfriamento atmosféricas (Figura 9) a aspiração do ar ocorre de maneira natural, ao longo dia quando a temperatura ambiente aumentar isto irá impactar em uma baixa na eficiência da torre. A movimentação do ar é induzida pelo jato de água produzida pelos bicos aspersores. Equipamentos, como ventiladores, não são utilizados para mover o ar pela torre (JASIULIONIS, 2012).

Atualmente estas torres não são muito utilizadas, pois são amplamente dependentes das condições externas. Todavia, em localidades onde o vento apresenta uma velocidade média boa, esta é uma opção econômica de resfriamento industrial (MAIA, 2013).

Figura 9 - Esquema de funcionamento de uma torre de resfriamento atmosférica.



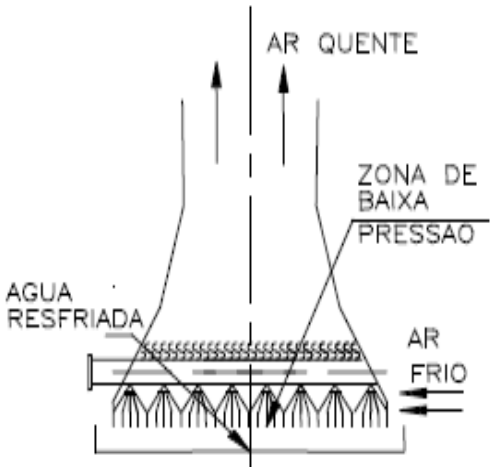
Fonte: adpatdo de CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981

3.3.3.1.2- Torre de Resfriamento Hiperbólica

Em 1920 foi finalizado o primeiro projeto de construção de uma torre de resfriamento hiperbólica, com sua estrutura construída em madeira. Muitos estudos foram e são realizados com finalidade de aumentar a eficiência e segurança operacional. A nomenclatura da torre expressa a forma geométrica na qual a casca é construída, forma hiperbólica (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011). Atualmente, estas torres são estruturas em concreto armado com ancoragem robusta, pois devido à grande necessidade de altura estes tipos de equipamento são amplamente impactados por ventos e ações sísmicas. A estrutura deve passar por estudos de impactos para avaliar a resistência as variáveis ambiente onde será construída e operada (KULKARNI, 2018).

Estes tipos de torre, Figura 10, são estruturas grandes semelhantes a imensas chaminés, apresentam em sua base venezianas por onde ocorre a entrada de ar. O fluxo entre o ar e a água ocorre de forma cruzada. O ar ao entrar na torre absorver calor, oriundo do contato com a água, acarretando diminuição de sua densidade (SUN; GUAN; HOOMAN, 2017). A diferença entre as densidade do ar no interior da torre e na parte externa provoca um fluxo natural do ar frio (mais denso), que entra na parte inferior da torre e o ar quente (mais denso) que escoa e sai no topo, o que gera na base da coluna uma região de baixa pressão que induz a aspiração ou entrada do ar frio. A distribuição de temperatura dentro da torre e horizontalmente uniforme e verticalmente linear (DONG *et al.*, 2018). A configuração hiperbólica auxilia no favorecimento da saída do ar quente, semelhante as chaminés (MARQUES, 2016).

Figura 10 -Torre de resfriamento hiperbólica



Fonte: adpatado deTERMOPARTS, 2018

Fonte: adaptado de Junior,2011

As torres hiperbólicas apresentam baixo custo de operação, todavia não devem ser utilizadas em processos com necessidade de controle eficiente da temperatura de saída, pois ela são dependentes das variáveis do ambientes, como corrente do ar (CHEN *et al.*, 2018). Muitas vezes, são equipadas com ventiladores, para aumentar sua eficiência, recebendo o nome de torres hibridas (ÂNGELO; DA, 2006). Em seu processo de resfriamento estas torres apresentam grande consumo de água, perda que ocorre via evaporação, sendo pouco utiliza em localidades que apresentem regiões áridas (WANG; LYU; *et al.*, 2018). São amplamente utilizadas em industrias de obtenção de energia elétrica, tais como as termoelétricas e as nucleares(HUICHÃO *et al.*, 2018).

3.3.3.2- Torre de Tiragem Mecânica

As torres de resfriamento mecânica tem como instrumento de obtenção do fluxo de ar dentro da torre, os ventiladores unitários ou múltiplos, gerando a operação da torres um desempenho previsível, consistente e menos susceptíveis as variáveis psicométricas (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011). Devido a utilização de tais aparatos, estas torres dissipam a mesma carga térmica que uma torre de tiragem natural, em uma área útil menor. As torres de resfriamento mecânico são subdivididas em tiragem forçada ou induzida e em circuito fechado ou aberto (MARQUES, 2016).

3.3.3.2.1- Torre de Resfriamento de tiragem Forçada

Nas torres de tiragem forçada, os ventiladores são instalados na parte lateral, na base da torre, ou seja, abaixo do enchimento. A instalação do ventilador pode ocorrer na parte inferior da torre, todavia devesse avaliar a ocupação humana na planta pois tais equipamentos geram muitos ruídos. O fornecimento de ar apresenta fluxo em contracorrente, pois a água desce através do enchimento, verticalmente, e o ar apresenta seu fluxo em sentido oposto. Este fluxo é considerado fraco, pois após a entrada ele deve realizar um caminho em um ângulo de 90°(MARQUES, 2016).

A desvantagem da de tais tipos de torre é a necessidade de manutenção dispendiosa nos ventiladores, o que não ocorre nas torres naturais. Quando ocorre algum dano ao ventilador, como quebra das pás ou parada do motor, esta torre deve parar a operação para que ocorra a manutenção, devido a este fator as torres de tiragem forçada sempre trabalham em paralelo, para que o resfriamento industrial não seja prejudicado. Outro aspecto relevante e a ocorrência de uma possível recirculação do ar dentro da torre,

isto pois a entrada do fluxo de ar apresenta alta velocidade, porém a saída ocorre a baixa velocidade. Em relação a tal fator as torres de tiragem forçada são consideradas menos estáveis em relação as de tiragem induzida (KOVAČEVIĆ; SOURBRON, 2017)

3.3.3.2.2- Torre de Resfriamento de tiragem Induzida

As torres de resfriamento de tiragem induzida apresentam ventiladores instalados no topo da coluna, ou seja, acima do enchimento (MARQUES, 2016). A velocidade de saída do fluxo de ar no topo da coluna é de 3 a 4 vezes que a velocidade de entrada, esta é próxima à da corrente de ar ambiente (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

3.3.4- Classificação em relação ao fluxo de ar com a corrente de água

3.3.4.1- Fluxo de Ar em Contra Corrente

Nestas torres o ar apresenta seu fluxo direcionado verticalmente de maneira ascendente através do enchimento, contra a queda de água descendente (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

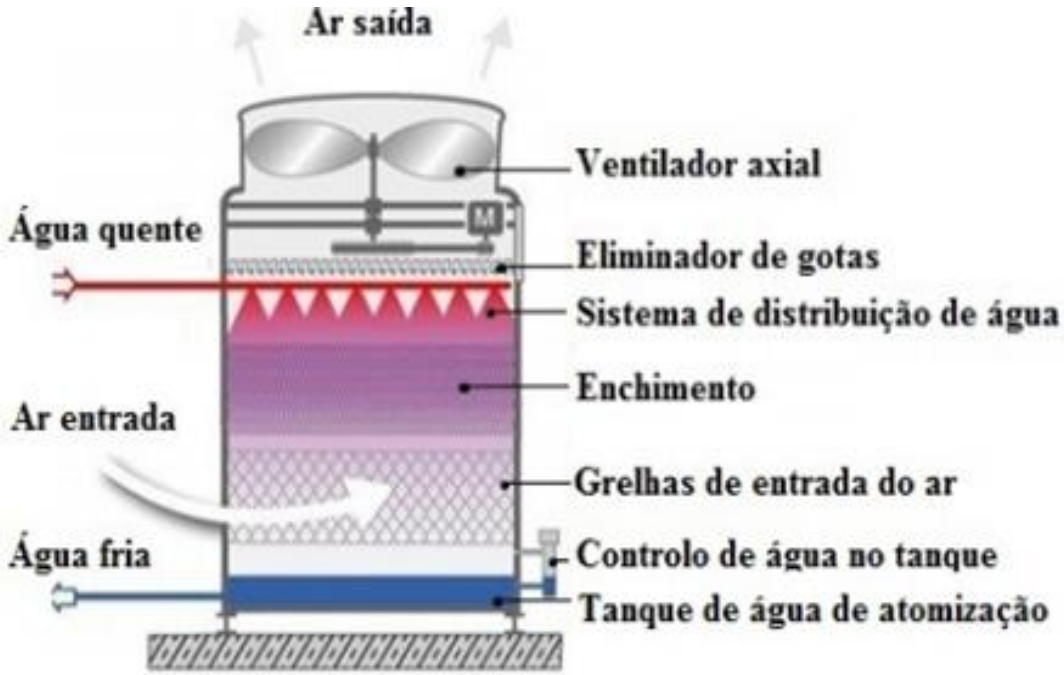
3.3.4.2- Fluxo de Ar em Corrente Cruzada

Nestas torres o fluxo de ar flui horizontalmente, através da corrente de água descendente. Os sistemas distribuição de água quente na torre ocorre via furos dimensionados a estrutura, evitando a utilização de bicos aspersores. Eles são de fácil operação e sua limpeza e manutenção podem ocorrer sem a necessidade de paralisar sua operação. Estas podem ser subdivididas em torres de com fornecimento de simples ou duplo (DUAN *et al.*, 2012).

3.4- Componentes básicos das torres de resfriamento mecânica

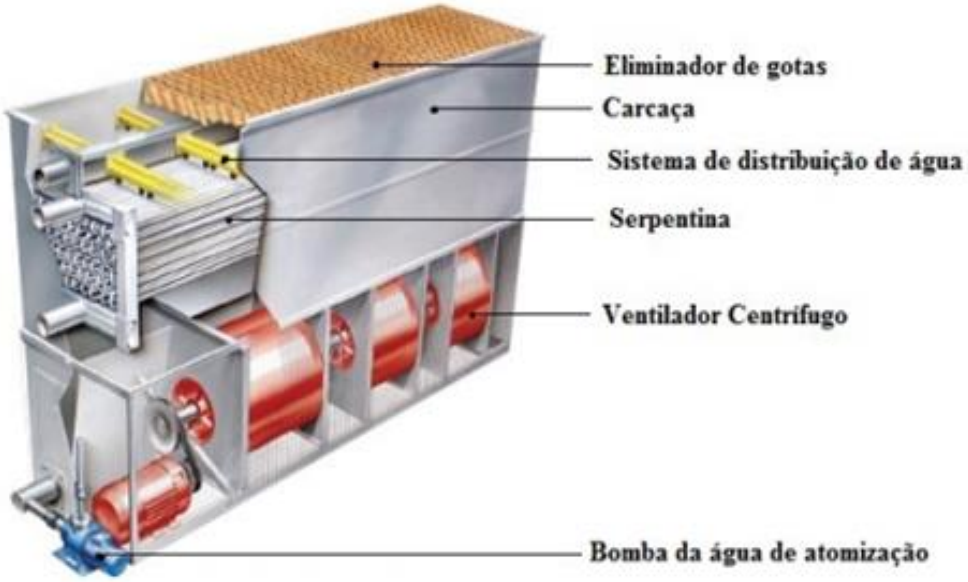
Existem diferentes classificações de torres de resfriamento, e cada um irá apresentar em sua estrutura componentes variados. Dentre as torres duas merecem destaque pela ampla utilização nas indústrias, as torres evaporativa e não evaporativas (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010). As **Figuras 11 e 12** ilustram os componentes básicos de torres de resfriamento evaporativo e não evaporativo, respectivamente.

Figura 11 - Principais componentes de uma torre de resfriamento de contato direto(evaporativa)



Fonte: adaptado de SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010

Figura 12 - Principais componentes de uma torre de resfriamento de contato indireto (não-evaporativa).



Fonte: adaptado de SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010

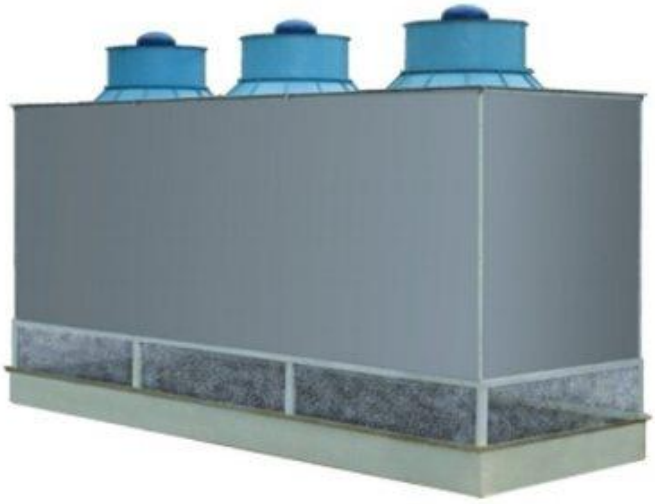
As torres apresentam sua estruturação básica e universal, sendo adaptada as condições e necessidade de cada planta operacional (SPX COOLING TECHNOLOGIES,

2011). Os componentes básicos de uma torre de resfriamento são carcaça, sistema de destruição de água, enchimento, eliminadores de gotas, ventiladores e motores, bacia de água fria e venezianas. Estes aparatos são temas de frequentes estudos, com objetivo de alcançar sempre materiais eficientes, com custo baixo e resistentes as intemperes dos meios externo e grande mudanças de temperatura e umidade no interior da torre (DUAN *et al.*, 2012).

3.4.1– Carcaça

São estruturas que podem apresentar diversas geometrias diferentes, de acordo com espaço de implantação e especificações técnica que atendam a planta em operação. Esta estrutura deve apresentar resistência a corrosão, pois internamente irá circular fluido com temperaturas diferentes. Ela deve suportar o peso dos demais componentes que uma torre apresenta. Além da resistência ao processo, ela deve suporta as intemperes como fortes ventos e ações sísmicas (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010). A Figura 13 apresenta uma explicação de uma carcaça de torre de resfriamento retangular.

Figura 13 - Carcaça de uma torre de resfriamento retangular.



Fonte: adaptado de OK-MARKOVI, 2018

3.4.2-Sistema de Distribuição de Água

Para que a distribuição de água seja homogenia dentro da torre, existe o sistema de distribuição de água. Há grande variedade deste sistema, isto irá depender da escolha do tipo de escoamento que irá ocorrer do ar-água (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010). O objetivo do sistema de distribuição é aumentar a área de contato da água com o ar e

consequentemente acelerar a troca de energia térmica, tal fenômeno e alcançado com a destruição da água em gotículas, estas são obtidas via bico aspersores (**Figura 14**) que pulverização a água sobre o sistema (OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012). Nas torres com fluxo em contracorrente a distribuição de água pode ocorre pela gravidade ou por pressão, em contrapartida em fluxo cruzado ocorrera sempre através da gravidade.

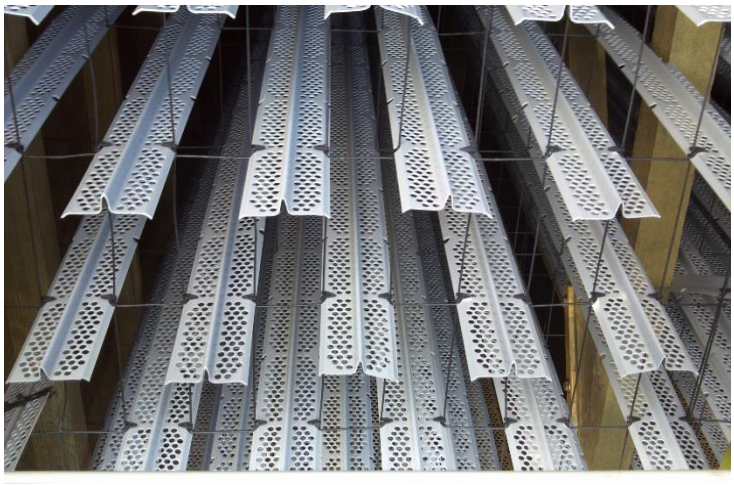
Figura 14 - Bicos aspersores

Fonte: adaptado de KOFHAX, 2018

3.4.3 – Enchimento

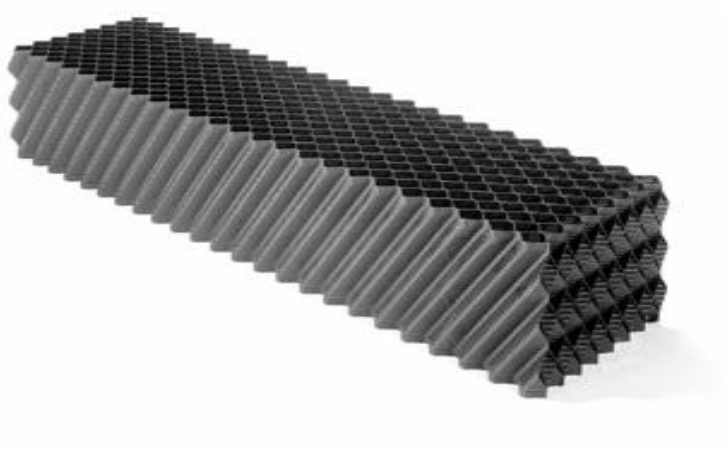
A principal função do enchimento em torres e aumentar a área de contato para transferência de calor e massa, pois ele dificulta a passagem da água pela torre, consequentemente aumentando a tempo de retenção e de contato entre o ar e a água. O enchimento é classificado em duas categorias por respingo (Figura 15) e lamina (Figura 16)(OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012).O enchimento é encontrado somente em torres evaporativas de contato direto, na torre de contato indireto não é aplicado pois é utilizado serpentinas (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010).

Figura 15 - Enchimento respingo em formato retangular.



Fonte: adaptado de ATS AMERTECH TOWER SERVICES, 2018

Figura 16 -Enchimento do tipo filme.



Fonte: adaptado de EVAPCO, 2018

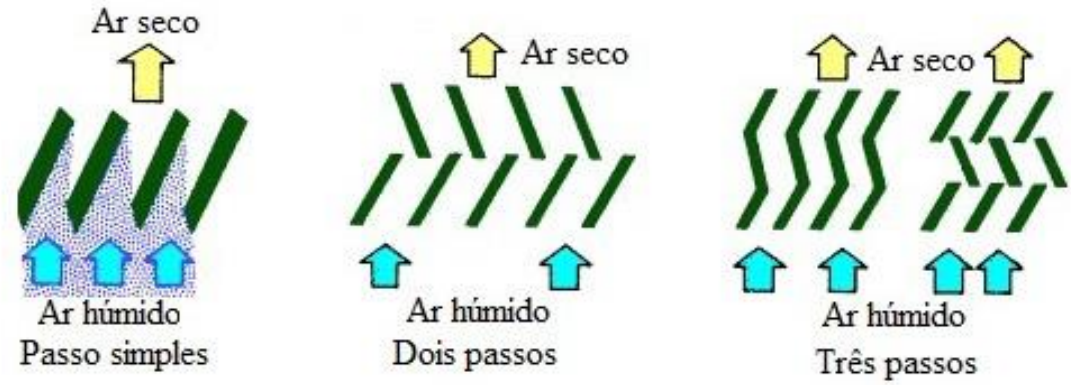
3.4.4– Eliminadores de Gotas

O ar aspirado através dos ventiladores para o interior das torres provoca o carreamento de pequenas gotas de água para o topo da torre e posteriormente para atmosfera, o eliminar de gotas tem como objetivo reter tais gotículas. Este aparato modifica a direção do ar, onde a força centrifuga resultante atua separando as gotículas de ar da água, esta irá ficar depositada na superfície do eliminador e a água escoa novamente para o interior da torre até ser coleta da base da torre na bacia de recolhimento de água fria (OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012).

Outro objetivo será o de obter um fluxo de ar uniforme através do enchimento da torre, isto ocorre devido à resistência que o fluxo de ar encontra ao passar pelo eliminar

do gotas, o que acarreta em uma pressão uniforme entre o ventilador e o eliminador, obtendo-se assim um fluxo de ar uniforme. A **Figura 17** ilustra o funcionamento do eliminador de gotas de passo simples, duplo e triplo(SAMPAIO, F. S., 2013).

Figura 17 - Funcionamento do eliminador de gotas.



Fonte: adaptado de SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010

Estes eliminadores serão classificados em relação ao número de passos que possuem, dois ou três passos, com mais passos maior será a eficiência deste aparato, pois irá diminuir a pressão. Um eliminador (Figura 18) bem dimensionado deve diminuir a perda por arraste sem perde pressão, pois isto iria sobre carregar a demanda dos ventiladores (OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012).

Figura 18 - Eliminador de gotas

Fonte: adaptado de HIDROTERM, 2018

3.4.5– Ventiladores e Motores

Em torres de resfriamento é usual utilizar dois tipos de ventiladores, o axial e o centrifugo. No ventilador axial o fluxo de ar ocorre no sentido do eixo, não havendo mudança de direção. Os centrífugos descarregam o ar no sentido perpendicular ao eixo do ventilador. Dentre os dois tipos os axiais são os mais utilizados, pois ele tem a capacidade de mover maior fluxo de ar, apresentam custo baixo e podem ser inseridos em torres de diversificados tamanhos (MARQUES, 2016). Os ventiladores normalmente apresentam dois tipos de velocidade, isto pois durante o dia geralmente a demanda por dissipação de calor e maior, logo o ventilador deve operar em sua capacidade máxima, a noite quando a demanda e menor a operação pode ocorre em aproximadamente 72 % de sua capacidade, esta configuração auxiliar na economia de energia (OLIVEIRA, A. C. C. T., 2012).

Os motores devem apresentar configurações robustas, visto que a área onde serão implantados é extremamente agressiva, com presença de fluidos a diferentes temperaturas, poeira e chuvas (DUAN *et al.*, 2012).

3.4.6– Bacia de Água Fria

Á água que entra quente descer verticalmente dentro da torre e é coleta na bacia de água fria na temperatura final ideal do projeto, após a dissipação de calor. Devido a possível presença de matérias na água oriundos do ar ou do processo de produção, a bacia também funciona como coletora de tais materiais. Logo, sua localização deve ser de fácil acesso, limpa em intervalo estipulados em função da necessidade operacional, apresentar um sistema de drenagem eficiente evitando entrada de detritos que entupam a sucção das bombas (SPX COOLING TECHNOLOGIES, 2011).

3.4.7 – Venezianas

O objetivo das venezianas e reter a água e uniformizar o escoamento de ar dentro da torre de resfriamento. Evitam o contato da luz solar com a água impedindo assim incrustações biológicas de micro-organismo como algas, bactérias fungos, etc (SAMPAIO, F. S., 2013).

As torres de escoamento cruzo necessitam da presença de venezianas de entrada e a torres em contra corrente não necessitam delas (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010). A Figura 19 ilustra as venezianas de uma torre de resfriamento.

Figura 19 - Venezianas de uma torre de resfriamento.

Fonte: adaptado de CYCLOS ÁGUAS, 2018

3.4.8– Serpentinas

As serpentinas são compostas por vários tubos capilares, podendo eles serem construídos em cobre, alumínio, Cu-Ni, aço e aço inoxidável. As aletas podem ser de alumínio, cobre, metais revestidos com polímeros, aço e aço inoxidável (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010)

3.5 - LÓGICA FUZZY

Aristóteles é considerado o fundador da ciência lógica, está é baseada em premissas e conclusões, exemplo:

Premissa 1: Todo ser vivo é mortal;

Premissa2: Sarah é um ser vivo;

Conclusão: Sarah é um ser mortal;

A lógica de Aristóteles é conhecida como Lógica Binária ou Lógica Clássica, ou seja, uma lógica é falsa ou verdadeira e não podendo ser parcialmente verdadeira ou falsa (CAVALCANTI *et al.*, 2012).

O matemático inglês Boole, dentre outros pesquisadores iniciaram no século XIX estudos sobre o emprego da álgebra no domínio da lógica. A parti do século XIX a lógica formal passou a ser elaborado como um cálculo algébrico, originando assim a álgebra Booleana. A Lógica Booleana admite somente valores booleanos, ou seja, valores de falso ou verdadeiro, grande ou pequeno, pertencer ou não a um conjunto (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

A álgebra Boolena binária está ligada diretamente a regras do pensamento, onde as informações serão verdadeiras (símbolo matemático 1) ou falsas (símbolo matemático 0), limitando-se aos conectivos OU, E e a operação de negação, estes associados a regras básicas para operações lógicas utilizadas pelas pessoas. O objetivo do estudo da álgebra

booleana binária é a manipulação algébrica de funções lógicas (LEO WEBER; KLEIN, 2003).

Na lógica booleana, dado o conjunto universo U composto por V = [0,1], temos:

Se $x \neq 0$, logo $x = 1$

Se $x \neq 1$, logo $x = 0$

A teoria da Lógica Clássica de "verdadeiro" ou "falsa" não é muito adequada para algumas situações. Um copo de água cheio até sua metade, a lógica clássica irá defini-lo como vazio ou cheio sendo ambas uma descrição falsa do sistema observado. Avaliando as dificuldades da Lógica Clássica ser aplicada em todos os sistemas, surgiu a Lógica Fuzzy, cuja os princípios foram desenvolvidos primeiramente por Jan Lukasiewicz (1878-1956), que em 1920 desenvolveu e introduziu conjuntos com grau de pertinência. Estes estudo juntamente com os de Aristóteles foi o embasamento para que na década de 60 o professor de Ciência da Computação da Universidade da Califórnia, Lofti Asker Zadeh, fosse o primeiro autor de uma publicação utilizando Lógica Fuzzy (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

A Lógica Fuzzy também conhecida como Lógica Difusa ou Nebulosa é baseada na Teoria dos Conjuntos Fuzzy. Está lógica varia de "0" a "1", levando a estar parcialmente verdadeiro ou parcialmente falsa. Está é a lógica que se baseia no raciocínio de aproximação e não no de exatidão. A Lógica Fuzzy é uma ferramenta capaz de através de informações vagas, ambíguas, imprecisas e qualitativamente incompletas geralmente expressa na linguagem natural e converte tais informações para um formato numérico, de fácil manipulação em computadores (CAVALCANTI *et al.*, 2012). O Grau de associação não é uma probabilidade, mas sim uma compatibilidade do objeto com o conceito representado pelo conjunto fuzzy (JR.; YONEYAMA, 2004).

3.5.1 - Teoria do Conjunto Fuzzy

O conceito de conjunto fuzzy foi definido inicialmente por Zadeh, quando ele observou a dificuldade ou impossibilidade de modelar sistemas com fronteiras mal definidas pela matemática tradicional e rígida. Problemas com graus de pertinência não bem definidos, logo não sabia a qual conjunto um dado elemento pertencia (RIBEIRO; MELO, 2013). Na Teoria Clássica os elementos assumem valores binários numéricos (0/1) ou linguísticos (excelente/ ruim). Na Lógica Fuzzy os valores apresentam grau de pertinência que podem variar do zero até 1, facilitando assim a aplicação próximas ao pensamento humano. A ideia de Zadeh era flexibilizar a pertinência dos elementos aos

conjuntos, criando assim a ideia de pertinência, onde um dado elemento pode pertencer parcialmente a um dado conjunto. Na teoria do conjunto fuzzy existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto (CAVALCANTI *et al.*, 2012). Logo, conjunto fuzzy é utilizado para modelar informações vagas, de maneira simplista, este conjunto irá aborda de maneira generalizada as noções clássica de conjunto, que objetiva representar conjuntos cujas as fronteiras não são claras(RIBEIRO; MELO, 2013).

A Lógica Fuzzy é amplamente dependente do especialista da área em estudo, porque é baseado em sua experiência e em seu raciocínio que as regras serão inferidas, baseadas no conhecimento previu de tal profissional(RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

3.5.2- Funções de Pertinência

O conjunto fuzzy são definidos por uma função intitulada de função de pertinência. A função pertinência os possíveis valores que uma função pode assumir indicam o grau com que o elemento pertence a um conjunto. A cada função de pertinência define um conjunto fuzzy, B, do conjunto universo, U, através do grau de pertinência atribuído $\mu_B(x)$, entre 0 e 1 para cada elemento x de U. Este é o grau na qual x pertence a B(SOUSA, 2005).

$\mu_B(x): U \longrightarrow [0,1]$

A= $\{\mu_B(x)/x\}$ x ϵ U

Onde:

$\mu_B(x)$: representa o grau de pertinência de x com o conjunto B;

B: Conjunto Fuzzy;

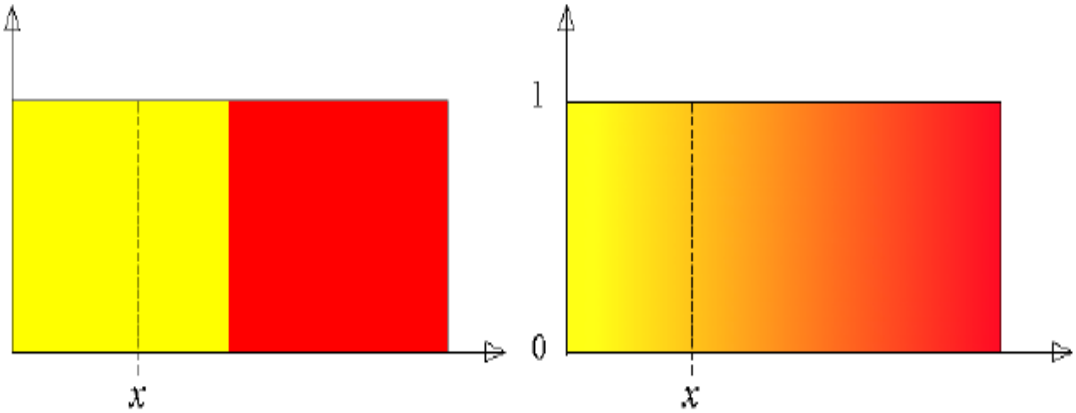
x: variável de interesse;

U: Universo de discurso.

Um elemento pode pertencer mais de um conjunto Fuzzy, contudo desde que apresente graus de pertinência diferentes. A figura 20 apresenta uma representação lúdica da lógica booleana e da logica fuzzy, na figura 20. a se um elemento, x, for movido em direção ao conjunto B, no gráfico representado pela cor amarela, observasse que no ponto de cruzamento haverá um degrau brusco no grau de sua pertinência, onde o elemento deixa de pertence a um conjunto e para pertencer a outro. A figura 20. b, apresenta um

comportamento diferenciado, representado pela lógica fuzzy, onde a variação de x na direção do conjunto B ocorre de maneira visualmente gradual na tonalidade da cor. Exemplo, o elemento x apresenta um grau de pertinência 0,8 na função de pertinência cor amarela e de 0,2 para o vermelho(GOMIDE; GUDWIN; TANSCHEIT, 1995).

Figura 20 - Comportamento da lógica clássica e Fuzzy



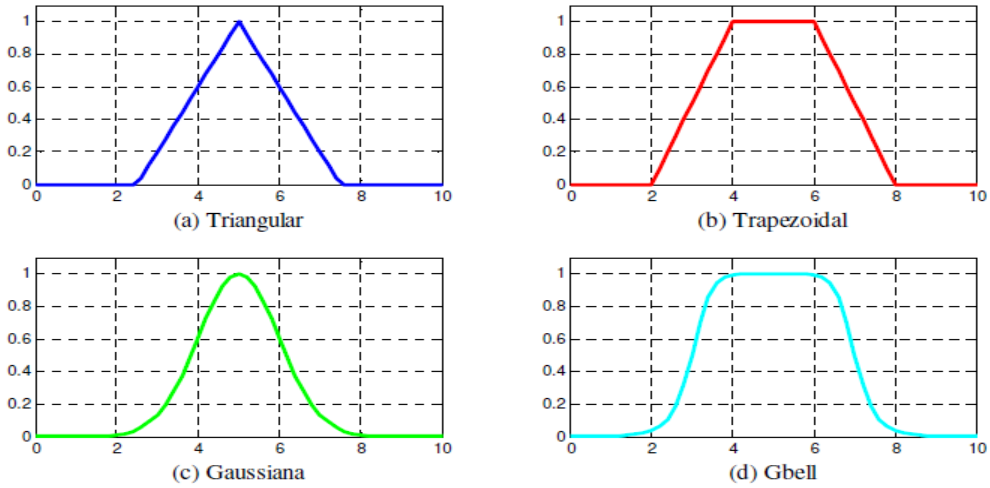
Fonte: adaptado de JR.; YONEYAMA, 2004

O conjunto fuzzy é dito normalizado quando seu máximo é igual a 1, caso isto não ocorra o mesmo é denominado por subnormal(RIBEIRO; MELO, 2013).

As funções de pertinência (Figura 21) podem ter as formas triangular, trapezoidal, gaussiana, função S, Função Z, sigmoidal e diversas outras(BRAGA, 2013)

A função triangular é definida pelos parâmetros {a, b, c}, que são referentes a posição de seus vértices. A função trapezoidal é definida por {a, b, c, d} também referentes a seus vértices da esquerda para a direita(BRAGA, 2013).

Figura 21 - Funções de Pertinência.

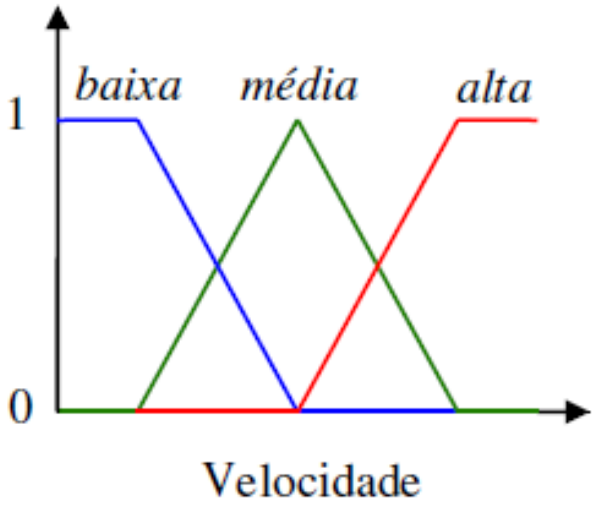


Fonte: adaptado de SOUSA, 2005

3.5.3 - Variáveis linguísticas

A variável linguística não adota número e sim palavras ou frases na linguagem natural. Sendo elas os nomes dos conjuntos fuzzy, no quais são representados pelos graus de pertinências associado(RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011)s. Exemplo a velocidade de distribuição de água via aspersores sobre as serpentinas em uma torre de resfriamento, pode adorar variáveis linguísticas de baixa, média e alta, como expressa na figura 22(SOUSA, 2005).

Figura 22 - Variáveis Linguísticas



Fonte: adaptado de SOUSA, 2005.

As variáveis linguísticas podem ser sentenças com um formato de linguagem padrão, sendo especificada pelo usuário, sendo construída a parti de termos primários, como baixo, médio,alto, de modificadores, como muito, pouco, de delimitadores (acima , abaixo...) e conectores (e, não e ou)(RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

3.5.4 - Base de regras

A base de regras consiste no aparato utilizado pelo controlado para organizar e sistematizar o sistema em estudo.

A utilização comum da base de regras consistia no **SE** premissa, **ENTÃO** consequência. Onde as premissas definas como antecedente estão interligadas ao controlador *fuzzy* e formam parte das regras que são representas a esquerda. A consequência que estão associadas as saídas dos controladores são as ações executadas em função de uma premissa (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011)

Estas bases de regras podem ser utilização para diversos objetos de estudo, desde que os conjunto fuzzy envolvido esteja em consonância com a realidade do processo. Como exemplo controle da vazão de água em uma caldeira (BILOBROVEC, 2005)

SE temperatura é alta **ENTÃO** vazão de água é alta

SE temperatura é baixa **ENTÃO** vazão de água é baixa

SE temperatura é estável **ENTÃO** vazão de água é normal

Após definidas todas as variáveis de entrada e saída do sistema de controle, criasse a base de regras que podem apresentar infinitas regras.

3.5.5- Fuzzyficação

A fuzzyficação e o processo construtivo do grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos definidos com conjunto fuzzy, sendo este construídos a parti de associações e cálculos. O grau de pertinência é obtido através das funções de pertinência previamente estabelecidas pelo profissional que detém conhecimentos práticos do sistema em estudo. Após as funções de pertinência estabelecidas o controlador irá estabelecer as melhores saídas de acordo com as variáveis de entrada(RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

Há cinco variáveis importantes para definir quantas funções de pertinência e o tipo, são ela:

1°_ Precisão;

2°_ Estabilidade;

3°_ Facilidade de implementação;

4°_Manipulação;

5°_ Manutenção.

Na etapa de fuzzyficação os valores numéricos são convertidos em graus de pertinência e posteriormente são associados a variáveis linguísticas. Isto gera uma ligação entre termos linguísticos às funções de pertinência (TANSCHEIT, 2012).

Dentre as funções de pertinência, as mais utilizadas são as triangulares e as trapezoidais sendo eficientes e efetivas. O conjunto difuso construído deve abranger o eixo X, cobrindo todo o intervalo, para que seja mapeando para o intervalo de 0 a 1 do eixo Y (BILOBROVEC, 2005).

3.5.6 - Inferência

Na etapa de fuzzyficação as variáveis linguísticas são interpretadas, a próxima etapa é a descrição nas quais as situações nas quais há reações, ou seja, a introdução das regras SE_ENTÃO. O SE são as premissas, são denominadas antecedentes, sendo estes os graus de pertinência calculados na etapa de fuzzyficação. O ENTÃO abrange uma ou mais ações chamadas consequente. Durante a etapa de avaliações das regras, a intensidade é calculada com base em valores de antecedentes, sendo assim indicativos de saídas difusas as regras (BILOBROVEC, 2005).

3.5.7 - Defuzzyficação

O objetivo do processo de defuzzyficação é de transforma o conjunto difuso de saída se um sistema em um conjunto clássico. Correspondente. Nesta etapa irá ocorrer compreendesse os significados das ações difusas usando as funções de pertinências e também para resolver conflitos entre ações competitivas (CHAMOVITZ; COSENZA, 2010).

3-6 - Computação fluidodinâmica (CFD)

Estudos sobre o comportamento dos fluidos sempre foram desenvolvidos, todavia com a necessidade de muitas simplificações. O surgimento dos computadores possibilitou grande avanços na solução de equações numéricas complexas, possibilitando a obtenção do perfil de escoamento de um fluido em um determinado volume de controle (FILHO, 2017).

A sigla CFD, do inglês, *Computational Fluid Dynamics* são conjuntos de técnicas numéricas que são aplicadas na solução de equações que descrevem a fluidodinâmica do escoamento de um determinado fluido, simulações computacionais do escoamento são possíveis com finalidade de obter e analisar detalhes do mesmo (RODRIGUES, 2018).

A ferramenta CFD apresenta grande utilização nas áreas de engenharia. Apresenta como vantagem a agilidade e um custo menor em sua execução. Diversos tipos de investigações são possíveis, tais como investigar parâmetros geométricos, comportamento do processo, variáveis e detalhes construtivos e econômico. A utilização do CFD auxilia, após o modelo adotado na simulação, na realização de menos experimentos. Sendo amplamente empregado na otimização de equipamentos e processos industriais (ZANUTTO, 2015).

A precisão de um CFD dentre outros fatores é obtida através do número de células na malha obtida pelo domínio computacional. Geralmente um maior número de células esta aliada a uma melhor precisão nas soluções. Do tempo gasto para desenvolver um projeto no CFD, mais de 50% do tempo é destinado a definição do domínio geométrico e a geração da malha (RODRIGUES, 2018).

Todos os pacotes de CFD comerciais apresentam uma interface, para o usuário, sofisticada para avaliar os parâmetros do problema e examinar a solução. Os códigos do CFD são três, o pré-processador, um solucionador e um pós-processador (VERSTEEG; W. MALALASEKERA, 2007).

O processador, ou "*Solver"* é o elemento responsável pelo processamento das informações. A técnica mais empregada no CFD é a de volumes finitos. Os códigos mais utilizados no CFD, e amplamente empregados são: CFX / ANSYS, FLUENT, PHOENICS e STAR-CD. As principais etapas realizadas pelos algoritmos numéricos são (ZANUTTO, 2015):

- Integração das equações governantes do escoamento do fluido ao longo de todo o volume de controle;
- Discretização, ou seja, conversão das equações resultantes em um sistema de equações algébricas;
- Soluções das equações algébricas por meio de métodos iterativos.

As principais equações aplicadas são as de conservação, oriundas dos fenômenos de transporte. Dentre elas podemos citar as equações da continuidade e as equações de Navier-Stokes. Grande parte dos termos da equações citadas não são lineares, logo não apresentam soluções analíticas (VERSTEEG; W. MALALASEKERA, 2007).

3.6.1 - Equações do Movimento

O escoamento laminar em regime permanente de um fluido viscoso, incompressível e newtoniano sem efeitos de superfícies livre, as equações de movimento que são utilizadas são as da continuidade(3.11) e de *Navier-Stokes (*3.12*)*(ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

$$\vec{\nabla}.\vec{V} = 0 \tag{3.11}$$

$$(\vec{V}.\vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + v\nabla^2\vec{V} \tag{3.12}$$

onde $\vec{V}$ é a velocidade do fluido, ρ é a sua densidade e v é sua viscosidade cinemática

As equações 8.1 e 8.2 representam respectivamente uma equação de conservação e uma equação de transporte está representa o transporte do momento linear em todo o domínio computacional (MCCABE, WARREN L, SMITH, J., HARRIOT, 1993).

As técnicas de CFD são compostas por cinco etapas fundamentais, sendo elas a definição da geometria, geração da malha computacional, pré-processamento, processamento e pós-processamento (RODRIGUES, 2018).

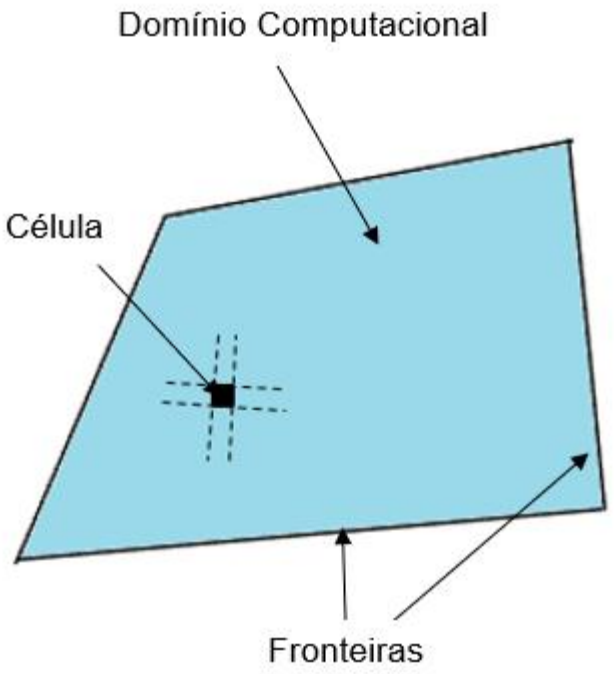
3.6.2 – Definição da Geometria

O primeiro passo para utilização da ferramenta CFD é a definição da geometria do sistema. A representação virtual do domínio real a ser estudado é obtida com a utilização de ferramentas de desenhos computacionais. O grau de detalhes e a complexidade do desenho iram necessitar de um maior esforço computacional e tempo de processamento para obtenção a solução (RODRIGUES, 2018).

3.6.3 – Geração da Malha Computacional

Um domínio do sistema é definido, e consequentemente uma malha é gerada (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). O domínio do sistema é subdivido em células computacionais. Quando há a utilização em 2D, ou seja, bidimensional (Figura 23), as células são definidas em áreas e em 3D, ou seja, tridimensional, como volumes. A célula é um minúsculo volume de controle onde as equações da continuidade são resolvidas. A células são pequenos elementos formados entre os nós da malha. (RODRIGUES, 2018). A qualidade de uma solução de CFD e dependente uma malha com uma boa qualidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Figura 23 -Domínio bidimensional e uma célula quadrilateral.



Fonte: adaptado de ÇENGEL; CIMBALA, 2007

3.6.4 – Pré-Processamento

A etapa de pré-processamento é composta pela definição dos modelos que serão aplicados na resolução, associados aos valores de parâmetros, propriedades físicas, condições iniciais e condições de contorno. As propriedades do fluido como temperatura, densidade, viscosidade, dentre outras são especificadas de acordo com o fluido em estudo. As condições de contorno são definidas em cada aresta do domínio computacional, em escoamento 2D, ou em cada face do domínio, em escoamento 3D (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Valores iniciais das variáveis do campo de escoamento são especificados para cada célula. Após a finalização desta etapa há a geração de diversas informações sobre o sistema (RODRIGUES, 2018).

3.6.5 – Processamento

Nesta etapa irá ocorrer a leitura das informações definidas nas etapas anteriores e iniciar a resolução das equações envolvidas (RODRIGUES, 2018). Estas equações são resolvidas no iterativamente no interior de cada célula.

A soma de todos os termos da equação 8.2, definida como resíduo, quando deslocados para um mesmo lado da equação for zero, isto indica uma solução exata. Todavia, em um CFD a soma nunca é zero, mas irá se aproximar deste valor com iterações

progressivas. Logo, definisse resíduo como a medida da quantidade com a qual a solução para equações de transporte se desvia da exatidão, sendo os resíduos médios contabilizados para determinar quando a solução convergiu (RODRIGUES, 2018). Às vezes são necessárias diversas das interações para que obtenha um resultado com conversão final, acarretando assim uma diminuição dos resíduos associados (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

3.6.6– Pós-Processamento

Esta é a etapa responsável pela interpretação das respostas obtidas (RODRIGUES, 2018). A apresentação dos dado obtidos serão obtidos nas seguintes etapas(VERSTEEG; W. MALALASEKERA, 2007):

- Visualização da malha e do domínio geométrico;
- Gráfico de vetores;
- Gráfico de linha e contornos;
- Gráfico de superfície em 2D e 3D;
- Trajetórias das partículas;
- Manipulação gráfica (translação e rotação);
- Animações.

4 – METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados enfaticamente as variáveis e os *softwares* utilizados neste trabalho. Dentre todos os tipos de torres de resfriamento foi escolhida uma torre de contato indireto para avaliação de seus principais gargalos operacionais e mensurar sua eficiência. Este é um tipo de torre que apresenta poucas publicações e estudos acadêmicos, logo sendo um equipamento com diversas possibilidades de estudos e acompanhamento. A escolha do equipamento está pautada em inovações para o estudo de torres de resfriamento, visto que com aplicação de algumas variáveis é preciso os dimensionamento do comportamento deste equipamento durante a operação, sem a necessidade de parar a plantar para avaliações.

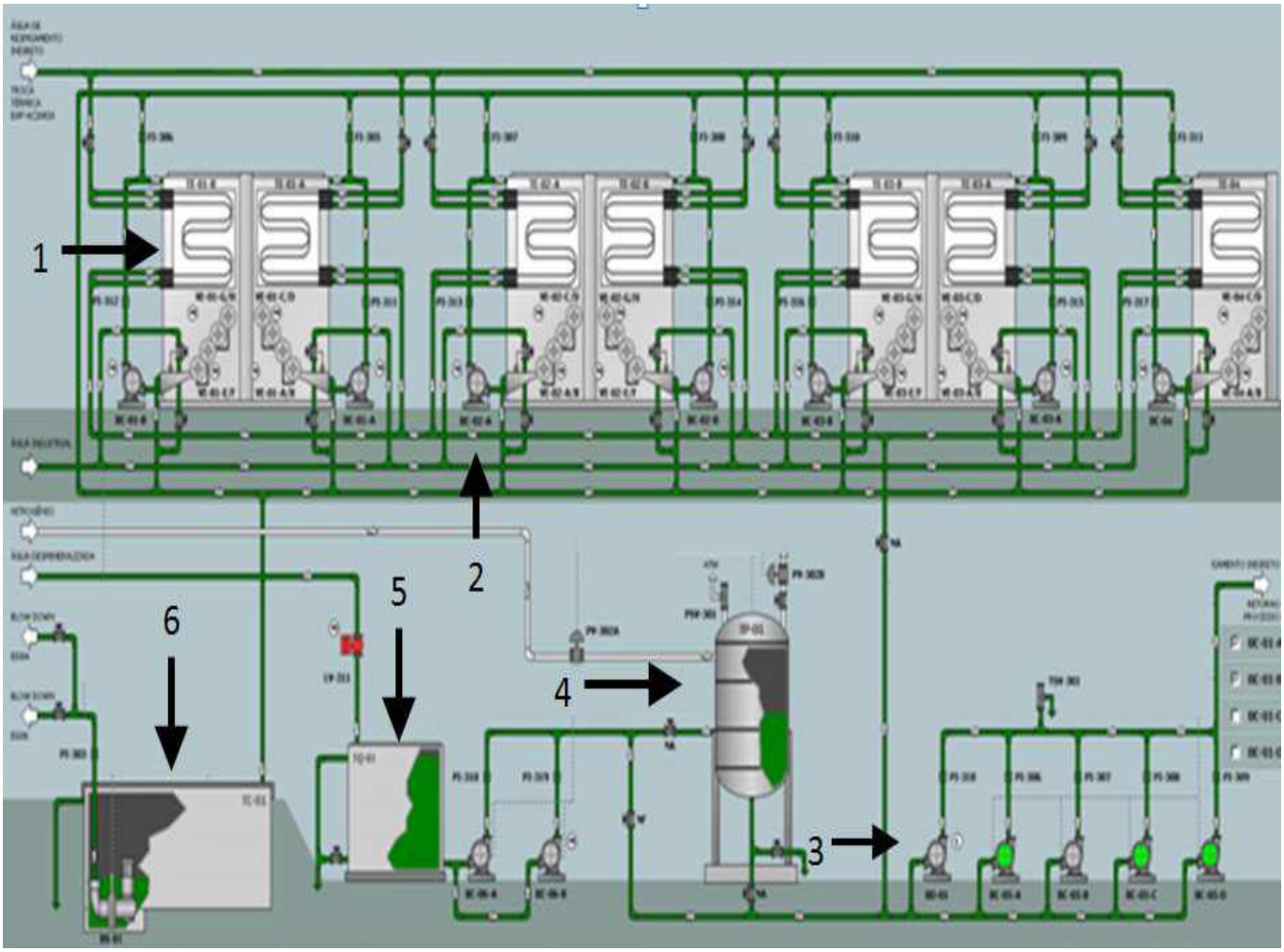
4.1 - Planta de Troca Térmica

A empresa em estudo está localizada no estado de Minas Gerais há 124 Km da capital, apresenta uma planta de troca térmica para atender a demanda de resfriamento do forno elétrico, na indústria siderúrgica. A planta possui capacidade nominal total do sistema implantado de 1200m³/h e foi projetada para resfriar o efluente de 50°C para 35°C, por meio de torres de resfriamento combinado, ou seja, apresenta um *range* de troca térmica de 15°C (SEMCO, 2009).

Após resfriada, a água retorna ao sistema de troca térmica indireta do alto forno elétrico da usina, que passa pela carcaça do forno, por meio de tubulações que são distribuídas por toda a estrutura do forno. Desta maneira, a água percorre resfriando o equipamento, sendo que a água utilizada no sistema é desmineralizada e não tem nenhum contato direto com o equipamento, o que justifica a utilização de uma torre de troca térmica indireta (SEMCO, 2009).

O efluente que vem do sistema de troca térmica indireta do alto forno elétrico chega ao sistema de resfriamento constituído de três torres em operação e um módulo reserva. Com a finalidade principal de manter o circuito pressurizado e também complementação de água (reposição), foi instalado a montante das bombas de retorno do processo (após das torres) um tanque de compensação. Este tanque apresenta-se parcialmente pressurizado por nitrogênio e pela água de compensação (neste circuito desmineralizada). O mesmo mantém o circuito (Figura 24) estável para sempre trabalhar nas condições de pressão desejadas e fornecer água caso ocorra uma perda não prevista ou não localizada.

Figura 24 - Sistema de troca térmica utilizado para obter os dados do trabalho



Fonte: autores, 2018

1- Torre de resfriamento combinado;

2- Bomba que recircula água de spray;

3- Bomba que envia água para resfriar o forno elétrico;

4- Tanque de compensação;

5- Tanque de água desmineralizada;

6- Tanque que recebe a purga das torres de resfriamento

Seu funcionamento se dá como se segue:

a) A água de reposição vinda do reservatório de água desmineralizada alimenta o tanque sob uma pressão maior do que a do circuito e é mantida por sistema de válvulas;

b) O nível de água é mantido entre 50 e 60% da capacidade do tanque de compensação sendo o restante preenchido por nitrogênio;

c) O nitrogênio garante que a pressão no tanque esteja equalizada com a pressão do circuito;

d) Ocorrendo redução na pressão do circuito, o nitrogênio força a alimentação da água para o mesmo, evitando a falta de fluxo;

e) Quando o nível do tanque atinge valores abaixo de 50%, as válvulas de entrada de água são abertas e assim se mantém, até que o nível do tanque de compensação retorne ao seu valor normal;

f) Qualquer perda de nitrogênio que venha a ocorrer é compensada por sua respectiva linha de alimentação;

g) Quando ocorrer acréscimo de pressão no circuito, o tanque de compensação irá absorvê-la e liberar parte do nitrogênio presente em seu interior equalizando a pressão do sistema;

Para evitar a concentração de sais no circuito, uma purga foi instalada. A mesma direciona tal fluxo para um poço de recebimento com um tempo de detenção hidráulico de aproximadamente uma hora, uma bomba é acionada, a qual direciona este fluxo para a bacia das torres de outro sistema de troca térmica instalado nesta mesma estação de tratamento de efluente, como água de reposição, por ser um sistema que utiliza uma água menos nobre.

A água fria que sai das torres de resfriamento combinado retorna através de bombas, para o sistema de troca térmica indireta do alto forno elétrico da Usina.

4.2 - Descrição do Equipamento

A água a ser resfriada é distribuída igualmente em de 4 torres (Figura 25 e 26) em paralelo, sendo três de 2 módulos e uma de apenas 1 módulo. Cada módulo possui 4

ventiladores, um tanque de 1,500 m³, e as seguintes dimensões. Comprimento 3,545, largura 2,397 e altura 2,477. As torres possuem dois módulos: o de troca térmica e o módulo tanque/ventilador.

Figura 25 - Torre de resfriamento em circuito fechado.

Fonte: (SEMCO, 2009)

1- O sistema de distribuição de água, consiste em distribuidores e ramais de pulverização em tubos de PVC, permitindo uma distribuição uniforme de água sobre a serpentina sob quaisquer condições de operação. A água sai do bico (5) a uma vazão de 1,69 m³/h (SEMCO,2009).

2 - Os eliminadores separam de forma eficaz as gotas de água do fluxo de ar através de três deflexões direcionais. O formato das lâminas na saída do ar aumenta a velocidade de descarga, direcionando-a para longe da tomada de ar dos ventiladores.

3- Carcaça da torre.

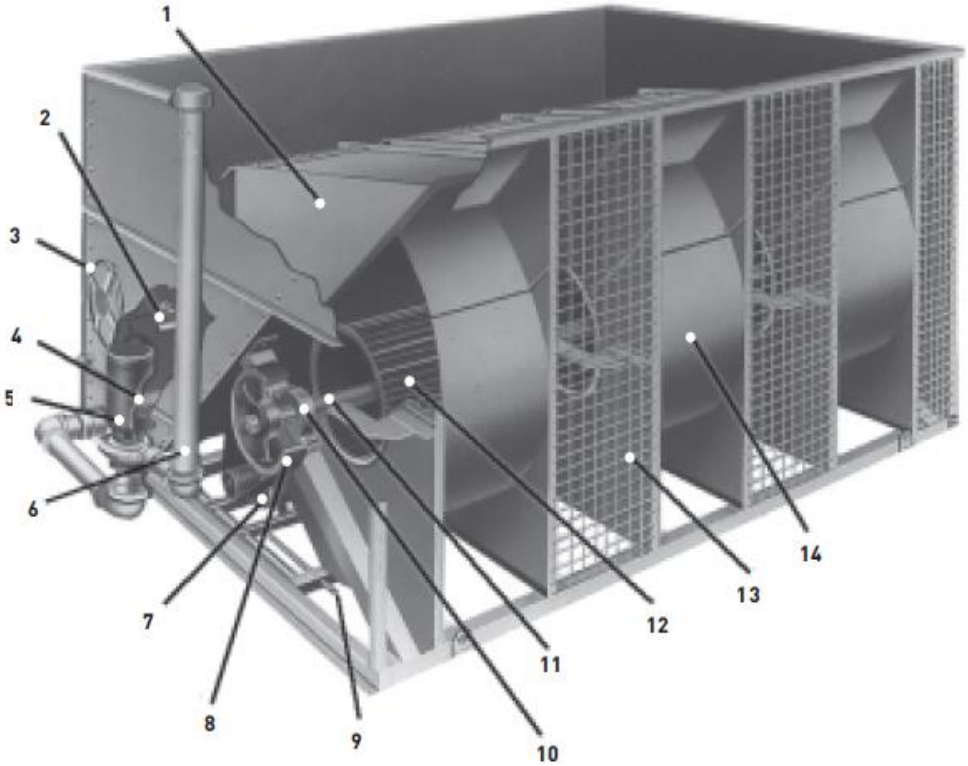
4 - A serpentina é constituída de uma tubulação de aço de diâmetro externo de 26,7mm e diâmetro interno de 20,96mm, projetada para uma baixa perda de carga, com tubos em espiral, a fim de possibilitar o rápido escoamento do fluído resfriado. O comprimento total da serpentina é de 54255 mm por circuito (SEMCO, 2009).

5 - Bicos aspersores

6 - Conexão de saída da serpentina

7 - Conexão de entrada da serpentina

Figura 26 - Módulo tanque/ventilador



Fonte:(SEMCO, 2009)

1 - Bocal de descarga do ventilador

2 - A válvula de água de reposição é controlada por uma boia de plástico de grande Diâmetro;

3 - Portas circulares de acesso ao tanque de água de spray.

4 – O Filtro

5 - Bomba d´água de recirculação transporta a água do tanque para os spray.

6 - Linha de purga

7 - Motor dos ventiladores

8 - Polias do ventilador

9 - Barra roscada para ajuste de tensão das correias

10 - Mancal de rolamentos

11 - Eixo do ventilador

12 - Ventiladores (rotores centrífugos) de pás curvadas para a frente e insufla uma carga de vento de 35 m/s.

13 - Tela do ventilador. A proteção para as partes móveis é feita através de telas metálicas situadas na face frontal das unidades, e painéis cegos nas faces laterais

14 - Carcaça do ventilador (voluta)

4.3- Modelagem física e matemática do processo

Os modelos (Figura 27) de comportamento térmico em torres de resfriamento são descritos sempre pelas mesmas equações físicas, diferindo em algumas consideração e pressuposto, a teoria básica assume as seguintes hipóteses:

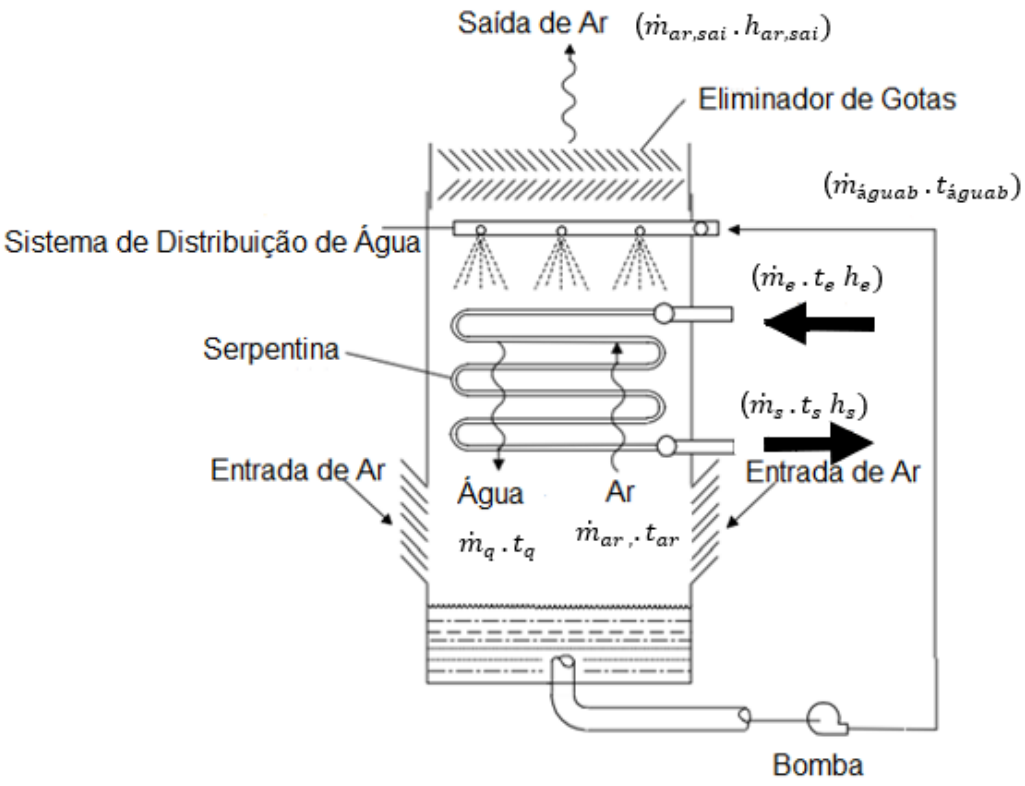
1- A torre é termicamente isolada, despreza-se a transferência de calor através do corpo da torre de arrefecimento;

2- O feixe de tubos completamente molhado, e de modo uniforme;

3- Escoamento do ar uniforme;

4 - Coeficiente de transferência de massa e calor constantes ao longo do feixe de tubos.

Figura 27 - Volume de controle para a construção do balaço de massa e energia.



Fonte: adaptado de QURESHI; ZUBAIR, 2007

O cálculo para obtenção da potência calorifica liberada pela planta térmica é obtida pela equação 4.1. Algumas considerações devem ser utilizadas(MALISKA, 2004)t: Temperatura na água de recirculação constante e para o coeficiente de transferência de calor interno, na avaliação das propriedades do fluido refrigerante foi considerado uma temperatura média dada pela média aritmética entre a temperatura de entrada e de saída do líquido (JABARDO, 1999). A tabela 1 está elencada as condições de projeto.

Tabela 1 - Condições de Projeto.

Circuito	**Modelo do Equipamento**	**Quantidade**	**Vazão Total (m^3/h)**	**Vazão Unitária (m^3/h)**	**Temperaturas TE/TS/TBU(°C)**
E0303	VXI – 430 – 3	3	1200	400	50/35/26
E0303	VXI – 215 – 3	1	200	200	50/35/26

Fonte: (autores,2018)

Energia térmica a ser removida:

$$Q = m * h = \dot{m} * \dot{c_p} * \Delta T \tag{4.1}$$

Onde:

Q = Calor a ser removido em kcal/h;

$\dot{m}$ = Vazão mássica de recirculação do fluido refrigerante em kg/h;

h = Entalpia do fluido refrigerante em kcal/kg;

$\dot{c}_p$ = capacidade calorífica específico do fluido refrigerante em kcal/kg*°C – 0,9982;

ΔT = Variação de temperatura do fluido refrigerante (Temperatura de água quente – Temperatura de Água fria) em °C;

Dado Auxiliar: Densidade do fluido Refrigerante – ρ – em kg/m^3 – 991,29.

4.4- Energia Térmica a Rejeitada

A fim de avaliar a capacidade da torre de resfriamento, deve-se determinar a taxa de energia térmica rejeitada para o ambiente, $\dot{q}$, em kW. Este calor rejeitado pelo

equipamento pode ser calculado de duas maneiras. A primeira delas é através do balanço térmico com a corrente de ar e com a água de reposição da bacia da torre de resfriamento, conforme representado pela equação 4.2, esta é obtida através do balanço entre as diferentes condições do ar de entrada e saída (OTTO, 2004):

$$\dot{q} = \dot{q}_{ar} - \dot{q}_{m-evap}$$

$$\dot{q} = \dot{m}_{ar} \cdot \left(h_{ar,sai} - h_{ar,ent}\right) - \dot{m}_{águab} \cdot h_{águab} \tag{4.2}$$

$\dot{m}_{ar}$ – Vazão mássica de ar seco que passa através do resfriador [kg/s]

$h_{ar,sai}$ – Entalpia de saída do ar [kJ/kg]

$h_{ar,ent}$– Entalpia de entrada do ar [kJ/kg]

$\dot{m}_{águab}$– Vazão mássica da água de reposição [kg/s]

$h_{águab}$ – Entalpia da água na bacia [kJ/kg]

A outra forma é realizando o balanço térmico na corrente de fluído refrigerante e de água de reposição, onde o calor rejeitado é igual a vazão mássica de refrigerante multiplicado pela variação de entalpia de entrada e saída menos a taxa de calor transferida devido à agua de reposição na bacia, que, quando entra a uma temperatura diferente da água na bacia poderá entregar ou retirar calor do sistema, equação 4.3 (JUNIOR, I. CA. A., 2014).

$$\dot{q} = \dot{m}_r \cdot \left(i_{r,ent} - i_{r,sai}\right) - \dot{m}_{wr} \cdot \left(i_w - i_{wr}\right) \tag{4.3}$$

m_r – Vazão mássica de fluido refrigerante [kg/s]

$i_{r,sai}$ – Entalpia de saída do fluido refrigerante [kJ/kg]

$i_{r,ent}$ – Entalpia de entrada do fluido refrigerante [kJ/kg]

i_{wr} – Entalpia da água de reposição [kJ/kg]

4.5 - Coeficiente Global de Transferência

4.5.1- Coeficiente Global de Transferência de Calor –Método Clássico

O coeficiente global de transferência de calor é definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre os fluídos (KOVAČEVIĆ; SOURBRON,

2017). A associação em série das resistências resulta a equação abaixo que auxilia na determinação do coeficiente global de transferência de energia térmica, equação 4.4:

$$U = \frac{1}{\frac{d_{ext}}{d_{int}} \cdot \left(\frac{1}{h_{int}}\right) + \frac{d_{ext}}{d_m} \cdot \left(\frac{L}{k_T}\right) + \frac{1}{h_{ext}}} \qquad (4.4)$$

k_T – Condutividade térmica do tubo [W/(m.ºC)]

d_{int} – Diâmetro interno do tubo [m]

d_{ext} – Diâmetro externo do tubo [m]

d_m – Diâmetro médio do tubo, dado pela média aritmética entre d_{ext}ed_{int} [m]

L – Espessura do tubo [m]

h_{int} – Coef. transferência de calor entre o fluído refrigerante e a superfície interna do tubo [W/(m².ºC)]

h_{ext} – Coef. transferência de calor entre a superfície externa dos tubos e a água [W/(m².ºC)]

4.5.2- Coeficiente de Transferência de Calor Entre o Fluído Refrigerante e a Superfície Interna dos Tubos

O coeficiente de transferência de calor entre o fluído refrigerante e a superfície interna do tubo calculado em W/(m².ºC) é obtido da equação 4.5, em função do número de Nusselt e da condutividade térmica do fluído refrigerante (SCHOCH *et al.*, 2007).

$$h_{int} = \frac{k_r}{d_{int}} \cdot Nu_r \qquad (4.5)$$

k_r – Condutividade térmica do fluído refrigerante [W/(m.ºC)]

Nu_r – Número de Nusselt do fluído refrigerante

O número de Nusselt, equação 4.6, para resfriamento em escoamento turbulento em tubos circulares pode ser calculado por:

$$Nu_r = 0.023 \cdot {Re_r}^{4/5} \cdot {Pr_r}^{0.3} \qquad (4.6)$$

Re_r – Número de Reynolds do fluído refrigerante;

Pr_r - Número de Prandtl do fluído refrigerante

Para escoamento incompressível em regime estacionário através de um tubo com área de seção reta uniforme, o número de Reynolds para o fluido refrigerante é determinado a partir da equação 4.7:

$$Re_r = \frac{4 \cdot \dot{m}_r}{\pi \cdot d_{int} \cdot \mu_r} \tag{4.7}$$

M_r – Viscosidade dinâmica do fluído refrigerante [N.s/m²]

4.5.3- Coeficiente de Transferência de Calor Entre a Superfície Externa dos Tubos e a Água

O coeficiente de transferência de calor entre o tubo e a água calculado em W/(m².ºC) é baseado na relação (Γ/d_{ext}), em que Γ representa a vazão de água por unidade de comprimento de tubo [kg/(m.s)] e d_{ext} o diâmetro externo dos tubos [m].

Mizushina desenvolveu uma correlação para uma faixa de aplicabilidade válida para $0.2 < \Gamma/d_{ext} < 5.5$ kg/(m².s). Esta correlação é descrita pela equação 4.8:

$$h_{ext} = 2102.9 \cdot \left(\frac{\Gamma}{d_{ext}}\right)^{1/3} \tag{4.8}$$

Já Tovaras apresentou a determinação do coeficiente de transferência de calor entre a superfície externa do tubo e a água, em função dos números de Nusselt do filme de água (Nu_w), Reynolds do filme de água (Re_w) e do ar (Re_{ar}) e Prandtl da água (Pr_w). Assim, para $3000 < Re_{ar} < 6900$.

Após calcular estas variáveis, o coeficiente de transferência de calor entre a superfície externa dos tubos e a água h_{ext} pode ser extraído da equação 4.9, para números de Reynolds da água entre 160 e 360 e para números de Prandtl da água entre 4.3 e 11.3 (JUNIOR, I. CA. A., 2014):

$$Nu_w = 1.1 \times 10^{-2} \cdot {Re_w}^{0.3} \cdot {Pr_w}^{0.62} \qquad 4.9$$

Onde

$$Re_w = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_w}$$

$$Re_{ar} = \frac{u_0 \cdot d_{ext} \cdot \rho_{ar}}{\mu_{ar}}$$

μ_w – Viscosidade dinâmica da água [N.s/m²]

μ_{ar} – Viscosidade dinâmica do ar [N.s/m²]

u_0 – Velocidade do ar na menor seção transversal [m/s]

$$Nu_w = \left(\frac{{\vartheta_w}^2}{g}\right)^{1/3} \cdot \frac{h_{ext}}{k_w}$$

k_w – Condutividade térmica da água [W/(m.ºC)]

4.5.4- Coeficiente de Transferência de Massa

A transferência de massa ocorre na superfície do filme de água para a mistura ar e vapor d'água que escoa em contra corrente com este filme (JUNIOR, I. CA. A., 2014).

Parker apresenta o coeficiente de transferência de massa, h_m [kg/m².s)], como uma função da vazão mássica do ar na seção mínima de passagem G_{ar}[kg/(m².s)]. A equação abaixo descreve esta correlação que é válida para a faixa compreendida entre 0.68 <G_{ar}< 5 kg/(m².s).

$$h_m = 0.04935 \cdot {G_{ar}}^{0.9}$$

Mizushima realizou testes com tubos de diâmetros externos entre 12 e 40 mm e a correlação encontrada por este pesquisador, válida para 1.2 x 10^3<Re_{ar}< 14 x 10^3 e 50 <Re_w< 240, foi:

$$h_m = 5.5439 * 10^{-8} \cdot {Re_{ar}}^{0.9} \cdot {Re_w}^{0.15} \cdot {d_{ext}}^{-1.6}$$

Niitsu testou tubos lisos e aletados e encontrou em todos os casos ensaiados um aumento do coeficiente de transferência de massa independente da vazão de água para valores de Γ/d_{ext} acima de 0.7. A equação que define o coeficiente de transferência de massa para tubos lisos é (SCHOCH *et al.*, 2007):

$$h_m = 0.076 \cdot G_{ar}{}^{0.8}$$

A aplicação desta correlação é recomendada para $1.5 < G_{ar} < 5$ kg/(m².s).

4.5.5 - Coeficiente Global de Transferência – Experimental

Depois de calculado o calor rejeitado, é possível obter o coeficiente global de transferência de calor experimental, U_{exp}(equação 4.10), em W/(m².ºC).

$$U_{exp} = \frac{\dot{q}}{A.\Delta T_{ml}} \qquad 4.10$$

A – Área de troca térmica [m²]

Onde ΔT_{ml} pode ser obtido com o auxílio da equação 4.11

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} \qquad 4.11$$

Para

$$\Delta T_1 = T_{r,ent} - T_w$$

$$\Delta T_2 = T_{r,sai} - T_w$$

4.6.4 - Efetividade

A efetividade térmica (ε) do resfriador evaporativo pode ser determinada pela equação 11.12(JUNIOR, I. CA. A., 2014):

$$\varepsilon = \frac{i_{r,ent} - i_{r,sai}}{i_{r,ent} - i_{TBU,ent}} \qquad 4.12$$

$i_{r,ent}$ – Entalpia do fluído refrigerante na entrada do trocador [kJ/kg]

$i_{r,sai}$ – Entalpia do fluído refrigerante na saída do trocador [kJ/kg]

$i_{TBU,ent}$ – Entalpia do fluído refrigerante na temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do trocador [kJ/kg]

4.6 – Lógica Fuzzy Aplicada a Torre

Para a implementação dos modelos fuzzy, faz-se necessário a sequência de procedimentos que desenvolvam parte a parte o modelo. A figura 28 representa os passos para a implementação do sistema fuzzy. Os modelos foram desenvolvidos utilizando a fuzzificação dos dados, modelagem da base de regras e defuzzificação do sistema proposto(BOUCHAFAA; HAMZAOUI; HADJAMMAR, 2011).

Figura 28 - Implementação do sistema fuzzy

Fonte: (autores, 2018)

Na análise utilizou-se o método de inferência de Mamdani que traz, como resposta, um conjunto Fuzzy originado da combinação dos valores de entrada com seus respectivos graus de pertinência, através do operador mínimo e em seguida pela superposição das regras, através do operador máximo (Leite *et al.*, 2010). A defuzificação foi feita utilizando-se o método média do máximos, que considera todas as possibilidades de saída transformando o conjunto Fuzzy originado pela inferência em valor numérico (SCHIASSI *et al.*, 2015)

Para construção da lógica Fuzzy da torre de resfriamento, foi utilizado o toolbox do Scilab. Dentre os diversos parâmetros controlados na operação da torre de resfriamento, foram elencados para lógica cinco, também denominadas de variáveis linguísticas de entrada, são elas, vazão de entrada do fluido, temperatura de entrada do ar, umidade relativa e temperatura da água que alimenta os bicos aspersores. Essas foram associadas à variável temperatura de entrada da água na serpentina. Para a preposição dos conjuntos fuzzy, das variáveis linguísticas, das funções de pertinência e a base de regras fuzzy, foram obtidas através de valores quantificados em quatro medidas diárias durante 30 dias consecutivos.

A variável de saída do sistema de inferência fuzzy, denominada de temperatura de saída da água foi quantificada nos mesmos dias e horários, sendo ela uma variável de interesse final da torre.

As funções de pertinência associada a cada variável linguística estão expressas na Tabela 2.

Tabela 2 - Funções de Pertinência

VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS DE ENTRADA	**FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA**			
	Nominal de Projeto	**Baixa de Operação**	**Média de Operação**	**Alta de Operação**
Vazão de entrada	380 m³/h 390 m³/h 400 m³/h 420 m³/h	418 m³/h 425 m³/h 433 m³/h 441 m³/h	433 m³/h 441 m³/h 450 m³/h	441 m³/h 456 m³/h 451 m³/h 456 m³/h
Temperatura de entrada da água na serpentina	45°C 46.5°C 48.5°C 50°C	26°C 29°C 32°C 35°C	32°C 37°C 41°C	37°C 40°C 43°C 45°C
Temperatura de entrada do ar	29°C 30°C 31°C 32°C	23°C 24°C 25°C 26°C	25°C 29°C 32°C	29°C 31°C 33°C 35°C
Umidade Relativa	59% 60% 61% 62%	39% 43% 44% 45%	44% 59% 74%	59% 65% 71% 77%
Temperatura da água dos bicos aspersores	25°C 26°C 27°C 28°C	21°C 22°C 23°C 24°C	23°C 25°C 26°C	25°C 26°C 27°C 28°C
VARIÁVEL LINGUÍSTICA DE SAÍDA				

	32°C	25°C	29°C	32°C
Temperatura de Saída da água	33°C	27°C	32°C	33°C
	34°C	29°C	34°C	34°C
	35°C	31°C		35°C

Fontes: (Autores, 2018)

Para construção das regras fuzzy foram analisados 120 pontos em 30 dias e avaliadas as combinações das variáveis linguísticas, logo foram construídas experimentalmente para cada conjunto de associações com a temperatura de entrada da água na serpentina. A variável de projeto não foi inserida visto que a mesma não acorre na operação na planta. A base de regras fuzzy proposta foram elaboradas através de medições reais na planta industrial, através de todas as combinações possíveis. As associações realizadas estão ilustradas nas Tabelas 3, 4,5 e 6, onde A representa valores altos, M representa valores médios e B valores baixos.

Na Tabela 3 foi avaliado a conexões entre as variáveis de entrada vazão de entrada da água com a temperatura de entrada da água na torre e obtendo como resultado a variável de saída a temperatura de saída da água na torre.

Tabela 3- Regras para variáveis de vazão e temperatura de entrada da água.

Vazão de Entrada da Água X Temperatura de Entrada da Água na Serpentina				
	Variáveis Linguísticas de Entrada			**Variáveis Linguísticas de Saída**
Regras	**Vazão de Entrada da Água**	**Conector**	**Temperatura de Entrada da Água**	**Temperatura de Saída**
1	B	or	B	B
2	B	or	M	B
3	M	and	M	M
4	A	and	A	A
5	B	and	B	B
6	M	and	A	M
7	A	and	M	M
8	A	and	B	B

9	M	and	B	B
10	B	and	A	M

Fonte: (autores,2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

Na tabela 4, foi inserida as regras para avaliar as funções de pertinência temperatura da água dos bicos aspersores coma temperatura de entrada da água na torre.

Tabela 4- Regras para variáveis de temperatura da água nos bicos aspersores e a temperatura da água ao entrar na serpentina.

Temperatura da Água dos Bicos Aspersores X Temperatura de Entrada da Água na Serpentina				
	Variáveis Linguísticas de Entrada			**Variáveis Linguísticas de Saída**
Regras	**Temperatura da Água dos Bicos Aspersores**	**Conector**	**Temperatura de Entrada da Água**	**Temperatura de Saída**
1	A	or	A	A
2	B	or	B	B
3	M	and	B	B
4	M	and	A	A
5	M	and	B	B
6	M	and	M	M
7	A	and	B	B
8	A	and	M	M
9	A	and	A	A
10	B	and	B	B

Fonte: (autores,2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

A Tabela 5, está inserida as regras e conectores de interferência para avaliar as variáveis de entrada temperatura de entrada do ar na torre com a temperatura de entrada da água na serpentina.

Tabela 5: Regras para variáveis de temperatura do ar na entrada com a temperatura de entrada da água na serpentina.

Temperatura Entrada do Ar X Temperatura de Entrada da Água na Serpentina				
	Variáveis Linguísticas de Entrada			**Variáveis Linguísticas de Saída**
Regras	**Temperatura Entrada do Ar**	**Conector**	**Temperatura de Entrada da Água**	**Temperatura de Saída**
1	A	or	A	A
2	M	and	M	M
3	M	and	B	B
4	A	and	A	A
5	B	and	M	M
6	B	and	A	A
7	M	and	A	M
8	A	and	M	M
9	A	and	B	B
10	B	and	B	B

Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

A tabela 6 avalia as regras de interferência, para a variáveis de saída temperatura de saída da água na torre de resfriamento, a os conetores entre as variáveis de entrada umidade relativa e temperatura de entrada da água na serpentina.

Tabela 6: Regras para variáveis Umidade relativa com a temperatura de entrada da água.

Umidade Relativa X Temperatura de Entrada da Água na Serpentina				
	Variáveis Linguísticas de Entrada			Variáveis Linguísticas de Saída
Regras	**Umidade Relativa**	**Conector**	**Temperatura de Entrada da Água**	**Temperatura de Saída**
1	A	or	A	A
2	B	or	B	B
3	A	and	M	M
4	M	and	M	M
5	A	and	B	B
6	M	and	A	A
7	M	and	B	B
8	B	and	A	A
9	B	and	B	B
10	B	and	M	M

Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

4.7 - Computação Fluido Dinâmica (CFD) Aplicada a Torre de Resfriamento

Nesse estudo usou-se como base uma serpentina de uma torre de resfriamento combinada com dimensões conforme descritas na Tabela 7. A estratégia de simulação adotada para o presente trabalho, face a capacidade de processamento disponível, foi a simulação 3D, com uso de um pacote comercial de CFD que usa a técnica de Volumes Finitos e Elementos Finitos para o processamento numérico do problema. De acordo com Jeong e Seong (2014) o CFD atual usa principalmente o Método dos Elementos Finitos e o e o Método dos Volumes Finos mais do que o Método das Diferenças Finitas, pois esse último método tem dificuldade em lidar com as complexidades das máquinas.

Tabela 7 - Dimensões da serpentina da Torre de Resfriamento Combinada

Comprimento	**3,5 m**
Diâmetro Interno	0,0203 m
Diâmetro Externo	0,027m
Número de Passos	32

Fonte: (SEMCO, 2009)

Foi realizada análise do comportamento termodinâmico e fluidodinâmico do fluído refrigerante (água), as características de interesse para a simulação utilizadas neste projeto junto com os parâmetros se encontram na Figura 29.

Figura 29 - Parâmetros e Condições de contorno utilizadas nas simulações.

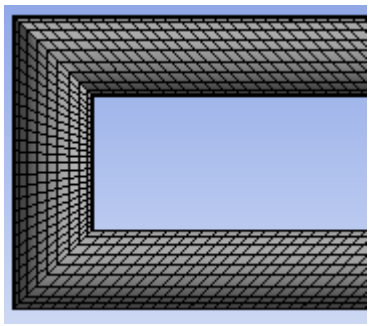
Modelo OFF		
Viscosidade do Fluido: Laminar		
Condição de Entrada: Velocity Inlet		
Referência de Pressão à saída da Serpentina		
Prâmetros Relaxação	Pressão : 0,3	
	Densidade: 1	
	Forças de Corpo: 1	
	Momentum: 0,7	
Máximo de Iteração / Passo de Tempo		4000
Informações especificas para cada particula do projeto		
Fluido Refrigerante (Água)	Massa Específica: 1000 Kg/m³	

Fonte: adaptado do programa computacional, (Autores, 2018).

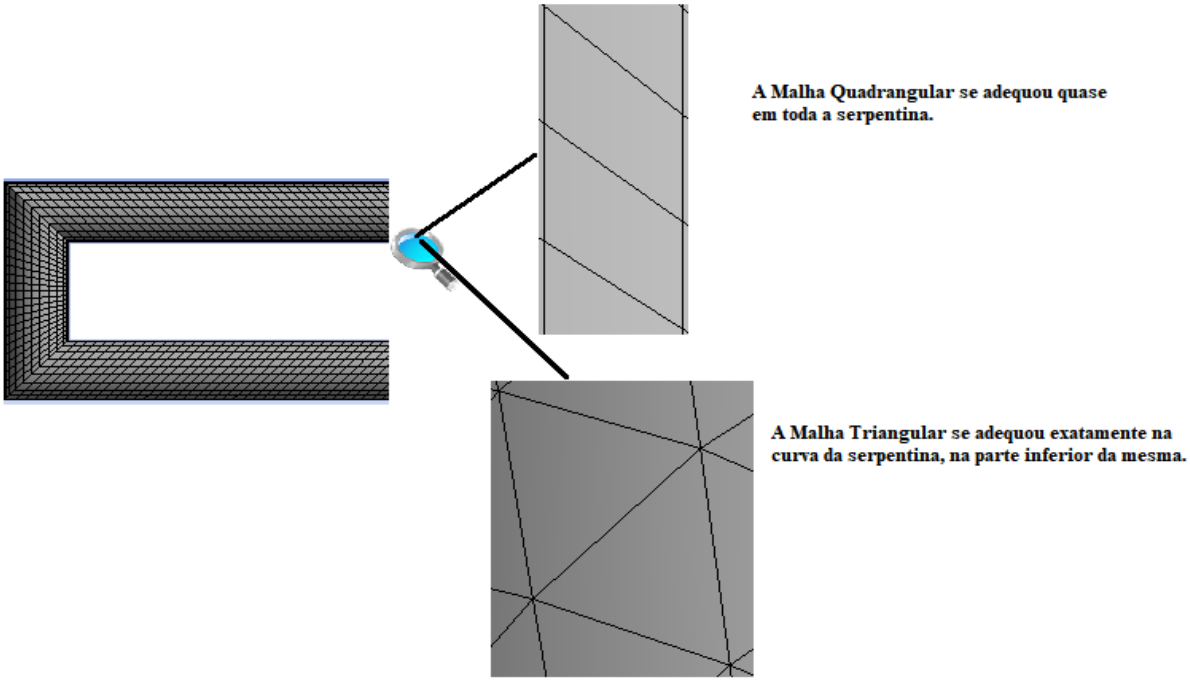
No estudo de simulação via CFD, foi utilizada configuração de malha, não-estruturada (triangular) e estruturada (quadrangular), a união dessas duas malhas recebe o nome de malha híbrida, de acordo (CENGEL; CIMBALA, 2017) malhas híbridas são aquelas formadas pela combinação entre a malha estruturada e a não-estruturada, elas são utilizadas quando necessita-se de um melhor detalhamento em algumas regiões (uso da malha não-estruturada), no entanto nos demais locais não se tem a conveniência desse detalhamento, (usa-se a estruturada), ocorrendo dessa forma a redução no esforço computacional(ZANUTTO, 2015). O projeto desse estudo apresenta aproximadamente 793.940 células, com um *mesh* de 0,005 Figura 30.

Foi adotado o modelo Off devido estudo apresentar passagem de um único fluído, como informado no guia do software comercial o modelo Off desabilita o cálculo do fluxo multifásico, permitindo consequentemente a avaliação de compostos como fase única (CANONSBURG, 2012). Sendo que as leis de conservação de massa e momento são satisfeitas devido a técnica de volume finitos e elementos finitos (JEONG; SEONG, 2014).

Figura 30 - Apresentação da malha hibrida da serpentina no mesh de 0,005. 29.a - Malha de uma região da serpentina, 29.b - Zoom da malha – da serpentina



a)



b)

Fonte: (Autores, 2018)

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados referentes a aplicação de *softwares* em variáveis da torre de resfriamento de contato indireto, para avaliar seu comportamento e eficiência em sua operação **.**

Da seção 4.3, utilizando-se a equação 4.1 pode-se calcular o calor removido pela planta:

$$Q = 1200\ \frac{m^3}{h} * 991{,}29\ \frac{kg}{m^3} * 0{,}9982\ \frac{kcal}{kg * °C} * (50 - 35)°C = 17.811.102{,}2\ \frac{kcal}{h}$$

Através do manual de especificação dos TE's fornecidos pela SEMCO e tendo a Lay Out de operação com 3 equipamentos VXI – 430 – 3 em operação (6 células) e 1 VXI – 215 – 3 em reserva (1 célula), o sistema instalado seria capaz de remover até 18.000.000,0 Kcal/h de energia uma vez que cada célula foi projetada para remoção de 3.000.000,0 de Kcal/h.

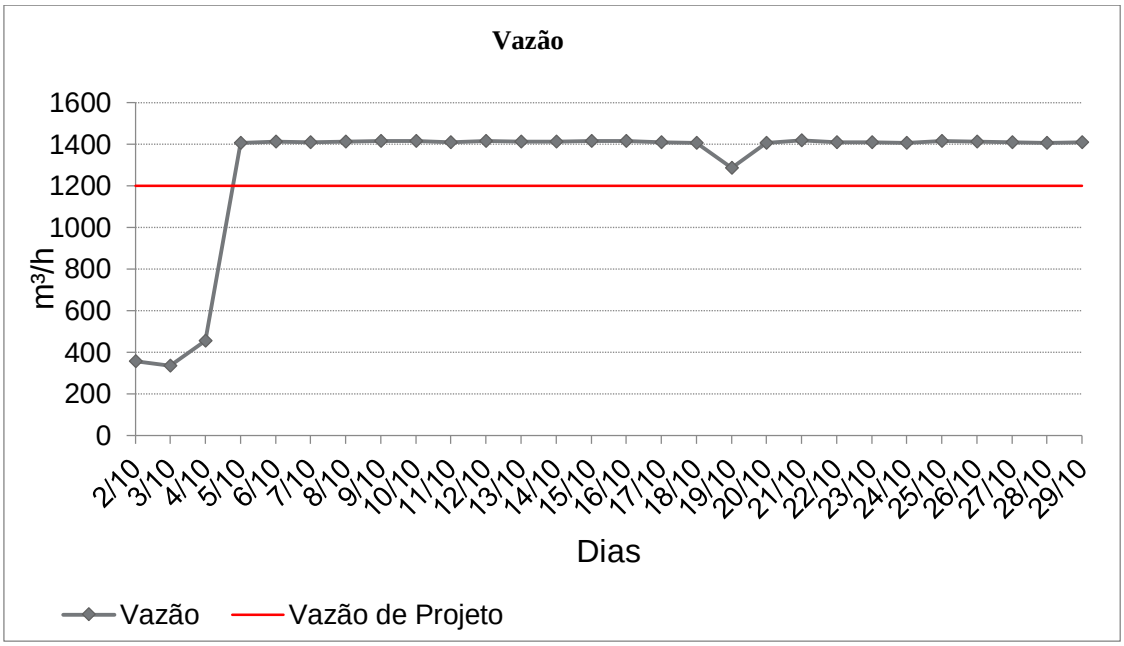
Tendo como ponto de partida as premissas de projeto (Vazão de recirculação de 1200 m³/h, Temperatura de entrada de 50 °C, Temperatura de saída de 35 °C, $\Delta T\ de\ 15°C$ e Temperatura de Bulbo Úmido de 26 °C, o sistema de troca Térmica apresenta apenas, 1,05 % de margem de segurança nas condições de trabalho pelas condições de projeto, margem está considerada muito pequena.

Fazendo-se o cálculo reverso, pode-se identificar qual o limite de vazão de recirculação do sistema que poderia consumir tomando-se a capacidade de remoção de calor dos equipamentos instalados (sem o reserva) como ponto de partida e mantendo-se todas as demais premissas de projeto, o que resulta em um valor apenas de 1.212 m^3/h. Conforme poder ser visto no gráfico abaixo, amostragem do mês de outubro de 2018, a vazão de recirculação do sistema está acima da prevista em projeto (1200 m^3/h) em 16,6 %, sendo a vazão de trabalho em tono de 1400 m^3/h.

Tendo-se o valor de recirculação acima conforme mostrado na Figura 31 (1400 m^3/h, ou em uma torre 466,7m³/h), e as demais premissas de projeto conforme o especificado (Temperatura de entrada de 50 °C, Temperatura de saída de 35 °C, $\Delta T\ de\ 15°C$ e Temperatura de Bulbo Úmido de 26 °C, o novo valor de calor a ser removido pelo sistema de trocadores evaporativos instalados em campo seria de 20.779.619,2 kcal/h. Nesta condição o sistema não mais poderia contar com o trocador

evaporativo reserva, uma vez que para suprir a demanda de rejeição de calor, o processo passaria a necessitar das 7 células em operação totalizando a capacidade de rejeição de 21.000.000,0 Kcal/h.

Figura 31 - Vazão de Recirculação do sistema de 4 torres juntas no mês de outubro de 2018.



Fontes: (Autores, 2018)

Uma torre opera acima de sua vazão máxima, todavia não há recebimento de água de entrada nas serpentinas acima de sua temperatura de projeto, sendo sua média no mês em estudo de 38,25°C. Logo, o os indicadores superiores de vazão não impactaram muito na temperatura de saída que deve ficar baixo de 35 °C, sendo a média para o mês de 31,79 °C. Os cálculos para rejeição de calor na torre utilizando a equação 11.1 em todos os pontos amostrais. Observasse que em nem uma amostra os valores chegaram ao limite de projeto, sendo o valor médio de 8.727.992,23 kcal/h, o valor mínimo de 2.099.982,00 kcal/h e o valor máximo de 12.195.271,29 kcal/h. Estes valores são obtidos para o sistema completo, os mesmos valores de ponto médio, mínimo e máximo para uma torre são respectivamente 2.909.330,74 kcal/h, 699.994,00 kcal/h e 4.065.090,43 kcal/h. Estes valores não ultrapassaram a capacidade no nominal por torre que é de 3.000.000,0 kcal/h, logo não impacta na recirculação da água desmineralizada para o resfriamento do forno elétrico.

Pelos dados teóricos do evaporador a vazão máxima por máquina é de 113.6 l/s (408.9 m³/h), para que a mesma trabalhe dentro da faixa limite de temperatura de saída.

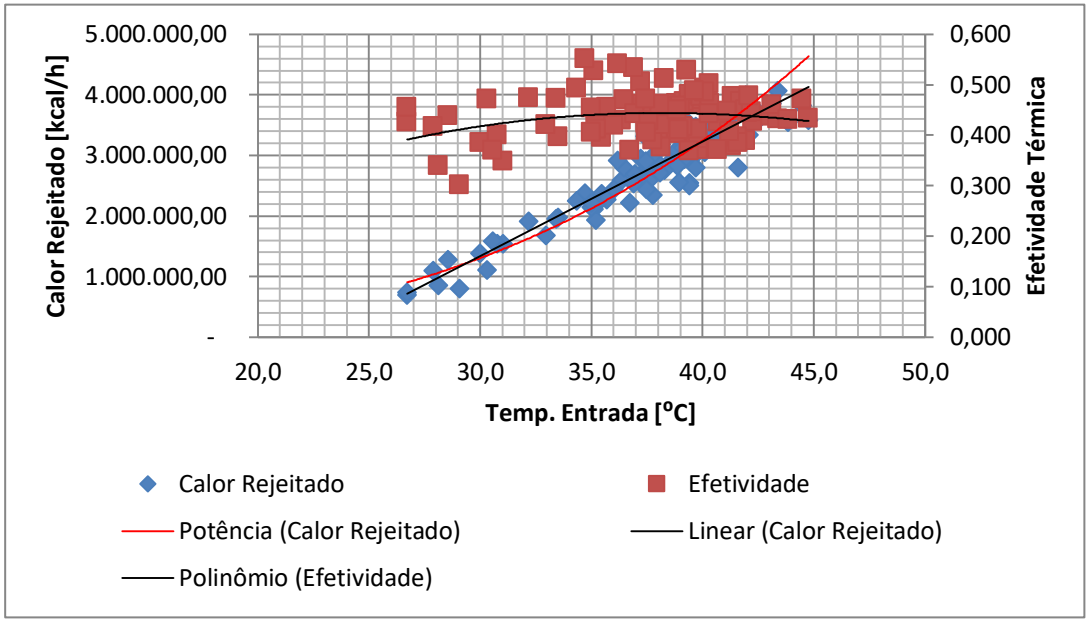
O volume de água de reposição deve ser igual ao volume de água perdida via evaporação. Pelos dados empíricos obtidos as condições operacionais estão fora dos valores estabelecidos pelo fabricante. A vazão é o fator mais importante e limita retirada de calor pelo tempo de residência.

Após o levantamento de dados durante os 30 dias consecutivos, observou-se que se as condições máximas de projeto para temperatura de entrada da água na serpentina forem atingidas (50°C) e as demais variáveis operacionais mantidas, a eficiência da torre não irá suprir a demanda de saída máxima de 35°C para água desmineralizada. Um fator que comprova tal afirmação é exemplificado quando a vazão de entrada for aproximadamente a média(446m³/h), a saída final da torre seria de 38°C e 39°C, sendo estes valores aproximadamente 9% acima da temperatura máxima de saída (35°C).

A temperatura da água aspergida sobre as serpentinas é de grande importância no processo de transferência de calor e massa que governam as condições de resfriamento no interior dos tubos. Tendo em vista que a área total de troca térmica não pode sofrer alteração, a diferença de temperatura entre a água no interior das serpentinas e a água aspergida definirá, juntamente com o coeficiente global de transferência de calor, a taxa de calor transferido. Quanto maior a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do resfriador, maior será a temperatura da água de aspersão.

A Figura 32 expressa o gráfico de efetividade de troca térmica em um trocador evaporativo, definida com base na temperatura de bulbo úmido do ar de entrada no trocador, demonstra ter sensibilidade a este parâmetro de forma direta. Quando somente as temperaturas de entrada dos fluidos são conhecidas ou podem ser estimadas, o método mais adequado é o ε-NUT, que permite a determinação da taxa de transferência de calor e temperaturas de saída (quente ou fria).

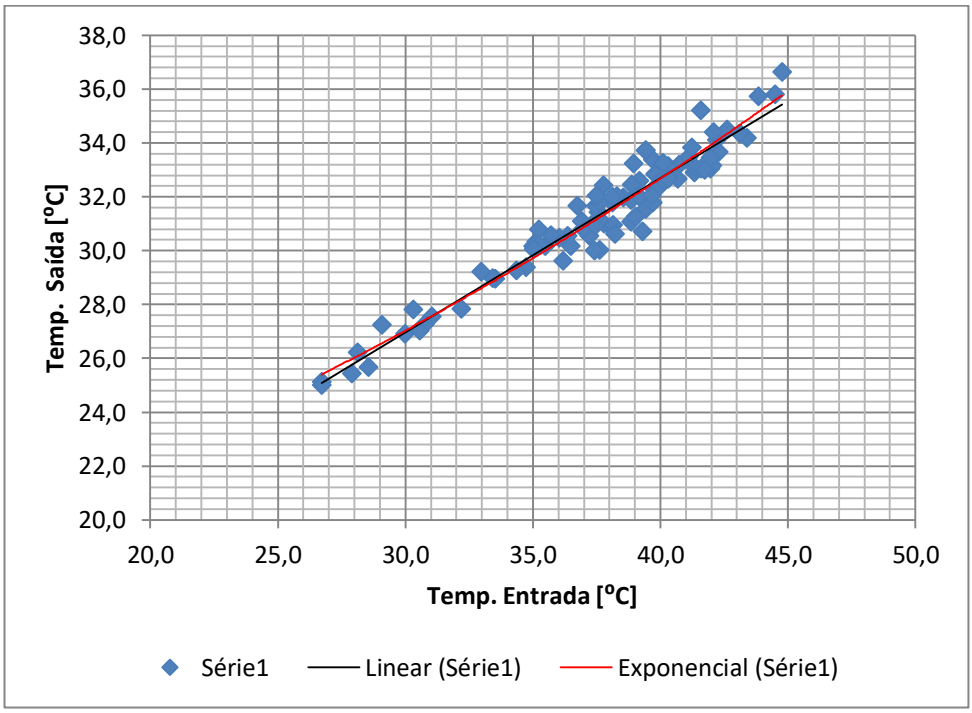
Figura 32 - Relação da temperatura de entrada X Calor Rejeitado X Efetividade Térmica



Fontes: (Autores, 2018)

A Figura 33 é uma gráfico construído para avaliar a interferência entre a temperatura de entrada na torre e a saída, observasse que ambas são proporcionais ao acréscimo de conteúdo energético, quanto maior a temperatura de entrada maior a temperatura de saída, sendo outro argumento para comprovar a relevância e limitações da torre em função da temperatura de entrada da água.

Figura 33 - Temperatura de Entrada X Temperatura de Saída



Fontes: (Autores, 2018)

5.1 – Aplicação da Lógica Fuzzy na Tore de Resfriamento

5.1.1 - Variável Linguística de Entrada

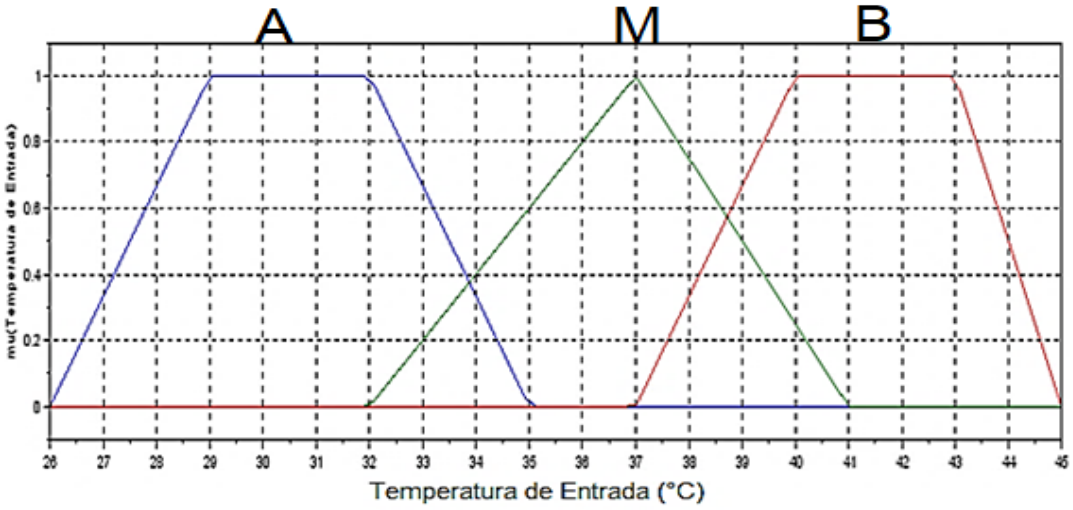
Para a criação das funções de pertinência baixa e alta, foi utilizada a função trapezoidal, pois a mesma apresenta uma região de máximos e seu processamento é rápido. A função triangular foi utilizada para a função de pertinência média, esta apresenta somente um ponto de máximo (CLÁUDIO; MARTINS, 2007).

O gráfico 34 evidência que a planta durante os trinta dias avaliados não recebeu água desmineralizada com temperatura acima da estipulada (50°C), tendo como ponto superior o valor de aproximadamente 45°C, apresentando média de operação no valores próximos a 37°C, visto que o valor máximo de saída é 35°C, o range de temperatura para troca térmica é baixo, para que a variável de saída fique dentro da especificações da planta operacional.

A função temperatura de entrada representa o grau de adesão da pertinência de cada variável linguística, referente a temperatura de saída da água desmineralizada da torre de resfriamento. Os níveis de temperatura de entrada estão separados em quatro cores diferentes entre si. A cor azul indica os pontos baixos obtidos na medição da temperatura de entrada, a cor verde indica as temperaturas médias de entrada, a cor vermelha indica os pontos alto de temperatura de entrada quantificados na amostragem. A função de pertinência utilizada foi escolhida, pois foi a função que melhor representou

o comportamento da variável em estudo. As intersecções das funções de pertinência indicam o ponto de transição entre os níveis de temperatura de entrada referente a cada função.

Figura 34 - Função de pertinência para temperatura da água de entrada na serpentina.



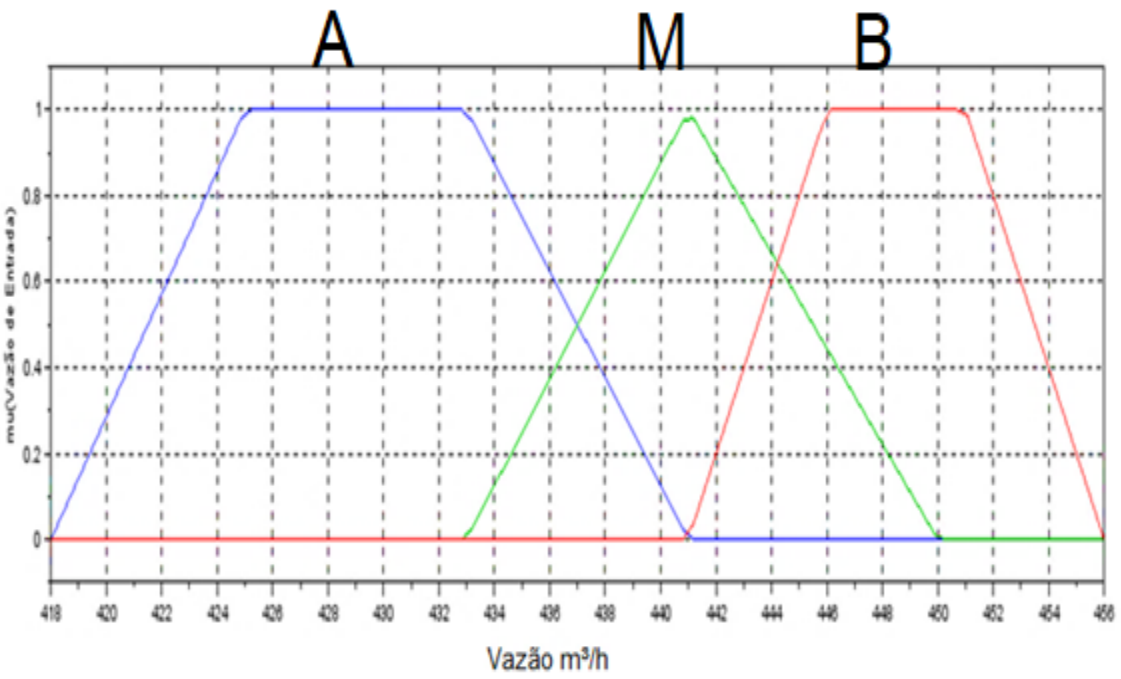
Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

5.1.2 - Vazão

A planta foi projetada para resfriar em 3 módulos 1200m³/h de água desmineralizada. Em uma torre de resfriamento médio a vazão média é de 400 m³/h, com ponto máximo em 420m³/h. Todavia, a planta operou em sua capacidade operacional em dias pontuais, apresentando média de operação de 441 m³/h, superior à de projeto em 5% e em relação ao maior ponto de vazão obtido em aproximadamente 9%.

A função vazão de entrada na serpentina representa o grau de adesão da pertinência de cada variável linguística, referente a temperatura de saída da água desmineralizada da torre de resfriamento. Os níveis da vazão de água desmineralizada na entrada da serpentina estão separados em quatro cores diferentes entre si. Na figura 35 a cor azul indica os pontos baixos obtidos na medição da vazão de entrada, a cor verde indica as temperaturas médias de entrada, a cor vermelha indica os pontos alto da vazão entrada quantificados na amostragem. A função de pertinência utilizada foi escolhida, pois foi a função que melhor representou o comportamento da variável em estudo. As intersecções das funções de pertinência indicam o ponto de transição entre os níveis de temperatura de entrada referente a cada função.

Figura 35 -Função de pertinência para vazão de entrada da água na serpentina



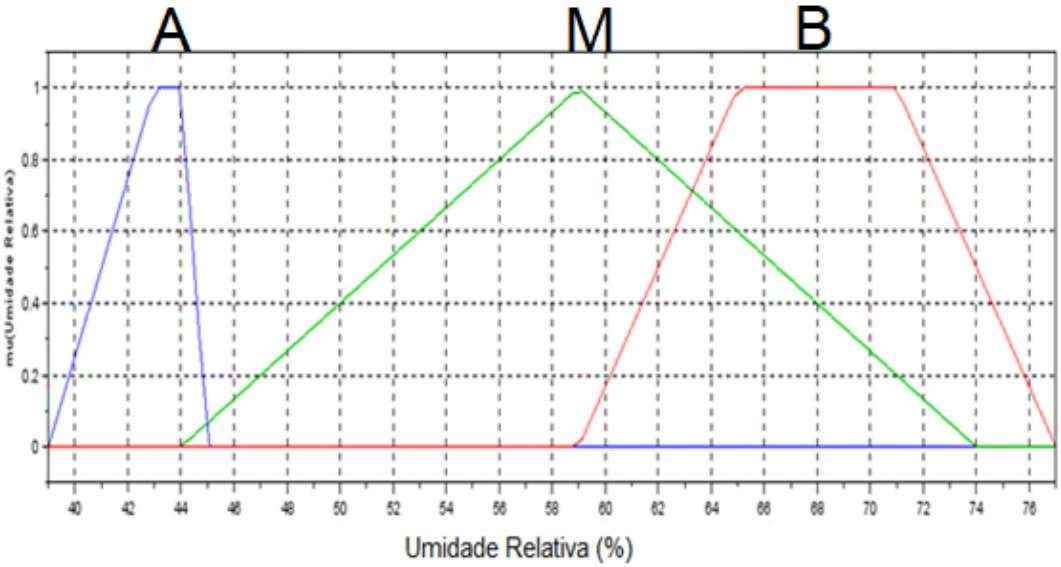
Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

5.1.3 - Umidade

Quanto menor o valor da umidade relativa ambiente, menor é a concentração de vapor d'água no ar, proporcionando assim uma maior taxa de evaporação da água (SHAPIRO *et al.*, 2005). Observa-se a umidade média de operação apresentou valores relativamente interessante como o pico de 59%, todavia houve dias em que a umidade relativa se aproximou da saturação o que gera uma menor eficiência da torre, pois ao ar não ir absorver o vapor d'água gerado e iniciará a condensação

A função Umidade Relativa representa o grau de adesão da pertinência de cada variável linguística, referente a temperatura de saída da água desmineralizada da torre de resfriamento. Os níveis de umidade relativa estão separados em quatro cores diferentes entre si. Na figura 36 a cor azul indica os pontos baixos obtidos na medição da umidade relativa, a cor verde indica as medidas médias de umidade relativa, a cor vermelha indica os pontos alto da umidade relativa quantificados na amostragem. A função de pertinência utilizada foi escolhida, pois foi a função que melhor representou o comportamento da variável em estudo. As intersecções das funções de pertinência indicam o ponto de transição entre os níveis de temperatura de entrada referente a cada função.

Figura 36 - Função de pertinência para umidade.



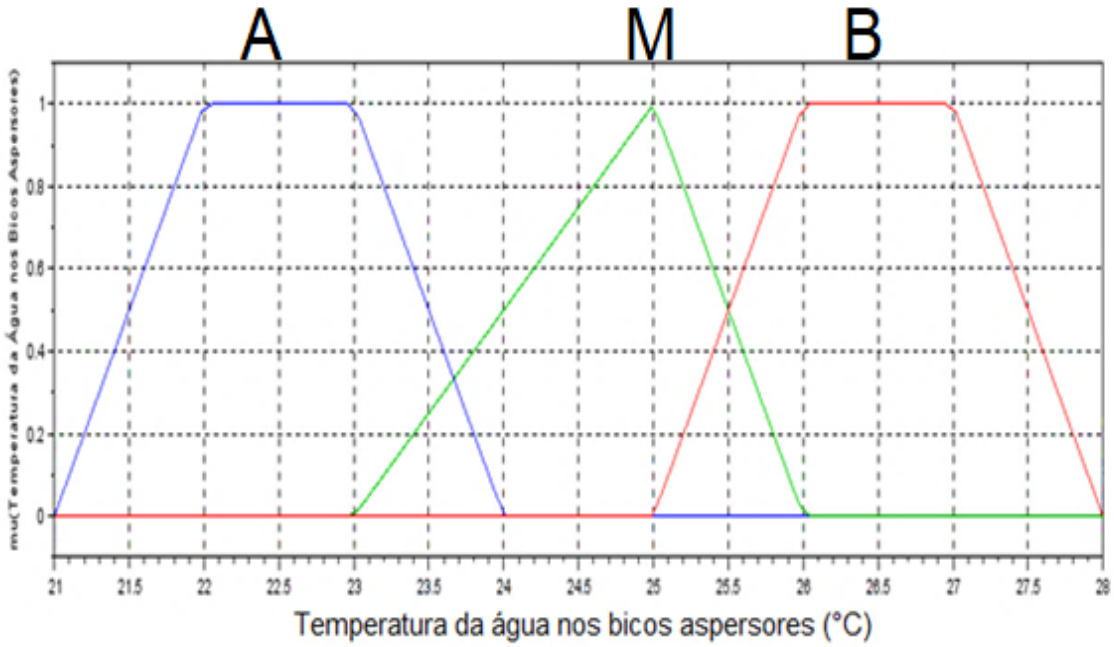
Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

5.1.4 – Temperatura da água dos Bicos Aspersores

A água utilizada para aspersão via bicos aspersores é oriunda do circuito fechado da bacia de água industrial com os distribuídos de água no topo da torre, a temperatura média desta água é diretamente influenciada pela temperatura ambiente. Devido a taxa de evaporação, este circuito deve sofrer purgas e reabastecimento de água para que não ocorra concentração de sais e outros compostos. E necessário a adição de biocidas, para que devido ao contato com ar atmosférico não ocorra proliferação de microrganismo que posteriormente pode gerar entupimentos e deteriora peças da torre de resfriamento (SAMPAIO, F. M. N. MA., 2010).

A função temperatura da água dos bicos aspersores representa o grau de adesão da pertinência de cada variável linguística, referente a temperatura de saída da água desmineralizada da torre de resfriamento. Os níveis da temperatura estão separados em quatro cores diferentes entre si. Na figura 37 a cor azul indica os pontos baixos obtidos na medição da temperatura, a cor verde indica as medidas médias da temperatura, a cor vermelha indica os pontos alto da temperatura quantificados na amostragem. A função de pertinência utilizada foi escolhida, pois foi a função que melhor representou o comportamento da variável em estudo. As intersecções das funções de pertinência indicam o ponto de transição entre os níveis de temperatura de entrada referente a cada função.

Figura 37 - Função de pertinência para temperatura da água nos bicos aspersores.



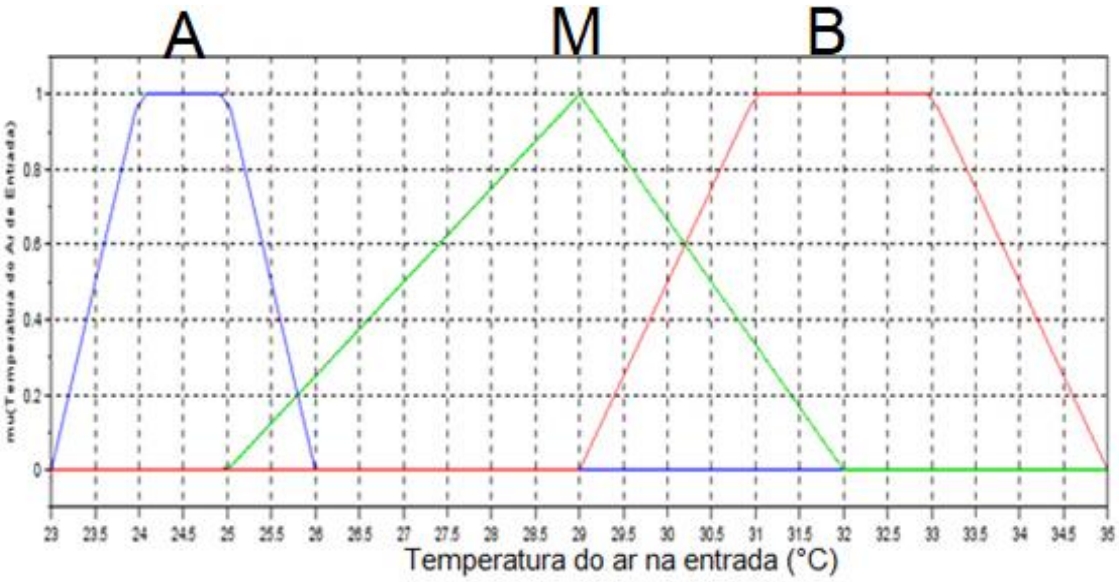
Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

5.1.5 - Temperatura do Ar

O ar é o principal agente carreador para atmosfera de calor, a água dos bicos aspersores auxilia na transferência de calor da serpentina para água e posteriormente da água para o ar que entra na base em contracorrente

A função temperatura do ar representa o grau de adesão da pertinência de cada variável linguística, referente a temperatura de saída da água desmineralizada da torre de resfriamento. Os níveis da temperatura estão separados em quatro cores diferentes entre si. Na figura 38 a cor azul indica os pontos baixos obtidos na medição da temperatura, a cor verde indica as medidas médias da temperatura, a cor vermelha indica os pontos alto da temperatura quantificados na amostragem. A função de pertinência utilizada foi escolhida, pois foi a função que melhor representou o comportamento da variável em estudo. As intersecções das funções de pertinência indicam o ponto de transição entre os níveis de temperatura de entrada referente a cada função.

Figura 38 - Função de pertinência para temperatura do ar.

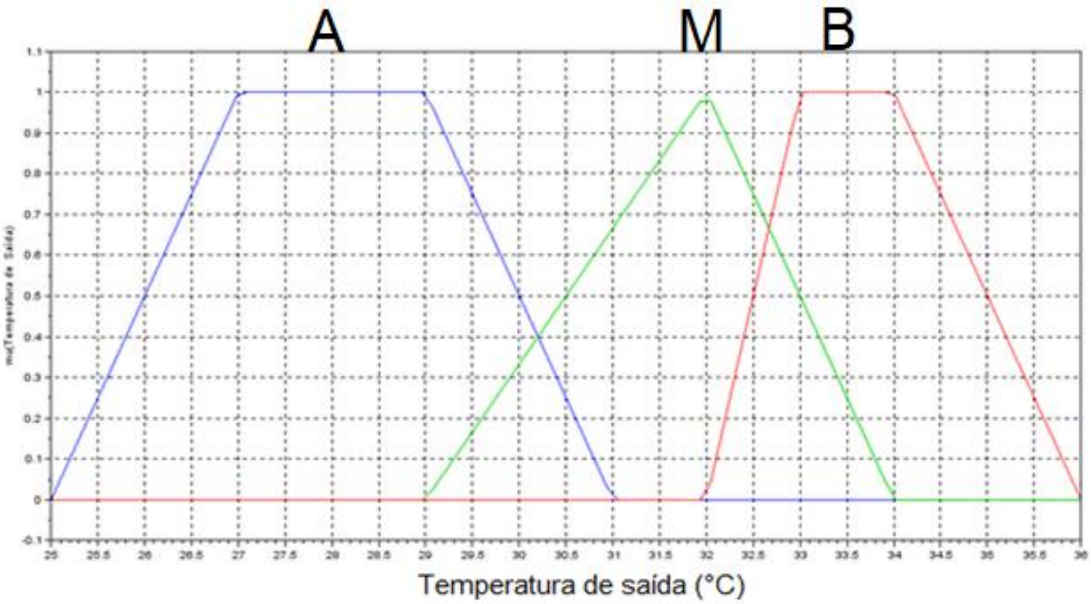


Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

5.1.6 - Temperatura de Saída

Após a fuzzificação dos vetores de entrada, foi estabelecido um único vetor de saída com três níveis de temperatura de saída da água. A saída fuzzy possui um conjunto totalmente abrangente dos níveis de temperatura de uma superfície, na figura 39 a coloração azul claro as temperaturas de saída baixa, na coloração a temperatura de saída média e na vermelha a alta.

Figura 39 - Função de pertinência para temperatura da água de saída.



Fonte: (Autores, 2018) - Legenda: A – Alta M – Média B - Baixa

5.1.7- Superfície de resposta

A apresentação da base de regras de cada modelo é importante devido ao fato de que toda a análise fuzzy depende desses dados. A base de regras deve ser bem elaborada para a máxima eficiência dos modelos propostos. Uma vez desenvolvidos, cada modelo pode executar várias simulações para vários tipos de combinações dos parâmetros sem a necessidade de reimplementar essa base. Caso necessário, é possível modificar a base de regras para aprimorar o modelo em questão.

A partir dos modelos implementados, foi possível construir os gráficos de superfície 3D para cada modelo fuzzy de estimação e classificação temperatura de saída da água desmineralizada. Esses gráficos são importantes, pois representam efetivamente a base de regras para o modelo analisado, onde se pode verificar a sua eficiência. A seguir serão apresentados os gráficos de superfícies 3D e o resultado para os modelos desenvolvidos neste trabalho.

5.1.7.1 - Primeiro modelo Vazão x temperatura de entrada

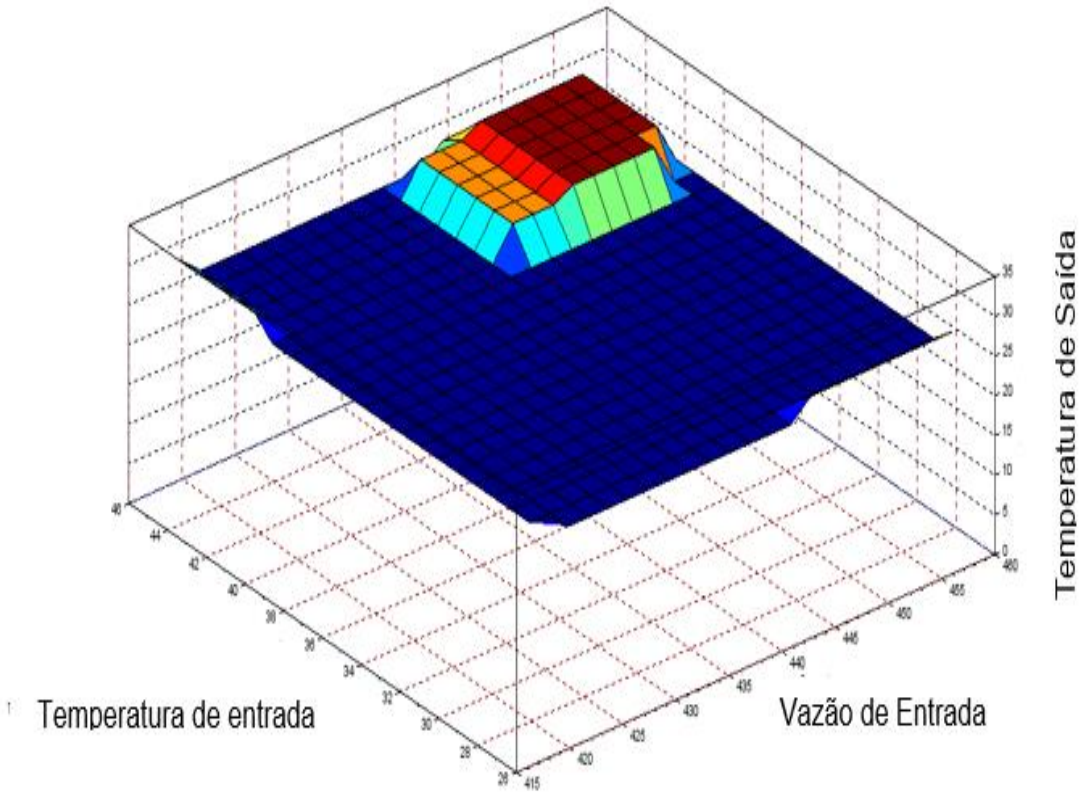
A superfície tridimensional foi gerada a partir da base de regras do primeiro modelo. Essa superfície possibilita visualizar os efeitos das regras sobre as entradas e a saída do sistema. A Figura 39 mostra a superfície do primeiro modelo. Pode-se verificar a partir da superfície tridimensional a regularidade das regras desenvolvidas. Se a base de regras não for totalmente consistente, a figura tridimensional seria representada com desproporções e irregularidades na superfície gerada. A continuidade, transição e simetria são características bem expressas na figura 40, representando que a base de regras foi bem elaborada.

O acréscimo da vazão de entrada e da temperatura da água de entrada e proporcional aos acréscimos da temperatura de saída. Para construção do gráfico de superfície em 3D foram inseridas as 10 regras observadas operacionalmente nos pontos coletados, utilizou -se duas regras de OU, pois as variáveis de entrada altas acarretam variáveis de saída também altas, o que justifica a inserção destas regras.

Ao fazer uma análise do gráfico abaixo, notasse pela cor azul predominante que as variáveis de entrada se encontram abaixo do valor nominal de operação em quase todo o universo. Quando a temperatura permeia os 39ºC e vazão de 439m³ iniciasse um aumento operacional significante, expresso pela coloração verde claro. A partir da vazão de aproximadamente 447m³/h e temperatura de 41°C as condições operacionais entram na zona crítica, ou seja, na área onde a temperatura de saída aproximasse ou chega no

limite operacional de 35°C, esta região está no gráfico representada pela cor vermelho ,onde não se pode garantir a saída desejada.

Figura 40 - Gráfico 3D temperatura de entrada da água(°C) X Vazão de entrada da água(m³/h).



Fontes: (Autores, 2018)

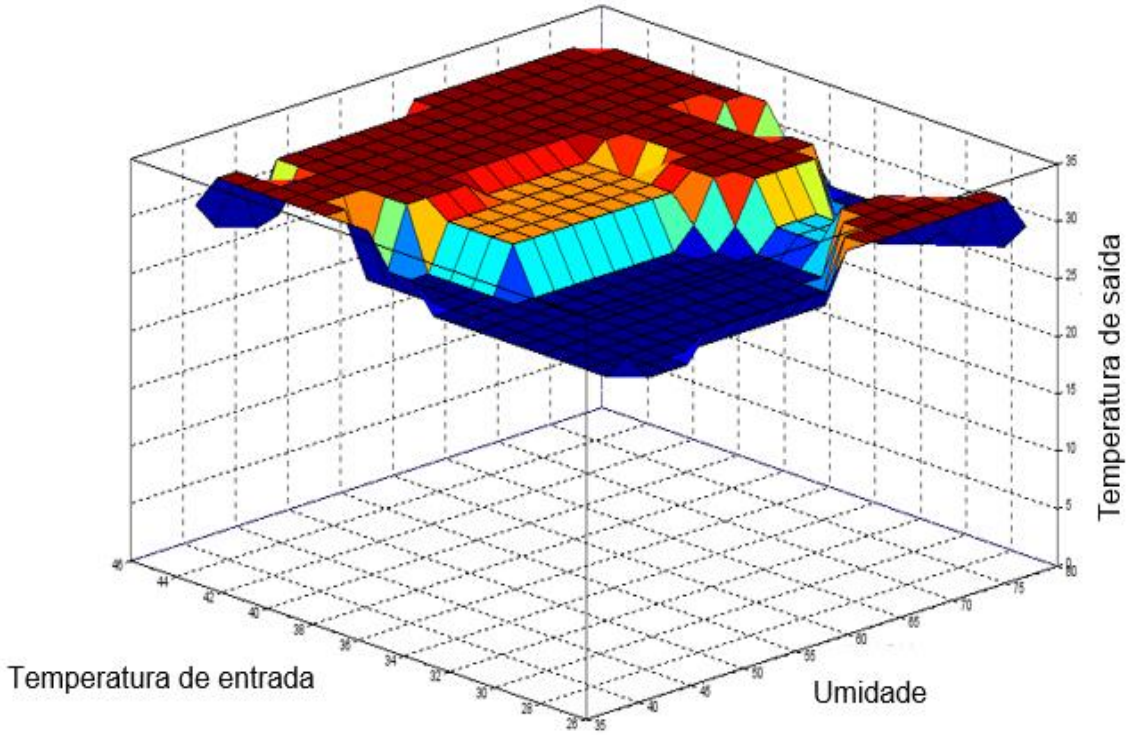
5.1.7.2 - Segundo Modelo Umidade Relativa x temperatura de entrada

Apesar de a simulação utilizar apenas duas entradas fuzzificadas, esse modelo realiza uma estimação confiável e estável no sistema. Porém, como desvantagem desse modelo, caso uma das variáveis apresente um valor errôneo, proveniente de vários fatores reais, como erros de leitura, a estimação do controlador será afetada.

Ao fazer uma análise do gráfico 41, notasse pela cor azul que as variáveis de entrada se encontram abaixo do valor nominal de operação no universo estudado. Em valores altos de umidade e temperatura de entra os valores de saída também serão próximos ao limite estipulado de 35°C, o que deve gerar um alerta em relação ao controle da avariáveis para não ultrapassar o limite permitido. Observasse pelo gráfico que em dias onde a umidade relativa está alta dificulta a absorção de vapor de água e consequentemente a troca térmica. A cor azul escuro ilustra valores baixíssimos, a cor

vermelha representa a zona crítica de operação, ou seja, valores altos de saída. Observasse que a umidade relativa impacta mais a temperatura de saída que a combinação com a vazão de entrada. Nos valores de umidade relativa de 50% a 65% e temperaturas de 32°C a 36°C, sendo maior parte deste limite já na faixa aceita para saída da torre, observasse a coloração alaranja que representa valores médios de saída.

Figura 41 - Gráfico 3D temperatura de entrada da água(°C) X Umidade(%).

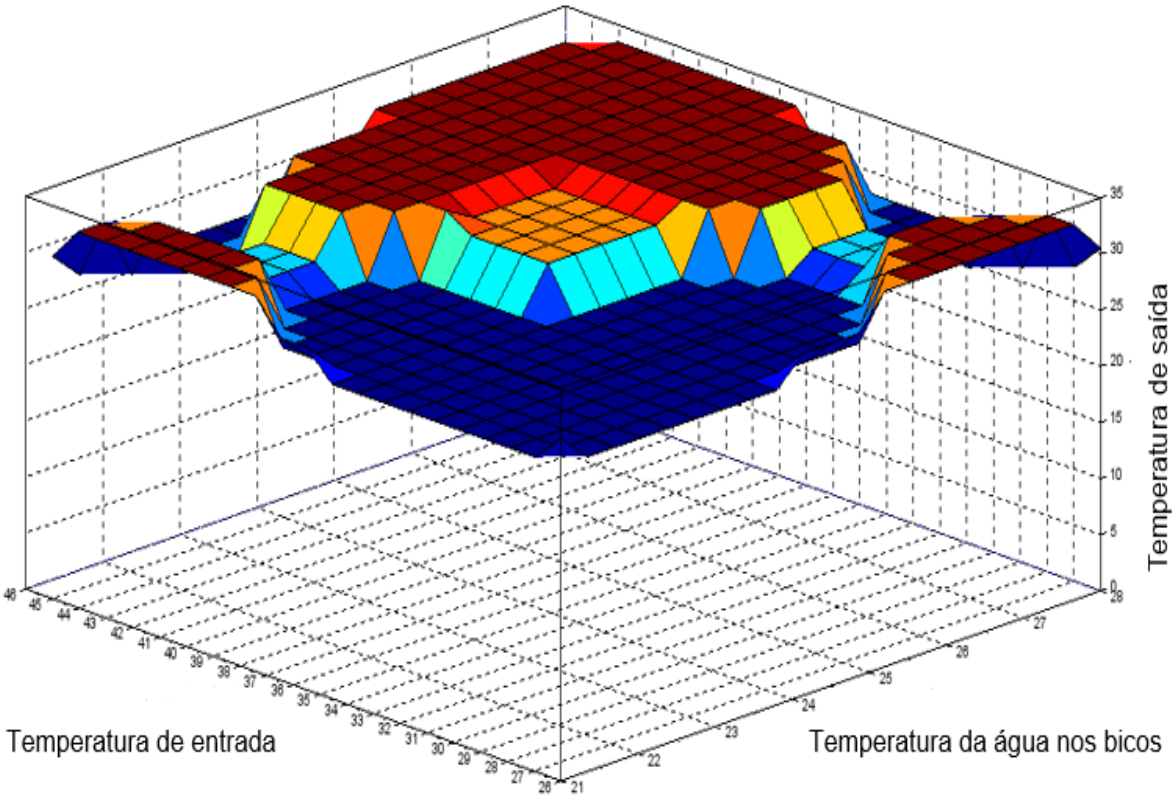


Fontes: (Autores, 2018)

5.1.7.3 – Terceiro Modelo Temperatura da água do Bicos Aspersores x temperatura de entrada

A água que aspergida sobre a serpentina fornece troca térmica através de calor sensível e latente. Ao fazer uma análise do gráfico 42, notasse pela cor azul as variáveis de entrada se encontram abaixo do valor nominal de operação no universo estudado. Em valores de temperatura dos bicos de aspersão e temperatura de entrada altos, observasse pela coloração vermelha que o equipamento está com sua eficiência próximo ao valor superior, o que deve ser analisado em conjunto com as outras diversas propriedades de uma torre e sanar a queda de eficiência. Em valores baixos de entrada da água e dos bicos aspersores observasse valores baixíssimos de saída.

Figura 42 - Gráfico 3D temperatura de entrada da água(°C) X Temperatura da água dos bicos aspersores(°C).

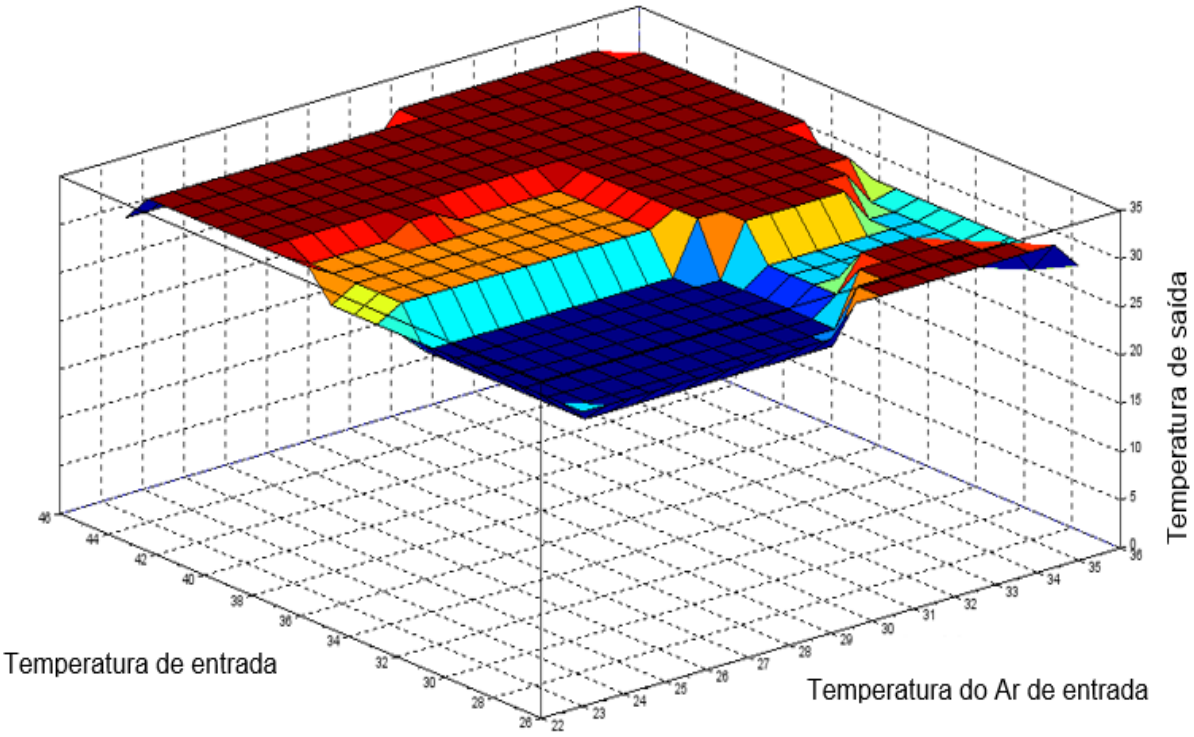


Fontes: (Autores, 2018)

5.1.7.4 - Caso 4 Temperatura da água do Bicos Aspersores x temperatura de entrada

O ar que entra na base da torre irá fazer troca térmica com a água dos bicos aspersores e posteriormente ser removido no topo da torre para a atmosfera. Observasse pela Figura 43 que em valores altos de temperatura de entra da água na serpentina e do ar a saída da água irá permear o valor máximo sendo este representado pela coloração vermelha, no sentido inverso tem-se a coloração azul para os valores baixíssimos. Na temperatura de aproximadamente 23°C a 30 °C do ar e de 35°C a 38°C é uma região de média representada pela coloração laranja.

Figura 43 -Gráfico 3D temperatura de entrada da água X Temperatura de ar



Fontes: (Autores, 2018)

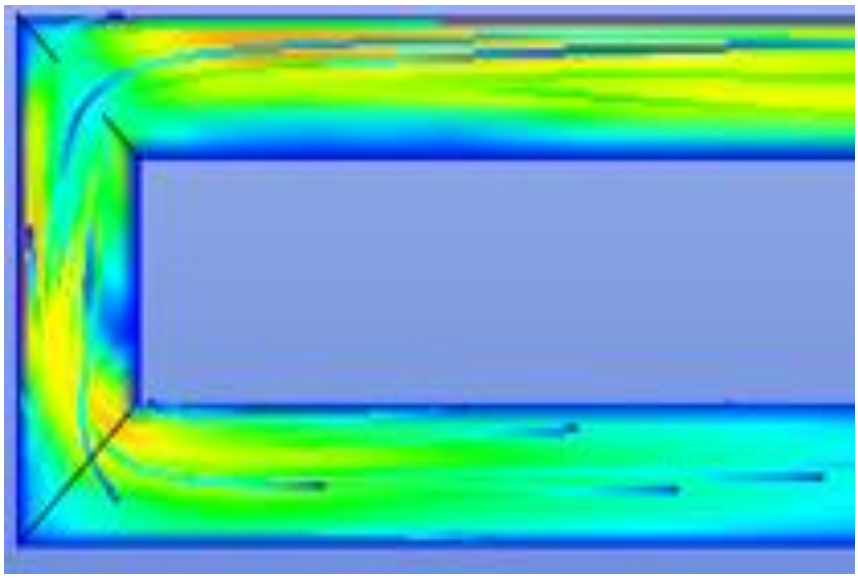
5.2- Aplicação da fluidodinâmica computacional

Avaliando-se a malha observou-se que a mesma se adequou na geometria proposta de forma homogênea, visto que nas suas bordas a mesma teve uma alta inserção de células pelo próprio software, para que dessa forma as informações que viessem a ser recolhidas não estivessem com irregularidades.

Visto que o fluído utilizado é um fluido newtoniano o mesmo não irá ter uma deformação tão elevada, sendo que o mesmo apresenta um diâmetro capilar (diâmetro interno capilar de 0,0207m). De acordo com Cengel and Ghajar (2014) tubos (geometria circular) são utilizados quando se tem grandes diferenças de pressão interna e externa, pois não deformam significativamente o fluido, já os dutos (geometria quadrada) não suporta grandes diferenças de pressão interna e externa sem provocar essa deformação, entretanto o mesmo é ideal para sistemas de aquecimento e resfriamento. Devido a este fato existem serpentinas tanto quadrangular quanto circular. Como alguns softwares apresentam a impossibilidade de realizar a confecção da geometria de forma circular ou apresenta, mas o esforço exigido se eleva de mais promovendo a incapacitação de se

realizar o desenvolvimento do projeto proposto, nesses casos se realiza de forma quadrangular, e coloca-se no programa por meio de inserção de parâmetros um informativo demonstrando que o mesmo é circular e dessa forma ele ficará e seguirá as características desejadas de tubos. Por causa disso para desenvolvimento do projeto para reduzir o esforço computacional fez-se uso de uma geometria com bordas retangulares e se fez uso desse parâmetro e informativo, como mostrado na Figura 44 a diante, nela demonstra-se como se deu a passagem do fluído como um tubo (representada pelas linhas azuis).

Figura 44 - Representação da passagem do fluido no tubo



Fontes: (Autores, 2018)

A torre de resfriamento em estudo apresenta um modulo com um conjunto de serpentina em espiral, onde na mesma apresenta 52 tubos em paralelo, as análises realizadas foram feitas em somente 1, visto que o processo para os demais seria o mesmo, e o esforço computacional exigido seria por demasiado alto e não traria alterações relevantes que se justifica tal aplicação.

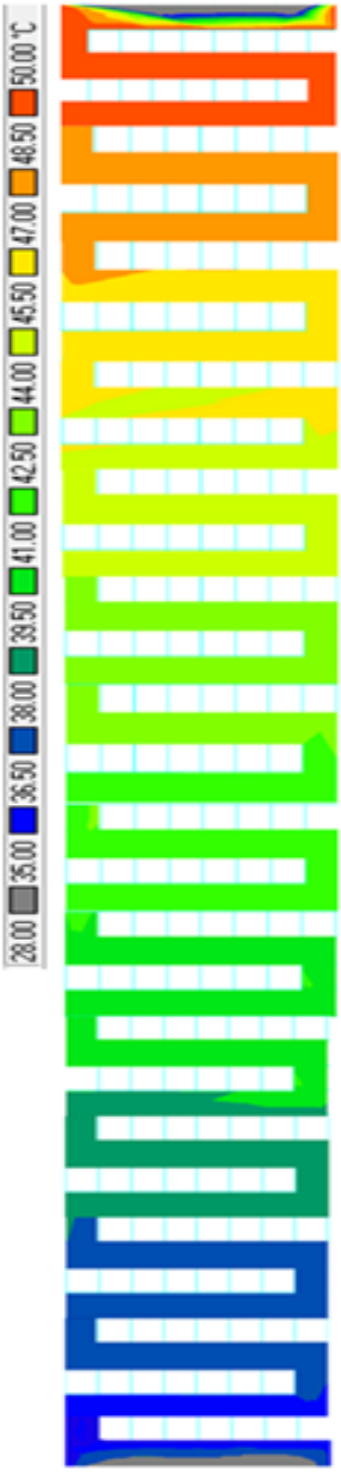
Na Figura 45.a. e 45.b. temos a apresentação dos *frames* de Temperatura, onde no mesmo demonstra-se a redução da queda de temperatura ao longo da serpentina, a mesma foi realizada na temperatura de entrada de 50 ºC com saída de 35º C, sendo que estas temperatura são as informadas pela empresa onde se está instalado o equipamento, que o mesmo seguia essas temperaturas informadas, entretanto fazendo um acompanhamento, observou-se que o mesmo não se encontra nessas temperatura informada, elas se encontram com: temperatura de entrada de 43,1 °C ou 43,4 °C com uma saída

respectivamente após passagem na serpentina de 34,20°C e 34,40°C, sendo que nessa torre ela apresenta bicos injetores que aspergem uma água de resfriamento numa temperatura de aproximadamente 28°C que em contato com a serpentina possui um coeficiente convectivo de 46,22 W/m.K, para que consequentemente ocorra o resfriamento adequadamente e a empresa fique com a temperatura dentro do desejado, no caso abaixo de 35°C, sendo que se após a passagem ela ficar acima dos 35°C a empresa é multada, devido a não estar seguindo a legislação ambiental (INSERIR A LEGISLAÇÃO). Por causa disso se tem um controle rigoroso nessa temperatura.

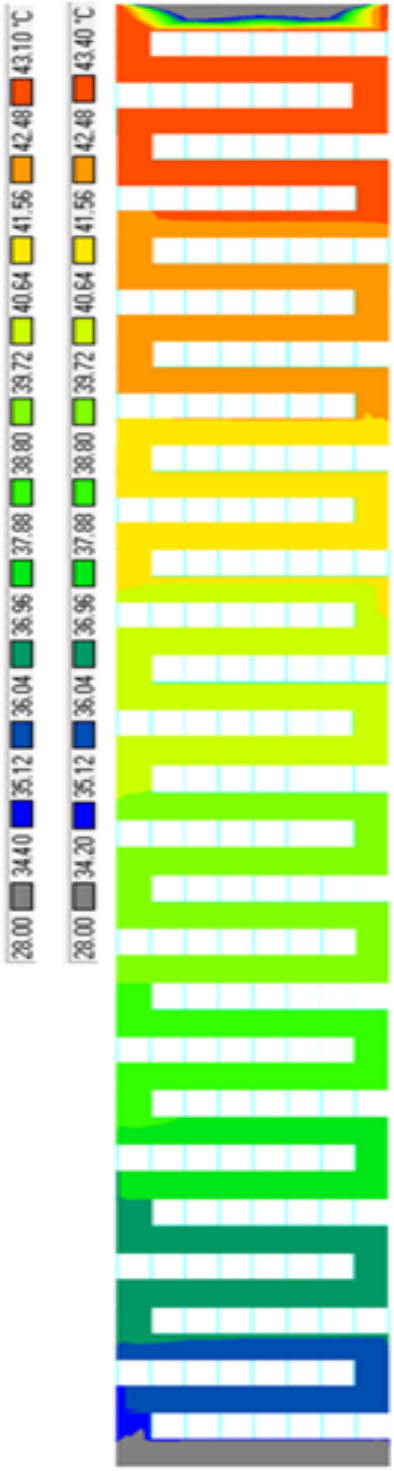
Nos Gráficos apresentado a diante, tem-se a demonstração da queda de temperatura a medida que se avança pelo comprimento da tubulação, na Figura 46 e 347 temos para a temperatura de manual que é na Entrada de 50°C com uma saída esperada de 35°C, nota-se que o mesmo apresenta uma linearidade, mas que no final da tubulação o mesmo terá que percorrer distâncias extremamente longas, quando se comparado com o início para ocorrer a redução na temperatura, entretanto quando se observa a Figura 39 que apresenta como ocorre a queda de temperatura real no equipamento, o mesmo se dá de forma linear e gradativa, demonstrando que a queda vai ocorrer dentro de um espaço basicamente igual, tanto na entrada como na saída do equipamento, a mesma é um pouco maior no início que é esperado devido ocorrer o contato direto com a agua de aspersão dos bicos injetores, mas posteriormente o espaçamento de comprimento para queda de temperatura é muito próximos.

Figura 45- *Frame* de temperatura

45.a - *Frame* do perfil de temperatura com entrada 50°C e saída 35°C.

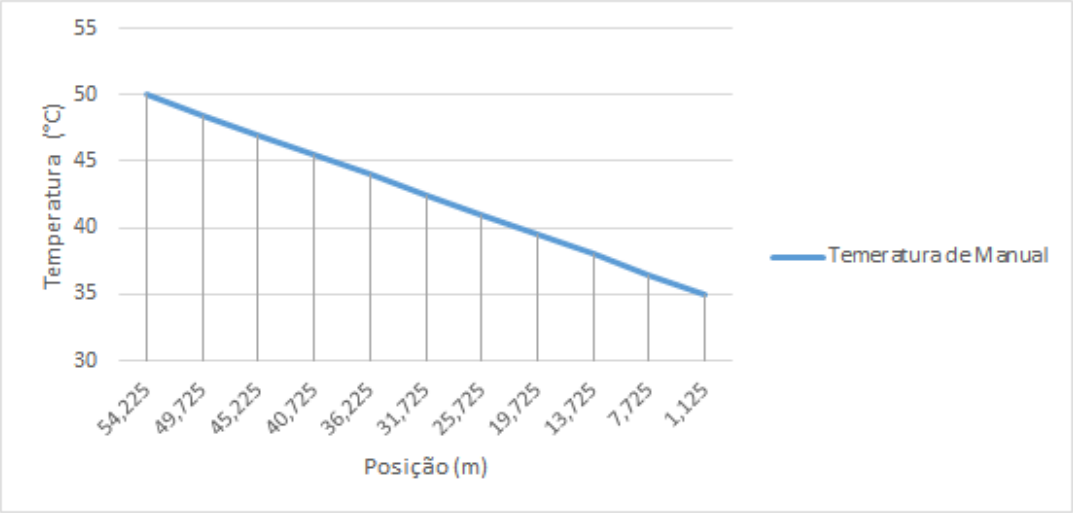


45.b - *Frame* do perfil de temperatura com entrada 43.4°C e saída 34.2°C.



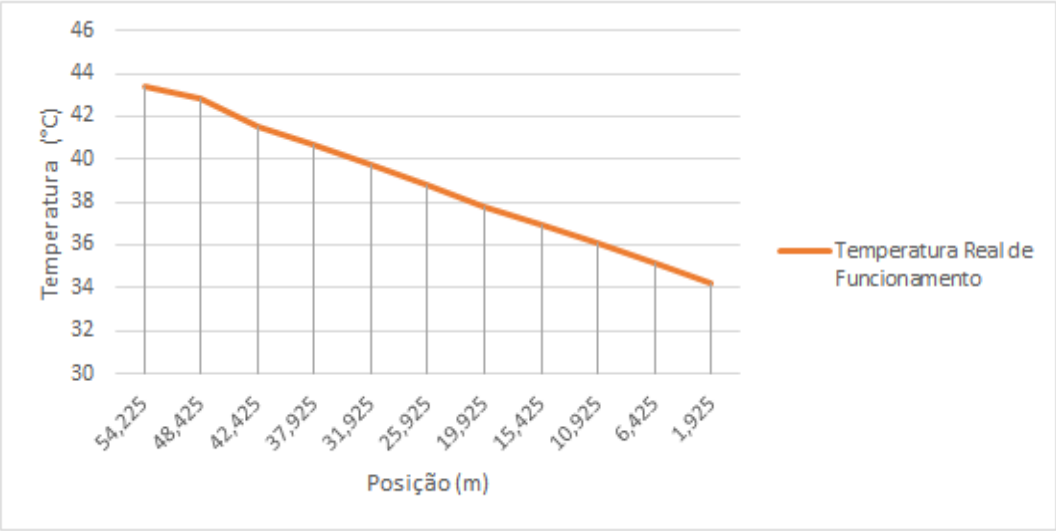
Fontes: (Autores, 2018)

Figura 46 - Temperatura de Entrada - Comprimento



Fontes: (Autores, 2018)

Figura 47 - Temperatura de entrada X Comprimento



Fontes: (Autores, 2018)

6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados estudos do escoamento de um fluído ao longo de uma serpentina de uma torre de resfriamento. Pela lógica fuzzy, observou-se que a torre opera acima da sua capacidade de projeto em relação a vazão de água desmineralizada que entra na serpentina, todavia devido as demais variáveis estarem abaixo das especificações de projeto, a temperatura de saída somente foi acima da permitida em um ponto. A planta não apresenta eficiência dentro das especificadas em seu projeto, visto que o *range* de temperatura máximo seria 15°C, e este não foi observado, sendo um range máximo obtido de 9°C.

Pela computação fluidodinâmica observou-se a malha híbrida se adequou a geometria e apresentou uma análise eficiente do sistema real. por meio da ferramenta CFD. Onde adotou-se o Modelo OFF por ter-se a passagem de um único fluído de resfriamento (água). Foi avaliado se o modelo teve uma boa representação do sistema real e o tempo computacional necessário para escoamento ao longo do equipamento, ambos os parâmetros foram atendidos ocorreu uma boa representação do escoamento do fluido na serpentina e o tempo computacional não foi muito elevado, visto que o *mesh* aplicado na geometria quando se observa na literatura percebe-se que é um *mesh* considerado muito refinado.

Além desses parâmetros, avaliou-se também os *frames* de pressão e velocidade através dos mesmos, nota-se que a simulação apresentou-se de forma satisfatória a realidade de funcionamento do equipamento, pois viu-se no que na entrada, necessita-se de uma pressão e velocidade mais elevada para que se tenha a passagem do fluído ao longo da serpentina e que a medida que vai se passando ao longo da mesma ocorre a redução gradativa dos dois parâmetros, confirmando que o fluído ao final está escoando devido a ser o seu caminho natural.

Outro parâmetro importante estudado foi a temperatura, viu-se pelo *frame* e gráfico que a forma de controle de queda de temperatura está diferente do manual, onde na de manual a queda de temperatura no início da serpentina ocorre em distâncias curtas e que no final a temperatura para reduzir-se terá que percorrer distâncias longas em vista do início, sendo que na realidade a queda de temperatura real no equipamento se dá de forma linear e gradativa, demonstrando que a queda vai ocorrer dentro de um espaço aproximadamente igual, tanto na entrada como na saída do equipamento.

A temperatura da água aspergida sobre as serpentinas é de grande importância no processo de transferência de calor e massa que governam as condições de resfriamento

no interior dos tubos. Tendo em vista que a área total de troca térmica não pode sofrer alteração, a diferença de temperatura entre a água no interior das serpentinas e a água aspergida definirá, juntamente com o coeficiente global de transferência de calor, a taxa de calor transferido.

Quanto maior a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do resfriador, maior será a temperatura da água de aspersão.

A efetividade de troca térmica em um trocador evaporativo, definida com base na temperatura de bulbo úmido do ar de entrada no trocador, demonstra ter sensibilidade a este parâmetro de forma direta.

Conclui-se que devido a vazões de entrada água desmineralizada serem superior as das condições de projeto, isto afeta diretamente a eficiência da torre em remoção de carga térmica. Os parâmetros de temperatura de saída da água desmineralizada, não foi superior ao permito (35°C), pois a temperatura de entra da água e inferior a máximas, provocando assim um *range* menor. A torre de resfriamento combinada é um equipamento complexo onde devesse avaliar uma serie de parâmetros que em conjunto iram analisar a eficiência. Todos os parâmetros estudos mostraram ter graus de importância na interferência da temperatura de saída, sendo a de maior impacto a temperatura de entrada da água.

Este trabalho foi um estudo global sobre alguns parâmetros para estudo de uma torre de resfriamento, todavia fundamental para novos estudos visto que é um equipamento complexo.

7- REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANA. *Situação da Água no Mundo*. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/agua-no-mundo>.

ÂNGELO, J.; DA, P. Utilização de materiais alternativos como enchimento de torres de resfriamento. usei, 2006.

ANTONIO, J. *et al.* Economia de energia elétrica em torres de resfriamento. 2005.

ARAUJO, E. C. DA C. *Operações Unitárias Envolvendo Transmissão de Calor*. [S.l: s.n.], 2015.

ATS AMERTECH TOWER SERVICES. Cooling Tower Fill. 2018.

BILOBROVEC, M. SISTEMA ESPECIALISTA EM LÓGICA FUZZY PARA O CONTROLE, GERENCIAMENTO E MANUTENÇÃO DA QUALIDADE EM PROCESSO DE AERAÇÃO DE GRÃOS. 2005.

BOUCHAFAA, F.; HAMZAOUI, I.; HADJAMMAR, A. Fuzzy logic control for the tracking of maximum power point of a PV system. *Energy Procedia*, v. 6, p. 633–642, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.073>.

BRAGA, A. P. SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM QUADCOPTER UTILIZANDO LÓGICA FUZZY. 2013.

CANONSBURG, T. D. *ANSYS FLUENT Tutorial Guide*. [S.l: s.n.], 2012. v. 15317.

CARVALHO, N. L.; BARCELLOS, A. L.; HENTZ, P. Tecnologias para reutilização de águas residuárias. *Revista gestão e desenvolvimento em contexto -GEDECON*, v. 2, n. 2, p. 16–31, 2016.

CAUSA OPERARIA. 2ª Guerra Mundial: Nagasaki é destruída por uma bomba atômica lançada pelos EUA. 2018. Disponível em:

<https://www.causaoperaria.org.br/acervo/blog/2017/08/09/2a-guerra-mundial-nagasaki-e-destruida-por-uma-bomba-atomica-lancada-pelos-eua/#.XAQjumhKjIU>.

CAVALCANTI, J. H. F. *et al.* Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias. p. 151, 2012.

CENGEL, Y. ; GHAJAR, A. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5th. ed. [S.l: s.n.], 2014.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações*. [S.l: s.n.], 2007.

CENGEL, Y.; CIMBALA, J. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. 4th Editio ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2017.

CHAMOVITZ, I.; COSENZA, C. A. N. Lógica Fuzzy: Alternativa viável para projetos complexos no Rio de Janeiro. *Xiv Profundão*, n. 2010, 2010. Disponível em: <http://api.adm.br/artigos/wpcontent/uploads/2010/10/artigo_2010_profundao_final_.pdf>.

CHEN, Y. L. *et al.* Crosswinds Effect on the Thermal Performance of Wet Cooling Towers Under Variable Operating Conditions Crosswinds Effect on the Thermal Performance of Wet Cooling Towers Under Variable Operating Conditions. 2018.

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

CLÁUDIO, A.; MARTINS, M. FUZZYCOM – COMPONENTE DE LÓGICA FUZZY. 2007.

CONAMA. *Resolução 430*. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/>.

CYCLOS ÁGUAS. Torres de Resfriamento. 2018. Disponível em: <http://www.cycloaguas.com.br/servicos/torreshttp://www.cycloaguas.com.br/servicos/torres>.

DELTA. The Secret History of Cooling Tower Systemso Title. 2015. Disponível em: <https://deltacooling.com/resources/news/the-secret-history-of-cooling-tower-systems>.
DIAS, C. H. B. B. Uma Aplicação da Lógica Fuzzy. 2010.

DONG, P. *et al.* The transient start-up process of natural draft dry cooling towers in dispatchable thermal power plants. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 123, p. 201–212, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.114>.

DUAN, Z. *et al.* Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 9, p. 6823–6850, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.007>.

EVAPCO. COOLING TOWER BASICS - Splash fills. 2018a. Disponível em: <http://www.towercomponentsinc.com/operation-splash-fill.php>.

EVAPCO. VAFOPTI-PAC 2100 Plus OF Media. 2018b. Disponível em: <http://www.towercomponentsinc.com/products-film-fill-op-2100.php>.

FILHO, D. G. AVALIAÇÃO DO USO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) EM SPRAY DRYERS. 2017.

GEJDOŠ, P. Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control. *Procedia Economics and Finance*, v. 34, n. 15, p. 565–572, 2015.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. *Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials*, n. July, p. 1–38, 1995.

HIDROTERM. eliminador-de-gotas8 Eliminador de Gotas. 2018. Disponível em: <http://www.hidroterm.com.br/produto/eliminador-de-gotas/>.

HUICHÃO, Z. *et al.* Review on Water Distribution of Cooling Tower in Power Station Review on Water Distribution of Cooling Tower in Power Station. 2018.

JABARDO, J. M. S. Simulação de Trocadores de Calor Evaporativos. 1999.

JASIULIONIS, J. A. E. “ Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água utilizando redes neurais artificiais ” “ Design and analysis of cooling towers using neural networks ”. ler depóis, 2012.

JEONG, W.; SEONG, J. International Journal of Mechanical Sciences Comparison of effects on technical variances of computational fl uid dynamics (CFD) software based on fi nite element and fi nite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 78, p. 19–26, 2014.

JR., C. L. N.; YONEYAMA, T. *Inteligência Artificial em Controle e Automação*. [S.l: s.n.], 2004.

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

JUNIOR, R. C. DE L. Modelagem Fenomenológica Do Desempenho De Torres De Resfriamento De Água Acopladas E Estudo De Casos. p. 85, 2011.

KARA, E. C. Heat and Mass Transfer Analysis of a Counter Flow Cooling Tower under Various Air and Water Flow Arrangements. *Master thesis*, 2010.

KOFHAX. Bicos Aspersores. 2018. Disponível em: <http://kofhax.com.br/bico-aspersor-inox.html>.

KOVAČEVIĆ, I.; SOURBRON, M. The numerical model for direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*, v. 113, n. November, p. 8–19, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025>.

KULKARNI, S. Review on Modeling of hyperbolic cooling towers. v. 9, n. 1, 2018.

LEO SAMUEL, D. G.; NAGENDRA, S. M. S.; MAIYA, M. P. Parametric analysis on the thermal comfort of a cooling tower based thermally activated building system in

tropical climate – An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, v. 138, n. April, p. 325–335, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.077>.

LEO WEBER; KLEIN, P. A. T. *Aplicação Da Lógica Fuzzy Em Software E Hardware*. [S.l: s.n.], 2003.

LÖFGREN, A. Modeling & Simulation of a cooling tower with extended uses. 2015.

MAIA, D. N. DE C. DA S. Análise da aplicabilidade de modelo integral simplificado para avaliação de desempenho de uma torre de resfriamento de grande porte. *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo*, 2013.

MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. [S.l: s.n.], 2004.

MARQUES, G. I. Avaliação de Torres de Resfriamento de Tiragem Mecânica Forçada e Induzida em um Sistema Industrial. usado até a pagina 29, 2016.

MCCABE, WARREN L, SMITH, J., HARRIOT, P. *Unit operations of chemical engineering. Chemical Engineering Science*. [S.l: s.n.]. , 1993

MELLO, L. C. DE. Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento. p. 138, 2008.

MENNEKES. Evaporative Condensers. 2018. Disponível em: <http://dhilreefer.blogspot.com/2016/02/what-is-cooling-tower-this-pamphlet.html>.

MUÑOZ, R. G. *et al.* Towards Software Performance Monitoring: An Approach for the Aerospace Industry. *Procedia CIRP*, v. 38, p. 41–46, 2015.

NASCIMENTO, S. M. Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores. p. 1–8, 2014.

NUNES, P. M. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo Márcio Nunes Utilização dos métodos de Merkel e de Poppe na modelagem do desempenho de torres

de resfriamento evaporativas do tipo contracorrente. 2014.

OIKAWA, E. H. Avaliação de sistema industrial de resfriamento de água. p. 101, 2012.
OK-MARKOVI. Small forced draught cooling towers. 2018. Disponível em: <http://www.coolingtowers-bg.com/st.htm>.

OLIVEIRA, A. C. C. T. Estudo de Materiais Alternativos para o Enchimento de Torres de Resfriamento. 2012.

OLIVEIRA, V. F. Diagnóstico De Eficiência Energética De Uma Torre De Resfriamento De Água Da Torre De Resfriamento De Água Da Arcelormittal Inox Brasil. 2010. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiw3JXo5tXOAhVMIZAKHfAdAYUQFggtMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.bibliotecadigital.ufmg.br%2Fdspace%2Fbitstream%2Fhandle%2F1843%2FBUOS-8GGP42%2Fdisserta__o_de_mestrado_vagner_ferreira_de_>.

OTTO, P. Grande do Sul , como parte dos Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Mecânica. p. 1–24, 2004.

POZZOBON, J. C. Recuperação De Água Em Torres De Resfriamento Por Meio De Estruturas De Condensação Porosas. 2015.

QURESHI, B. A.; ZUBAIR, S. M. Prediction of evaporation losses in evaporative fluid coolers. *Applied Thermal Engineering*, v. 27, n. 2–3, p. 520–527, 2007.

RIBEIRO, D.; MELO, D. T. DE. *Sistemas Especialistas E Lógica Fuzzy*. [S.l: s.n.], 2013.
RIGNEL, D. G. DE S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica. *Revista eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica2*, v. 01, n. 01, p. 17–28, 2011. Disponível em: <www.facef.br/resiget>.

RODRIGUES, J. P. AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA A SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO ÁGUA-AR NA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL. 2018.

SAMPAIO, F. M. N. MA. Projecto de uma Torre de Arrefecimento de 3 MW de Potência Térmica. 2010.

SAMPAIO, F. S. TORRE DE RESFRIAMENTO : EXPERIMENTAIS PARA APOIO AO ENSINO DE ENGENHARIA MECÂNICA TORRE DE RESFRIAMENTO MODELAGEM , SIMULAÇÃO E TESTES. 2013.

SCHIASSI, L. *et al.* Modelagem Fuzzy aplicada na avaliação do desempenho de frangos de corte. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, n. February, p. 140–146, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662015000200140&lang=pt>.

SCHOCH, C. *et al.* Modelos MAtemáticos. *Mycological Research*, v. 111, n. 2, p. 154–162, 2007.

SEMCO. Manual de Instruções Operação e Manutenção Transporte e Montagem Módulo do Ventilador. 2009.

SHAPIRO, H. N. *et al. Introdução à Engenharia de Sitemas Térmicos*. [S.l: s.n.], 2005.

SOUSA, J. N. DE P. Aplicação De Lógica Fuzzy Em Sistemas De Controle de Tráfego Metropolitano Em Rodovias Dotadas De Faixas Exclusivas Para Ônibus. p. 97, 2005.

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

SPX COOLING TECHNOLOGIES. Cooling Tower Fundamentals. p. 133–146, 2011. Disponível em: <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b11510-14>.

SPX COOLING TECHNOLOGIES. Thermal Science - External Influences on Cooling Tower Performance. 2016. Disponível em: <http://spxcooling.com/library/results/search&doctype=White+Papers/>.

SUN, Y.; GUAN, Z.; HOOMAN, K. A review on the performance evaluation of natural draft dry cooling towers and possible improvements via inlet air spray cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, n. September 2016, p. 618–637, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.151>.

TANSCHEIT, R. Sistemas Fuzzy. *LN Sistemas - DEE-PUC-Rio*, v. 113, p. 113–134, 2012. Disponível em: <http://www2.ica.ele.puc-rio.br/Downloads/41/LN-Sistemas Fuzzy.pdf>.

TERMOPARTS. Torre Hiperbolica. 2018. Disponível em: <https://www.termoparts.com.br/>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Cooling Towers: Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency. p. 9, 2011. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/waterfs_coolingtowers.pdf>.

VENKATESH, P. Y. Creating a New Model to Predict Cooling Tower Performance and Determining Energy Saving Opportunities through Economizer Operation. usei, n. May 2014, 2015.

VERSTEEG, H. K.; W. MALALASEKERA. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. [S.l: s.n.], 2007. v. M.

WAKI, R. Montagem e avaliação de uma torre de resfriamento para uso em atividades de ensino de graduação. otima para psicometria, p. 133, 2009.

WANG, W.; LYU, J.; *et al.* Energy & Buildings A performance enhancement of a natural draft dry cooling tower in crosswind via inlet flow field reconstruction. *Energy & Buildings*, v. 164, p. 121–130, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.003>.

WANG, W.; ZHANG, H.; *et al.* Ventilation enhancement for a natural draft dry cooling tower in crosswind via windbox installation. *Applied Thermal Engineering*, trabalho sobre fluidodinâmica em torre de resfriaemnto natural, v. 137, n. March, p. 93–100, 2018.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.059>.

ZANUTTO, C. P. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA AVALIAÇÃO DA. 2015.