

## CONTROLE DE TEMPERATURA DE TORRE DE RESFRIAMENTO COM ARDUÍNO E SISTEMA SUPERVISÓRIO SCADA BR

### TEMPERATURE CONTROL FOR COOLING TOWERS WITH ARDUINO AND SCADA BR SUPERVISORY SYSTEM

Oscar Pereira Saraiva Júnior<sup>1</sup>  
Rafael Augusto Donadon<sup>2</sup>  
Roberto Fábio Conway Baccarat<sup>3</sup>

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho é demonstrar o princípio de funcionamento de uma torre de resfriamento e sua automação no controle de temperatura da Água de serviço, e o princípio será demonstrado através de um protótipo bem próximo de uma torre de resfriamento. O funcionamento é baseado na troca de calor, feita pelo contato da água com as placas de enchimento, devido ao coeficiente térmico do material, bem como o fluxo de ar cruzado no interior da mesma. Espera-se reproduzir as operações e demonstrar as teorias e cálculos realizados para a construção do protótipo, onde poderemos notar que os princípios aplicados são efetivos, notada a facilidade de se executar tarefas com a utilização de sistemas automatizados, os quais com pequena intervenção do operador (sistemas manuais) nos permite executar tarefas que necessitariam do esforço de diversas pessoas para realizar a mesma operação.

1092

**Palavras-chave:** Controle de temperatura. Resfriamento. Microcontrolador. Sistema supervisório. Água.

**ABSTRACT:** The objective of this paper is to demonstrate the operation principle of a cooling tower and its automation in the temperature control of the service water, and the principle will be demonstrated through a prototype very close to a cooling tower. The operation is based on the heat exchange, due to the contact of the water with the filler plates, due to the thermal coefficient of the material, as well as the crossed air flow inside the same. It is expected to reproduce the operations and demonstrate the theories and calculations made for the construction of the prototype, where we can notice that the principles applied are effective, noting the ease of performing tasks using automated systems, which with little operator intervention (manual systems), allows us to perform tasks that would require the effort of several people to carry out the same operation.

**Keywords:** Temperature control. Cooling. Microcontroller. Supervisory system. Water.

<sup>1</sup> Tecnólogo em Automação Industrial. Instituto federal de ciência e Tecnologia de São Paulo-Campus Cubatão.

<sup>2</sup> Tecnólogo em Automação Industrial. Instituto federal de ciência e Tecnologia de São Paulo-Campus Cubatão

<sup>3</sup> Tecnólogo em Automação Industrial. Licenciatura em Biologia. Lato Senso em Docência no Ensino superior. Mestrando em Ciências (Bioprodutos e Bioprocessos - Ecotoxicologia). Docente Substituto - Instituto federal de ciência e Tecnologia de São Paulo- Campus Cubatão.

## INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho é apresentar um controle automatizado da temperatura de uma torre de resfriamento que possa ser utilizado em diversos sistemas sejam eles industriais ou não. Estas torres são aplicadas atualmente quase que exclusivamente para a umidificação do ar ou para o resfriamento de água (KERN, 1987). A temperatura é uma grandeza física que mensura a energia cinética média de cada uma das partículas de um sistema em equilíbrio térmico. (Wikipedia, 2016). O sistema internacional de Unidades estabelece uma escala específica para a temperatura absoluta, que no caso utiliza-se a escala Kelvin como padrão segundo o sistema internacional, porém existem outras unidades de medida como as Celsius e Fahrenheit, e ainda, existem escalas menos utilizadas como a escala de Rankine, que utiliza o grau Fahrenheit como unidade de intervalo, que ainda está em uso como parte do sistema de unidades inglesas de engenharia em alguns campos de estudo nos Estados Unidos. (Wikipedia, 2016).

O projeto descrito neste trabalho utiliza embasamento teórico no conceito da troca de calor por condução e no conceito da mecânica de fluidos. No protótipo confeccionado para demonstração prática destas teorias, são aplicadas as leis da Termodinâmica, simulando o controle eficiente do resfriamento de um líquido de arrefecimento (água) vindo aquecida dos equipamentos contemplados na instalação, para que seja resfriada e enviada novamente para esses equipamentos, com a água já resfriada, sendo então, um circuito fechado de circulação. Através de pesquisas, o projeto foi desenvolvido com base no conceito de fluxo contra a corrente buscando a utilização dos mais diversos materiais objetivando o baixo custo e/ou materiais reciclados de outros projetos com fins didáticos.

1093

O trabalho está dividido em itens para melhor descrever o desenvolvimento do projeto, inicialmente apresentando fundamentos teóricos e os conceitos anteriormente citados da troca de calor por condução e mecânica dos fluidos. Em seguida, os componentes do sistema e métodos construtivos do protótipo (onde é detalhado o desenvolvimento e a construção) e posteriormente, a operação, bem como os resultados obtidos.

Com este trabalho a meta é obter o resfriamento eficiente da água utilizada no sistema, através do conceito de fluxo cruzado, e troca de calor com o ar e demais componentes, que compõem internamente a torre de resfriamento, resultando em uma água com a temperatura de saída mais baixa que a temperatura de entrada no final do ciclo.

### 1. REVISÃO DA LITERATURA

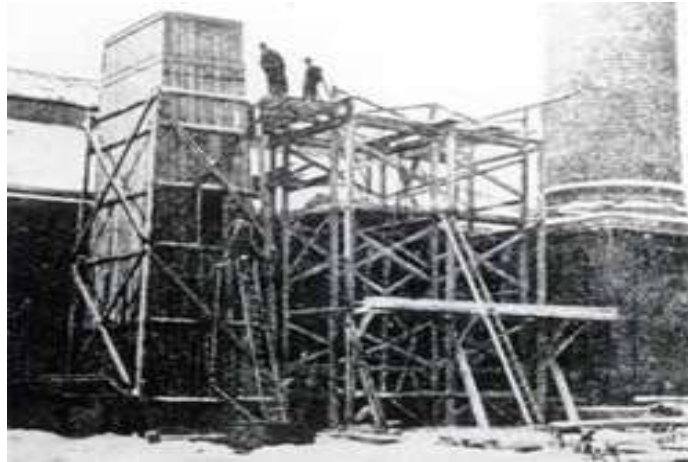
Aqui é apresentado o avanço com decorrer dos anos das torres de resfriamento e suas tecnologias, entendendo melhor seu funcionamento interno.

#### 1.1. Evolução das Torres de Resfriamento

Torre de resfriamento é um equipamento de remoção de calor de uma corrente de água para o ar atmosférico com conseqüente resfriamento de água (COOLING TOWER INSTITUTE, 2007). O primeiro modelo de torre de resfriamento surgiu por volta de 1894, criada pelo Engenheiro Hans Joachim Balcke que fundou a empresa alemã Balcke & Co, que já por volta da década de 1920 já era uma referência em torres de resfriamento, o

primeiro modelo a ser desenvolvido para fins industriais foi à torre do tipo chaminé com 12 metros de altura, como a da figura 1. (Equipe BETA (PAI 1º Semestre - UNIFACS), 2013).

Figura 1 - Primeiro modelo de Torre de resfriamento

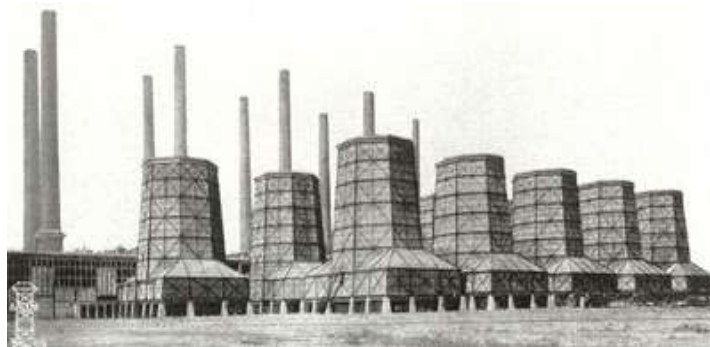


**Fonte:** <http://equipebeta-pai.blogspot.com.br/p/curiosidades.html> - Acessado em: 18/04/2018.

No início da década de XX (1920-1929) com o aumento das indústrias e o grande crescimento da demanda por equipamentos cada vez maiores e mais produtivos, a empresa de Hans, desenvolveu a maior torre de tiragem natural do mundo naquela época, que tinha uma capacidade de resfriamento de 43 mil m<sup>3</sup> de água por hora, representada na figura 2. (Equipe BETA (PAI 1º Semestre - UNIFACS), 2013).

1094

Figura 2 - Primeiro modelo de Torre de resfriamento



**Fonte:** <http://equipebeta-pai.blogspot.com.br/p/curiosidades.html>. Acessado em: 18/04/2018.

No ano de 1930 surgiram às primeiras torres de resfriamento que se utilizavam da tiragem mecânica induzida do ar (uso de exaustores) foram desenvolvidas, que é o modelo mais utilizado hoje em dia nas industriais. (Sistemas EEL, [entre 2010 e 2018]). No Brasil,

as primeiras torres de resfriamento para finalidades industriais, surgiram por volta de 1950 através da empresa Alpina, que já dominava o mercado Brasileiro do ramo, atuando em conjunto com a empresa alemã Balcke, estas primeiras torres desenvolvidas aqui, eram de madeira imunizada, representada na figura 3. (Alpina Equipamentos, 2018).

Figura 3 - Década de 50, primeiras torres desenvolvidas no Brasil



**Fonte:** <http://www.alpinaequipamentos.com.br/pdf/50-anos-de-evolucao-em-torres-resfriamento-no-brasil.pdf>. Acessado em: 18/04/2018.

Já por volta dos anos de 1970, com a pressão da mídia internacional pela preservação das florestas foi preciso rever o uso dos materiais de fabricação, já que as torres eram feitas de madeira. (ALPINA EQUIPAMENTOS, 2018). Para torres de construção mais antiga, feitas com recheio em ripas de madeira, o desempenho é pior, com valores de Hoar entre 3m a 6m (BURGER, 1991). E então após muitas pesquisas e estudos surgiram torres com estrutura de concreto e aço protegido, deste ponto em diante, houve a evolução e a implementação de novas tecnologias na área, que originaram nos modelos de torres de resfriamento presentes em grandes empresas hoje em dia, mostradas na figura 4. (Alpina Equipamentos, [entre 1998 e 2018]).

1095

Figura 4 - Torres de resfriamento usadas atualmente



**Fonte:** <http://www.cleanwaterwtc.com.br/site/aplicacoes/torre-de-resfriamento>. Acessado em: 18/04/2018.

## 1.2. Temperatura

Temperatura é a grandeza que caracteriza o estado térmico de um corpo ou sistema. (SÓ FÍSICA, 2018). Fisicamente o conceito dado a quente e frio é um pouco diferente do que costumamos usar no nosso cotidiano. Pode-se definir como quente, um corpo que tem suas moléculas agitando-se muito, ou seja, com alta energia cinética. Analogamente, um corpo frio, é aquele que tem baixa agitação das suas moléculas. (SÓ FÍSICA, 2018).

Ao aumentar a temperatura de um corpo ou sistema pode-se dizer que está se aumentando o estado de agitação de suas moléculas. (SÓ FÍSICA, 2018).

Ao retirar uma garrafa de água mineral da geladeira ou ao retirar um bolo de um forno, percebemos que após algum tempo, ambos tendem a chegar à temperatura do ambiente. Ou seja, a água "esquenta" e o bolo "esfria". (AJUDA ESCOLAR, 2018). Quando dois corpos ou sistemas atingem a mesma temperatura, dizemos que estes corpos ou sistemas estão em equilíbrio térmico. (AJUDA ESCOLAR, 2018).

## 1.3. Calorimetria

Calor é a transferência de energia térmica entre corpos com temperaturas diferentes. (ANJOS, 2018).

Quando dois corpos com temperaturas diferentes estão em contato, podemos observar que a temperatura do corpo "mais quente" diminui, e a do corpo "mais frio" aumenta, até o momento em que ambos os corpos apresentem temperatura igual.

Esta reação é causada pela passagem de energia térmica do corpo "mais quente" para o corpo "mais frio", a transferência de energia é o que chamamos *calor*. (SÓ FÍSICA, 2018).

A unidade mais utilizada para o calor é *caloria* (cal), embora sua unidade no SI seja o *joule* (J). Uma caloria equivale à quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um grama de água pura, sobre pressão normal, de 14,5 °C para 15,5 °C. (SÓ FÍSICA, 2018).

A relação entre a caloria e o joule é dada por:  $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$

Partindo daí, podem-se fazer conversões entre as unidades usando regra de três simples.

Como 1 caloria é uma unidade pequena, utilizamos muito o seu múltiplo, a *quilocaloria*, vide fórmula <sup>1</sup>.  $1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal}$  (1)

### 1.3.1. Calor Sensível

É a quantidade de calor que tem como efeito apenas a alteração da temperatura de um corpo. (SÓ FÍSICA, 2018).

Este fenômeno é regido pela lei física conhecida como *Equação Fundamental da Calorimetria*, que diz que a quantidade de calor sensível (Q) é igual ao produto de sua massa, da variação da temperatura e de uma constante de proporcionalidade dependente da natureza de cada corpo denominada calor específico. (SÓ FÍSICA, 2018).

Assim:  $Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta$

Onde:

- $Q$  = quantidade de calor sensível (cal ou J);
- $c$  = calor específico da substância que constitui o corpo (cal/g°C ou J/kg°C);
- $m$  = massa do corpo (g ou kg);
- $\Delta\theta$  = variação de temperatura (°C).

É interessante conhecer alguns valores de calores específicos:

Substância	c (cal/g°C)
Alumínio	0,219
Água	1,000
Alcool	0,590
Cobre	0,093
Chumbo	0,031
Estanho	0,055
Ferro	0,119
Gelo	0,550
Mercúrio	0,033
Ouro	0,031
Prata	0,056
Vapor d'água	0,480
Zinco	0,093

SÓ FÍSICA. Calorimetria. [S. l.], [entre 2008 e 2018]. Disponível em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/calor.php>. Acesso em: 23 abr. 2018.

Quando:  $Q > 0$ : o corpo ganha calor.  $Q < 0$ : o corpo perde calor.

### 1.3.2. Calor Latente

Nem toda a troca de calor existente na natureza se detém a modificar a temperatura dos corpos. Neste caso, chamamos a quantidade de calor calculada de calor latente. (SÓ FÍSICA, 2018).

A quantidade de calor latente ( $Q$ ) é igual ao produto da massa do corpo ( $m$ ) e de uma constante de proporcionalidade ( $L$ ). (SÓ FÍSICA, 2018).

Assim:  $Q_L = m \cdot L$

A constante de proporcionalidade é chamada calor latente de mudança de fase e se refere à quantidade de calor que 1 g da substância calculada necessita para mudar de uma fase para outra. (SÓ FÍSICA, 2018).

Além de depender da natureza da substância, este valor numérico depende de cada mudança de estado físico. (SÓ FÍSICA, 2018).

Por exemplo, para a água:

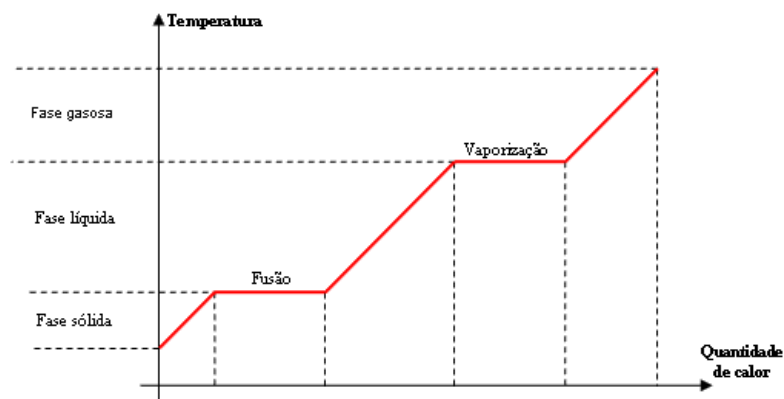
$Q_{LF}$  (fusão) – 80cal/g;  $Q_{LV}$  (vaporização) – 540cal/g;  
 $Q_{LS}$  (solidificação) – -80cal/g;  $Q_{LC}$  (condensação) – -540cal/g.

Quando:  $Q > 0$ : o corpo funde/vaporiza.  $Q < 0$ : o corpo solidifica/condensa.

### 1.3.3. Curva de aquecimento

Estudados os valores de calor latente, foi observado que estes não dependem da variação de temperatura, assim foi elaborado um gráfico de temperatura em função da quantidade de calor absorvida, essas curvas de desempenho dependem da característica do recheio na torre e das vazões de ar e água pelo equipamento (CASTRO, SONG, PINTO, 2000). No gráfico 1 temos o *Gráfico de Curva de Aquecimento*:

Gráfico 1- Gráfico de curva de aquecimento.



Fonte: <https://www.resumo escolar.com.br/química/curva-de-aquecimento/>. Acessado em 12/04/2018

#### 1.4. Trocas de Calor

O trocador de calor foi projetado com o objetivo de trocar calor entre fluidos, segundo as leis da termodinâmica e, proporcionar o reaproveitamento da energia térmica presente nos fluidos quentes. (RIBEIRO; ARAÚJO; COVRE, 2011).

Para que o estudo de trocas de calor seja realizado com maior precisão, este é realizado dentro de um aparelho chamado calorímetro, que consiste em um recipiente fechado incapaz de trocar calor com o ambiente e com seu interior. (SÓ FÍSICA, 2018).

Dentro de um calorímetro, os corpos colocados trocam calor até atingir o equilíbrio térmico. Como os corpos não trocam calor com o calorímetro e nem com o meio em que se encontra, toda a energia térmica passa de um corpo ao outro. (SÓ FÍSICA, 2018).

Como, ao absorver calor  $Q_{>0}$  e ao transmitir calor  $Q_{<0}$ , a soma de todas as energias

térmicas é nula, ou seja:  $\sum q = 0$

(Lê-se que somatório de todas as quantidades de calor é igual à zero)

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots Q_n = 0$$

Sendo que as quantidades de calor podem ser tanto sensível, como latente.

##### 1.4.1. Capacidade Térmica

É a quantidade de calor que um corpo necessita receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade. (SÓ FÍSICA, 2018).

Então, pode-se expressar esta relação por:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta} \rightarrow C = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\theta}{\Delta\theta} \rightarrow C = m \cdot c$$

Sua unidade usual é cal/°C.

A capacidade térmica de 1g de água é de 1cal/°C já que seu calor específico é 1cal/g°C.

#### 1.4.2. Transmissão de Calor

Em certas situações, mesmo não havendo o contato físico entre os corpos, é possível sentir que algo está mais quente. Como quando chegamos perto do fogo de uma lareira. Assim, concluímos que de alguma forma o calor emana desses corpos "mais quentes" podendo se propagar de diversas maneiras, como já mencionado, o fluxo de calor acontece no sentido da maior para a menor temperatura. (INSTITUTO EDUCACIONAL VERA CRUZ, 2019).

Este trânsito de energia térmica pode acontecer pelas seguintes maneiras:

- Condução; Convecção; e, Irradiação.

#### 1.5. Perdas de Água em Torres de Resfriamento

Em torres de resfriamento, sempre existe uma perda de água no meio do processo, embora seja uma perda pequena, deve ser controlada, pois conforme o tempo de operação da torre se estender, as perdas também vão se estender ao longo do processo de resfriamento da água através da torre. (ALPINA EQUIPAMENTOS, 2018).

Essas perdas se dão por três motivos, que são eles:

- Perda por evaporação; Perda por arraste; e, Perda por purga.

As perdas por evaporação e por arraste são desprezíveis em operação normal, pois estão em torno de 0,2% do volume total que está circulando na torre para cada 10° C do range da torre (CHEREMISINOFF, 1981), como mostra o gráfico 3.

1099

Gráfico 2- Relação entre perda por evaporação, arraste e ciclos de concentração.



Fonte: <https://www.resumo escolar.com.br/química/perdas/>. Acessado em 12/04/2018



### 1.5.1. Perda por Evaporação

A perda por evaporação depende diretamente do diferencial térmico entre as temperaturas da água na entrada e saída da torre, além das condições climáticas externas. Problemas como esses podem ser compensados por meio da variação da vazão de água no sistema (CORTINOVIS E SONG, 2005).

Para calcular este tipo de perda existe um cálculo matemático onde pode-se entender melhor pela seguinte fórmula:

$$G I_0 = \frac{G I (t_1 - t_2)}{1000 \cdot \frac{(h_2 - h_1)}{(x_2 - x_1)} - t_2}$$

Onde:

- $G I_0$  = Perda de água por evaporação ( $m^3/h$  ou  $t/h$ );
- $G I$  = vazão da água em circulação ( $m^3/h$  ou  $t/h$ );
- $t_1 - t_2$  = Diferencial térmico entre as temperaturas da entrada ( $t_1$ ) e saída da torre ( $t_2$ );
- $h_2 - h_1$  = Diferencial de entalpia do ar, na entrada e na saída da torre ( $kcal/kg$  ar seco);
- $x_2 - x_1$  = Diferencial de conteúdo de vapor do ar úmido, na entrada e na saída da torre ( $g/kg$  ar seco).

### 1.5.2. Perda por Arraste

Este tipo de perda não chega a ser algo significativo já que geralmente estas perdas não passam de 0,1%, porém neste tipo de perda pode variar de acordo com o equipamento usado pelo fabricante, um dos tipos mais eficientes, utilizado pela empresa Alpina atuante no Brasil é o sistema de eliminadores de gotas do tipo onda-dupla, construídos de perfis de PVC, a perda por arraste é de 0,01%. (ALPINA EQUIPAMENTOS, 2018).

### 1.5.3. Perda por Purga de Desconcentração

Já este tipo de perda quase não chega a ser efetivamente uma, pois este sistema de purga é utilizado periodicamente para evitar o acúmulo excessivo de sais, que aumentam na densidade da água, que assim acaba afetando sua eficiência de resfriamento. (Alpina Equipamentos, 2018).

## 1.6. Controle das Variáveis

As variáveis a serem administradas serão:

- a. Temperatura da Água – será medida a temperatura na entrada, que simula a temperatura do processo com a água aquecida e na saída, logo depois da passagem da água pelo recheio da torre.
- b. Fluxo de Ar (Não Mensurado) – o fluxo de ar no interior da torre será controlado exclusivamente pela velocidade do ventilador/exaustor instalado sem levar em consideração o quantitativo real insuflado no interior da torre.

### 1.6.1. Controle de Temperatura

O controle de temperatura se baseia em sensores de temperatura que ficam na entrada e saída de água da torre, mas para fins de controle, a temperatura de saída é que é controlada na malha de controle, pela velocidade do ventilador que é diretamente responsável pelo fluxo de ar que entra na torre. (TERMOPARTS, 2013).

### 1.6.2. Controle do Fluxo de Ar

O controle do fluxo de ar de uma torre de resfriamento varia dependendo do seu modelo, em algumas, só é utilizado o ar atmosférico sem nenhum tipo de indução, ou seja, o ar utilizado de forma natural (SISTEMAS EEL, 2018).

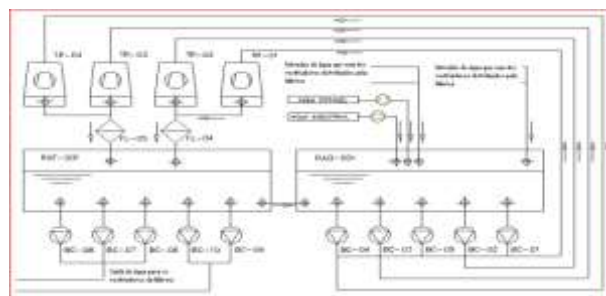
Já em outros casos existem torres em que o fluxo de ar é induzido através de ventiladores, que aumentam mais ainda a capacidade de captação de ar, esta captação de ar está ligado diretamente à eficiência de resfriamento da água já que um dos principais componentes que trocará calor com a água é o ar e para um rendimento eficiente da torre a entrada de ar será proporcional à quantidade de água que circulará pela torre. (SISTEMAS EEL, 2018).

### 1.7. Automação do Controle da Torre de Resfriamento

A figura 19 representa um sistema utilizado na empresa Bosch onde é feito todo processo de resfriamento da água utilizada na fábrica, a água chega das linhas em um reservatório que está conectado a cinco bombas, onde quatro trabalham e uma fica de reserva para possíveis falhas, estas bombas são interligadas cada uma em uma torre de resfriamento, onde existe um ventilador no seu topo, que ao ser ligado retira o calor da água e uma bacia em sua base onde está conectada uma tubulação que levará a água para outro reservatório por meio de gravidade e em seguida bombeada para a fábrica através de outro sistema. (VENÂNCIO, 2007).

A água que sai dos resfriadores é bombeada e distribuída no topo da torre, que contém um enchimento interno para melhor espalhar a água. Ar ambiente é insuflado através do mesmo, em contracorrente (corrente cruzada) com a água que desce. Por meio desse contato líquido-gás, parte da água evapora e ocorre o seu resfriamento. (VENÂNCIO, 2007).

Figura 5 - Controle automatizado de uma torre de resfriamento

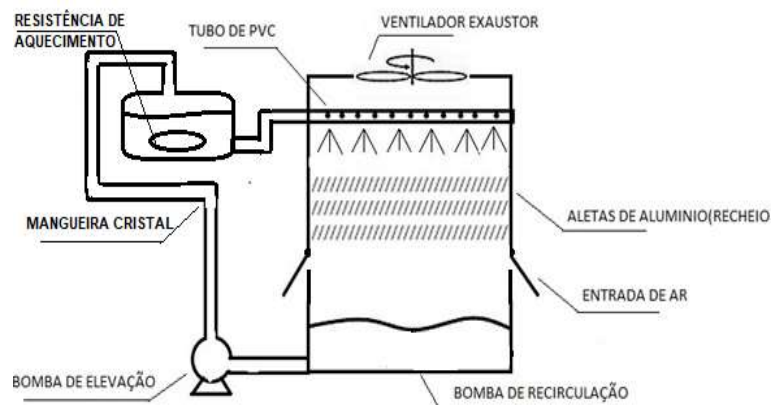


Fonte: TCC - Curso de Eng<sup>a</sup>. Elétrica - Universidade São Francisco (Campinas-SP) Autor: Samuel José Venâncio.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os passos para a idealização do projeto da torre de resfriamento. Inicialmente optou-se por elaborar uma torre de resfriamento em menor escala com base no modelo de fluxo contra a corrente, fazendo algumas modificações para que os resultados de sua eficiência fiquem mais próximos do pretendido, na figura abaixo, pode-se ter uma visão mais significativa do projeto, de modo que seja possível analisar cada componente que integra o projeto.

Figura 6 - Torre de resfriamento em menor escala



Fonte: Autores.

### 2.1. Pesquisa e Coleta dos Materiais

Para realização do projeto, foram utilizados materiais de baixo custo e fácil aquisição em lojas de ferragens, são os materiais da tabela 3.

Tabela 3- Materiais utilizados

Coleta de Materiais		
Materiais	Quantidade	Custo
Perfis para Dry-wall	6	R\$ 100,00
Módulo Relê	1	R\$ 50,00
Ventilador/Exaustor	1	R\$ 230,00
Placa Ethernet Shield	1	R\$ 150,00
Bomba de Recirculação	1	R\$ 170,00
Resistência de chuveiro	1	R\$ 30,00
Sensores de temperatura	4	R\$ 80,00

Fonte de Alimentação 220 x 5V	1	R\$ 25,00
Placa de Relês para Arduíno	1	R\$ 20,00
Placa “Shield Ethernet” para Arduíno	1	R\$ 20,00
Placa Controladora (Arduíno Leonardo)	1	R\$ 140,00
Chuveiro Elétrico	1	R\$ 39,00
Reservatório de água (Vaso)	1	R\$ 7,00
Vidro Bisotado	1	R\$ 130,00
Espumas Termo-acústicas	1	R\$ 5,00
Cabo RJ-45 “Ethernet”	1	R\$ 1,00
	Total (R\$)	R\$ 1197,00

Fonte: Autores.

## 2.2. Método de Construção

Será descrito o processo de montagem do protótipo e a relação entre seus componentes internos.

1103

### 2.2.1. Processo de Montagem

Inicialmente foi projetada uma estrutura com perfis de alumínio, onde ocorre todo o processo de troca de calor da água com o recheio e o ar, onde a água é aquecida na parte superior, e flui para baixo em menor velocidade, por conta do recheio, no que facilita a troca de calor com o próprio material de enchimento e o ar que também entra no fluxo contrário da água, e é puxado através do ventilador exaustor para cima, contribuindo para a troca de calor.

Após a etapa de resfriamento, a água cai no fundo do reservatório, formando um nível considerável, e no fundo do reservatório, fica situado um sensor de temperatura, que faz a medição da água já fria, e a bomba que é responsável por bombear a água resfriada para a etapa de aquecimento.

Na etapa de aquecimento da água, foi utilizado como base um chuveiro que recebe através de uma mangueira a água advinda da bomba, o aquecimento é feito através de uma resistência, nesta etapa, também possui um sensor de temperatura acoplado ao chuveiro, para medir a temperatura da água quente, ou seja, serão utilizados na medição os sensores mencionados para que possamos controlar o delta de temperatura pela diferença entre eles, determinando assim a eficiência.

E então, finalizada a parte de aquecimento, a água segue novamente para ser pulverizada de forma uniforme para dar início novamente no seu resfriamento, ou seja, a água segue este ciclo da mesma forma que em um circuito fechado.

Todo este sistema é controlado por um sistema supervisório (SCADA BR), onde é possível ler a variável de processo (temperatura) e o monitoramento dos componentes

utilizados, alternar entre o controle automático/manual da torre e ligar e desligar os componentes, como bomba, resistência, e exaustor.

No decorrer do processo de montagem da torre, foram substituídos alguns itens visando uma melhor eficiência no resfriamento da água, um exemplo disso, foi em questão da estrutura central, que anteriormente em PJIA4 tinha-se como ideia utilizar caixas de isopor, mas ao realizar a montagem do projeto já em PJIA6, foi visto que na prática, as caixas não se aplicavam bem a esta finalidade, e então foi substituído por uma estrutura em alumínio, que além de atender as expectativas esperadas, ficou esteticamente melhor.

Más, a maior alteração realizada, visando à melhora da eficiência, foi no recheio, que inicialmente havia sido feito com condutores de plástico em forma de colmeia, e após observar alguns resultados de medição, concluiu-se que era necessária a troca deste recheio por outro material de melhor desempenho na troca de calor com a água, e então veio à substituição por aletas de alumínio, que resultou em uma melhora significativa na temperatura de saída da água.

### 2.3. Componentes e Suas Funções

A seguir será comentado sobre a função de cada componente utilizado na montagem do protótipo e seu papel no processo de resfriamento.

Durante o processo de montagem do trabalho, foram reutilizados materiais que já possuíamos para a montagem da torre de resfriamento, adquirindo apenas alguns componentes que faltavam para a conclusão do projeto.

#### 2.3.1. Protoboard

Componente onde foram feitas as ligações entre: sensores, Arduino e módulo relê, possibilitando a comunicação entre eles.



Figura 7 - Protoboard

Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/protoboard-400-pontos/> Acessado em: 05/06/2018

#### 2.3.2. Ventilador / Exaustor

Esse componente faz com que o ar no interior da torre e fluindo em sentido contrário ao fluxo de água (denominado “fluxo cruzado”) troque calor com a água, é diretamente responsável pela eficiência de resfriamento da torre, já que através do seu acionamento ou desligamento ao longo da operação da torre, será possível aumentar e/ou

cessar o fluxo de ar que percorre o interior da torre. A figura 26 mostra um modelo similar ao utilizado no projeto.

Figura 8 - Ventilador Exaustor



**Fonte:** <http://www.soubarato.com.br/produto/122353875/ventilador-de-coluna-catrina-pedestal-branco-azul-3-velocidades>; Acessado em: 17/06/2019.

### 2.3.3. Bomba de Recirculação

Faz a recirculação da água do processo, uniformizando com água resfriada de ciclos anteriores, não interfere no próximo ciclo.

Figura 9 - Bomba elétrica



**Fonte:** [http://www.refriarparts.com.br/produtos/o,76276\\_bomba-de-drenagem-127v-maquina-de-lavar-eletrobomba-da-lavadora-127v](http://www.refriarparts.com.br/produtos/o,76276_bomba-de-drenagem-127v-maquina-de-lavar-eletrobomba-da-lavadora-127v) Acessado em: 17/06/2019

### 2.3.4. Módulo relê

Possibilita acionar exaustor, bomba, e resistência, pelo comando vindo do Arduino.

Figura 10 - Módulo relê



**Fonte:** <https://www.kitgames.com.br/2018-03-21-16-56-28> Acessado em: 05/06/2018

### 2.3.5. Chuveiro Elétrico (7500 Watts)

Sua função é aquecer a água resfriada, simulando a condição real do ciclo quente que precisa resfriar para novo ciclo, fica localizada no reservatório superior, e junto com a bomba de recirculação, aquece toda a água do reservatório uniformemente.

Figura 11 – Chuveiro Elétrico



Fonte: <https://www.lorenzetti.com.br/produto/bella-ducha-4t-996> Acessado em: 25/02/2022

### 2.3.6. Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura medirão a temperatura de entrada da água (aquecida), a temperatura de saída da água (já resfriada), temperatura externa (ambiente) e também atuarão como referência para operação do ventilador e a eficiência do resfriamento.

1106

Figura 12 - Sensor de Temperatura



Fonte: <http://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-temperatura-a-prova-de-agua-ds18b20-1m-dfrobot.html> Acessado em: 05/06/2018

### 2.4. Ethernet Shield

Responsável pela comunicação do Arduino com o sistema supervisor, através do protocolo de comunicação Modbus/IP, via cabo de rede.

Figura 13 - Ethernet Shield



Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/ethernet-shield-w5100-para-arduino/> - Acessado em: 07/03/2019

#### 2.4.1. Controlador (Arduíno Leonardo)

A Placa **Arduíno Leonardo** é um micro controlador baseado no ATmega 32u4, receberá toda a parte lógica do projeto, onde foi programado o funcionamento da torre, para que com base na leitura dos sensores, faça os respectivos acionamentos.

Figura 14 - Arduíno Leonardo



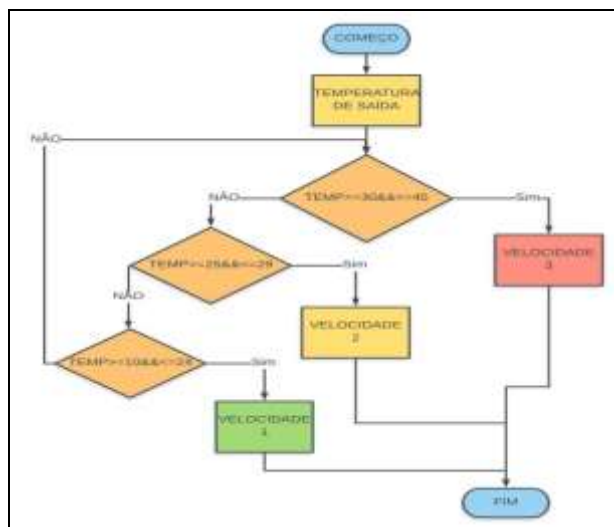
Fonte: [https://www.arduino.cc/en/Main/Arduino\\_BoardLeonardo](https://www.arduino.cc/en/Main/Arduino_BoardLeonardo) Acessado em: 25/02/2022

#### 2.4.2. Diagrama de Operação do Circuito - Controle de Temperatura

No diagrama abaixo, temos o esquemático do sistema de controle de temperatura, controlado através do Arduíno, que basicamente funciona da seguinte forma: Quando a temperatura da água estiver acima do set point desejado, o Arduíno fará o controle atuando na rotação do ventilador exaustor, até que a temperatura da água atinja o valor do set point.



Figura 15 - Diagrama Controle temperatura

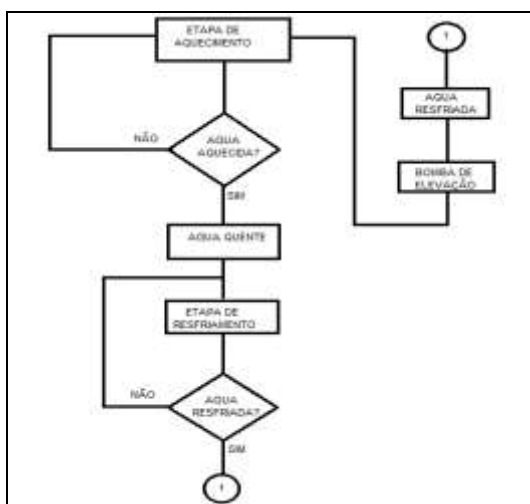


Fonte: Autores

### 2.4.3. Fluxograma de Funcionamento

No fluxograma da figura 36 é possível identificar os principais pontos do processo de resfriamento da água, que no caso do nosso protótipo se trata de um circuito fechado, onde inicialmente a água será aquecida, depois fluirá até a etapa de resfriamento e então será enviada através da bomba de elevação para que seja aquecida novamente.

Figura 16 - Fluxograma de funcionamento



Fonte: Autores

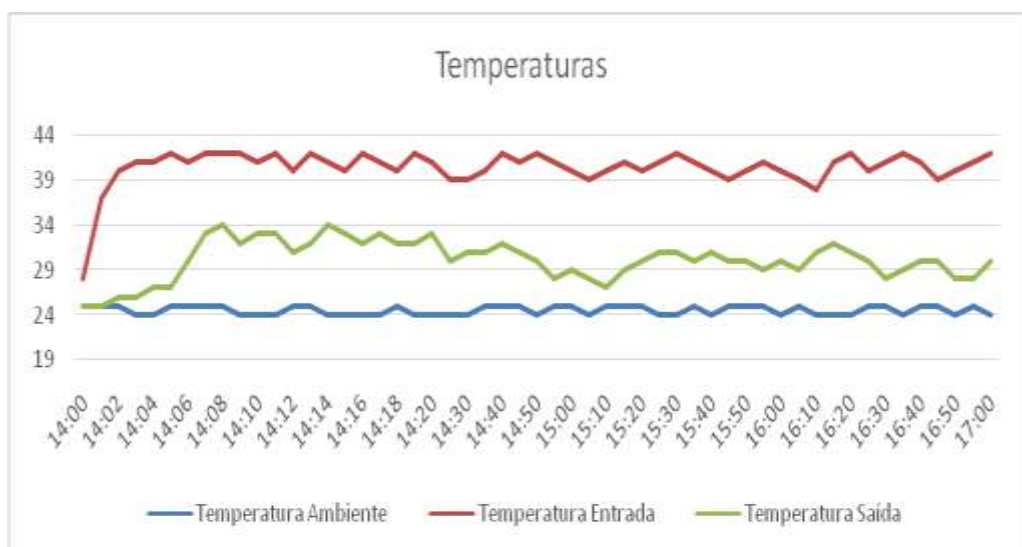
## 3 RESULTADOS

A Metodologia utilizada para a aquisição dos resultados aqui apresentados foi à operação do sistema em modo automático por um período de 3 horas, partindo da temperatura ambiente em 25°C e da água fria em 25°C; e mantendo-se a temperatura de

aquecimento entre 38 e 42°C através do controle automatizado pelo sistema supervisorio; a programação pré-estabelecida visa manter a diferença média entre entrada e saída em 10°C, chegando-se aos seguintes valores.

Tempo	Temperatura			Tempo	Temperatura			Tempo	Temperatura		
	Amb.	Ent.	Saí.		Amb.	Ent.	Saí.		Amb.	Ent.	Saí.
14:00	25	28	25	14:18	25	40	32	15:40	24	40	31
14:01	25	37	25	14:19	24	42	32	15:45	25	39	30
14:02	25	40	26	14:20	24	41	33	15:50	25	40	30
14:03	24	41	26	14:25	24	39	30	15:55	25	41	29
14:04	24	41	27	14:30	24	39	31	16:00	24	40	30
14:05	25	42	27	14:35	25	40	31	16:05	25	39	29
14:06	25	41	30	14:40	25	42	32	16:10	24	38	31
14:07	25	42	33	14:45	25	41	31	16:15	24	41	32
14:08	25	42	34	14:50	24	42	30	16:20	24	42	31
14:09	24	42	32	14:55	25	41	28	16:25	25	40	30
14:10	24	41	33	15:00	25	40	29	16:30	25	41	28
14:11	24	42	33	15:05	24	39	28	16:35	24	42	29
14:12	25	40	31	15:10	25	40	27	16:40	25	41	30
14:13	25	42	32	15:15	25	41	29	16:45	25	39	30
14:14	24	41	34	15:20	25	40	30	16:50	24	40	28
14:15	24	40	33	15:25	24	41	31	16:55	25	41	28
14:16	24	42	32	15:30	24	42	31	17:00	24	42	30
14:17	24	41	33	15:35	25	41	30	<b>Média</b>	<b>24,5</b>	<b>40,4</b>	<b>30,1</b>

Fonte: dos Autores



Fonte: dos Autores

#### 4 DISCUSSÕES

Neste trabalho, o objetivo é automatizar o controle da temperatura da água do processo de resfriamento da torre, para isso foram feitas pesquisas nas mais diversas fontes, para alcançar os melhores resultados possíveis.

Com relação à pesquisa, há uma dificuldade inerente com relação ao material de pesquisa, pois são poucos os livros em português que tratam de forma específica o assunto. Outra dificuldade também surgiu ao começar a selecionar os componentes para o protótipo, já que não se pode usar qualquer tipo de composição, pois dependendo do material influenciará diretamente no processo de resfriamento, e pretendemos no PJI6 executar diversos testes, utilizando vários tipos de materiais, a fim de selecionar o que melhor se encaixa no projeto e com isso poderá ser obtido diferentes resultados ao longo dos diversos ensaios que serão efetuados.

#### CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o projeto foi um sucesso e atingiu as expectativas, observando o equipamento e toda a estrutura que o envolve, nota-se que existe uma grande semelhança com os equipamentos industriais que atualmente são usados, pois foi construído com base nos mesmos, porém, com materiais de baixo custo e com finalidade didática.

Outro detalhe importante que pode ser ressaltado na questão do desempenho e eficiência no arrefecimento, pois com o estudo feito em torres de resfriamento, conseguiu-se um funcionamento também muito semelhante com as máquinas industriais, porém com temperaturas mais baixas, para fins de demonstração de conceito. Outro ponto importante é que alguns dos materiais que foram instalados no equipamento são de uso na indústria atual, como por exemplo, resistência, contadores, disjuntores, botões de acionamento, conexões hidráulicas, sistema supervisorio, isso acaba familiarizando o aluno com o meio industrial, que é o seu provável futuro no mercado de trabalho. Para finalizar, a automatização do equipamento, ou seja, fazer com que o ciclo de trabalho do mesmo aconteça de forma programada.

Embora o projeto esteja pronto, foram estudadas possíveis melhorias para aperfeiçoar a parte operacional da torre de resfriamento, e uma delas seria a implementação de um controlador junto à torre, para controlar e monitorar a temperatura da água de saída através do set point, sendo um meio alternativo de fazer o controle da temperatura sem a necessidade de fazer alterações no supervisorio.

#### REFERÊNCIAS

**ALPINA EQUIPAMENTOS.** 50 anos de evolução em torres de resfriamento no Brasil. Disponível em: <http://www.alpinaequipamentos.com.br/pdf/50-anos-de-evolucao-em-torres-resfriamento-no-brasil.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2019.

**ANJOS, Talita Alves dos.** Temperatura e Calor. Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/temperatura-calor.htm>. Acesso em: 20 abr. 2019.

**CASTRO, M. M.; SONG, T.W.; PINTO, J.M.** Minimization of operational cost in cooling water systems. *Trans IChemE.*, v.78, part A. 2000. 192-201 p.

**COOLING TOWER INSTITUTE, Sam.** Zero Blowdown for Cooling Towers. In: **OWENS, Sam.** *COOLING TOWER WATER BLOWDOWN TREATMENT*, 2007.

**CORTINOVIS, G.F.; SONG, T.W.** Funcionamento de uma Torre de Resfriamento de Água. *Revista de Graduação da Engenharia Química, São Paulo*, v. 14, p. 5-10, 2005.

**DANTAS, Tiago.** Termodinâmica. Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fterminamica.htm>. Acesso em: 13 abr. 2019.

**DUARTE, PROF. CLAUDIO ROBERTO.** CURSO DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS II. Disponível em: [https://www.academia.edu/36739215/Bibliografia\\_TROCADORES\\_DE\\_CALOR](https://www.academia.edu/36739215/Bibliografia_TROCADORES_DE_CALOR). Acesso em: 20 abr. 2019.

**EQUIPE BETA (PAI 1º SEMESTRE -UNIFACS ).** HISTÓRIA DAS TORRES DE RESFRIAMENTO, 2013. Disponível em: <http://equipebeta-pai.blogspot.com/p/curiosidades.html>. Acesso em: 7 abr. 2019.

**INSTITUTO EDUCACIONAL VERA CRUZ.** Física termologia, Óptica e Ondulatória, 2019. Disponível em: <http://www.submit.ioenvolve.com.br/uploads/ec6f8eb10bafce3e19aco46617e6152f28foc1d2/7360861964685063b616f6e3fd9170ee.pdf>. Acesso em: 2 maio 2019.

**KERN, Donald Q.** Transmissão de Calor. In: **KERN, Donald Q.** *Processos de Transmissão de Calor*. Guanabara, 1987.

**KREITH, Frank.** *Princípios da Transmissão de Calor*. Edgard Blucher, 1977.

**MARQUES, Domiciano Correa.** Primeira Lei da Termodinâmica, 2018. Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/primeira-lei-termodinamica.htm>. Acesso em: 15 abr. 2019.

**MEISSNER, DAVID.** Tratamento de efluente, 2015. Disponível em: <https://www.celuloseonline.com.br/tratamento-de-efluentes-david-charles-meissner-a-importancia-de-controlar-a-temperatura-no-tratamento-de-efluentes-1/>. Acesso em: 5 maio 2019.

**PEREIRA, Prof. Dr. Félix Monteiro.** FENÔMENOS DE TRANSPORTE II TRANSFERÊNCIA DE CALOR: CONCEITOS GERAIS, 2018. Disponível em: [sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817066/.../C1\\_ConceitosGeraiTC.pptx](https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817066/.../C1_ConceitosGeraiTC.pptx). Acesso em: 27 abr. 2019.

**SISTEMAS EEL.** Torres de resfriamento, 2018. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4086/torres.de.resfriamento2.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2019.

**SÓ FÍSICA.** Termometria, 9 jun. 2019. Disponível em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Termometria/temperatura.php>. Acesso em: 18 abr. 2019.

**SÓ FÍSICA.** Calorimetria, 2018. Disponível em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/calor.php>. Acesso em: 22 abr. 2019.

**SÓ FÍSICA.** Calor latente, 2018. Disponível em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/calor2.php>. Acesso em: 23 abr. 2019.

**VENÂNCIO, Samuel José.** AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA. 2007. Trabalho de conclusão de curso (CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA) - UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO, 2007. Disponível em: <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1372.pdf>. Acesso em: 3 maio 2019.

**WIKIPÉDIA.** Temperatura, 2016. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Temperatura#cite\\_note-1](https://pt.wikipedia.org/wiki/Temperatura#cite_note-1). Acesso em: 5 mar. 2019.