

## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **TORRE DE RESFRIAMENTO: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS PARA APOIO AO ENSINO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Por,  
**Franco Serighelli Sampaio**

**Brasília, 10 de julho de 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO  
**TORRE DE RESFRIAMENTO  
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E TESTES  
EXPERIMENTAIS PARA APOIO AO ENSINO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA**

POR,

**Franco Serighelli Sampaio**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira, UnB/ ENM

---

Prof. Antônio Francisco Parentes Fortes, UnB/ ENM

---

Brasília, 10 de julho de 2013

**Dedicatória**

*Dedico este trabalho a todos os alunos do ENM visando ajudar a melhoria de sua formação acadêmica.*

*Franco Serighelli Sampaio*

## **Agradecimentos**

*Queria agradecer ao professor João Manoel Dias Pimenta pela sugestão deste tema de projeto, à todos os membros e a equipe BAJA – Piratas do Cerrado pelo fornecimento de ferramentas quando eu precisei, à todos os membros e a equipe DRACO VOLANS pelo mesmo motivo, A Elisa de Oliveira Monteiro e o José das Neves Júnior pela assistência prestada, a minha mãe Rosangela Serighelli, meu irmão Ciro Serighelli que me deram grande suporte quando eu precisei, ao meu pai Arquimedes Sampaio, ao grupo dos Barulhentos da engenharia mecânica com quem tive o grande prazer de começar esta jornada na Universidade e todos meus amigos da engenharia mecânica, e também ao restante dos meus amigos por me proporcionarem um ambiente agradável e me fizeram conseguir chegar até aqui.*

*Franco Serighelli Sampaio*

---

## **RESUMO**

Este trabalho fornece material de apoio ao estudo teórico do tema torres de resfriamento. Por intermédio dele, o aluno é capaz de dizer os aspectos gerais de uma torre de resfriamento, saber sobre os conceitos relacionados, diferenciar e qualificar os métodos de exposição da água a corrente de ar, diferenciar e qualificar os diversos tipos de torres existentes, diferenciar e qualificar os sistemas de distribuição de água na torre, diferenciar e qualificar os tipos diferentes de enchimentos, saber sobre os eliminadores de gotas, saber estimar a quantidade de água para reposição, aprender sobre ciclos de concentração, saber sobre o tratamento de água, ter conhecimento de algumas observações gerais, ter noções de custos e aprender sobre o ensino direcionado para engenharia. Também é relatado e mostrado os procedimentos adotados para a restauração da bancada experimental de torres de resfriamento do Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado – LaAR e as práticas experimentais criadas para uso do equipamento.

---

## **ABSTRACT**

This paper provides support material to the theoretical study of cooling towers. Through it, the student is able to tell the general aspects of a cooling tower, learn about related concepts, differentiate and describe the methods of exposing water to air draft, differentiate and classify the various types of existing towers, differentiate and qualify the distribution systems of water in the tower, differentiate and classify the different types of fills, know about the droplet water eliminator, know how to estimate the amount of water to spare, learn about cycles of concentration, learn about water treatment, have knowledge of some general observations have notions of costs and learn about some specific education for engineering. It is also reported the procedures adopted for the restoration of the experimental bench of cooling tower of the Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning – LaAR and the experimental practices designed to use the equipment.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. O tema em estudo e sua importância .....	1
1.2. Como o tema é abordado em grandes Universidades do Brasil .....	3
1.2.1. UnB – Universidade de Brasília: .....	3
1.2.2. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais: .....	4
1.2.3. USP – Universidade de São Paulo (Campus Cidade Universitária): .....	7
1.2.4. Análise .....	7
1.3. Revisão bibliográfica .....	8
1.4. Objetivos .....	9
1.5. Metodologia .....	9
1.6. Estrutura do relatório .....	10
<b>2. Torres de Resfriamento.....</b>	<b>12</b>
2.1. Aspectos Gerais .....	12
2.2. História das torres de resfriamento.....	14
2.3. Conceitos relacionados a torres de resfriamento .....	17
2.4. Torres de circuito fechado ou aberto .....	17
2.5. Torres secas e torres úmidas .....	18
2.6. Métodos de exposição da água à correntes de ar .....	19
2.7. Tipos de tiragem em torre de resfriamento.....	20
2.8. Sistemas de distribuição de água.....	26
2.9. Enchimentos (ou recheios).....	28
2.10. Eliminadores de gotas .....	30
2.11. Reposição de água e Ciclos de Concentração.....	31
2.12. Tratamento da água da torre de resfriamento .....	33
2.13. Observações importantes.....	36
2.14. Custos da torre de resfriamento .....	37
<b>3. Revisão de conceitos .....</b>	<b>39</b>
3.1. Psicrometria e cartas psicrométricas.....	39
3.2. Umidade absoluta.....	40
3.3. Umidade relativa.....	41
3.4. Umidade específica .....	41
3.5. Volume específico .....	41
3.6. Lei de Dalton .....	42
3.7. Entalpia específica .....	42
3.8. Temperatura de bulbo seco.....	42
3.9. Temperatura de bulbo úmido .....	42
3.10. Temperatura de ponto de orvalho .....	43
<b>4. Ensino .....</b>	<b>44</b>
4.1. Balanço de massa e energia num volume de controle .....	44
4.2. Alguns números adimensionais importantes para o estudo .....	46
4.3. O Fator de Lewis para torres de resfriamento .....	47
4.4. Transferência de calor e massa na torre de resfriamento .....	49
<b>5. Bancada Experimental do LaAR.....</b>	<b>52</b>
5.1. Apresentação da bancada.....	52
5.2. Funcionamento e operação da bancada .....	57
5.3. Restauração da bancada experimental.....	59
5.4. Equipamentos de medição de temperatura.....	70

5.4.1.	Termômetros digital tipo agulha .....	70
5.4.2.	Equipamento de medição e monitoramento com CPU .....	70
5.5.	Ajuste do controle de vazão de água .....	74
5.6.	Ajuste no controle da vazão de ar .....	75
5.7.	Construção do psicrômetro .....	76
5.8.	Primeiros testes realizados após restauração .....	79
5.8.1.	Teste com a vazão de água .....	80
5.8.2.	Teste com a vazão de ar .....	81
5.8.3.	Teste comparativo entre termômetros e equipamento AUTOMATA .....	82
5.8.4.	Teste com o psicrômetro .....	84
<b>6.</b>	<b>Planejamento e elaboração de experimentos .....</b>	<b>85</b>
6.1.	Introdução .....	85
6.2.	Aula teórica .....	85
6.3.	Práticas experimentais com a bancada .....	86
6.3.1.	Experimento 1 .....	86
6.3.2.	Experimento 2 .....	86
6.3.3.	Experimento 3 .....	86
6.3.4.	Experimento 4 .....	87
<b>7.</b>	<b>Conclusões e Recomendações .....</b>	<b>88</b>
7.1.	Dificuldades gerais do trabalho .....	88
7.2.	Elaboração de material teórico geral .....	89
7.3.	Bancada Experimental .....	89
7.4.	Elaboração de Práticas laboratoriais .....	90
7.5.	Trabalho dentro da disciplina Instalações 2 .....	90
7.6.	Custos gerais .....	90
7.6.1.	Custos de manutenção .....	90
7.7.2.	Custos da instrumentação com termômetros digitais tipo agulha .....	91
7.7.3.	Custos com equipamento de medição e monitoramento com CPC .....	91
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>92</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Duas Torres de Resfriamento de tiragem natural da Estação de Energia Beaver Valley localizadas no rio Ohio em Shippingport, Pensilvânia (Fonte: <a href="http://www.ecology.com/2012/06/05/water-cooled-power-plants-warming-climate/">http://www.ecology.com/2012/06/05/water-cooled-power-plants-warming-climate/</a> , Credit: NRC/First Entergy). .....	12
Figura 2.2 - Torre de resfriamento de tiragem mecânica (Fonte: <a href="http://www.swlf.ait.ac.th/Old/Visu_CD/photo_collection/china/fieldvisit/Cooling%20Tower%20at%20the%20Incineration%20plant.JPG">http://www.swlf.ait.ac.th/Old/Visu_CD/photo_collection/china/fieldvisit/Cooling%20Tower%20at%20the%20Incineration%20plant.JPG</a> ). .....	13
Figura 2.3 - Funcionamento simplificado de uma torre de resfriamento do tipo tiragem mecânica induzida (Fonte: <a href="http://www.proficool.pl/?html_file_name=zasada-dzialania-chlodni">http://www.proficool.pl/?html_file_name=zasada-dzialania-chlodni</a> , adaptada pelo autor.). .....	14
Figura 2.4 - Modelos antigos de torre de tiragem natural (Fonte: <a href="http://vettortorres.com.br/vettor/Home/Historia">http://vettortorres.com.br/vettor/Home/Historia</a> ). .....	15
Figura 2.5 – Torres de resfriamento de tiragem mecânica em série (Fonte: <a href="http://www.flickr.com/photos/grupoebx/7068748861/">http://www.flickr.com/photos/grupoebx/7068748861/</a> ). .....	16
Figura 2.6 - Torre híbrida (seca e úmida) com tiragem mecânica induzida e forçada (Fonte: <a href="http://vettortorres.com.br/vettor/Home/Historia">http://vettortorres.com.br/vettor/Home/Historia</a> ). .....	16
Figura 2.7 – Range e Approach. ....	17
Figura 2.8 - Torres de circuito fechado e circuito aberto respectivamente. ....	18
Figura 2.9 - Torre com fluxo em contracorrente (Fonte: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower">http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower</a> , com adaptações do autor). .....	19
Figura 2.10 - Torre com fluxo cruzado (Fonte: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower">http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower</a> , com adaptações do autor). .....	20
Figura 2.11 - Exemplo de torre de tiragem natural ou hiperbólica (Fonte: <a href="http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/392003">http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/392003</a> ). .....	20
Figura 2.12 – A esquerda torre com fluxo de ar cruzado e a direita com fluxo de ar em contracorrente (Fonte: Mulyandasari, Viska, Cooling Tower Selection and Sizing (Engineering Design Guideline), KLM Technology Group, Rev 01, 2011, página 9). .....	21
Figura 2.13 – Torre de tiragem natural auxiliada por ventiladores (Fonte: <a href="http://spxcooling.com/images/fd-p02-b.jpg">http://spxcooling.com/images/fd-p02-b.jpg</a> ). .....	22
Figura 2.14 – Torre de tiragem mecânica (Fonte: <a href="http://blog.thermwood.com/default.aspx?Tag=manufacturing">http://blog.thermwood.com/default.aspx?Tag=manufacturing</a> ). .....	23
Figura 2.15 - Vários modelos de torre de tiragem mecânica (Fonte: <a href="http://cooling-tower-online.com/2010/02/06/101/">http://cooling-tower-online.com/2010/02/06/101/</a> , adaptada pelo autor). .....	24
Figura 2.16 – Torre de tiragem mecânica induzida (Fonte: <a href="http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.pdf">http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.pdf</a> ). .....	24
Figura 2.17 – Vista explodida de torre de tiragem mecânica induzida (Fonte: <a href="http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.pdf">http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.pdf</a> ). .....	24
Figura 2.18 Torre de resfriamento de tiragem forçada em contracorrente (Fonte: <a href="http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf">http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf</a> ). .....	25
Figura 2.19 – Torre de tiragem mecânica forçada em contracorrente e circuito aberto (Fonte: <a href="http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf">http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf</a> ). .....	26
Figura 2.20 - Desenho esquemático do sistema de distribuição da água da torre por gravidade (Fonte: <a href="http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf">http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf</a> , figura 7). .....	27
Figura 2.21 - Desenho esquemático do sistema de distribuição de água da torre por pressão (Fonte: <a href="http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf">http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf</a> , figura 8). .....	27



Figura 2.22 – Exemplo de enchimento de gotejamento (Fonte: <a href="http://vettor.com.br/store/index.php/internos/enchimento-de-respingo-v-bar-1500-mm.html">http://vettor.com.br/store/index.php/internos/enchimento-de-respingo-v-bar-1500-mm.html</a> ).	28
Figura 2.23 – Exemplo de enchimento laminar (Fonte: <a href="http://www.termoparts.com.br/tp/">http://www.termoparts.com.br/tp/</a> )...	30
Figura 2.24 – Exemplo de eliminador de gotas (Fonte: <a href="http://www.termoparts.com.br/tp/peças-22/">http://www.termoparts.com.br/tp/peças-22/</a> ).	31
Figura 2.25 - Corrosão em tubulação (Fonte: <a href="http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4148-corrosao-em-metais--principios-e-prevencao/">http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4148-corrosao-em-metais--principios-e-prevencao/</a> ).	34
Figura 2.26 - Incrustações de carbonato de cálcio (Fonte: Trovati, Joubert, Tratamento de água de resfriamento, Araraquara-SP, Página 28, 2004).	35
Figura 2.27 - Crescimento de organismos em torre de resfriamento (Fonte: Trovati, Joubert, Tratamento de água de resfriamento, Araraquara-SP, Página 46, 2004).	35
Figura 3.1 - Carta Psicrométrica de Brasília (Fonte: Duarte Junior, José; Novais, Mariana, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO HÍBRIDO UTILIZANDO BACNET SOBRE ZIGBEE, Universidade de Brasília página 19, 2010).	40
Figura 4.1 - Balanço de energia no corpo da torre de resfriamento.	45
Figura 5.1 – Bancada experimental de torre resfriamento – LaAR, UnB (foto tirada pelo autor).	52
Figura 5.2 - Diagrama esquemático da torre de resfriamento The Hilton Cooling Water Tower (Fonte: <a href="http://www.fem.unicamp.br/~em712/torre.doc">http://www.fem.unicamp.br/~em712/torre.doc</a> , página 10).	53
Figura 5.3 - Painel de controle da bancada (foto tirada pelo autor).	54
Figura 5.4 - Motor elétrico da bancada (foto tirada pelo autor).	55
Figura 5.5 - Ventilador centrífugo da bancada (foto tirada pelo autor).	55
Figura 5.6 - Tanque de alimentação de nível constante da bancada (foto tirada pelo autor).	55
Figura 5.7 - Tanque coletor de água da bancada (foto tirada pelo autor).	56
Figura 5.8 - Resistências elétricas da bancada (foto tirada pelo autor).	56
Figura 5.9 - Fusíveis do circuito elétrico da bancada (foto tirada pelo autor).	56
Figura 5.10 - Enchimento da torre de resfriamento da bancada (foto tirada pelo autor).	56
Figura 5.11 - Eliminadores de gota da bancada (foto tirada pelo autor).	57
Figura 5.12 - Rotâmetro da bancada sujo (foto tirada pelo autor).	60
Figura 5.13 - Rotâmetro da bancada após ser limpo (foto tirada pelo autor).	60
Figura 5.14 - Espaço pequeno dificulta a manutenção (foto tirada pelo autor).	60
Figura 5.15 - Ferramenta necessária para soltar os parafusos (foto tirada pelo autor).	61
Figura 5.16 - Desmonte da caixa de resistências (foto tirada pelo autor).	61
Figura 5.17 - Interior da caixa de resistências no momento em que foi aberta (foto tirada pelo autor).	61
Figura 5.18 – Resistências no momento em que a caixa foi aberta (foto tirada pelo autor).	61
Figura 5.19 – Resistências e o interior da caixa (foto tirada pelo autor).	62
Figura 5.20 - Posição do termômetro que mede a temperatura de entrada da água (foto tirada pelo autor).	62
Figura 5.21 - Termômetro comprometido devido ao longo tempo sem manutenção (foto tirada pelo autor).	62
Figura 5.22 - Mangueiras velhas e comprometidas (foto tirada pelo autor).	63
Figura 5.23 - Comparação da mangueira que foi substituída (foto tirada pelo autor).	63
Figura 5.24 - Parte inferior da bancada após a troca das mangueiras (foto tirada pelo autor).	63
Figura 5.25 - Detalhe do tanque coletor de água após troca das mangueiras (foto tirada pelo autor).	63
Figura 5.26 - Multímetro ICEL GUBINTEC AW – 2500 (foto tirada pelo autor).	64
Figura 5.27 – Interruptores das resistências. (foto tirada pelo autor).	64

Figura 5.28 - Borracha utilizada para vedar a caixa das resistências (foto tirada pelo autor)..	65
Figura 5.29 - Fresta entre partes de metal da caixa de resistências elétricas. ....	66
Figura 5.30 - Novo isolamento de borracha em comparação com o antigo borracha-metal- borracha. ....	66
Figura 5.31 - Rompimento da resistência elétrica durante teste. ....	66
Figura 5.32 - Fio interno da resistência foi removido. ....	67
Figura 5.33 - Dispositivo de trava automático da resistência elétrica. ....	67
Figura 5.34 - Fio terra colocado na carcaça das resistências elétricas. ....	68
Figura 5.35 - Reservatório de água do manômetro utilizado para medir a vazão de ar. ....	68
Figura 5.36 - Ponto de solta TIG no reservatório de água do manômetro. ....	69
Figura 5.37 - Painel elétrico da bancada. ....	69
Figura 5.38 - Termômetro tipo agulha utilizado na bancada. ....	70
Figura 5.39 - Equipamento da Empresa AUTOMATA. ....	71
Figura 5.40 - Equipamento instalado na bancada. ....	71
Figura 5.41 - Interface do software da empresa AUTOMATA. ....	72
Figura 5.42 - Funcionamento do software da empresa AUTOMATA. ....	72
Figura 5.43 - Sensor de injeção eletrônica modelo 4051 ....	72
Figura 5.44 - Detalhe do sensor acoplado na bancada. ....	73
Figura 5.45 - Curva dos valores de resistência em função da voltagem. ....	73
Figura 5.46 - Curva de calibração da vazão de água. ....	75
Figura 5.47 - Sistemas utilizados para variar as vazões de ar. ....	76
Figura 5.48 - Psicrômetro construído para a bancada ....	77
Figura 5.49 - Termômetro com tecido (bulbo úmido) ....	77
Figura 5.50 - Termômetros do psicrômetro antes do início do teste. Temperatura de bulbo seco igual 20,2°C e temperatura de bulbo úmido igual a 20,2°C. ....	78
Figura 5.51 – Ventilador induzindo corrente de ar no Psicrômetro da bancada ....	78
Figura 5.52 – Termômetros do Psicrômetro durante o teste quando a temperatura estabilizou. Temperatura de bulbo seco igual a 20,1°C e temperatura de bulbo úmido igual a 15,2°C. ....	79
Figura 5.53 - Pontos de medição de temperatura de água da bancada. ....	80
Figura 5.54 - Comparação, para duas vazões de água, da taxa de decaimento da temperatura. .....	81
Figura 5.55 – Comparação, para várias vazões de ar, do decaimento da temperatura. ....	82
Figura 5.56 – Comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e ventilador desligado. ....	82
Figura 5.57 - Comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e vazão de ar a 350 m <sup>3</sup> /h.. ....	83
Figura 6.1 - Dimensões da bancada experimental do LaAR. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.2 - Gotícula de água em um escoamento de ar seco. ..	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – As nove melhores Faculdades e Institutos de Engenharia Mecânica do Brasil. ...	3
Tabela 1.2 – UnB – Disciplinas obrigatórias da área térmica. ....	3
Tabela 1.3 – UFMG – Disciplinas obrigatórias da área Térmica.....	5
Tabela 1.4 - USP – Disciplinas obrigatórias da área Térmica. ....	7
Tabela 5.1 – Tempo gasto, para vários níveis do rotâmetro, para encher a marca de 4 litros do tanque coletor de água.....	74
Tabela 5.2 - Temperatura da água ao longo da torre para uma vazão de 16,0 na escala do rotâmetro. ....	80
Tabela 5.3 - Temperatura da água ao longo da torre para uma vazão de 12,5 na escala do rotâmetro. ....	81
Tabela 5.4 – Valores obtidos da comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e ventilador desligado. ....	83
Tabela 5.5 - Valores obtidos da comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e vazão de ar de 350 m <sup>3</sup> /h. ....	83
Tabela 8.1 - Custos de manutenção da bancada.....	91
Tabela 8.2 – Custo da compra de termômetros tipo agulha. ....	91
Tabela 8.3 – Custos da compra com equipamento de medição e monitoramento com CPU...	91

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área	$[m^2]$
$CC$	Ciclos de concentração	
$c_p$	Calor específico a pressão constante	$[kJ/kg.K]$
$c$	Calor específico	$[kJ/kg.K]$
$d$	Razão entre o peso molecular da água e do ar	
$D$	Difusividade mássica	$[m^2/s]$
$E$	Evaporação de água	$[kg/s]$
$F$	Outras formas de reposição de água	$[kg/s]$
$G$	Arrasto de gotículas	$[kg/s]$
$G$	Vazão de ar em base seca	$[kg \text{ de ar seco/s}]$
$\dot{G}$	Vazão de ar em base úmida	$[kg \text{ de ar úmido/s}]$
$G'$	Fluxo mássico de ar (base seca)	$[kg \text{ de ar seco/s} \cdot m^2]$
$e$	Eficiência	
$H$	Entalpia	$[kJ]$
$h$	Entalpia específica	$[kJ/kg]$
$HE$	Umidade relativa	
$h_{conv}$	Coef. de transf. de calor por convecção	$[W/m^2 \cdot ^\circ K]$
$h_G$	Coeficiente de transferência de calor entre o ar e a superfície do líquido	
$h_L$	Coeficiente de transferência de calor para a fase líquida	
$h_m$	Coeficiente de transferência de massa	$[kg/m^2 \cdot s]$
$I$	Perdas indeterminadas de água	$[kg/s]$
$L_c$	Calor latente de vaporização da água	$[J]$
$L$	Comprimento característico	$[m]$
$L$	Vazão volumétrica de água	$[m^3/h]$
$\dot{L}$	Vazão de água	$[kg/s]$
$L'$	Fluxo mássico de água	$[Kg/s \cdot m^2]$
$m$	Massa	$[kg]$
$P$	Pressão	$[N/m^2]$
$PU$	Purga	$[kg/s]$
$Q$	Calor	$[J]$
$R$	Retorno de água	$[kg/s]$
$r$	raio	$[m]$
$T$	Temperatura	$[^\circ C]$
$U$	Energia interna	$[J]$
$V$	Volume	$[m^3]$
$V_{vel}$	Velocidade	$[m/s]$
$w$	Umidade absoluta	
$Z$	Altura do corpo da torre	$[m]$

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Difusividade térmica	$[m^2/s]$
$\phi$	Umidade relativa	
$v$	Volume específico	$[m^3/kg]$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$[m^2/t]$

$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\kappa$	Condutividade térmica	[W/m*K]

### Grupos Adimensionais

$\frac{\kappa V}{L}$	Número de Merkel
$Re$	Número de Reynolds
$Pr$	Número de Prandtl
$Sc$	Número de Schmidt
$Nu$	Número de Nusselt
$Le$	Número de Lewis

### Subscritos

<i>ar</i>	Ar atmosférico
<i>conv</i>	Convecção
<i>evap</i>	Evaporação
<i>máx</i>	Máximo
<i>w</i>	vapor d'água
<i>Total</i>	Total
1,2,3..	Números utilizados para diferenciação

### Sobrescritos

- Variação temporal

### Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CC	Ciclos de Concentração
CSV	Comma Separated Values
CTI	Cooling Technology Institute
EUA	Estado Unidos da América
LaAR	Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
PVC	Poli Cloreto de Vinila
TIG	Tungsten Inert Gas

# 1. INTRODUÇÃO

*Neste introduzimos o tema e explicamos sua relevância dentro do cenário mundial, fazemos uma revisão bibliográfica para contextualizar o leitor acerca da evolução deste, traçamos os objetivos do trabalho, dissertamos sobre a metodologia utilizada em sua confecção e descrevemos sua estrutura ao longo do mesmo.*

## 1.1. O tema em estudo e sua importância

Água e energia são dois dos mais importantes recursos existentes e ambos estão com suas reservas em estado crítico. Além disso, estão intimamente relacionados. Para a produção de energia é necessário o uso de água, e para se utilizar água, é necessário tratamento, estocagem e transporte, que demandam certa parcela de energia. Segundo um relato do National Renewable Energy Laboratory (2003) são necessários, em média, 2 galões de água (7,57 L) para gerar 1 kWh de energia nos Estados Unidos e num estudo do California Energy Commission são necessários, em média, 5 mil kWh para produzir 1 milhão de galões (3,78 milhões de L) de água.

Em muitos processos industriais, gera-se calor, e este calor deve ser extraído e dissipado. Geralmente é empregada a água como um elemento de resfriamento. A água utilizada pode ser desprezada ou pode ser resfriada e reutilizada, entretanto neste segundo caso tem-se um maior gasto econômico. Com a crescente preocupação mundial com o meio ambiente, este recurso deve, mais do que nunca, ser usado de forma consciente.

Em uma publicação (The World's Water, 2008-2009), o Dr. Peter H. Gleick, um renomado cientista da Pacific Institute, afirma que aproximadamente apenas 3% de toda a água do mundo é água doce. Deste total, aproximadamente 70% encontram-se na forma de gelo, restando para consumo, aproximadamente 30% que são águas subterrâneas e 0,3% que são águas de rios e lagos. Esses dados não são novos, o grande problema é que a maioria da água utilizada hoje para processos industriais vem da mesma fonte que da água para consumo.

As torres de resfriamento são equipamentos que são voltados para grandes demandas de resfriamento, pois apresenta um modo limpo e muito econômico de se resfriar a água para ser reutilizada. Em geral são usadas em grandes instalações industriais, mas podem também ser usadas em shoppings, grandes hotéis (devido ao uso de caldeiras) ou qualquer outro grande complexo que demande grande resfriamento de água.

Com a crescente preocupação ambiental, as torres de resfriamento de água passaram a ser modificadas e modernizadas para que ajudassem no uso consciente de água. Desta forma, as torres de

resfriamento futuras tendem a integrar um circuito fechado, mais viável ainda do ponto de vista ambiental e devem ser construídas com um sistema híbrido (torres secas e úmidas) e automatizado para ter maior viabilidade econômica.

No Brasil as primeiras torres produzidas foram feitas de madeira em 1951 pela empresa Alpina. Hoje, o setor cresceu muito e já há várias empresas no ramo. A Vettor é uma empresa brasileira criada em 1984 e atua no mercado de torres de resfriamento de água e atende cerca de 250 obras por ano neste segmento. Uma grande conquista desta empresa foi em 2006 com um projeto (e a montagem) da primeira torre do Brasil a operar com água salgada, na siderúrgica Arcelor Mittal Tubarão, em Serra, no ES. Esta foi projetada a partir de um estudo feito nos EUA e possui componentes internos que resistem à corrosão gerada pela água marinha. (fonte: Site da Empresa Vettor).

No cenário mundial, o mercado de torres de resfriamento é dominado por Estados Unidos e Europa, entretanto o crescente investimento dos governos da China e Índia em novas centrais nucleares para a produção de energia deve impulsionar este mercado na Ásia e trazer os orientais para serem gigantes produtores da área (principalmente pelos custos baixos de produção).

Entre os anos de 2007 a 2009 devido à recessão econômica da época, o mercado desacelerou. O declínio na atividade de construção comercial e industrial foi o fator mais significativo para esta desaceleração. Em 2010 o mercado apresentou uma nova aceleração, graças a melhoria no ambiente macroeconômico que impulsionou novamente o crescimento da atividade de construção civil. Segundo a Global Industry Analysts, Inc (2012), o mercado de torres de resfriamento deve crescer muito nos próximos anos e movimentar cerca de 1,8 bilhões de dólares em 2015 e 2,6 bilhões de dólares em 2018.

Este grande aumento se deve ao crescimento do setor industrial e a regulamentação ambiental que esta se tornando cada vez mais rígida, devido a crescente “onda verde” da última década. O EPA – Environmental Protection Agency, que é um órgão dos Estados Unidos, propõe que existam torres de resfriamento de água de circuito fechado em todas as plantas industriais de energia que utilizam grandes quantidades de água, para economizar este precioso recurso hídrico.

É nítido o crescimento e é nítido o grande potencial que este mercado pode alcançar no mundo todo. O crescente aumento do estudo e da tecnologia aplicada a este setor viabilizara, cada vez mais, maior acesso a este equipamento ao decorrer dos anos. O Brasil, como emergente potência, deve acompanhar este mercado, pois o crescimento da indústria esta cada vez mais relacionado com a preocupação ambiental. Assim, para se tornarem competitivos, os meios de produção vão demandar formas mais econômicas e “verdes” e as torres de resfriamento parecem caminhar ao encontro com esta nova realidade.

## 1.2. Como o tema é abordado em grandes Universidades do Brasil

O objetivo deste tópico é observar o ensino do tema torre de resfriamento em outras grandes universidades do Brasil. Segundo o Guia do Estudante 2012, a tabela 1.1 mostra as 9 melhores faculdades e institutos de engenharia mecânica do Brasil.

**Tabela 1.1 – As nove melhores Faculdades e Institutos de Engenharia Mecânica do Brasil.**

FACULDADE	Estrelas
UnB - Universidade de Brasília	5
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais	5
Unifei - Universidade Federal de Itajubá	5
UFU - Universidade Federal de Uberlândia	5
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina	5
Unicamp - Universidade Estadual de Campinas	5
USP - Universidade de São Paulo, Campus São Carlos	5
ITA - Instituto de Tecnologia e Aeronáutica	5
USP - Universidade de São Paulo, Campus Cidade Universitária	5

### 1.2.1. UnB – Universidade de Brasília:

Atualmente o curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília possui o seguinte currículo para área térmica:

**Tabela 1.2 – UnB – Disciplinas obrigatórias da área térmica.**

Matérias Obrigatórias			
Período	Matéria	Horas aula	Pré-requisitos
4º	Termodinâmica 1	60 horas ou 4 créditos	Física 2
5º	Mecânica dos fluidos 1	75 horas ou 5 créditos	Cálculo 3 Mecânica 1
6º	Mecânica dos fluidos 2 Máquinas Térmicas	75 horas ou 5 créditos 75 horas ou 5 créditos	Mecânica dos fluidos 1 Termodinâmica 1
7º	Transferência de calor	90 horas ou 6 créditos	Termodinâmica 1 Mecânica dos fluidos 2
8º	Instalações termomecânicas 1 e sistemas fluido mecânicos	60 horas ou 4 créditos 60 horas ou 4 créditos	Transferência de calor Mecânica dos fluidos 2
9º	Instalações termomecânicas 2	60 horas ou 4 créditos	Transferência de calor

Temos duas matérias que abrangem o estudo da refrigeração, não possuindo matérias optativas:

#### ➤ Instalações Termomecânicas 1

- Pré-requisitos: Transferência de calor.

1. Aplicações da refrigeração;
2. O ciclo de compressão a vapor;



3. Sistemas multipressão;
4. Compressores;
5. Trocadores de calor;
6. Condensadores;
7. Evaporadores;
8. Dispositivos de expansão;
9. Análise do sistema de compressão a vapor;
10. Refrigerantes;
11. Refrigeração por absorção;
12. Bombas de calor;
13. Psicrometria;
14. Torres de resfriamento e condensadores evaporativos;
15. Tubulações de instalações frigoríficas;
16. Carga térmica de refrigeração;
17. Projetos de instalações frigoríficas;
18. Práticas de laboratório.

➤ **Instalações Termomecânicas 2.**

- Pré-requisitos: Transferência de calor.

1. Ventilação;
2. Carga térmica;
3. Processos psicrométricos;
4. Equipamentos para climatização;
5. Torres de arrefecimento;
6. Sistemas de ar condicionado.

➤ **OBS: Entretanto, na prática o tema torres de resfriamento não é dado.**

**1.2.2. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais:**

O curso de engenharia mecânica da UFMG se diferencia por levar o estudante de engenharia a optar por uma trajetória de seu curso. É uma espécie de “especialização” em determinada área de engenharia mecânica. Caso o aluno opte por se direcionar a área térmica, ele seguirá a trajetória de “Energia e Utilidades”. Nesta trajetória o aluno deve fazer pelo menos 24 dos 60 créditos disponíveis. Esta trajetória abrange mais temas que apenas a área térmica. Das matérias existentes, selecionamos as mais envolvidas com nosso tema. São: Trocadores de calor e torres de resfriamento, Refrigeração e condicionamento de ar e Sistemas de Ar comprimidos e resfriamento de água.

Abaixo, na tabela é mostrado as matérias obrigatórias da área térmica ao longo do curso.

Tabela 1.3 – UFMG – Disciplinas obrigatórias da área Térmica.

<b>Matérias Obrigatórias</b>			
<b>Período</b>	<b>Matéria</b>	<b>Horas aula</b>	<b>Pré-requisitos</b>
3º	Termodinâmica Fundamental Carga Optativa	60 horas ou 4 créditos 60 horas ou 4 créditos	
4º	Carga Optativa	60 horas ou 4 créditos	
5º	Mecânica dos Fluidos Carga Optativa Matérias Optativas Direcionada	60 horas ou 4 créditos 45 horas ou 3 créditos 60 horas ou 4 créditos	Equações Diferenciais B
6º	Transmissão de Calor  Sistemas Fluido-Mecânicos Carga Eletiva Carga Optativa	60 horas ou 4 créditos  45 horas ou 3 créditos 60 horas ou 4 créditos 105 horas ou 7 créditos	Mecânica dos Fluidos Equações Diferenciais B
7º	Laboratório de Fluidos Laboratório de Térmica Termodinâmica Aplicada Carga Eletiva Carga Optativa	30 horas ou 2 créditos 30 horas ou 2 créditos 60 horas ou 4 créditos 60 horas ou 4 créditos 90 horas ou 6 créditos	Sistemas Fluido-Mecânicos Termodinâmica Fundamental Termodinâmica Fundamental
8º	Carga Optativa	120 horas ou 8 créditos	
9º	Carga Optativa	90 horas ou 6 créditos	
10º	Carga Optativa	75 horas ou 5 créditos	

Caso o aluno opte pela trajetória de “Energia e Utilidades” ele poderá cursar as seguintes disciplinas que tangem o tema:

➤ **Trocadores de Calor e Torres de Resfriamento (2 créditos):**

- Pré-requisito: Transmissão de calor.
- 1. Introdução, avaliação e bibliografia;
- 2. Revisão de transferência de calor e mecânica dos fluidos;
- 3. Classificação de trocadores de calor;
- 4. Metodologia básica para projeto de trocadores de calor;
- 5. Avaliação de perda de carga;
- 6. Fuligem;
- 7. Trocadores de duplo tubo;
- 8. Trocadores de casto e tubo;
- 9. Trocadores de calor compactos;
- 10. Correlações para condensadores e evaporadores;
- 11. Condensadores e evaporadores;
- 12. Trocadores tipo placa;
- 13. Torres de resfriamento – Introdução;

14. Torres de resfriamento – Cálculos;

15. Seminários/Projetos.

➤ **Refrigeração e Condicionamento de Ar (4 créditos):**

○ Pré-requisito: Transmissão de calor.

1. Conceitos gerais;
2. Condicionamento de ar;
3. Torres de arrefecimento;
4. Sistemas de refrigeração por compressão mecânica;
5. Análise de um sistema de compressão mecânica de vapor;
6. Refrigerantes;
7. Sistemas de refrigeração por absorção;
8. Sistemas de refrigeração por adsorção;
9. Projetos.

➤ **Sistemas de Ar Comprimidos e Resfriamento de Água (4 créditos):**

○ Pré-requisito: Transmissão de calor.

1. Introdução, apresentação dos programas, avaliação – bibliografia;
2. Fluxograma de processo, sistemas de ar comprimido;
3. Moto compressores, classificação, estimativa de potência e água de resfriamento;
4. Condensado, secadores de ar, frigoríficos e de adsorção, reservatórios e filtros;
5. Projeto, centrais geradoras, redes de distribuição, isométricos;
6. Dimensionamento de redes, parâmetros dimensionais/dados técnicos de cilindros, válvulas direcionais;
7. Fluxograma de processo, sistema de resfriamento de água;
8. Potência do ventilador, fluxos hidráulicos e temperaturas, aspectos dimensionais;
9. Estudo das torres, terminologia tipos de torre;
10. Componentes das torres, recirculação e interferência, seleção, folha de dados, operação;
11. Testes de performance, condições para o teste;
12. Curvas de projeto, curvas características, curvas de projeto, curvas de performance;
13. Aceitação pela curva de performance, condições de conformidade;
14. Aceitação pela curva de característica, condição de conformidade;
15. Simulações.

### 1.2.3. USP – Universidade de São Paulo (Campus Cidade Universitária):

A tabela mostra as disciplinas obrigatórias ministradas ao longo do curso que abordam a área térmica.

Tabela 1.4 - USP – Disciplinas obrigatórias da área Térmica.

Matérias Obrigatórias			
Período	Matéria	Horas aula	Pré-requisitos
4º	Mecânica dos Fluidos I	90 horas ou 6 créditos	
5º	Mecânica dos Fluidos II	60 horas ou 4 créditos	Mecânica dos Fluidos I
	Termodinâmica I	90 horas ou 6 créditos	
6º	Processos de Transferência de Calor	75 horas ou 5 créditos	
7º	Termodinâmica II	30 horas ou 2 créditos	Termodinâmica I
	Trocadores de Calor e Massa	30 horas ou 2 créditos	Termodinâmica I Processos de Transferência de Calor
	Termodinâmica dos Fluidos Compressíveis e Aplicações	30 horas ou 2 créditos	Termodinâmica I
8º	Máquinas Térmicas	60 horas ou 4 créditos	Termodinâmica I Processos de Transferência de Calor
	Máquinas de Fluxo	75 horas ou 5 créditos	Mecânica dos Fluidos I Mecânica dos Fluidos II

Sobre as disciplinas que tangem o tema, especificamos o programa das disciplinas:

#### ➤ **Refrigeração Industrial e Comercial (2 créditos):**

1. Refrigeração Industrial e Comercial: aplicações;
2. Ciclos por compressão de vapor: de Carnot, ciclo padrão, ciclo real;
3. Ciclos por absorção;
4. Cálculo de carga térmica de refrigeração;
5. Evaporadores e sistemas de degelo;
6. Compressores;
7. Condensadores;
8. Dispositivos de expansão;
9. Tubulações, válvulas e reservatórios;
10. Sistemas de controle;
11. Fluidos refrigerantes;
12. Segurança e manutenção.

### 1.2.4. Análise

Podemos perceber que outras grandes Universidades do Brasil como USP e UFMG também fazem estudo deste tema. A UnB como grande Universidade deve dar a devida importância a este tema e implementá-lo em seu plano de estudo.

### 1.3. Revisão bibliográfica

Segundo o CTI (2012) uma torre de resfriamento é um dispositivo de rejeição de calor, o qual extrai o calor do arrefecimento de um fluxo de água a uma temperatura mais alta e lança este calor residual para a atmosfera. As aplicações mais comuns para as torres são fornecer água mais fria para sistemas de ar-condicionado, de produção e de geração de energia elétrica. O termo genérico "torre de resfriamento" é utilizado tanto para descrever o equipamento de circuito aberto (com troca direta de calor) quanto o equipamento de circuito fechado (com troca indireta de calor). Uma torre de circuito aberto, ou de resfriamento direto, é uma estrutura fechada, com meios internos de distribuição para a água quente através de enchimentos, ou recheios. O enchimento pode ser constituído de várias maneiras, mas tem a função de espalhar a água e facilitar a troca de calor com o ar. Uma torre de circuito fechado, ou de resfriamento indireto, não envolve o contato direto do ar e o fluido a ser resfriado (geralmente água ou uma mistura de glicol). O fluido de trabalho é arrefecido quando exposto a uma corrente de ar em contra fluxo ou em fluxo cruzado. Este ar absorve calor, deslocando-se para cima através da torre, passando pelos enchimentos (contato direto) ou pelos tubos (contato indireto).

Sobre a bancada experimental, o atual Engenheiro Mecânico formado na UnB, Mário Nogueira da Silva, em seu projeto de graduação (2007) objetivava a implementação de aulas de laboratório referente às disciplinas Instalações Termomecânicas I e II. Em seu trabalho ele descreve a condição em que era encontrada a bancada de torre de resfriamento na época de seu trabalho:

*“A bancada de torre de resfriamento ficou vários anos sem ser utilizada. A falta de manutenção preventiva no equipamento por esse longo período de tempo provocou uma grave degradação da mesma. Visualmente, é perceptível seu estado de abandono e as péssimas condições de seus acessórios.*

*Devido a essas condições, sua funcionalidade ficou comprometida e um breve levantamento de suas condições mostrou que seria necessária uma manutenção corretiva cara e dispendiosa. Portanto, para este trabalho não foi possível a sua manutenção.*

*Inicialmente, nota-se a clara necessidade de troca de todas as suas mangueiras do circuito de água, que estão velhas ressecadas e furadas. Há muita sujeira no tanque coletor de água. Algumas válvulas estão travadas, necessitando a troca. O medidor de fluxo de água esta com alta concentração de impurezas no fundo, provavelmente indicando um entupimento e comprometimento. Há também muita sujeira nas bandejas de alumínio da torre.*

*Na parte elétrica, não foi possível ligar a bancada porque um de seus fusíveis está queimado. Logo, não foi possível testar a funcionalidade das resistências elétricas e do motor do ventilador. Com relação a instrumentação, seria necessário reinstalar novos termopares para medições de temperatura de bulbo úmido e seco em todos os pontos mencionados anteriormente. Além disso, não*

*foi encontrada nas dependências do laboratório a pistola psicrométrica necessária para medições de temperatura de bulbo úmido e seco do ar ao longo da torre. Por fim, seria necessária a recalibração do manômetro de coluna d'água.*

*Portanto, com as condições da bancada citadas acima, seu teste e funcionamento se tornou inviável para este trabalho. No entanto, ainda assim, será possível propor uma metodologia experimental de forma que quando seu funcionamento estiver restabelecido seja possível a execução de aulas práticas abordando o tema torres de resfriamento, que são um dos principais equipamentos em instalações de ar condicionado de grande porte.”*

## **1.4. Objetivos**

Este trabalho objetiva a melhoria na qualidade de formação dos alunos do ENM – UnB, implementando o tema torres de resfriamento no âmbito da disciplina Instalações Termomecânicas 2. Para isso, o trabalho intenciona integrar o conhecimento do estudo teórico e o estudo prático de laboratório.

A primeira parte visa reunir conteúdo do tema em questão para elaboração de um material teórico de apoio ao ensino e também dar base para formulação das futuras práticas laboratoriais. Também tem como objetivo restaurar e fazer funcionar a bancada existente no LaAR para posteriormente ser possível sua instrumentações e modernização.

A segunda parte tem como objetivo deixar a bancada em condições de operação, instrumenta-la e moderniza-la para ser possível o seu uso prático em experimentos. Este também visa a elaboração e realização das práticas.

## **1.5. Metodologia**

Para alcançar estes objetivos, este relatório de Projeto de Graduação fornece material de apoio ao estudo teórico do tema torres de resfriamento. Por intermédio dele, o aluno é capaz de dizer os aspectos gerais de uma torre de resfriamento, saber sobre os conceitos relacionados, diferenciar e qualificar os métodos de exposição da água a corrente de ar, diferenciar e qualificar os diversos tipos de torres existentes, diferenciar e qualificar os sistemas de distribuição de água na torre, diferenciar e qualificar os tipos diferentes de enchimentos, saber sobre os eliminadores de gotas, saber estimar a quantidade de água para reposição, saber sobre ciclos de concentração, saber sobre o tratamento de água, ter conhecimento de algumas observações gerais, ter noções de custos, aprender sobre o ensino direcionado para engenharia.

Com a restauração da bancada experimental do LaAR, o aluno terá contato com uma melhor explicação do funcionamento de torres de resfriamento. Entretanto apenas o entendimento do

funcionamento não é adequado. Para aprimorar o estudo do tema, os instrumentos de medição de vazão de ar e água serão recuperados e a bancada passará por uma modernização. Esta contará com a instalação de novos sensores (de temperatura), e estes irão se comunicar com um computador para registrar e monitorar as leituras instantâneas dos mesmos. Este monitoramento instantâneo tem como fim, além de facilitar uma análise e compreensão dos acontecimentos, mostrar ao aluno e fazê-lo aprender a operar o equipamento integrado a um software..

Além destes, com a elaboração (e posterior implementação) de práticas de laboratório para esta bancada, o aluno terá um roteiro do experimento para direcioná-lo ao estudo de interesse. Estas práticas, farão o aluno ter conhecimento do princípio de funcionamento e se familiarizar com o uso dos instrumentos do equipamento e da integração desde com o computador.

Para o orientador do experimento prático (professor ou monitor), é importante que o mesmo tenha conhecimento teórico do assunto e dos fenômenos existentes. Ele também deve saber operar o equipamento e sua instrumentação. Deve se familiarizar e testar a funcionalidade da máquina antes do experimento para caso haja alguma eventualidade. Se houver algum problema, o mesmo deve providenciar as soluções e/ou procurar ajuda do professor. Ao certificar-se do correto funcionamento do equipamento, o orientador do experimento deve fazer os preparativos para início da prática.

## **1.6. Estrutura do relatório**

Este trabalho está dividido em 8 capítulos. Os mesmos abordam respectivamente, introdução, torres de resfriamento, revisão de conceitos, ensino, bancada experimental do LaAR, modelagem e simulação, planejamento e elaboração de experimentos e finalmente conclusões e recomendações.

No capítulo 1 introduzimos o tema e explicamos sua relevância dentro do cenário mundial, fazemos uma revisão bibliográfica para contextualizar o leitor acerca da evolução deste, traçamos os objetivos do trabalho, dissertamos sobre a metodologia utilizada em sua confecção e descrevemos sua estrutura ao longo do mesmo.

No capítulo 2 dissertamos sobre torres de resfriamento. Falamos dos aspectos gerais das torres, alguns conceitos teóricos específicos, os métodos de exposição da água frente as correntes de ar, os tipos de torre existentes, os sistemas de distribuição de água, os enchimentos utilizados, os eliminadores de gotas, a reposição de água para a torre, os tratamentos de água necessários e algumas observações gerais.

No capítulo 3 revisamos alguns conceitos importantes da área da psicrometria relevantes para melhor entendimento do trabalho em questão. São abordados temas como cartas psicrométricas, umidade absoluta, umidade relativa, volume específico, entalpia específica, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido.

No capítulo 4 tratamos do ensino do tema voltado para a engenharia. Mostramos alguns equacionamentos envolvidos na transferência de calor e massa no interior da torre. Além disso, também fazemos uma comparação de como este estudo é feito em outras grandes Universidades do Brasil.

No capítulo 5 apresentamos a bancada experimental do Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração da UnB - LaAR. Falamos de seu funcionamento, de sua operação de seus componentes, e da restauração feita para fazê-la funcionar novamente. Também é destinado espaço para futuros testes e assuntos relacionados.

No capítulo 6 mostraremos as praticas laboratoriais que foram feitas ao longo do trabalho para a bancada em questão e comentaremos acerca do roteiro, metodologia e resultados obtidos durante as práticas.

No capítulo 7 falaremos sobre as conclusões finais do projeto. Comentaremos e analisaremos os objetivos que foram ou não alcançados e o porquê disso. Analisaremos o trabalho como um todo para também fazermos recomendações gerais para o futuro.



## 2. Torres de Resfriamento

*No capítulo 2 dissertamos sobre torres de resfriamento. Falamos dos aspectos gerais das torres, alguns conceitos teóricos específicos, os métodos de exposição da água frente as correntes de ar, os tipos de torre existentes, os sistemas de distribuição de água, os enchimentos utilizados, os eliminadores de gotas, a reposição de água para a torre, os tratamentos de água necessários e algumas observações gerais.*

### 2.1. Aspectos Gerais

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para o resfriamento de água. Esta água seria aquela proveniente do resfriamento de condensadores de usinas de geração de potência, de instalações de refrigeração, trocadores de calor, etc. A água que realizou o resfriamento destes equipamentos torna-se, então, quente. Para resfriá-la (e assim poder usá-la de novo para tais processos) utilizamos as torres de resfriamento.



**Figura 2.1 - Duas Torres de Resfriamento de tiragem natural da Estação de Energia Beaver Valley localizadas no rio Ohio em Shippingport, Pensilvânia (Fonte: <http://www.ecology.com/2012/06/05/water-cooled-power-plants-warming-climate/>, Credit: NRC/First Entergy).**



Figura 2.2 - Torre de resfriamento de tiragem mecânica (Fonte: [http://www.swlf.ait.ac.th/Old/Visu\\_CD/photo\\_collection/china/fieldvisit/Cooling%20Tower%20at%20the%20Incineration%20plant.JPG](http://www.swlf.ait.ac.th/Old/Visu_CD/photo_collection/china/fieldvisit/Cooling%20Tower%20at%20the%20Incineration%20plant.JPG)).

Existe uma classificação de torres de resfriamento quando ao seu método de transferência de calor. Elas podem ser secas, úmidas ou mistas. Quando falamos da troca de calor seca (ou também chamado de circuito de sistema fechado pelo fato do fluido a ser refrigerado permanecer em sistema fechado), não há contato direto entre os dois fluidos, eles trocam calor por meio de uma superfície. Nas trocas úmidas há o contato direto dos fluidos (também chamado de sistema aberto). Esse sistema de troca úmida utiliza o princípio do resfriamento evaporativo (responsável pela maior parte da troca de calor). No tipo misto ou híbrido (também chamado de circuito fechado por não envolver contato com o fluido a ser refrigerado) o processo é semelhante ao sistema seco, porém há a aplicação de água (de outra fonte) nos trocadores de calor para se utilizar o princípio do resfriamento evaporativo.

Nas torres de resfriamento úmido, a água quente é levada para a torre no ponto de aspersão e desce através de “enchimentos” para a parte inferior. Durante a queda, a água entra em contato com uma corrente de ar que troca calor tanto de forma sensível como latente. Durante a troca de calor, parte da água evapora, aumentando a umidade relativa do ar. Os “enchimentos” têm a função de acelerar esta troca de calor da água com o ar, aumentando a superfície de contato entre eles por meio de formação de gotas (ou gotículas) ou filmes de água. Eles são de diferentes tipos formatos e tamanhos, cada um com sua característica específica. Abaixo falaremos melhor desses. No contato desse ar com a água teremos troca de calor sensível e latente, entretanto o principal fenômeno da troca de calor é do calor latente da evaporação da água, onde há mais energia dissipada pela água no o ar. Parte da água torna-se vapor d’água e é dissipada junto com o ar para a atmosfera. Além da perda de água pelo vapor, temos a perda pelo arrasto de pequenas gotículas de água pelo ar. Para amenizar esta perda, são utilizados “eliminadores de gotas”. Sua função é reter estas pequenas gotas arrastadas pela corrente de ar. Falaremos melhor sobre estes abaixo. A parte perdida de água no processo deve ser reposta, para evitar, num momento futuro, problemas com falta de água no processo.

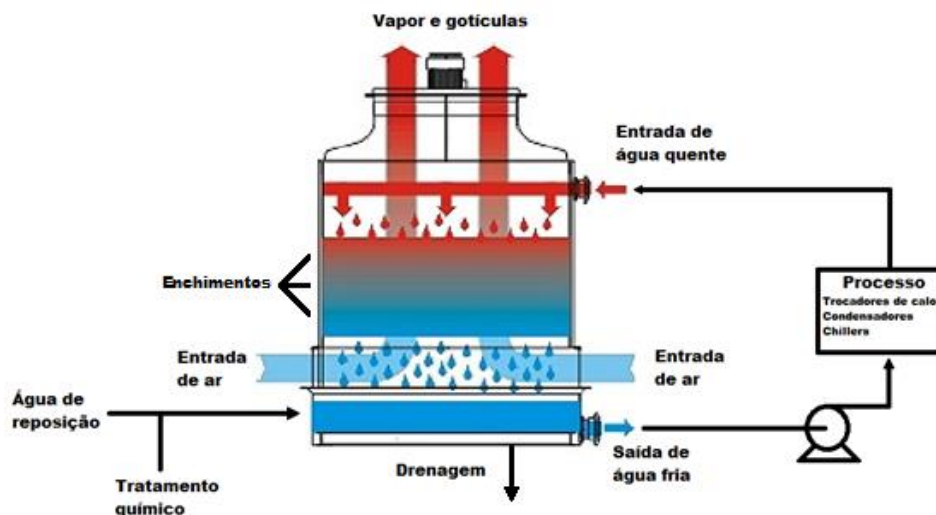


Figura 2.3 - Funcionamento simplificado de uma torre de resfriamento do tipo tiragem mecânica induzida (Fonte: [http://www.proficool.pl/?html\\_file\\_name=zasada-dzialania-chlodni](http://www.proficool.pl/?html_file_name=zasada-dzialania-chlodni), adaptada pelo autor.).

Para projetar uma torre de resfriamento, deve se conhecer as condições climáticas da região e definir os valores da vazão de água, do range e do approach de interesse. Então, uma vez conhecendo estes valores, especificamos a geometria da torre em termos de suas dimensões e tipo de enchimento. As dimensões das maiores torres podem chegar a mais de 200 metros de altura e 100 metros de diâmetro. O correto funcionamento dependerá do controle da vazão de ar. Para cálculos com gasto de energia, sempre a água precisará ser bombeada até o ponto de aspersão. Para a corrente de ar, a torre pode demandar (dependendo do tipo) potência para escoar o ar (sendo que teremos perda de carga neste escoamento devido ao enchimento da torre). E por último os custos de manutenção, que vão desde manutenções mecânicas até o devido tratamento e reposição da água utilizada.

Uma torre de refrigeração é essencialmente um dispositivo de grande remoção de calor de um processo para ser, posteriormente, lançado para a atmosfera. Possui uma coluna de transferência de calor e massa, que é projetada para permitir um grande contato das áreas superficiais da corrente de ar e das gotículas d'água. Sobre torres de resfriamento podemos dizer que há vários tipos de torre, de “enchimentos” e de sistemas possíveis de ser utilizados nestas torres.

## 2.2. História das torres de resfriamento

O pioneiro das torres de resfriamento foi o engenheiro Hans Joachim Balcke. Em 1894 ele fundou sua empresa, a Balcke & Co, e no mesmo ano construiu a primeira torre para resfriamento do tipo “chaminé”, com 12 metros de altura. Dez anos depois em 1904 o invento de Balcke já possuía aproximadamente 1.400 unidades funcionando ao redor do mundo.

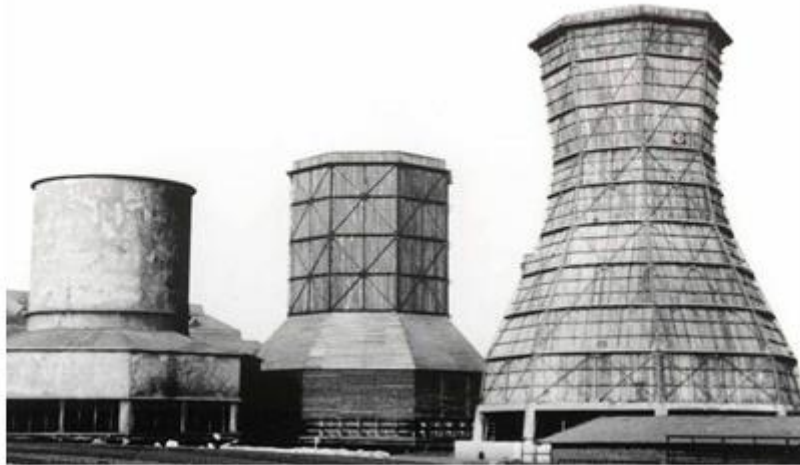


Figura 2.4 - Modelos antigos de torre de tiragem natural (Fonte: <http://vettortorres.com.br/vettor/Home/Historia>).

A constante melhora das tecnologias de construção civil e aprimoramento das torres foram a marca da década de 1920. Em 1921 a Balke & Co forneceu para uma Usina Termo Elétrica a maior torre de tiragem natural do mundo (até então construída), com capacidade de resfriar 43 mil m<sup>3</sup> de água por hora.

Em 1930 é produzida a primeira torre de resfriamento de água com tiragem mecânica induzida do ar, nos EUA. A década também é marcada pelo início do uso do perfil hiperbólico das torres de tiragem natural. Na Europa são construídas as primeiras torres de tiragem mecânica induzida e também a primeira torre de resfriamento com perfil hiperbólico, com 50 metros de altura.

Em 1943, a Marley, Inc (Atualmente Marley – SPX Cooling Technologies, Inc) fornece sete torres de resfriamento de água para o Projeto Manhattan, no Novo México, permitindo a criação da primeira bomba atômica. Após a Segunda Guerra Mundial, o Exército dos Estados Unidos confere a Marley um prêmio. Nesta época as torres de resfriamento natural começaram a ser substituídas pelas torres de tiragem mecânica induzida

Na década de 1950 foram produzidas pela Alpina as primeiras torres de resfriamento no Brasil (feitas de madeira). Na mesma década Carl Munters desenvolve e patenteia os primeiros enchimentos (tipo filme) para torres, para melhorar a taxa de transferência de calor das mesmas. Esta criação revolucionou o mercado conferindo às torres do tipo contra corrente grande eficiência e domínio do mercado na década de 60, em detrimento das torres de fluxo horizontal.

Em 1955 Carl Munters desenvolve e patenteia os primeiros enchimentos tipo filme para torres de resfriamento de água (e outras aplicações) inicialmente em papelão impregnado e posteriormente em folhas de PVC termo formado, de alta taxa de transferência de calor por unidade de volume, que viriam revolucionar o mercado, conferindo às torres do tipo contra corrente grande eficiência e



domínio do mercado na década de 60, em detrimento das torres de fluxo horizontal. Em 1958 a primeira torre de tiragem forçada é introduzida ao mercado americano.

Começam a ser fabricadas nos EUA torres em série (em módulos ou células) de madeira e inicia se a fabricação de algumas peças em fibra de vidro, em 1964. Na mesma década, mas alguns anos depois, é lançado nos EUA os enchimentos do tipo filme, em material plástico (PVC).



**Figura 2.5 – Torres de resfriamento de tiragem mecânica em série** (Fonte: <http://www.flickr.com/photos/grupoebx/7068748861/>).

A partir dos anos 70, há a melhora das tecnologias já conhecidas. Sistemas híbridos (seca/úmida) ou tiragem induzida/forçada começam a ser criados. No Brasil podemos destacar em 1986 a construção da maior torre de resfriamento até então produzida com vazão de 33 mil m<sup>3</sup>/h, pela empresa Alpina e a construção das primeiras torres em fibra de vidro (em contra corrente, com ventilação mecânica). Também devemos dar destaque a maior torre a operar com água salgada (2006) com 10 células e vazão total de 27.100 m<sup>3</sup>/h e a maior torre de resfriamento do Brasil (2007) totalmente construída em fibra de vidro com enchimentos em Polipropileno auto extingüível (resistente a chamas e/ou temperaturas elevadas), com oito células uma e vazão total de água de 30.000 m<sup>3</sup>/h, ambas construídas pela Empresa Vettor.



**Figura 2.6 - Torre híbrida (seca e úmida) com tiragem mecânica induzida e forçada** (Fonte: <http://vettortorres.com.br/vettor/Home/Historia>).

### 2.3. Conceitos relacionados a torres de resfriamento

Para o melhor entendimento acerca do tema, alguns conceitos básicos relacionados a torres devem ser passados antes de prosseguirmos.

#### Range (Figura 2.7):

O range de uma torre de resfriamento é definido como a diferença das temperaturas de alimentação da torre (água quente de entrada) e de devolução da torre (água de saída, resfriada).

#### Approach (Figura 2.7):

O approach de uma torre de resfriamento é a diferença das temperaturas de devolução da torre (água de saída, resfriada) e da temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre.

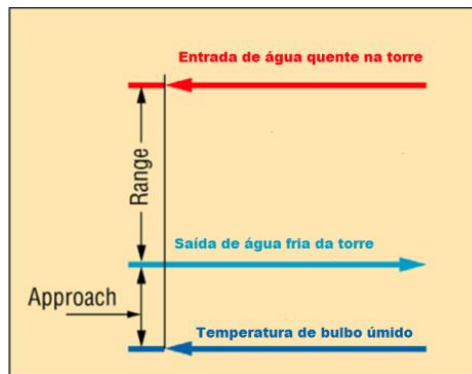


Figura 2.7 – Range e Approach.

#### Eficiência da torre de resfriamento:

Na prática, para torres de resfriamento, comumente é utilizado o conceito de eficiência de resfriamento, dado por:

$$e_{torre} = \frac{T_{entrada\ da\ água} - T_{saída\ da\ água}}{T_{entrada\ da\ água} - T_{bulbo\ úmido}} \quad (1)$$

#### Purga (blow down):

Todo tanque deve ter instalado um dreno na em sua parte inferior, para caso haja a necessidade de esvazia-lo. A purga nada mais é que a ação de “descarga” de um tanque. A intenção da purga é retirar do tanque o excesso de resíduos (sujeiras, material orgânico, excesso de sais e qualquer outro resíduo depositado no fundo do tanque) que prejudicam de alguma forma o uso daquele tanque.

### 2.4. Torres de circuito fechado ou aberto

As torres de resfriamento podem também ser classificadas como de circuito aberto ou fechado. Para iniciar esta classificação temos que entender que a torre de resfriamento tem o objetivo de resfriar um fluido de trabalho. Geralmente o fluido utilizado em torres é água, por isso já associamos torres de resfriamento com torres de resfriamento de água.

### Torres de circuito fechado (figura 2.8):

Em torres de circuito fechado, o fluido de trabalho é resfriado de forma indireta. O fluido passa pela torre de resfriamento por meio de dutos e troca calor com a torre. Em circuitos fechados, podemos utilizar a água como fluido de trabalho e também como fluido de resfriamento. Entretanto neste caso, as fontes de água são distintas.

### Torres de circuito aberto (figura 2.8):

Em torres de circuito aberto o fluido de trabalho empregado é a água. Neste caso a troca de calor acontece de forma direta entre a água e o ar, tendo o processo eficiência máxima.

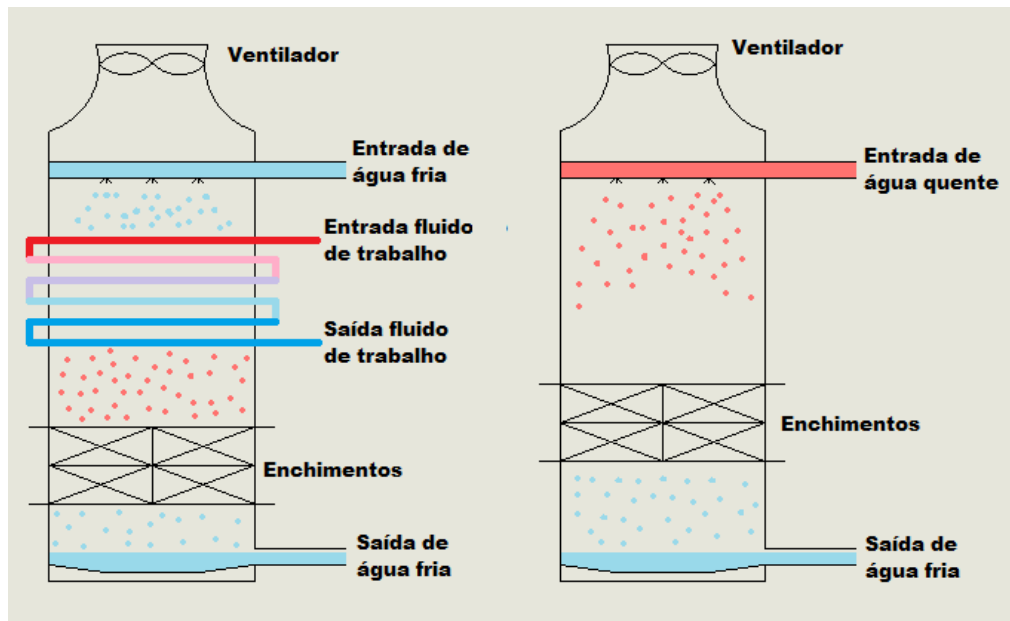


Figura 2.8 - Torres de circuito fechado e circuito aberto respectivamente.

## 2.5. Torres secas e torres úmidas

Essencialmente os termos seca e úmida estão relacionados com a forma que o fluido de trabalho é resfriado. Ele pode ser resfriado de três formas. A figura 2.8 ilustra dois casos de resfriamento úmido (resfriamento a água).

### Resfriamento seco (ou resfriamento a ar):

No caso de circuito fechado, o fluido de trabalho passa por dentro da torre de resfriamento por meio de dutos, onde há a passagem de correntes de ar que trocam calor com os dutos, resfriando o fluido de trabalho. Neste caso não há uma grande eficiência na troca de calor, entretanto como não temos uso de água, este recurso não é desperdiçado.

No caso de circuito aberto, o fluido de trabalho empregado é a água e a troca de calor acontece de forma direta entre a corrente de ar e a água.

## Resfriamento úmido (ou resfriamento a água):

Temos o resfriamento à água em circuitos fechados e assim como no caso a ar, o fluido de trabalho passa por dentro da torre por meio de dutos, onde o contato com o fluxo de água resfria o fluido de trabalho. Geralmente neste tipo de resfriamento geralmente é utilizado um ventilador para criar uma corrente de ar no corpo da torre e resfriar está água que resfriou o fluido de trabalho, como podemos observar na figura 2.8.

## Resfriamento híbrido:

Neste caso (que é mais utilizado em torres mais modernas), temos características dos dois tipos de resfriamento. A torre possui resfriamento a ar e quando a demanda de resfriamento é grande, sprintsers são acionados e uma certa quantidade de água é lançada nos dutos para trocar calor por evaporação, tornando o processo de resfriamento muito mais eficiente.

## 2.6. Métodos de exposição da água à correntes de ar

A exposição da água frente à corrente de ar é algo muito importante nas torres de resfriamento. São numerosos os métodos para esta exposição, cada um com sua vantagem específica, mas todos devem ser considerados para melhor aplicação e rendimento em cada caso.

Uma forma de classificação das torres é baseada em como a água é distribuída ao longo da torre (nos enchimentos) para obter um melhor contato com a corrente de ar. Falaremos sobre os enchimentos mais a frente neste capítulo.

Outra forma de classificação são os tipos de fluxo relativos entre as correntes de ar e água. Entende-se por isso que existem dois métodos:

- Torres de fluxo em contracorrente (figura 2.9);
- Torres de fluxo cruzado (figura 2.10).

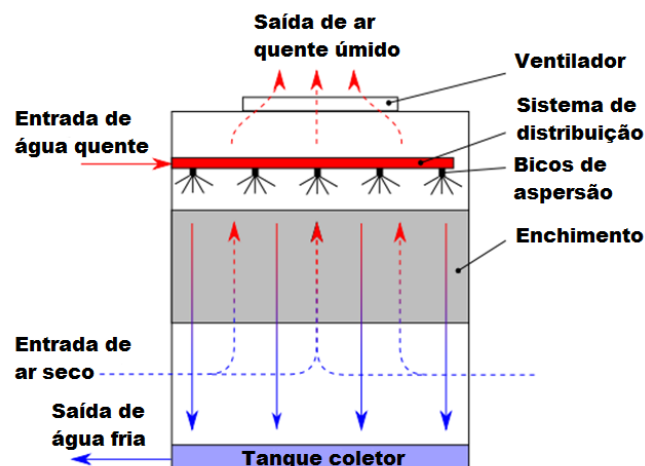


Figura 2.9 - Torre com fluxo em contracorrente (Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling\\_tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower), com adaptações do autor).



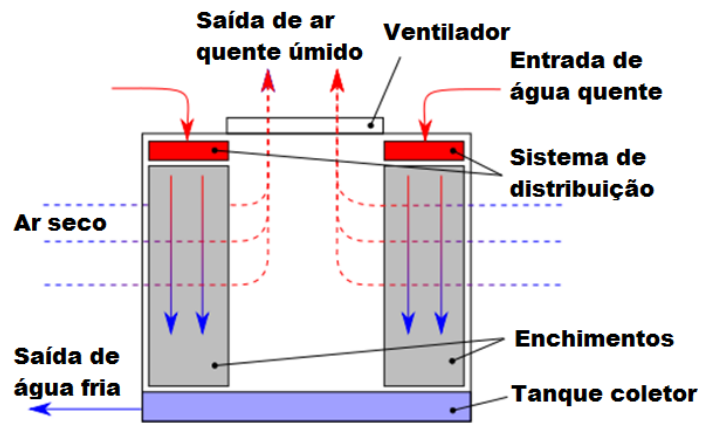


Figura 2.10 - Torre com fluxo cruzado (Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling\\_tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower), com adaptações do autor).

Comparando estes dois métodos, podemos observar algumas diferenças:

- Nas torres de fluxo em contracorrente, a água mais fria entra em contato com o ar mais seco, melhorando a eficiência da torre;
- Nas torres de fluxo cruzado, o acesso aos sistemas mecânicos e de distribuição são mais fáceis;
- Nas torres de fluxo cruzado a entrada de ar pode ser feita por toda a parte lateral da torre, podendo assim a torre ser mais baixa e necessitando de menos trabalho para bombeamento da água para parte superior da torre;
- Nas torres de fluxo em contracorrente existe menor risco de recirculação de ar.

## 2.7. Tipos de tiragem em torre de resfriamento

Podemos citar dois tipos principais de tiragem em torres:

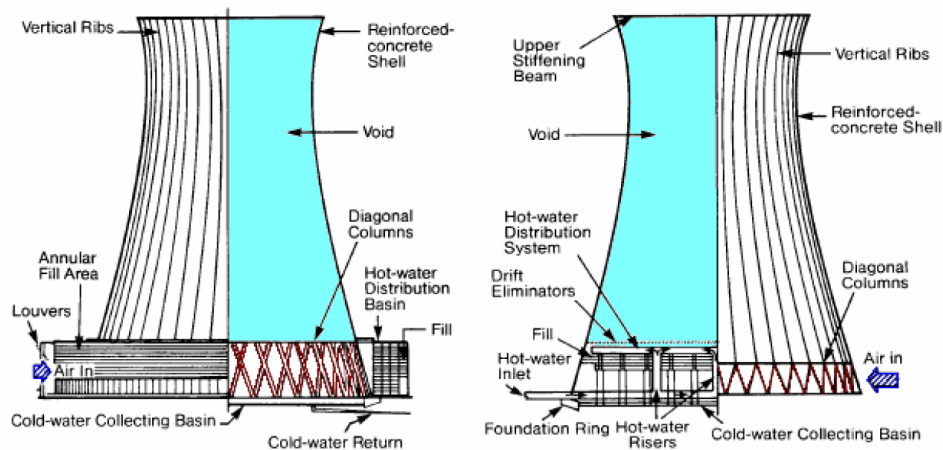
- Torres de tiragem natural (hiperbólicas);
- Torres de tiragem mecânica (induzida ou forçada).

**Torres de tiragem natural ou hiperbólicas (figura 2.11):**



Figura 2.11 - Exemplo de torre de tiragem natural ou hiperbólica (Fonte: <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/392003>).

São torres de maior porte, chegando a mais de 200m de altura e 100 metros de diâmetro. Sua construção é aconselhada em áreas onde há corrente de ventos fortes, para aumentarem sua eficiência. Ela é chamada de torre de tiragem natural por que ocorre um fluxo de ar naturalmente pela torre. Dois fatores são responsáveis pela circulação deste ar dentro da torre. Primeiramente o aumento da temperatura do ar em contato com a água (mais quente) no interior da torre faz o ar subir e força a entrada de um ar novo pela base da torre. Em segundo lugar, a velocidade dos ventos na altura da base faz com que o processo seja acelerado e aumente sua eficiência (por isso a importância de lugares com ventos fortes). Neste tipo de torre a água pode encontrar em contato com a corrente de ar tanto em fluxo em contracorrente como em fluxo cruzado (figura 2.12).



**Figura 2.12 – A esquerda torre com fluxo de ar cruzado e a direita com fluxo de ar em contracorrente (Fonte: Mulyandasari, Viska, Cooling Tower Selection and Sizing (Engineering Design Guideline), KLM Technology Group, Rev 01, 2011, página 9).**

Em lugares onde não há ventos fortes ou requer-se mais eficiência do processo de resfriamento da torre, alguns ventiladores podem ser instalados na base da torre (torre de tiragem natural auxiliada por ventiladores, figura 13) para induzir a maior entrada de ar. A queda d'água e o contato entre os dois fluidos (água e ar) acontece a cerca de um oitavo da altura da torre. Por serem muito altas, a estrutura é reforçada com estrutura de concreto armado.

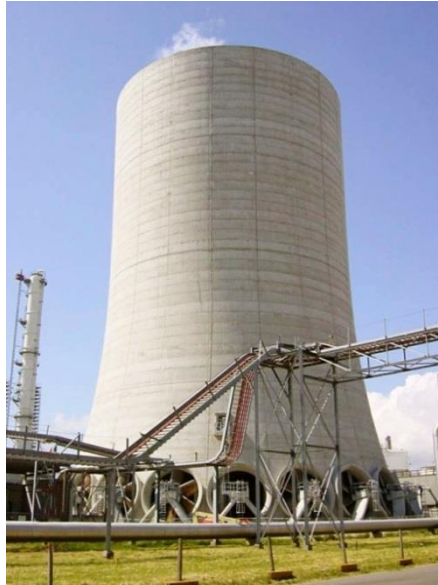


Figura 2.13 – Torre de tiragem natural auxiliada por ventiladores (Fonte: <http://spxcooling.com/images/fd-p02-b.jpg>).

A forma hiperbólica da torre é explicada por várias razões:

- Mais enchimentos e áreas de transferência de calor podem ser montadas na base;
- As correntes de vento entrante ficam orientadas para o centro (devido ao formato da parede) produzindo uma forte corrente de ar para cima;
- O formato convergente-divergente cria uma região de baixa pressão na parte superior da torre aumentando a velocidade do escoamento de ar;
- Resistência estrutural e estabilidade.

Como principais características desta torre, temos:

- Alto tempo de vida útil;
- Baixos custos de manutenção;
- Baixos custos de energia (apenas o bombeamento da água para a parte de aspersão);
- Baixa eficiência;
- Resfria grandes volumes de água;
- Não se produz recirculação do ar;
- Necessidade de um amplo espaço para a torre;
- Torres muito altas;
- Necessidade de ancoragem da torre contra as fortes correntes de vento;
- Orientação da torre deve ser para a corrente de ventos dominantes;
- O range da torre depende da velocidade, direção do vento (e das condições atmosféricas em geral);
- Não consegue chegar a uma pequena temperatura de approach;
- Por geralmente ser de grande porte, tem um custo inicial alto;

- Mesmo com baixa eficiência, possui o custo de resfriamento da água (por volume resfriado) mais baixo de todas as torres (sem considerar o custo inicial);
  - Aconselhada a ser usada quando a demanda de resfriamento é muito grande.
- ✓ OBS: A torre de tiragem natural geralmente é utilizada em grandes instalações por ter uma relação custo/resfriamento baixo, entretanto o custo inicial é alto;

### **Torres de tiragem mecânica:**



**Figura 2.14 – Torre de tiragem mecânica (Fonte: <http://blog.thermwood.com/default.aspx?Tag=manufacturing>).**

São torres que utilizam o trabalho de ventiladores para fazer a movimentação do ar em seu interior. Podem ser do tipo tiragem mecânica forçada ou induzida. De maneira geral apresentam as seguintes características quando comparadas as torres atmosféricas:

- Mais compactas;
- Mais eficientes;
- Vários modelos (figura 2.15);
- Menor altura para bombeamento de água na parte superior da torre;
- Melhor controle da temperatura;
- Não é necessária a orientação da torre para as correntes de ventos dominantes;
- Possibilidade de falha mecânica, abaixando a confiabilidade neste caso;
- Maior gasto de energia por causa dos ventiladores, podendo aumentar muito os gastos;
- Há recirculação de ar, podendo afetar um pouco a eficiência da torre;
- Custos de operação e manutenção mais caros;
- Devido aos ruídos e vibrações dos ventiladores, a localização delas deve ser planejada.

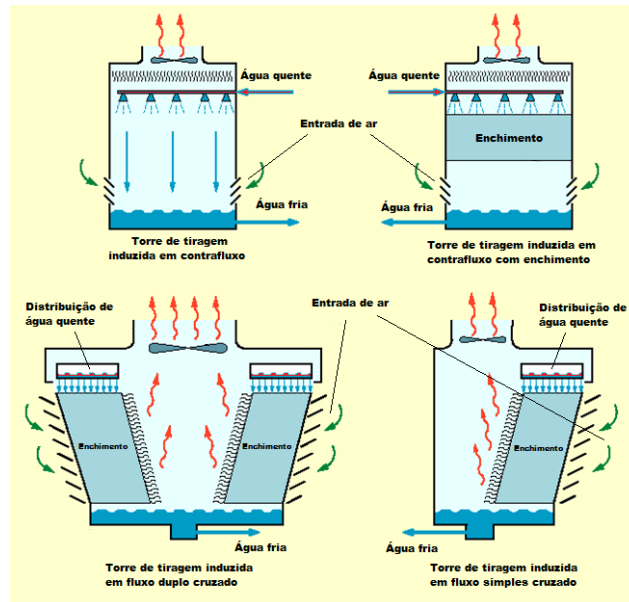


Figura 2.15 - Vários modelos de torre de tiragem mecânica (Fonte: <http://cooling-tower-online.com/2010/02/06/101/>, adaptada pelo autor).

Entre os dois tipos existentes, tiragem mecânica forçada e tiragem mecânica induzida, há algumas características que devemos explicitar e comparar:

**Tiragem mecânica induzida:**



Figura 2.16 – Torre de tiragem mecânica induzida (Fonte: [http://spxcooling.com/pdf/a4\\_CP-10.pdf](http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.pdf)).



Figura 2.17 – Vista explodida de torre de tiragem mecânica induzida (Fonte: [http://spxcooling.com/pdf/a4\\_CP-10.pdf](http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.pdf)).

- Ventiladores posicionados na saída de ar, geralmente na parte superior da torre;
  - Possibilidade de instalação de grandes ventiladores, diminuindo, neste caso, as velocidades de operação e o nível de ruído;
  - Podem ser instalados filtros para entrada de ar;
  - Velocidades de saída do ar são maiores que na entrada (pois a corrente de ar é induzida), diminuindo os problemas com recirculação;
  - Menores gastos de energia com ventiladores;
  - Tendência a produzir maiores vibrações da torre, devido ao peso do ventilador em cima da estrutura (ou parte dela);
  - Elementos mecânicos (motor, ventilador etc) sujeitos a correntes quentes e úmidas de ar;
  - Devido a posição dos ventiladores possui uma manutenção mais difícil.
- ✓ OBS: A torre de tiragem mecânica induzida geralmente é utilizada para médias instalações por apresentar a relação custo/resfriamento mais elevada (em relação a tiragem natural), entretanto o custo inicial é menor;

#### **Tiragem mecânica forçada:**



**Figura 2.18 Torre de resfriamento de tiragem forçada em contracorrente (Fonte: <http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf>).**

- Os ventiladores se encontram no nível do solo, facilitando a manutenção;
- Mais eficientes (entretanto com maior gasto de energia), pois a velocidade da corrente de ar é convertida em pressão estática, realizando assim um trabalho útil;
- Por serem mais eficientes necessitam de menor área de instalação;
- Devido à posição dos ventiladores, trabalham com um ar levemente mais frio (e com maior densidade);
- Ventiladores ocupam uma posição com correntes de ar relativamente menos úmidas;



- Tamanho do ventilador limitado, necessitando de vários ventiladores de menor porte e com maiores velocidades;
- Maiores gastos de energia com ventiladores;
- Maior nível de ruído devido as maiores velocidades dos ventiladores;
- Em regiões frias (em épocas frias), há possibilidade de formação de gelo nos ventiladores, obstruindo a entrada de ar.
- Alguns modelos apresentam maior recirculação de ar. Isso aumenta quando a saída do ar for muito baixa em relação a da entrada (perda de carga nos enchimentos e nos eliminadores de gota), que aumenta a pressão interna.

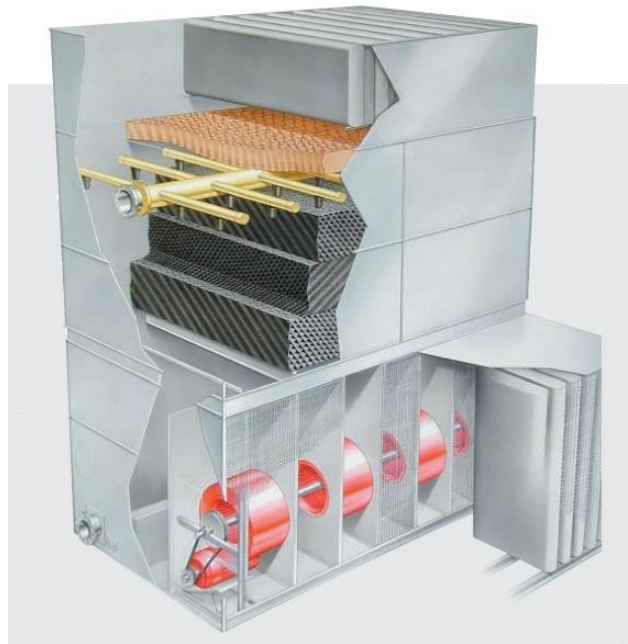


Figura 2.19 – Torre de tiragem mecânica forçada em contracorrente e circuito aberto (Fonte: <http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf>).

- ✓ OBS: A torre de tiragem mecânica forçada geralmente é utilizada para menores instalações, pois mesmo apresentando a maior relação de gasto/resfriamento possui a maior eficiência, diminuindo a área da planta industrial destinada ao resfriamento de água.

## 2.8. Sistemas de distribuição de água

Os sistemas de distribuição de água podem ser de dois tipos:

- Por gravidade;
- Por pressão.

Para um melhor entendimento das mesmas vamos explicitar e comparar algumas de suas características:

### Sistema de distribuição por gravidade:

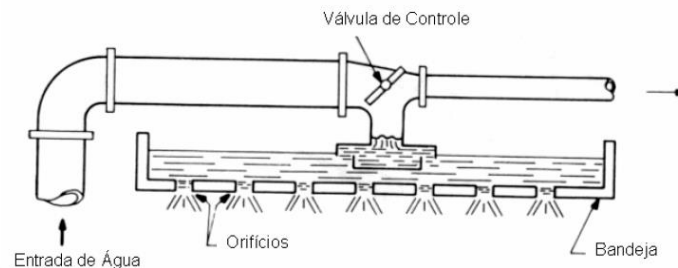


Figura 2.20 - Desenho esquemático do sistema de distribuição da água da torre por gravidade (Fonte: <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf>, figura 7).

- Possui uma bandeja alimentada com água, onde a água escoa (gravidade) por meio de orifícios na bandeja;
- Geralmente é utilizada em torres de fluxo cruzado para a água descer mais devagar e ter mais tempo de contato com a corrente de ar perpendicular a queda d'água;
- Raramente é utilizado em torres com fluxo em contracorrente por dificuldades de projeto e ajuste da distribuição de água, devido a interferência com o fluxo de ar;
- No sistema de distribuição por gravidade, há um menor trabalho para bombear a água para cima da torre, pois esta não está pressurizada;
- A regulação da vazão é feita por inspeção visual da bandeja, sendo pouco precisa;
- É de fácil manutenção (mais fácil que a de distribuição por pressão);
- Seus eliminadores de gota estão numa posição tal que não fica nem em cima nem em baixo da bandeja.

### Sistema de distribuição por pressão:

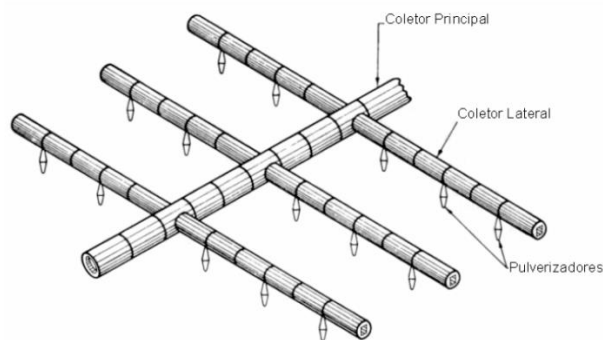


Figura 2.21 - Desenho esquemático do sistema de distribuição de água da torre por pressão (Fonte: <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf>, figura 8).

- Este sistema de distribuição está amplamente relacionada com o rendimento da torre, pois o aumento da pressão acarreta no aumento do fluxo de água;



- Geralmente utilizada em torres de fluxo em contracorrente, para aproveitar o maior fluxo de água;
- Pode ou não possuir bicos pulverizadores;
- Difícil manutenção;
- Seu sistema de pulverização de água encontra-se abaixo dos eliminadores de gotas;
- Pode ter problemas na distribuição equivalente ao longo dos seus orifícios, comprometendo a eficiência da torre.

## 2.9. Enchimentos (ou recheios)

Os enchimentos são extremamente importantes na torre de resfriamento para aumentar sua eficiência, entretanto há torres que não os possuem. Têm como objetivo promover a aceleração da troca de calor entre a água e o ar, aumentando a superfície de contato entre eles (formação de finas camadas de filme de água ou gotículas, dependendo do tipo de enchimento) e mantendo uma distribuição de água uniforme neste processo. Também devem promover pouca resistência para o escoamento do ar e ser fabricados com material resistentes, que aguentem o tempo de vida útil da torre, e sejam bons transmissores de calor. Por compor uma grande parte da torre, os enchimentos devem ser de um material de baixo custo de fabricação e de fácil instalação.

Há basicamente dois tipos de enchimentos:

- De gotejamento ou respingo (splash fill);
- De película ou laminar (film fill);

### **Enchimento de gotejamento ou respingo (splash fill):**



**Figura 2.22 – Exemplo de enchimento de gotejamento (Fonte: <http://vettor.com.br/store/index.php/internos/enchimento-de-respingo-v-bar-1500-mm.html>).**

Seu objetivo consiste em gerar pequenas gotas de água para aumentar a superfície de contato com o fluxo de ar para facilitar o processo de troca de calor (evaporação de parte da água). Por mais que exista uma série de modelos diferentes, o efeito desejado é conseguido pela queda da água em

uma série de camadas compostas por barras (de diferentes disposições). A água, ao cair, se quebra em gotas cada vez menores. A figura abaixo ilustra a troca de calor entre uma gotícula e um escoamento de ar seco.

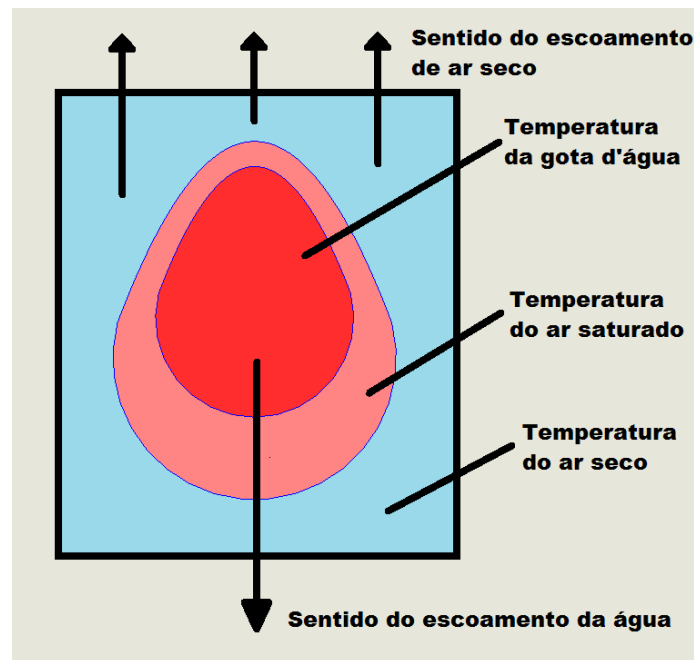


Figura 23 - Gotícula de água em um escoamento de ar seco.

Podemos perceber que temos três temperaturas na imagem, a temperatura da gota d'água, a temperatura do ar seco e a temperatura de interface. Temos que ter em mente que estas temperaturas estão relacionadas da seguinte forma:

$$T_{gota} > T_{interface} > T_{ar\ seco}$$

A disposição correta das barras (e das camadas) é muito importante para o rendimento da torre. Quando dispostas de maneira incorreta, a distribuição de água fica desproporcional não aproveitando a totalidade da área da torre onde ocorre a troca de calor. A troca de calor é menos eficiente que os sistemas laminares, obrigando estas torres a terem uma altura mais elevada. Outro ponto importante é o arraste de gotas o que obriga a torre a ter eliminadores de gotas de bom rendimento.

Geralmente esses enchimentos eram feitos de madeira, entretanto com o avanço dos meios de produção da última década, a madeira perdeu espaço e sua utilização está em decadência e gradativamente está sendo substituída para metais e materiais sintéticos.

#### **Enchimento de película ou laminar (film fill):**

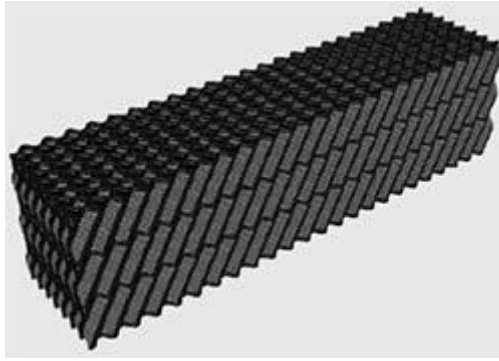


Figura 2.24 – Exemplo de enchimento laminar (Fonte: <http://www.termoparts.com.br/tp/>).

Tem como objetivo escoar a água em finas películas ao longo de grandes superfícies, proporcionando uma maior exposição da água a corrente de ar. Comparada ao enchimento de gotejamento, este apresenta maior eficiência por volume ocupado. Sua eficiência depende da correta distribuição da água nestas finas películas. Seus formatos são variados podendo ser placas paralelas, onduladas e formas geométricas variadas como a hexagonal.

Como não há a formação de gotas, as velocidades do ar podem ser maiores, promovendo uma maior troca de calor por unidade de volume. Também, pelo mesmo motivo, as perdas por arraste das gotas diminuem drasticamente. Por ser mais eficiente, tem seu tamanho reduzido quando comparado aos enchimentos de gotejamento promovendo um menor gasto com enchimentos e com o bombeamento de água para a parte superior da torre.

Como este tipo é mais sensível as irregularidades da vazão de ar e a distribuição de água, o desenho da torre deve garantir sua uniformidade através de todo o enchimento. Outro inconveniente destes é sua maior facilidade de acumular sujeiras entre suas placas, obstruindo parcialmente o escoamento, rompendo com a homogeneidade do processo.

Para confecção destes enchimentos em instalações industriais, o fibrocimento é muito utilizado, pois apresenta boa resistência estrutural e contra eventuais matérias orgânicas. Entretanto, tem peso elevado em relação ao seu volume. Atualmente com as inovações dos meios de fabricação o plástico vem sendo muito utilizado.

## 2.10. Eliminadores de gotas

Os eliminadores de gotas (figura 2.25) têm como função eliminar as gotas que são carregadas pelas correntes de ar geradas pelos ventiladores. Quanto maior a potencia dos ventiladores, maior é a quantidade de gotas arrastadas. O enchimento utilizado também pode auxiliar ou não no carregamento de gotas. As torres de resfriamento que possuem enchimentos tipo respingo devem ter bons eliminadores de gotas, pois este enchimento é propício para a criação de gotículas, que são mais facilmente arrastadas pelas correntes de ar. No caso da utilização de enchimentos tipo laminar há

pouca criação de gotas (apenas as criadas pelos fortes correntes de ar sobre o escoamento laminar da água) e os enchimentos utilizados podem ser do tipo menos eficiente.



**Figura 2.25 – Exemplo de eliminador de gotas (Fonte: <http://www.termoparts.com.br/tp/peças-22/>).**

Em geral, os eliminadores de gotas atuam provocando bruscas mudanças de direções das correntes de ar úmido (ar com vapor d'água e gotículas carregadas). Essas bruscas mudanças de direção fazem com que gotículas de água arrastada fiquem na superfície do eliminador. Posteriormente elas se juntam e caem de novo nos enchimentos.

Além de eliminar gotas (diminuindo a perda de água), podemos citar alguns efeitos secundários positivos dos eliminadores de gota. Evitam que gotas entrem em contato com equipamentos posteriores (preservando por mais tempo estes equipamentos). Em regiões muito frias diminuem a formação de névoa (condensação do vapor d'água em contato com ar muito frio provoca a formação de nuvens, dificultando a clara visualização local). Outro ponto é a melhora da uniformização do fluxo de ar através do enchimento, devido à região de pressão mais baixa criada após os eliminadores.

A recomendação é que os materiais que serão utilizados para fabricar os eliminadores devam resistir a atmosferas corrosivas e erosivas. Geralmente são feitas de plástico (PVC), polipropileno (PP), lâminas de fibrocimento, madeira tratada, chapa galvanizada, alumínio. Suas formas são muito parecidas, formato de ondas (Onda Belga), trapezoidal ou perfis celulares (ex: perfil colmeia).

## **2.11. Reposição de água e Ciclos de Concentração**

Com as diversas formas de perda de água numa torre de refrigeração, a reposição da mesma é muito importante. Não só pelo fato de se evitar o pouco nível de água circulando no futuro, mas também devido ao aumento da concentração de sais existentes que podem comprometer o sistema. As formas de perda de água são:

- Evaporação (vapor d'água);
- Arrasto de gotículas pelo ar;
- Purga (descarga);

- Perdas indeterminadas (outras perdas como vazamentos etc).

As formas de reposição são:

- A reposição propriamente dita;
- Outras formas.

Considerando todo o sistema da água a ser resfriada como um volume de controle, podemos igualar o fluxo de entrada de água com o de saída.

$$R + F = E + G + PU + I \quad (1)$$

sendo  $R$  o retorno de água,  $F$  outra forma de reposição de água,  $E$  a evaporação de água,  $G$  o arrasto de gotículas de água,  $PU$  a purga (descarga) e  $I$  as perdas indeterminadas de água.

Agora considerando um sistema funcionando em condições normais, temos que as outras formas de reposição e as perdas indeterminadas são zero.

$$F = I = 0 \quad (2)$$

consequentemente,

$$R = E + G + PU. \quad (3)$$

Como na evaporação há perda apenas de água (nas perdas por arraste e por purga há também a perda de sais) e a água da torre é circulante, a concentração de sais aumenta com o tempo devido a evaporação. O ciclo de concentração (CC) é a quantidade de vezes que esta água está concentrada em relação a uma concentração padrão (ou ótima).

Equacionando isso temos:

$$CC = \frac{E+G+PU}{G+PU} = \frac{R}{G+PU} = \frac{E}{G+PU} + 1. \quad (4)$$

Considerando as perdas por arraste constantes, observamos pelo último termo da direita que o CC aumenta com o aumento da evaporação  $E$  e diminui com o aumento da purga  $P$ , entretanto o menor valor de CC, devido ao aumento da purga  $P$  será 1. Para diminuir o valor de CC para menor que 1, devemos utilizar a reposição de água  $R$ .

Rearranjando as equações podemos determinar a quantidade de água a ser reposta em função da evaporação e do CC.

$$R = E \left( \frac{CC}{CC-1} \right) = . \quad (5)$$

Lembrando que, nestes cálculos, não consideramos as perdas indeterminadas  $I$  e nem outras fontes de reposição  $F$ . Caso alguma dessas variáveis exista, ela deve ser computada.

Para cálculo de dosagem de produtos químicos para tratamento de água, é bom lembrar que apenas o arrasto e a purga propiciam a perda de produtos. Assim uma formulação genérica pode ser feita para estipular a dosagem.

$$W_{produto} = \frac{C*(G+PU)}{1000} = \frac{C*R}{CC*1000} \quad (6)$$

onde  $w_{produto}$  é a vazão de produto ( $kg/h$ ),  $C$  é a concentração desejada de produto ( $ppm$ ),  $A$  é perda por arraste ( $m^3/h$ ),  $PU$  é a purga ( $m^3/h$ ),  $R$  é a reposição ( $m^3/h$ ) e  $CC$  é o ciclo de concentração.

Muitas vezes é difícil obter os ciclos de concentração de um sistema assim como a medição da evaporação, do arraste, da purga e da reposição. Então outro método como a análise laboratorial das concentrações de sílica, cálcio e/ou magnésio da água do sistema e da água de reposição pode ser usado para estipular a quantidade de água de reposição do sistema.

## 2.12. Tratamento da água da torre de resfriamento

As Torres de Resfriamento necessitam ser tratadas para evitar corrosões, incrustações crescimento de matéria orgânica, que diminuem a eficiência da torre e aumentam o custo de manutenção. Este tratamento é, normalmente, efetuado com produtos químicos.

Atualmente novas formas alternativas de tratamento da água como com radiação ultra violeta e a utilização de ozônio ( $O_3$ ) começaram a ser utilizadas. Entretanto o tratamento com agentes químicos ainda é o mais utilizado.

O correto controle do tratamento da água pode ser resumido em tópicos:

- Instalação de filtros de ar e separadores nas torres;
- Controle de crescimento de matéria orgânica;
- Controle de corrosões;
- Controle de incrustações;
- Controle de escala do crescimento de matéria orgânica, das corrosões e das incrustações.

O ultimo item é o mais importante, pois sem o correto acompanhamento dos controles a dosagem dos produtos pode estar inadequada e outros problemas mais sérios podem surgir. É importante a instalação de filtros de ar e separadores de sujeira para minimizar a entrada de qualquer tipo de agente nocivo. A água mais limpa pela instalação de filtros e separadores torna o tratamento de água mais eficiente.

Uma maneira de eliminar o excesso de impurezas da água é a purga (definida anteriormente). Na parte mais inferior de um tanque deve-se sempre instalar um dreno para facilitar a eliminação das impurezas que se sedimentam ao fundo do tanque. Entretanto o excesso de uso da purga traz desperdício de água e perda de produtos químicos utilizados para tratamento da água. Entretanto o pouco uso da purga pode trazer maior risco de incrustações e biodepósitos.

Dentre os contaminantes da água podemos citar agentes Inorgânicos (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloretos, nitratos, cálcio, magnésio, ferro, cobre, manganês, sílica, fluoretos etc) agentes orgânicos (ácidos húmicos, taninos, gases dissolvidos, oxigênio, cloro, gás carbônico, óxidos de enxofre - SO<sub>x</sub>, óxidos de nitrogênio - NO<sub>x</sub> etc) e material suspenso (poeira, contaminantes como óleo e resíduos, algas, fungos e bactérias).

Resumindo os objetivos do tratamento de água temos:

- Minimizar incrustações;
- Minimizar corrosões;
- Minimizar crescimento microbológico;
- Minimizar depósitos inorgânicos;
- Minimizar depósitos orgânicos;
- Minimizar a emissão de poluentes.
- Maximizar eficiência da torre;
- Maximizar segurança da torre;

Para realização destes objetivos falaremos mais sobre corrosões, incrustações e crescimento microbológico e a forma de tratamento dos mesmos.

### **Corrosão (figura 2.26):**



**Figura 2.26 - Corrosão em tubulação** (Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4148-corrosao-em-metais--principios-e-prevencao/>).

Pode provocar destruição do equipamento e aumento de nutrientes microbológicos. Consequentemente pode promover obstruções (tubulações, trocadores de calor, enchimentos etc), perda na eficiência na troca térmica, aumento do custo de bombeamento de água devido as obstruções,

aumentando dos custos de manutenção de maneira geral e criação de um ambiente mais propício para crescimento de matéria orgânica (aumento de nutrientes).

Formas de tratamento e prevenção: Controle do pH, inibidores anódicos (molibdatos, silicatos, ortofosfatos etc), inibidores catódicos (polifosfatos, fosfonatos/zinco etc) e tratamento eletrolítico.

**Incrustações (figura 2.27):**



**Figura 2.27 - Incrustações de carbonato de cálcio (Fonte: Trovati, Joubert, Tratamento de água de resfriamento, Araraquara-SP, Página 28, 2004).**

Pode provocar, corrosão sob depósito e aumento de nutrientes microbiológicos. Conseqüentemente pode promover obstruções (tubulações, trocadores de calor, enchimentos etc), perda de eficiência na troca térmica, aumento do custo de bombeamento de água devido às obstruções, aumento das manutenções de maneira geral e criação de um ambiente propício para crescimento de matéria orgânica (aumento de nutrientes).

Formas de tratamento e prevenção: Utilização de filtros de ar, deionização por meio de tratamentos químicos, osmose reversa (processo de separação de soluto) e utilização da purga (de modo adequado).

**Crescimento microbiológico (figura 2.28):**



**Figura 2.28 - Crescimento de organismos em torre de resfriamento (Fonte: Trovati, Joubert, Tratamento de água de resfriamento, Araraquara-SP, Página 46, 2004).**



Pode provocar biodepósitos, e o surgimento e crescimento de fungos, algas e bactérias. Conseqüentemente pode promover obstruções (tubulações, trocadores de calor, enchimentos etc), redução da eficiência térmica, corrosão sob depósitos e uma série de doenças.

No caso do crescimento microbiológico, é bom sabermos os fatores que contribuem para o crescimento dos mesmos. Agentes contaminantes podem vir pelo ar (sem uso de filtros), podem se multiplicar se tiverem nutrientes necessários presentes no sistema e condições favoráveis como pH, temperatura e luz solar. A presença de oxigênio/gás carbônico e a velocidade da água também são fatores a se considerar.

Formas de tratamento e prevenção: Instalação de filtros de ar, uso de dispersantes e de biocidas e utilização da purga (de modo adequado).

### **2.13. Observações importantes**

Dentro deste tema algumas observações pontuais são necessárias.

#### **Motores:**

Os motores utilizados dentro do contexto de torres de resfriamento ficam expostos a um ambiente altamente deteriorante de elevada temperatura e umidade durante seu funcionamento. Por isso, deve ser um motor projetado para este tipo de ambiente. Motores normais tem pouca vida útil em relação ao seu projeto neste ambiente.

#### **Bombas de água:**

Os sistemas de bombeamento para circulação da água na entrada da torre (local de aspersão da água) quanto na saída (retorno da água para os outros processos) consomem uma fração importante de gasto de energia que deve ser considerado. É importante comentar também que é comum a utilização de duas bombas para torres de resfriamento, uma principal e uma reserva.

#### **Ventiladores:**

Os ventiladores têm o mesmo problema dos motores devido à exposição de um ambiente deteriorante. Entretanto este caso é mais simples de se resolver pois o projeto de ventiladores é menos trabalhoso.

#### **Fibra de vidro (PRFV):**

Na verdade a expressão refere-se ao Polímero Reforçado com Fibra de Vidro, cujo nome é popularmente conhecido como fibra de vidro. O PRFV tem alta resistência a tração, flexão e impacto. É leve, não conduz corrente elétrica, não enferruja e tem excepcional resistência a ambientes agressivos aos materiais convencionais. Por isso é muito utilizada na estrutura (ou partes) de vários modelos de torres de resfriamento é feitas de fibra de vidro.

**Venezianas:**

Estão colocadas na entrada de ar e são projetadas para minimizar as perdas de água devida a entrada de ar e para uma eficiente admissão deste ar. Como a perda de água e a entrada de ar são positivamente relacionadas (quanto maior a entrada de ar, maior a perda de água), o projeto das venezianas deve ser bem elaborado para minimizar as perdas de água e maximizar a entrada de ar. Geralmente são feitas de madeira, fibrocimento e fibra de vidro (PRFV).

**Vibrações e detector de vibrações:**

Qualquer projeto de engenharia que possua partes moveis cíclicas esta sujeito a ter problemas com vibrações. Estes problemas podem ser pequenos (peças soltas, como parafusos) a problemas mais graves como danos permanentes ao projeto e acidentes graves. Para evitar problemas maiores, o detector de vibrações deve ser instalado. Quando o nível de vibração excede certo ponto, o detector deve enviar um sinal a algum módulo de comando para desligar o equipamento ou emitir algum sinal (mensagem de alerta para os operadores ou sinal sonoro). Ele é importante para monitorar o nível de vibração e evitar um acidente de maiores proporções.

**Redutor de velocidade:**

Muitas vezes os processos de uma indústria são sazonais ou variam por algum outro motivo. Isso acarreta numa diminuição de processos e conseqüentemente diminui a demanda por resfriamento de água. Por este motivo, para economia de energia, são instaladas (ou são itens de projeto) redutores de velocidade para os ventiladores. Geralmente eles funcionam em duas velocidades, entretanto para grande ventiladores (maiores que 6 metros de diâmetro) são aconselhados três níveis de velocidade. Devido a exposição ao ambiente agressivo, eles devem possuir um bom sistema de vedação, impedindo a entrada de água e em baixo devem possuir bolsas de condensado para evitar a emulsão do óleo dentro do redutor.

**“Plume”:**

É o fluxo de ar saturado que deixa a torre de resfriamento. Quando o vapor d’água da torre encontra com um ar atmosférico com uma temperatura mais fria, o “plume” torna se visível, possuindo uma aparência de fumaça branca.

**2.14. Custos da torre de resfriamento**

Um dado importante a ser considerado na compra de uma torre de resfriamento é o seu custo. Podemos o custo total da torre em custo de investimento inicial e custos fixos operacionais.

**Custos de investimento inicial:**

- Custo total da torre de resfriamento (lembrar do custo de amortização do investimento);
- Custo dos motores e bombas;
- Custo da bacia de coleta de água fria;
- Custo do sistema elétrico instalado (fiação, painel de comando, controladores etc);
- Custo do sistema hidráulico instalado (entrada e saída de água, dreno, válvulas etc);
- Custo operacional de instalação do projeto (funcionários, ferramentas utilizadas etc).

**Custos fixos operacionais:**

- Custo da energia elétrica para os ventiladores e bombas;
- Custo de manutenção;
- Custo de tratamento da água;
- Custos operacionais (operadores da torre);

## 3. Revisão de conceitos

*Neste revisamos alguns conceitos importantes da área da psicrometria relevantes para melhor entendimento do trabalho em questão. São abordados ensinamentos sobre cartas psicrométricas, umidade absoluta, umidade relativa, volume específico, entalpia específica, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido.*

### 3.1. Psicrometria e cartas psicrométricas

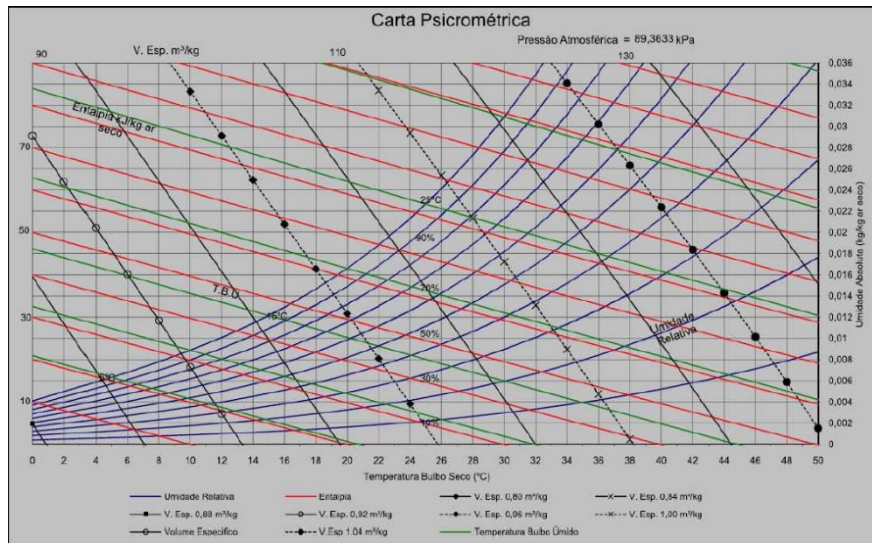
A Psicrometria é um ramo da ciência destinado ao estudo e das propriedades físicas e termodinâmicas da mistura entre gases e vapor e também suas aplicações práticas. A maioria dos estudos da psicrometria esta voltada para a análise da mistura do vapor d'água e o ar atmosférico. Na engenharia este estudo é extremamente importante para projeto e dimensionamento de sistemas evaporativos.

Na atmosfera, o ar normalmente contém um pouco de vapor d'água (ou umidade) e é chamado de ar atmosférico. O ar que não contém umidade é chamado de ar seco. Com frequência é conveniente considerar o ar como uma mistura de ar seco e vapor d'água. Isso se deve ao fato da composição do ar seco permanece relativamente constante enquanto que a de vapor muda com vários processos como condensação e evaporação de oceanos, lagos, chuvas entre outros. Apesar da quantidade de vapor d'água no ar atmosférico seja pequena, ela tem um papel importante em algumas áreas da engenharia e estudar a fundo este assunto é necessário.

Considerando a temperatura de 50°C, a pressão de saturação da água é de 12,3 kPa. A pressões abaixo deste valor, o vapor d'água pode ser tratado como um gás ideal com erro abaixo de 0,2%. Para o âmbito da engenharia a consideração do ar atmosférico como um gás ideal (para este limite acima citado) é muito conveniente, facilitando os cálculos.

As cartas psicrométricas são diagramas utilizados para representar e relacionar uma série de propriedades termodinâmicas do ar úmido e mostrar a variação dos mesmos durante alguns processos. Elas são utilizadas como um método rápido e fácil para a obtenção das características do ar úmido. São necessárias apenas duas propriedades para a definição de um estado, a partir do qual as outras propriedades podem ser estabelecidas. É importante ressaltar que a carta psicrométrica é válida para uma determinada pressão, logo cada região, geralmente, apresenta uma diferente.

Abaixo podemos visualizar a carta psicrométrica de Brasília (Figura 3.1).



**Figura 3.1 - Carta Psicrométrica de Brasília (Fonte: Duarte Junior, José; Novais, Mariana, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO HÍBRIDO UTILIZANDO BACNET SOBRE ZIGBEE, Universidade de Brasília página 19, 2010).**

Como podemos observar, na carta psicrométrica temos representada uma série de linhas (legenda) e cada uma delas representa o valor constante de uma das propriedades abaixo:

- Umidade absoluta;
- Umidade relativa;
- Volume específico;
- Entalpia específica;
- Temperatura de bulbo seco;
- Temperatura de bulbo úmido.

Estas propriedades serão abordadas mais profundamente a seguir

### 3.2 Umidade absoluta

É uma forma de se medir a quantidade de vapor d'água em determinada quantidade de ar em um momento específico. A umidade absoluta  $w_{abs}$  corresponde a razão entre a massa de vapor d'água  $m_w$  e a massa de ar seco  $m_{ar}$ .

$$w_{abs} = \frac{m_w}{m_{ar}} \quad (7)$$

É bom lembrar que a umidade absoluta não varia com a temperatura, dentro de uma determinada margem.

### 3.3 Umidade relativa

Visto que a umidade absoluta não varia com a temperatura, não temos um real entendimento do que esta umidade realmente significa. Para isso um parâmetro criado para se saber melhor sobre a umidade do ar foi criado, a umidade relativa do ar  $\phi_{ar}$ .

A umidade relativa é expressão em porcentagem e corresponde a razão entre a massa de vapor d'água presente na mistura ar-vapor a máxima massa de vapor que esta mistura pode suportar à mesma temperatura e pressão.

$$\phi_{ar} = \frac{m_w}{m_{máx w}} * 100 . \quad (8)$$

### 3.4 Umidade específica

A umidade específica é a razão mássica de vapor de água com o ar úmido. É expressa da seguinte forma.

$$HE = \frac{m_w}{m_w + m_{ar}}, \quad (9)$$

onde  $m_w$  é a massa de água e  $m_{ar}$  é a massa de ar.

### 3.5 Volume específico

Se tivermos uma determinada substância com massa  $m$  e que esta ocupa certo volume  $V$ , podemos estabelecer uma relação entre estas duas propriedades. Sendo:

A massa específica:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (10)$$

e volume específico:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}. \quad (11)$$

Em alguns estudos específicos da termodinâmica, o volume específico  $v$  é usualmente mais empregado que a massa específica  $\rho$ .

Nas cartas psicrométricas, é utilizado o volume específico da mistura vapor d'água-ar. Onde é expressa a relação do volume de vapor d'água por unidade de massa de ar seco.

$$v_{m_w, V_{ar}} = \frac{V_{ar} + V_w}{m_{ar}} . \quad (12)$$

### 3.6 Lei de Dalton

Se uma mistura gasosa com  $n$  componentes esta contida em um volume  $V$ , sendo sua temperatura  $T$  e sua pressão  $P$ , temos que as propriedades das misturas são descritas pela combinação (média ponderada) das propriedades dos componentes. Isto é a pressão total é dada pela soma individual de cada gás naquele volume, conforme é mostrado.

$$P_{total} = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum P_i . \quad (13)$$

### 3.7 Entalpia específica

Na análise de determinados tipos de processo, particularmente na geração de potencia e refrigeração, frequentemente encontramos a combinação das propriedades  $U+P * V$ . Essa combinação é chamada de entalpia  $H$ .

$$H = U + P * V . \quad (14)$$

A entalpia total da mistura vapor d'água-ar é dada pela contribuição da entalpia individual do ar seco e do vapor d'água:

$$H = H_{ar} + H_w . \quad (15)$$

A entalpia especifica da mistura  $h$  é dada como a entalpia total  $H$  dividida pela massa de ar seco  $m_{ar}$ :

$$h = \frac{H}{m_{ar}} = \frac{H_{ar}}{m_{ar}} + \frac{H_w}{m_{ar}} = h_a + w_{abs} * h_w . \quad (16)$$

### 3.8 Temperatura de bulbo seco

A temperatura de bulbo seco corresponde a temperatura da mistura de ar e vapor d'água medida por um termômetro convencional e que não é influenciada pela a umidade relativa ou absoluta do ar. Seria a temperatura que estamos acostumados a medir no dia a dia.

### 3.9 Temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura da mistura ar-vapor, atingida por um processo de resfriamento evaporativo. A evaporação consome calor, ocasionando resfriamento, diminuindo assim a temperatura da mistura ar-vapor. É medida por um termômetro convencional cujo bulbo fica envolto por um tecido umidificado com água destilada e exposto a uma corrente de ar. Esta corrente favorece a evaporação de parte desta água, diminuindo a temperatura medida pelo termômetro. O valor desta temperatura esta relacionado com a quantidade de vapor d'água presente no ar. Quanto

maior a presença de umidade, maior será a evaporação desta água presente no tecido e consequentemente menor será a temperatura de bulbo úmido. Sendo assim a temperatura de bulbo úmido é sempre menor ou igual a temperatura de bulbo seco.

### **3.10 Temperatura de ponto de orvalho**

Quando o ar seco esta com sua umidade relativa em 100%, ou seja, no ponto de saturação, qualquer queda no valor de sua temperatura ocasionaria na perda da “capacidade de absorção de umidade” deste ar. Neste ponto, considerando que a temperatura do ar abaixe, parte da umidade deste ar seria condensada.

A temperatura de ponto de orvalho  $T_{po}$  é definida como a temperatura na qual a condensação começa quando o ar é resfriado a pressão constante.

Como resultado da diminuição da temperatura, a quantidade de vapor d'água diminui. Entretanto a umidade relativa continua em 100%.



## 4. Ensino

*Neste capítulo tratamos do ensino do tema voltado para a engenharia. Mostramos alguns equacionamentos envolvidos na transferência de calor e massa no interior da torre. Além disso, também fazemos uma comparação de como este estudo é feito em outras grandes Universidades do Brasil.*

### 4.1. Balanço de massa e energia num volume de controle

Consideremos uma torre de resfriamento com escoamento de água e resfriada devido ao contato com o escoamento do ar em contracorrente, conforme mostra a figura 29 Temos assim um volume específico por unidade de área transversal  $v$  e sejam  $a_H$  e  $a_M$  respectivamente as áreas específicas de transferência de calor e massa por volume de enchimento da torre.

A água é alimentada no topo da torre e consideramos que esta distribuição é uniforme pelo enchimento. O fluxo de ar ascendente é também considerado uniformemente distribuído ao longo da secção transversal da torre. Vamos considerar também que as temperaturas e as entalpias específicas do ar são uniformes nesta secção.

Quando o ar entra em contato com a água, a temperatura de interface (temperatura do ar saturado) é maior que a temperatura do ar seco e menor que no interior do volume de água.

Considerando a figura 4.1 aplicamos o balanço de energia para um volume de controle infinitesimal temos:

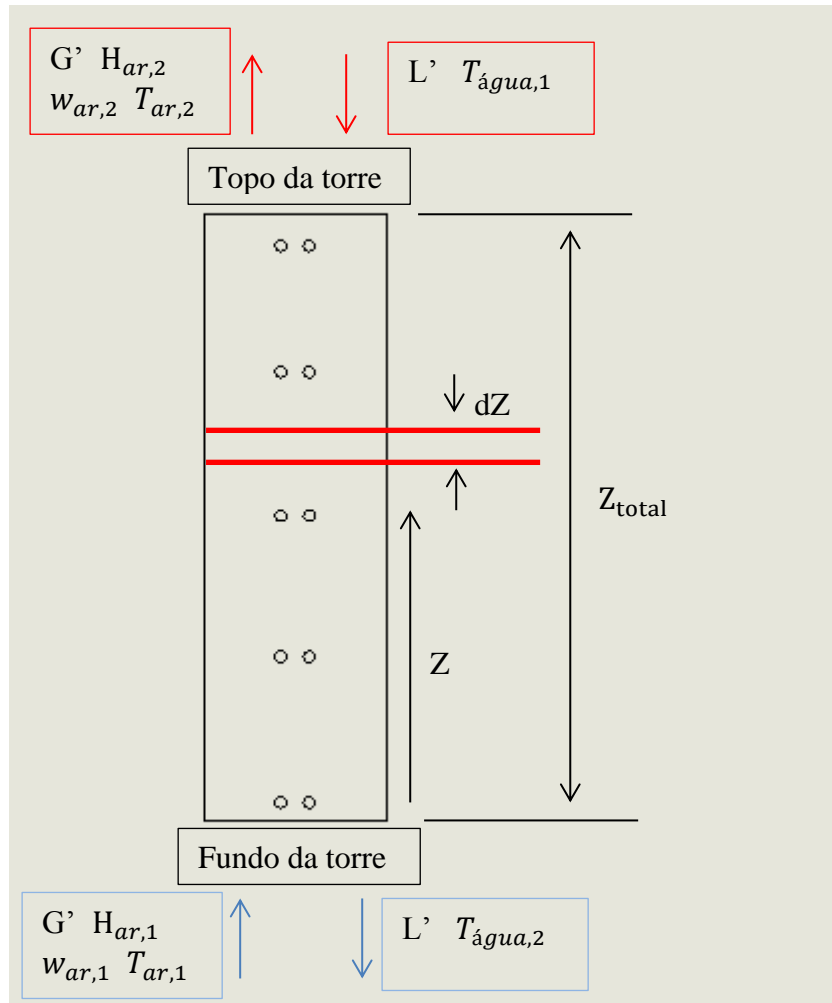


Figura 4.1 - Balanço de energia no corpo da torre de resfriamento.

$$G' * dH_{ar} = d(L' * H_{\acute{a}gua}) \quad (17)$$

Consideramos que o fluxo de ar não muda ao longo da torre pois esta expresso em massa de ar seco. Supondo que a água perdida (evaporada ou arrastadas pelo ar) seja desprezível, nossa equação torna-se:

$$G' * dH_{ar} = L' * c_p * dT_{\acute{a}gua} \quad (18)$$

Aplicando o balanço em toda torre:

$$G' * (H_{ar,2} - H_{ar,1}) = L' * c_p * (T_{\acute{a}gua,1} - T_{\acute{a}gua,2}) \quad (19)$$

Em um ponto genérico dentro da torre teremos:

$$G' * (H_{ar,2} - H_{ar,local}) = L' * c_p * (T_{\acute{a}gua,1} - T_{\acute{a}gua,local}) \quad (20)$$

Com a equação 20 podemos calcular os valores ao longo de uma torre de resfriamento. Entretanto para isso devemos conhecer o estado do ar interior e utilizar uma carta psicrométrica. Geralmente isso é feito em torres com a utilização de um psicrômetro, medindo-se a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido e conhecendo-se assim o estado do ar interior.

## 4.2. Alguns números adimensionais importantes para o estudo

Neste falaremos de alguns números adimensionais importantes para o estudo.

### ***Números de Reynolds:***

É interpretado como a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas de um escoamento.

É definido como:

$$Re = \frac{V_{vel} * L}{\nu} \quad (21)$$

onde  $V_{vel}$  é a velocidade do escoamento,  $L$  é o comprimento característico do escoamento e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

### ***Número de Prandtl:***

É a relação entre a difusividade do momento e a difusividade térmica.

É definido como:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (22)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\alpha$  é a difusividade térmica do fluido. O número de Prandtl também pode ser escrito como:

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k}, \quad (23)$$

onde  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica e  $k$  é a condutividade térmica.

### ***Número de Schmidt:***

Mede a relação entre a difusividade de momento e a difusividade mássica.

É definido como:

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \quad (24)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $D$  é a difusividade mássica do fluido.

### ***Número de Lewis:***

Mede a relação entre a difusividade térmica e a difusividade mássica.

É definido como:

$$Le = \frac{\alpha}{D}. \quad (25)$$

Uma outra forma de defini-lo seria:

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (26)$$

### ***Número de Nusselt:***

Representa a relação entre as taxas de transferência de calor por convecção e a que se obteria por condução num determinado gradiente de temperatura.

É definido como:

$$Nu = \frac{h_{conv} * L}{\kappa} \quad (27)$$

onde  $\kappa$  é a condutividade térmica do fluido.

### ***Número de Sheerwood***

Representa a razão de transferência de massa convectiva e difusiva.

$$Sh = \frac{h_m * L}{D}, \quad (28)$$

onde  $h_{massa}$  é o coeficiente de transferência de massa e D é a difusividade mássica do fluido.

### ***Número de Stanton***

Representa a relação entre a transferência de calor de um fluido e sua capacidade calorífica.

$$St = \frac{h_{conv}}{c_p * \rho * V_{vel}}. \quad (29)$$

Também pode ser representado como função dos *números de Nusselt, Reynolds e Prandtl*:

$$St = \frac{Nu}{Re * Pr}. \quad (30)$$

Outra forma do *número de Stanton* é quando tratamos da transferência de massa:

$$St_m = \frac{h_m}{\rho * V_{vel}}. \quad (31)$$

Ou temos a representação em função dos *números de Sheerwood, Reynolds e Schmidt*:

$$St_m = \frac{Sh}{Re * Sc}. \quad (32)$$

## **4.3. O Fator de Lewis para torres de resfriamento**

No estudo da troca de calor e massa de torres de resfriamento, um parâmetro adimensional muito importante na história é o *fator de Lewis*. Este fator relaciona-se com outros números adimensionais importantes como o *número de Reynolds* e o *número de Nusselt* para explicar os fenômenos da transferência de calor e massa de um sistema. O *fator de Lewis* esta intimamente ligado com o *número de Lewis* e funciona como se fosse uma forma corrigida deste número para o estudo de torres de resfriamento.

Mostraremos a relação deste fator com os outros números adimensionais antes de entrarmos no estudo próprio de torres de resfriamento.

A *Lei do Resfriamento de Newton* estabelece que taxa de transferência de calor entre uma superfície e um fluido é dada como:

$$\dot{Q} = h_{conv} * A(T_{superfície} - T_{fluido}). \quad (33)$$

Uma análise adimensional das equações que regem a transferência de calor por convecção resulta na definição do número de *Nusselt*. Podemos ainda notar uma correlação entre os números de *Nusselt*, *Prandtl* e *Reynolds* como sendo:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (34)$$

De forma análogo a Lei do Resfriamento de Newton, podemos definir uma Taxa de Transferência de massa  $h_{massa}$  entre uma superfície malhada e um fluxo de ar úmido:

$$\dot{m} = h_{massa} * A * (\rho_{água} - \rho_{ar}). \quad (35)$$

Agora podemos relacionar o coeficiente de transferência de massa  $h_{massa}$  com outras grandezas adimensionais como o *número de Sherwood*:

$$Sh = \frac{h_m * L}{D} = f(Re, Sc), \quad (35)$$

onde *Re* e *Sc* são o *número de Reynolds* e o *número de Schimdt* respectivamente.

Quando tratamos de problemas envolvendo simultaneamente transferência de calor e massa, devemos relacionar os parâmetros  $\alpha$  (difusividade térmica) e  $D$  (difusividade mássica). A relação desses parâmetros se dá pelo número de Lewis:

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{Sc}{Pr} = \frac{k}{\rho * c_p * D}. \quad (36)$$

Além do número de Lewis, podemos estabelecer outra relação entre as taxas de transferência de calor e massa, quando tratamos de um processo evaporativo. Esta relação é chamada de fator de Lewis,  $Le_f$ .

O fator de Lewis é mais utilizado quando tratamos de torres de resfriamento e é igual a razão entre o número de Stanton de transferência de calor  $St$  (equação 29) e o número de Stanton de transferência de massa  $St_m$  (equação 30), sendo:

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \frac{h}{\rho * V_{vel} * c_p} \frac{\rho * V_{vel}}{h_m} = \frac{h}{c_p * h_m}. \quad (37)$$

Para sistemas ar/água temos uma boa aproximação desta relação para a unidade:

$$Le_f \cong 1. \quad (38)$$

Utilizando a analogia da Lei de potência Chilton-Colburn para o número de Stanton, podemos encontrar uma relação de  $Le$  e  $Le_f$ :

$$St = C * Re^{-\frac{1}{2}} * Pr^{-\frac{2}{3}} = \frac{h}{\rho * V_{vel} * c_P}, \quad (39)$$

$$St_m = C * Re^{-\frac{1}{2}} * Sc^{-\frac{2}{3}} = \frac{h_m}{\rho * V_{vel} * c_P}, \quad (40)$$

segue então que:

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{-\frac{2}{3}} = Le^{\frac{2}{3}}. \quad (41)$$

Entretanto esta relação pode variar um pouco dependendo da natureza da mistura vapor-gás. Segundo *Bosnjakovic*, existe uma expressão de correção desta equação para as variações da natureza da mistura. O fator de correção é dado por:

$$Le_f = Le^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{w_{vapor\ saturado} + d}{w + d} - 1\right) / \ln\left(\frac{w_{vapor\ saturado} + d}{w + d}\right), \quad (42)$$

onde o valor  $d$  é o peso molecular da água/peso molecular do air e vale 0,62198.

Segundo *Bourillot*, o fator  $Le_f$  para torres de resfriamento úmidas é aproximadamente 0,92, adotando um *número de Lewis* igual a 0,865.

Em uma análise com variados tipos de enchimentos, *Feltzin e Benton* indicaram que para torres em contracorrente, um valor mais apropriado para o fator de Lewis seria 1,25. Entretanto num estudo de *Sutherland* ele conseguiu boas aproximações no estudo de torres utilizando o valor de 0,90 para o *fator de Lewis*.

Através destes estudos podemos notar que os valores para o fator de Lewis, em torres de resfriamento, variam perto da unidade. Entretanto mesmo com estas variações, estes mesmos estudos também mostram que a suposição feita na equação 38 de  $Le_f \cong 1$  traz boas aproximações para análise. Sendo assim este trabalho irá considerar esta aproximação.

#### 4.4. Transferência de calor e massa na torre de resfriamento

No interior das torres de resfriamento, ocorre simultaneamente, uma transferência de calor e massa. O calor transferido pela água à atmosfera é constituído de duas parcelas principais, sendo o calor transferido por convecção (calor) e o calor transferido pela evaporação da água (massa).

A seguir faremos uma análise mais detalhada destes dois processos.

$$dQ_{total} = dQ_{Cond} + dQ_{evap}, \quad (43)$$

onde  $dQ_{total}$  é o calor total trocado,  $dQ_{Cond}$  é o calor trocado por condução e  $dQ_{evap}$  é o calor trocado por evaporação.

### Convecção:

Aqui o calor é transferido da água para o ar pela ação combinada da condução de calor de molécula por molécula e do transporte de energia térmica, tendo por veículo as moléculas em movimento devido ao escoamento de ar.

$$dQ_{cond} = h_{conv} * (T_{\acute{a}gua} - T_{ar}) * dA , \quad (44)$$

onde  $h_{conv}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2\text{°C}$ ),  $T_{\acute{a}gua}$  é a temperatura da água ( $\text{°C}$ ),  $T_{ar}$  é a temperatura do ar e  $dA$  é a área de troca de calor ( $m^2$ ).

É feita a consideração de que a temperatura da gota ou película da água é constante desde seu interior até a superfície.

### Evaporação:

A temperatura neste caso é abaixada devido a parcela de massa de água que é evaporada. A energia necessária à mudança de estado é retirada da própria água, diminuindo assim sua temperatura. Esta parcela é responsável pela maior parte do calor trocado. No Brasil esta parcela corresponde a cerca de 90% nas condições de temperatura e umidade mais frequentes (ALPINA, torres de resfriamento de água 1978).

A massa de água evaporada é transferida para o ar através de dois processos simultâneos, o primeiro deles, junto a interface, é o de difusão de moléculas de água no ar e o segundo é o do arraste destas moléculas pela corrente de ar, induzida mecanicamente.

$$dQ_{evap} = h_m * L_c * (UE_2 - UE_1) * dA , \quad (45)$$

onde  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa ( $kg/m^2 * s$ ),  $L_c$  é o calor latente de vaporização da água ( $kcal/kg$ ),  $UE_2$  é a umidade específica do ar saturado, junto à água ( $kg \text{ vapor}/kg \text{ ar}$ ),  $UE_1$  é a umidade específica do ar antes do contato com a água ( $kg \text{ vapor}/kg \text{ ar}$ ) e  $dA$  é a área de troca de calor ( $m^2$ ).

O calor recebido pelo ar pode ser expresso por:

$$dQ = \dot{m}_{ar} * dh_{ar} , \quad (46)$$

onde  $\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica do ar  $kg/s$  e  $dh_{ar}$  é a variação de entalpia do ar ( $kcal/kg$ ).

Para continuar, aproximamos o valor  $h_{ar}$  como:

$$h_{ar} = c_p * T_{ar} + L_c * UE_{ar} , \quad (47)$$

onde  $c_p$  é o calor específico a pressão constante.

Para o calor transferido da água para o ar:

$$dQ = \dot{m}_{\acute{a}gua} * c_{\acute{a}gua} * dT_{\acute{a}gua} , \quad (48)$$

onde  $c_{\acute{a}gua}$  é o calor específico da água.

É feita a consideração de que a perda por evaporação é zero, então  $\dot{m}_{\acute{a}gua}$  é constante.

Substituindo as equações acima tem-se:

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} * c_{\acute{a}gua} * dT_{\acute{a}gua} = h_{conv} * (T_{\acute{a}gua} - T_{ar}) * dA + h_m * L_c * (UE_2 - UE_1) * dA. \quad (49)$$

Utilizando a teoria de Merkel (baseada na suposição de Lewis para  $Le_f = 1$ ):

$$Le_f = 1 = \frac{h_{conv}}{h_m * c_P}, \text{ logo,}$$

$$h_m * c_P = k_{conv}. \quad (50)$$

Em termos gerais pode-se dizer que, quando  $Le_f = 1$ , o grau de dificuldade ou facilidade encontrado pela transferência de calor por convecção é o mesmo encontrado pela transferência de massa ao evaporar e ser carregada pelo ar. Isto quer dizer que o perfil de temperatura é igual ao perfil de umidade específica do ar.

Substituindo temos:

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} * c_{\acute{a}gua} * dT_{\acute{a}gua} = h_m * c_P * (T_{\acute{a}gua} - T_{ar}) * dA + k_G * L_c * (UE_2 - UE_1) * dA \quad (51)$$

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} * c_{\acute{a}gua} * dT_{\acute{a}gua} = h_m * [(c_P * T_{\acute{a}gua} + L_c * UE_2) - (c_P * T_{ar} + L_c * UE_1)] * dA \quad (52)$$

Lembrando de (21) temos,

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} * c_{\acute{a}gua} * dT_{\acute{a}gua} = h_m * (h_{ar,2} - h_{ar,1}) * dA \quad (53)$$

ou

$$(h_m * dA) / \dot{m}_{\acute{a}gua} = (c_{\acute{a}gua} * dT_{\acute{a}gua}) / (h_{ar,2} - h_{ar,1}). \quad (54)$$

Esta é a equação de Merkel, em homenagem à importância prática de sua formulação. Vale lembrar que esta hipótese feita de que  $Le_f = 1$  é uma aproximação. Para torres de resfriamento sabe-se que  $Le_f > 1$ , mas como mostrado anteriormente, o *fator de Lewis* tem uma boa aproximação para a unidade. Mesmo com esta aproximação, a integração da equação de Merkel é muito utilizada por apresentar, por comprovação prática, valores aceitáveis.

A integração da equação de Merkel fica:

$$KV = \frac{h_m * dA}{\dot{m}_{\acute{a}gua}} = \int \left( \frac{c_{\acute{a}gua}}{h_{ar,2} - h_{ar,1}} \right) * dT_{\acute{a}gua}, \quad (55)$$

onde o efeito de resfriamento por ela indicado é um número adimensional denominado Coeficiente Global de Performance ( $KV$ , *nº de Merkel* ou  $\frac{KaV}{L}$ ).



## 5. Bancada Experimental do LaAR

*Neste apresentamos a bancada experimental do Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração da UnB - LaAR. Falamos de seu funcionamento, de sua operação de seus componentes, e da restauração feita para fazê-la funcionar novamente. Também é destinado espaço para futuros testes e assuntos relacionados.*

### 5.1. Apresentação da bancada

A bancada experimental do LaAR (The Hilton Water Cooling Tower) foi fabricada pela empresa P.A. HILTON LTD e é uma pequena torre de resfriamento com variadas condições de operação. Com ela, podemos enfatizar o estudo da troca de calor e massa e da psicrometria. Na figura 5.1 podemos observar a bancada e na figura 5.2 observar seu diagrama esquemático. Sua estrutura consiste numa coluna retangular que possui o lado da frente transparente para visualização dos enchimentos e do local onde temos o processo de troca de calor e massa. É uma torre de tiragem mecânica forçada por um ventilador. O escoamento de água opera em contra-fluxo com a corrente de ar gerada pelo ventilador. Seu sistema de distribuição recebe água de um tanque de alimentação de nível constante que alimenta o sistema de aspersão (na parte superior da torre). A vazão de água é controlada pela válvula localizada abaixo do rotâmetro (no painel da bancada). Mais detalhes explicando o funcionamento serão vistos a seguir.



Figura 5.1 – Bancada experimental de torre resfriamento – LaAR, UnB (foto tirada pelo autor).

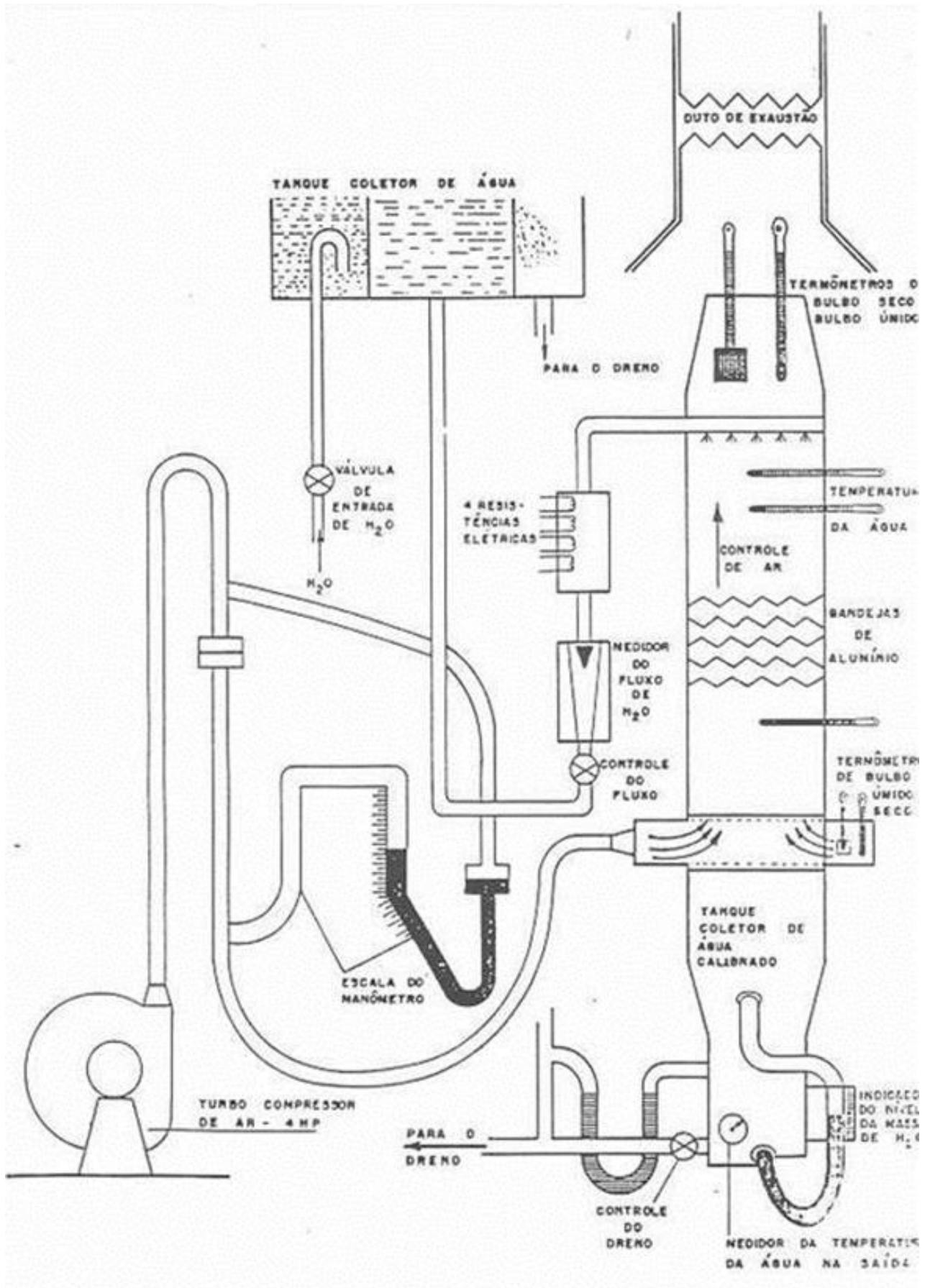
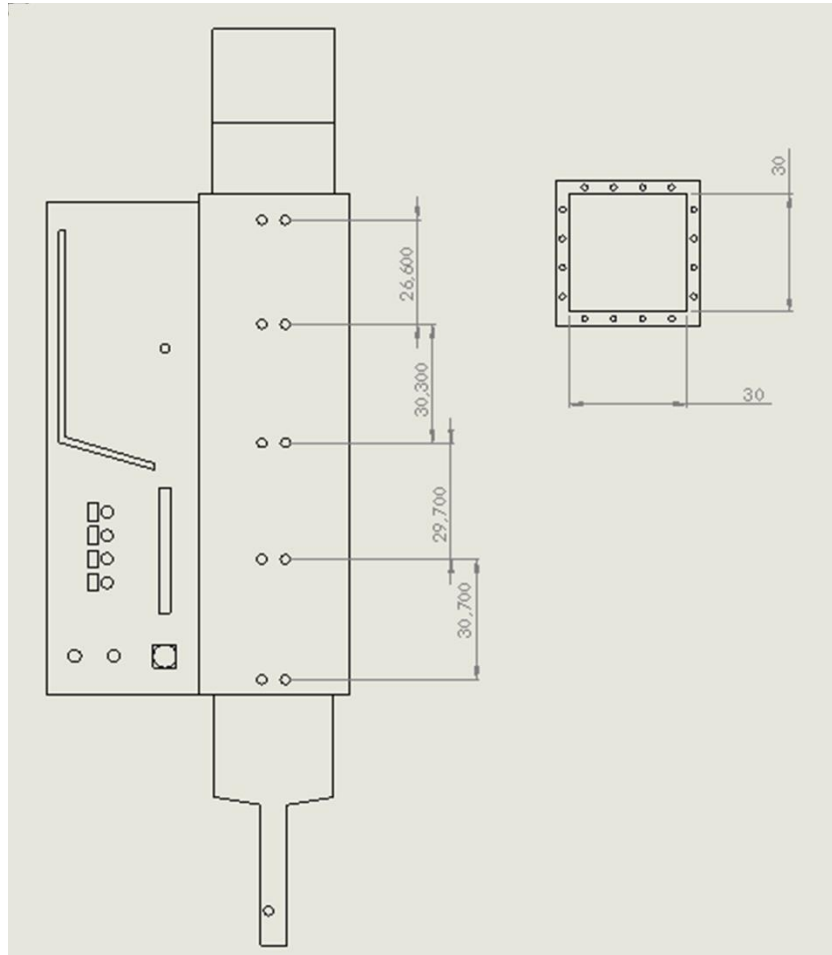


Figura 5.2 - Diagrama esquemático da torre de resfriamento The Hilton Cooling Water Tower (Fonte: <http://www.fem.unicamp.br/~em712/torre.doc>, página 10).

A figura abaixo mostra as dimensões da bancada.



**Figura 3 - Dimensões da bancada de torre de resfriamento (desenho feito pelo autor).**

Ao lado da frente transparente da bancada, há um painel onde cada uma das resistências e o ventilador podem ser ligados. Neste mesmo painel, há um rotômetro para controle e medição do fluxo de água e uma marcação para medição do fluxo de ar.

Abaixo segue ilustração de alguns componentes da bancada:

- Painel de controle das resistências, do ventilador e da vazão de água;



**Figura 5.4 - Painel de controle da bancada (foto tirada pelo autor).**

- Motor elétrico de 3400 rpm;



Figura 5.5 - Motor elétrico da bancada (foto tirada pelo autor).

- Ventilador centrífugo;



Figura 5.6 - Ventilador centrífugo da bancada (foto tirada pelo autor).

- Tanque de alimentação de nível constante;



Figura 5.7 - Tanque de alimentação de nível constante da bancada (foto tirada pelo autor).

- Tanque coletor de água;



Figura 5.8 - Tanque coletor de água da bancada (foto tirada pelo autor).

- 4 Resistências 240V/2.750W TOP12/77TPE;



Figura 5.9 - Resistências elétricas da bancada (foto tirada pelo autor).

- Fusíveis do circuito elétrico;



Figura 5.10 - Fusíveis do circuito elétrico da bancada (foto tirada pelo autor).

- Enchimentos são pilhas de grades feitas de alumínio;

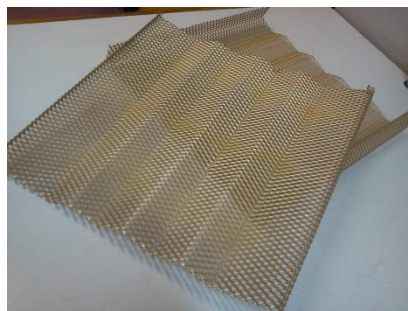


Figura 5.11 - Enchimento da torre de resfriamento da bancada (foto tirada pelo autor).



- Eliminador de gotas;



Figura 5.12 - Eliminadores de gota da bancada (foto tirada pelo autor).

- Manômetro para se calcular a vazão do ar.
- OBS: Pistola Psicrometrica (não esta em uso, pois não foi encontrada).

Este equipamento esta instrumentado para permitir a medição de:

- Vazão de ar na entrada da torre, parte inferior (placa orifício e manômetro);
- Vazão e temperatura da água na entrada da torre, parte superior (rotâmetro e termopar);
- Vazão e temperatura de água na saída da torre (tanque calibrado, cronômetro e termopar);
- Temperatura da água em 5 pontos ao longo da torre (termopares);
- Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente (psicrômetro);
- Temperatura de bulbo úmido e bulbo seco do ar, com termopares fixos, na entrada e saída do ar;
- OBS: Mediante uma pistola psicrométrica, a bancada tem capacidade de medir a temperatura de bulbo úmido e bulbo seco do ar em 5 pontos ao longo da torre.

## 5.2. Funcionamento e operação da bancada

Para melhor explicar o funcionamento, mais detalhado, da bancada, primeiro falaremos do caminho percorrido pela água e depois falaremos do escoamento do ar.

A água vem de uma de uma mangueira e vai para um tanque no topo da torre. Devido a gravidade, a água desce do tanque e vai para o rotâmetro. Em seguida a água sobe e passa por uma caixa contendo quatro resistências elétricas que a aquecem (para simular uma água a ser resfriada). Depois de aquecida, a água sobe mais um pouco para o ponto de aspersão onde ela passa por três tubos furados e é aspergida para os enchimentos num fluxo em contracorrente com o ar (trocando calor) ate cair no tanque coletor de água, na parte inferior da bancada. Para o sistema de água, há uma série de drenos para possibilitar o melhor controle das vazões de água.

O ar é gerado por um ventilador centrifugo e segue ate o corpo da torre entrando por baixo. No corpo da torre, em contracorrente com a queda d'água, o ar troca calor com a água e segue subindo pelos enchimentos. Em contato com a água, ele acaba carregando certa umidade devido ao processo de evaporação da água. Devido a força do vento, algumas gotículas também são arrastadas. Depois de passar pelo corpo da torre, o ar úmido e as gotículas continuam subindo e passam por um eliminador de gotas, onde praticamente todas as gotículas ficam e só o ar úmido passa para ser liberado na atmosfera.

Abaixo é listada uma série de procedimentos para ligar a torre de resfriamento de maneira correta e também desliga-la.

Antes de ligar a bancada alguns procedimentos devem ser efetuados:

- Verifique se a área de trabalho ao redor da bancada esta limpa, para evitar acidentes;
- Verifique se a tomada, do sistema elétrico, esta desconectada da tomada;
- Se estiver conectada, desconecte a e termine os passos a seguir (a voltagem é alta 380V, tome cuidado);
- Verifique se não há alguma modificação na bancada;
- Feche as válvulas de drenagem de água na parte inferior da bancada;
- Verifique se ambas as chaves elétricas estão desligadas (posição OFF);
- Verifique se os interruptores das resistências estão todos desligados;
- Verifique se há uma mangueira para fonte de água;
- Complementar futuramente após implementação da bancada (PG 2).

Depois de realizar TODOS os passos acima, realize os procedimentos abaixo para ligar a bancada.

- Abra a torneira da fonte de água e espere até que o tanque de nível constante esteja cheio. Você vai saber quanto ele estiver cheio quando observar um fluxo de água pelo dreno;
- Abra a válvula de controle de fluxo de água (rotâmetro) no painel e ajuste o fluxo desejado. Aguarde ate observar a queda d'água pelos enchimentos da torre (isto pode demorar dependendo da vazão de água devido o enchimento de água na caixa das resistências);
- Verifique se para o fluxo desejado ainda há saída de água pelo dreno do tanque de nível constante (para assegurar que a vazão através da torre seja constante, parte da água deve sempre estar sendo descarregada pelo dreno). Se não houver saída de água pelo dreno, aumente a vazão de entrada de água na caixa d'água ate observar saída pelo dreno ou diminua a vazão de água para o corpo da torre. Se a vazão de água pelo dreno da caixa d'água for muito alta, diminua a vazão de água para caixa para não desperdiçar este recurso;

- Deixe a água encher o tanque coletor, na base da torre, e passar através do sistema “overflow” (tubo em “U”, figura 52) do tanque para o dreno. O sistema de “overflow” deve ser sempre mantido cheio para impedir que o ar retorne.
- Abra a válvula de drenagem do tanque coletor para esvaziarlo. Ajuste a válvula de drenagem de modo que a água sempre cubra o sensor do termopar instalado no tanque coletor. Este sensor mede a temperatura de saída da água e deve sempre estar submerso. O fluxo de entrada de água na torre deve ser igual ao de saída do dreno do tanque coletor;
- Ligue a tomada do sistema elétrico;
- Ligue as duas chaves elétricas (posição “ON”);
- Ligue o ventilador. O fluxo de ar pode ser controlado pelo orifício no início da tubulação de ar (perto da saída do ventilador). Um medidor vazão no painel mostra o fluxo de ar. Ajuste o fluxo de ar desejado.
- Ligue as resistências (ou parte delas) para aquecer a água.

Após a conclusão destes passos a prática experimental com a bancada esta pronta para ser iniciada. Após a prática a bancada deve ser parada de modo adequado.

Para procedimentos de parada da bancada experimental

- Desligue o ventilador;
- Desligue as resistências;
- Desligue as duas chaves elétricas (retorno para a posição “OFF”);
- Feche a válvula de suprimento de água;
- Abra todas as válvulas de drenagem e esvazie o sistema.

### **5.3. Restauração da bancada experimental**

Após a descrição (revisão bibliográfica, item 1.3) de como o equipamento se encontrava a 5 anos atrás, seguem os fatos em ordem cronológica de como a manutenção da bancada foi feita. No final deste tópico a uma síntese da manutenção ate agora realizada.

Num primeiro momento a bancada encontrava-se superficialmente muito suja. Através do vidro do medidor de vazão de água pudemos notar que ele estava completamente cheio de sujeira, possivelmente lama e ferrugem. O medidor foi retirado, juntamente com uma válvula de controle de fluxo na parte inferior. Ambos (medidor e válvula) foram limpos para futura montagem.



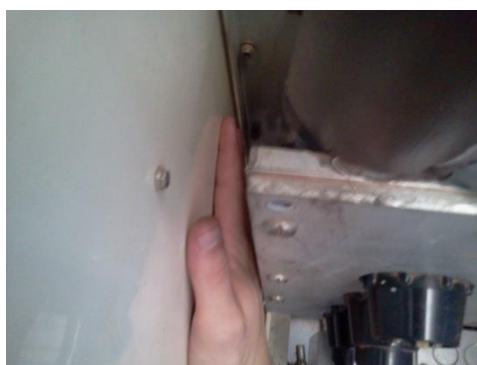


**Figura 5.13 - Rotâmetro da bancada sujo (foto tirada pelo autor).**

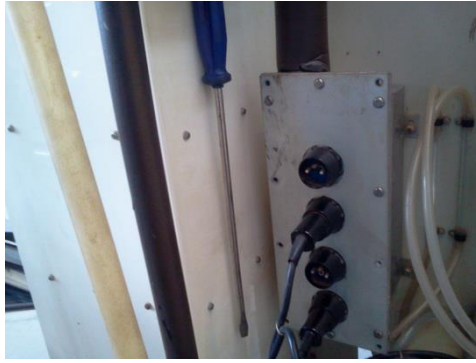


**Figura 5.14 - Rotâmetro da bancada após ser limpo (foto tirada pelo autor).**

A caixa onde encontram se as resistências foi desmontada a fim de se conhecer seu interior e, se necessário, realizar algum tipo de manutenção. A remoção dos parafusos que fecham a caixa foi de extrema dificuldade, pois além deles estarem velhos e um pouco enferrujados, a posição que a caixa se encontra na bancada não facilita a remoção dos parafusos que estão muito apertados, tendo pouco espaço para utilização das ferramentas (figura 5.14). Para o primeiro desmonte foi necessária a ajuda de uma segunda pessoa e de ferramentas muito grandes para conseguir gerar torque suficiente para desmontar esta caixa e não espanar os parafusos.



**Figura 5.15 - Espaço pequeno dificulta a manutenção (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.16 - Ferramenta necessária para soltar os parafusos (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.17 - Desmonte da caixa de resistências (foto tirada pelo autor).**

Quando aberta a caixa, as resistências foram retiradas. Tanto o interior da caixa como as resistências encontravam-se num estado deplorável, extremamente sujas com lama e ferrugem e outros elementos não detectados (figura 5.17, 5.18 e 5.19). Foi feita uma limpeza e a resistência foi posta de lado para futura montagem.



**Figura 5.18 - Interior da caixa de resistências no momento em que foi aberta (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.19 – Resistências no momento em que a caixa foi aberta (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.20 – Resistências e o interior da caixa (foto tirada pelo autor).**

Na desmontagem dos sensores (os que a torre ainda possuía), todos estavam em péssimas condições (5.20 e 5.21). Funcionavam, mas sua calibração correta seria impossível, devido ao tempo e a falta de cuidado em que foram expostos. Sua confiabilidade seria muito baixa e o erro de medição muito grande. Todos eles devem ser trocados.



**Figura 5.21 - Posição do termômetro que mede a temperatura de entrada da água (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.22 - Termômetro comprometido devido ao longo tempo sem manutenção (foto tirada pelo autor).**

Uma conversa com um ex-aluno da UnB, o engenheiro Ricardo Luis Cortes de Oliveira, foi sugerida pelo Professor Pimenta para ver a questão dos sensores e uma possível modernização da torre de resfriamento.

Em conversa com o Sr. Ricardo Luis, o mesmo sugeriu a troca de todos os sensores, pois os mesmos, mesmo conseguindo fazer uma leitura diferencial, estavam em condições péssimas, devido ao longo período sem cuidados, necessários para sua preservação. Além de novos sensores, foi sugerida uma modernização computacional (necessidade de um software) para poder acompanhar o funcionamento, em tempo real, dos sensores por meio de uma tecnologia de envio de dados wi-fi.

No dia 23/01/2013 foi efetuada a troca de algumas mangueiras da torre. As mangueiras antigas apresentavam um aspecto de desgaste e estavam muito sujas e comprometidas (figura 5.22 e 5.23). Após a troca destas mangueiras a bancada obteve uma grande melhora visual (figura 5.24 e 5.25).



**Figura 5.23 - Mangueiras velhas e comprometidas (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.24 - Comparação da mangueira que foi substituída (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.25 - Parte inferior da bancada após a troca das mangueiras (foto tirada pelo autor).**



**Figura 5.26 - Detalhe do tanque coletor de água após troca das mangueiras (foto tirada pelo autor).**



Em outro dia de manutenção, constatou-se que com as trocas das mangueiras, a parte mecânica já estava revisada. Neste mesmo dia, deu-se início ao teste dos equipamentos elétricos. As resistências da bancada foram testadas utilizando um multímetro que o LaAR possui (ICEL GUBINTEC AW-2500, figura 5.26). Foi aplicado o teste de continuidade para ver se existia algum comprometimento físico das resistências. Por este teste, as resistências foram aprovadas. Em outras partes do equipamento elétrico foi aplicado o mesmo teste, entretanto o teste não foi muito conclusivo, sugerindo talvez que houvesse algum comprometimento de parte dos componentes elétricos.



**Figura 5.27 - Multímetro ICEL GUBINTEC AW – 2500 (foto tirada pelo autor).**

Para refazer os testes que haviam falhado e também testar outras partes elétricas, dois alunos de engenharia elétrica da UnB, Elisa de Oliveira Monteiro e José das Neves Júnior, foram convidados para prestar auxílio. Foram retirados os quatro fusíveis que pertenciam ao circuito das resistências. Estes encontravam-se na parte frontal da bancada (figura 56) ao lado dos interruptores das resistências. Testados os componentes pelo método da continuidade, os mesmos estavam aptos para uso. O painel elétrico foi testado logo em seguida. Depois de acionar o interruptor e assim fechar o circuito elétrico foi aplicado o teste de continuidade, onde a parte elétrica foi liberada para uso. Todos os testes para a parte elétrica foram feitos com a bancada desligada de uma fonte de energia para evitar possíveis acidentes devido a alta voltagem (380V) da bancada.



**Figura 5.28 – Interruptores das resistências. (foto tirada pelo autor).**

Na semana seguinte estava agendado o primeiro teste completo (parte mecânica e elétrica) da bancada. Quando a mangueira foi acoplada à banca a água subiu até a caixa na parte superior da bancada e nenhum problema foi encontrado. Entretanto, quando a água chegou na parte das

resistências, a mesma apresentou grande vazamento. O material de isolamento estava muito comprometido, pois estava velho. A continuação do teste foi cancelada até o problema ser corrigido.

Uma borracha foi comprada para servir de material para isolamento (figura 5.28). O mesmo foi dimensionado e cortado no tamanho correto para ser usado na caixa das resistências com a ajuda de um estilete. A caixa foi desmontada e o novo isolante foi colocado para ser iniciado, no mesmo dia, o segundo teste da bancada. O sistema de água foi ligado e quando a água chegou a caixa, a mesma não apresentou mais vazamentos. Entretanto a parte elétrica não foi ligada neste dia. Como o equipamento é antigo e não tinha sido testado nos últimos anos, algum eventual problema poderia acontecer, e, por motivos de segurança, foi decidido que por não haver outra pessoa presente no bloco no momento (era sexta feira de noite), ela seria ligada outro dia.



**Figura 5.29 - Borracha utilizada para vedar a caixa das resistências (foto tirada pelo autor).**

No começo da outra semana, o bloco estava com a presença de muitas pessoas. Foi pedido a alguns membros da equipe de competição da mecânica DRACO VOLANS, que estavam presentes no bloco, para que acompanhassem o teste da bancada, pelos motivos de segurança já citados. Após ligar o sistema de água e a água encher a caixa das resistências, a parte elétrica foi ligada. O ventilador pode ser ligado pelo painel de controle, assim como todas as quatro resistências. Podíamos perceber a presença de vapor d'água na saída de ar, então tudo certo pelo caminho percorrido pelo ar. Para testar se as resistências estavam funcionando, o ventilador foi desligado e pudemos perceber a presença de água quente pela saída do tanque coletor. A bancada finalmente funcionou.

Entretanto, mesmo com a bancada funcionando, novamente tivemos problemas com vazamentos. A parte de metal entre os encaixes da caixa de resistências permitia a passagem de água entre as frestas (figura 5.29).



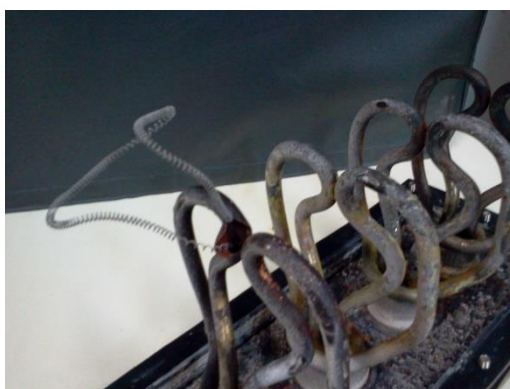
**Figura 5.30 - Fresta entre partes de metal da caixa de resistências elétricas.**

O isolamento foi novamente trocado, desta vez o conjunto antigo foi substituído por um isolamento mais espesso (figura 5.30) para evitar o uso das partes metálicas e consequentemente os vazamentos entre estas partes. O problema foi resolvido.



**Figura 5.31 - Novo isolamento de borracha em comparação com o antigo borracha-metal-borracha.**

Depois de saber se que a bancada já estava sem vazamentos, tivemos de testar os componentes para saber se os mesmos se encontravam em boas condições de uso. Das quatro resistências existentes, duas não estavam funcionando e uma outra estourou durante um teste com a bancada (figura 5.31).



**Figura 5.32 - Rompimento da resistência elétrica durante teste.**

Em conversa com o professor Pimenta, a hipótese da resistência ter estourado é de que ela apresentava alguma fissura por onde deve ter tido a passagem de água para o seu interior. Em seguida quando a mesma foi ligada, a água vaporizou, aumentando muito a pressão interna, fazendo a resistência estourar.

Por motivos de segurança, o fio interno da resistência foi cortado.



**Figura 5.33 - Fio interno da resistência foi removido.**

Com apenas uma resistência funcionando agora, a água já não esquentava muito e isso poderia comprometer a utilização da bancada. Procurou-se então soluções para resolver este problema. Um grande empecilho foi a idade do equipamento, pois seu manual não tinha catálogo de peças ou um meio fácil de se comunicar com o fabricante para aquisição de novas peças.

A tentativa de aquisição de resistências semelhantes foi frustrada. Foi encontrada apenas um lugar em Brasília onde se trabalhava com resistências deste tipo, entretanto mesmo com um grande variedade de modelos, não foi encontrada um resistência que se enquadrava nas necessidades de tamanho, potencia para a bancada e entrada para o plug de energia.

Para resolver o problema, uma adaptação ou construção de uma nova caixa de resistências (ou outro método para esquentar água) deveria ser feita. Entretanto, em paralelo da ideia de substituição destas peças, houve a tentativa de conserto das resistências antigas. Após o desmonte e uma análise mais profunda, foi constatado que as mesmas não funcionavam devido a um dispositivo de trava automático (figura 5.33) que foi acionado de maneira indevida.



**Figura 5.34 - Dispositivo de trava automático da resistência elétrica.**

Este dispositivo deveria ter sido acionado apenas quando a resistência se rompesse, entretanto o mesmo foi acionado não se sabe o motivo, talvez pela idade, houve deterioração de algum componente do dispositivo, fazendo-o ser acionado de forma equivocada.

As duas resistências que não funcionavam foram desmontadas e o dispositivo de trava foi retirado. Isso possibilitou a volta de sua funcionalidade normalmente.



Com as resistências funcionando, a água estava finalmente esquentando, mas surgiu um novo problema. Por algum motivo desconhecido, a bancada estava dando descargas elétricas em toda sua estrutura metálica, tornando o uso da bancada potencialmente perigoso.

Após uma análise mais precisa do problema e das condições de operação da bancada foi decidido colocar um fio terra na parte exterior da carcaça das resistências elétricas (figura 5.34). Isso solucionou o problema.



**Figura 5.35 - Fio terra colocado na carcaça das resistências elétricas.**

A cor do fio terra escolhida foi a verde, seguindo a norma da NBR 5410 item 6.1.5.3.2 de novembro de 1997. O item diz que na falta de fio de dupla coloração, verde e amarelo, admite-se o uso do fio da cor verde.

Outro instrumento da bancada que não funcionava da maneira adequada, era o manômetro utilizado para medir a vazão do ar. Após análise, foi constatado que o reservatório de água do manômetro possuía um pequeno furo, da ordem de 1 décimo de milímetro. Este pequeno furo na parte inferior do reservatório, só foi detectado, pois o nível da coluna d'água que marcava a vazão de ar mudava de um dia para o outro quando a bancada era testada.

O reservatório foi soldado com solda TIG (o reservatório era feito de Aço Inox) para evitar problemas futuros (figura 5.35 e 5.36).



**Figura 5.36 - Reservatório de água do manômetro utilizado para medir a vazão de ar.**



Figura 5.37 - Ponto de solda TIG no reservatório de água do manômetro.

Após a realização de alguns testes e medições, a bancada voltou a apresentar problemas. A parte elétrica da bancada parou de funcionar, tanto as resistências elétricas como o ventilador, entretanto as luzes dos interruptores das resistências continuam acesas, indicando que a bancada recebia energia elétrica e isto não era problema com o cabo. Descobriu-se que outra resistência apresentou defeito e parou de funcionar. Não se soube a causa do problema. Mesmo com esta descoberta, a parte elétrica da bancada não voltava a funcionar. Por isso foi feita uma verificação no painel elétrico (figura 5.38).

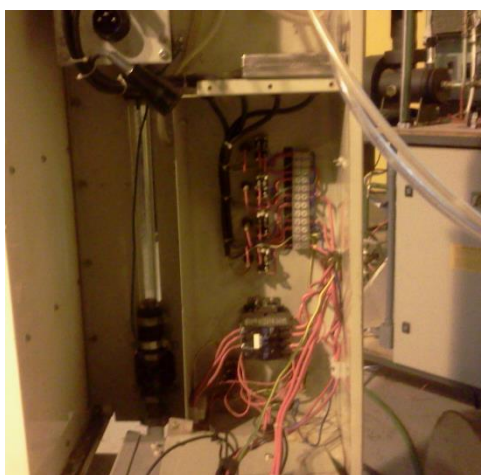


Figura 5.38 - Painel elétrico da bancada.

Após uma detalhada análise do painel elétrico, não foi encontrado nenhum problema. Partiu-se então para análise da planta elétrica da bancada que se encontrava no manual da bancada. Após análise deste, foi constatado que a parte elétrica foi feita de tal forma que **precisa** ter ao menos duas resistências elétricas funcionando para a parte elétrica funcionar (resistências e motor). Além disso, estas duas resistências, **obrigatoriamente**, devem obedecer a uma configuração adequada, pois se ela não for obedecida, a parte elétrica não funciona.

Com as mudanças feitas, a bancada voltou a funcionar.

Não foram realizadas mais manutenções e/ou modificações na bancada até este ponto.

## 5.4. Equipamentos de medição de temperatura

Para esta bancada, dois tipos de equipamento de medição da temperatura tentaram ser implantados.

### 5.4.1. Termômetros digital tipo agulha

Foram comprados para a bancada alguns termômetros para serem usados na prática de laboratório. Estes termômetros são ilustrados na figura 5.38.



Figura 5.39 - Termômetro tipo agulha utilizado na bancada.

Abaixo listamos os dados que nos interessa do termômetro, segundo o fabricante:

- Faixa de temperatura:  $-50^{\circ}\text{C} \sim +300^{\circ}\text{C}$  ( $-58^{\circ}\text{F} \sim +572^{\circ}\text{F}$ );
- Precisão  $0,1^{\circ}\text{C}$ ;
- Erro  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  na faixa de  $-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ .

Podemos perceber que na faixa de trabalho da bancada a temperatura não irá ultrapassar os limites de  $-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ , logo o erro, segundo o fabricante, será de no máximo  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### 5.4.2. Equipamento de medição e monitoramento com CPU

Este equipamento permite a medição e monitoramento da temperatura de forma instantânea e pelo computador. Ele foi doado para testes pela empresa ATOMATA – Tecnologia em Informática.

Devido a problemas que a empresa teve com os fornecedores de hardware, o projeto não pode ser feito completamente.

Primeiramente, o equipamento (figura 5.39) deveria fazer a medição de temperatura em tempo real da bancada em diversos pontos e transmiti-los via wireless para um computador. Pelos motivos acima citados, a empresa só pode fornecer em tempo hábil, um equipamento que fizesse a transmissão da informação via cabo USB-Serial. Além disso, a informação recebida pelo computador não era a temperatura da água, apenas um valor de voltagem para depois se calcular a temperatura.



Figura 5.40 - Equipamento da Empresa AUTOMATA.

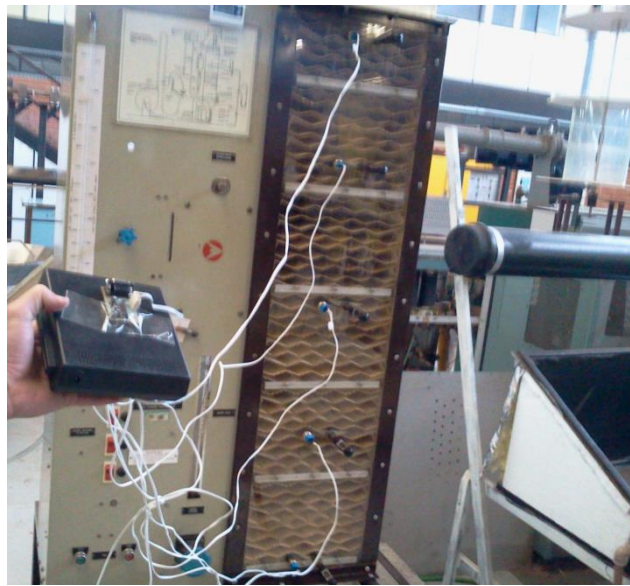


Figura 5.41 - Equipamento instalado na bancada.

Algumas características do equipamento:

- Envio dos dados em formato .csv contendo o valor medido, o dia e o horário da medição e o sensor correspondente;
- O tempo de envio da leitura do sinal pode ser configurado. O envio de sinal para o computador pode ser feita no intervalo de interesse.
- O tempo que o equipamento registra as leituras também pode ser alterado.

Para teste, as configurações do equipamento foram de envio de sinal a cada 5 segundos e o tempo de registro das leituras de 10, 20, 30, 40, 50 ou 60 minutos.

A interface do software é simples e de fácil controle. Assim que selecionado o tempo para registro das leituras, basta clicar em “Conecta” para ele ser iniciado (figura 5.41).

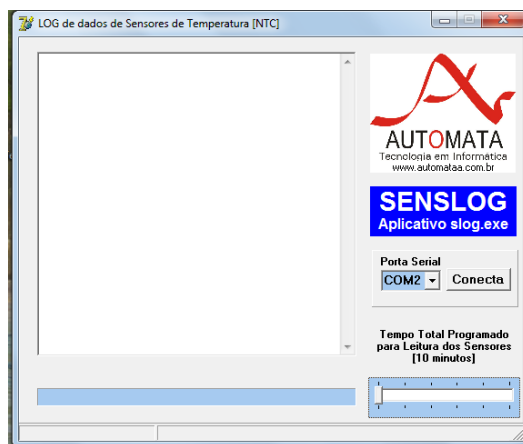


Figura 5.42 - Interface do software da empresa AUTOMATA.

Quando iniciado o software fará a leitura de 5 em 5 segundos de cada sensor e durante o tempo determinado como mostra a figura 5.42.

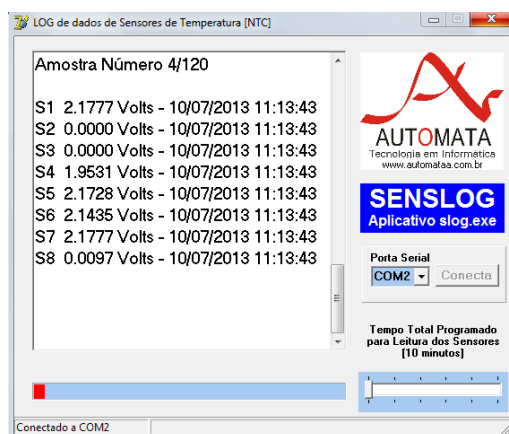


Figura 5.43 - Funcionamento do software da empresa AUTOMATA.

O sensor utilizado por este equipamento é um sensor de temperatura de injeção eletrônica de automóvel modelo 4051. Qualquer sensor que fizesse a leitura da temperatura e pudesse gerar um sinal elétrico correspondente poderia ser utilizado. Este foi escolhido por ser um sensor de qualidade, ter a possibilidade de ser rosqueado na bancada (sem alterar o tamanho do furo da bancada), (figura 5.44) e ser relativamente muito barato e de fácil acesso.

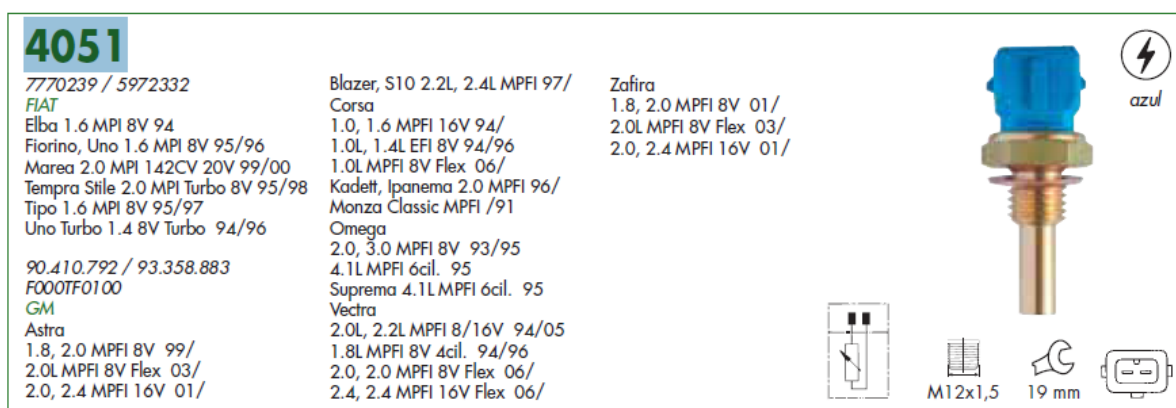


Figura 5.44 - Sensor de injeção eletrônica modelo 4051



Figura 5.45 - Detalhe do sensor acoplado na bancada.

Para cálculo da temperatura foi utilizado a equação de Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = a + b * \ln(R) + c * \ln^3(R), \quad (55)$$

onde os valores de “a”, “b” e “c” devem ser especificado para cada dispositivo (valor tabelado em função da resistência do sensor a temperatura de 25°C). O valor R é a resistência em Ohms e a temperatura é dada em graus Kelvin (°K).

Como o software apresenta apenas os valores de voltagem de cada sensor, a empresa forneceu uma tabela com valores de voltagem e sua correspondente resistência, para assim poder calcular a temperatura no sensor.

Com os dados da tabela fornecida traçou-se uma curva (figura 5.45) para achar a relação da voltagem e da resistência do sensor.

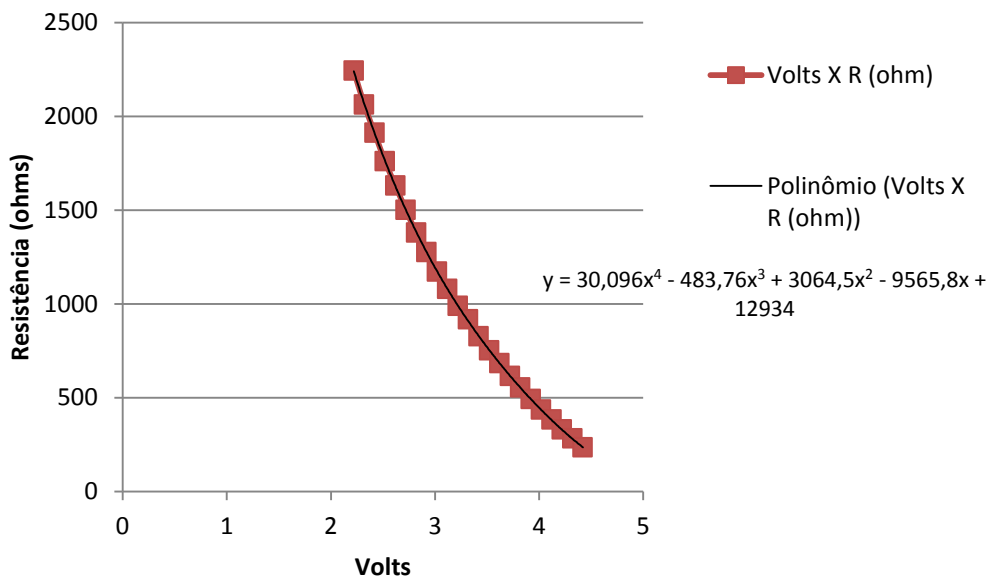


Figura 5.46 - Curva dos valores de resistência em função da voltagem.

Através de uma tabela pudemos descobrir o valor de “a”, “b” e “c”:

$$a = 1,498872 * 10^{-3}$$



$$b = 2,379047 * 10^{-4}$$

$$c = 1,066953 * 10^{-7}$$

Agora com os valores de reescrevendo a equação de Steinhart-Hart com os valores obtidos temos:

$$\frac{1}{T} = 1,498872 * 10^{-3} + 2,379047 * 10^{-4} * \ln(R) + 1,066953 * 10^{-7} * \ln^3(R), \quad (56)$$

que foi a equação utilizada para cálculo da temperatura em cada sensor.

Como o arquivo gerado pelo software é em formato CSV, tendo posse desta equação, o cálculo das temperaturas nos sensores é rápido e fácil, além da facilidade manipular os dados devido ao formato do arquivo.

Este equipamento não teve oportunidade de ser testado na bancada, devido a problemas funcionais da parte elétrica da bancada que não funcionou nos dias dos testes programados.

De maneira geral o equipamento se mostrou muito bom mesmo nesta versão que foi feita as pressas. Também há a facilidade de se manipular os dados devido ao formato do arquivo CSV gerado pelo software.

Com um trabalho bem feito e com mais tempo este equipamento poderia além de medir a temperatura ao longo da bancada, as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco no interior da torre (com o auxílio de um psicrômetro).

## 5.5. Ajuste do controle de vazão de água

Para melhor uso da bancada, fez-se a calibração da válvula de controle de vazão de água. No painel de controle podemos observar esta válvula (válvula azul). Em conjunto com o rotâmetro esta válvula indica a vazão de água que utilizamos.

Para esta calibração, faz-se uso do tanque coletor da bancada (figura 5.7). Este possui dois marcadores que indicam quando o nível do tanque esta em 4 litros. Fechando-se todas as válvulas de dreno na parte inferior da bancada e marcando o tempo que o nível de água no tanque coletor demora para passar a marca de 4 litros, podemos calcular a vazão de água.

Foi tomado vários valores de tempo para cada marca lida no rotâmetro e montamos a tabela abaixo:

**Tabela 5.1 – Tempo gasto, para vários níveis do rotâmetro, para encher a marca de 4 litros do tanque coletor de água.**

Nível do rotâmetro	Tempo para encher a marca de 4 litros	Fluxo de água (L/s)
5	233,14	0,017157
7	181,4	0,022051

9	146,51	0,027302
11	123,81	0,032308
13	106,85	0,037436
15	94,97	0,042119
17	83,77	0,047750
19	74,19	0,053916
21	66,08	0,060533
23	58,32	0,068587
25	53,02	0,075443

Com esta tabela conseguimos traçar um gráfico:

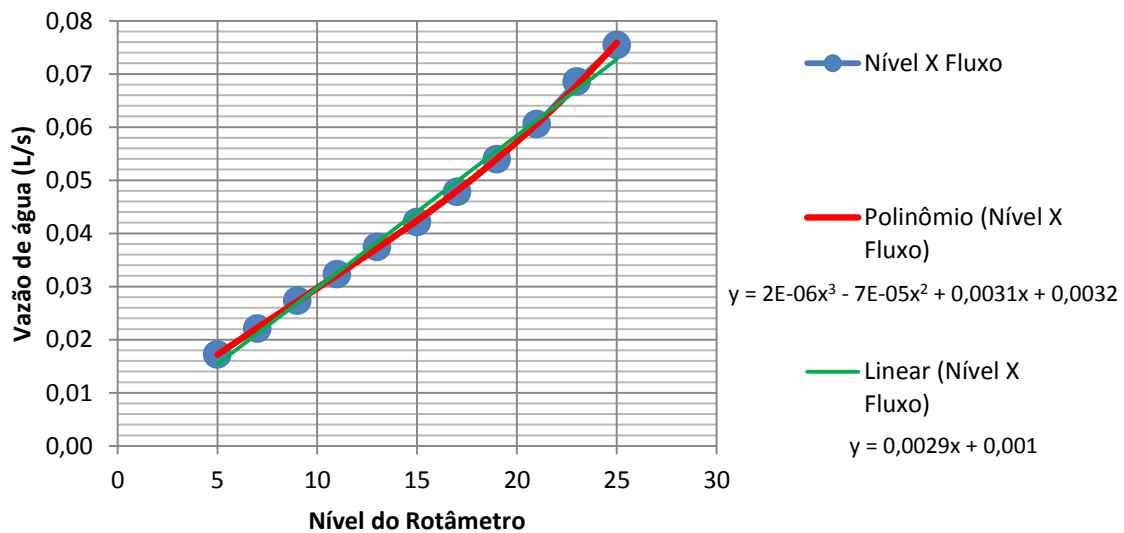


Figura 5.47 - Curva de calibração da vazão de água.

Onde os valores em azul são os medidos experimentalmente, a curva vermelha é uma aproximação polinomial de grau 3 e a curva verde é uma aproximação linear.

É importante comentar que há pequenas vazões de água para marcas abaixo do nível 0 do rotâmetro. Isso acontece por causa do rotâmetro utilizado.

Devido a boa aproximação e por simplicidade, será adotada a aproximação linear para cálculo da vazão de água nas práticas experimentais. A vazão é dada em  $m^3/s$ .

$$\text{Vazão de água} = 0,0029 * \text{nível do rotâmetro} + 0,001 \quad (57)$$

## 5.6. Ajuste no controle da vazão de ar

A banca atualmente possui um sistema para variar a vazão de ar que percorre o interior da torre. Entretanto este sistema não consegue nos dar uma boa variação da vazão de ar. A vazão de ar máxima é de 420  $m^3/h$  enquanto a vazão mínima é de 410  $m^3/h$ . Com esta pequena variação, não conseguimos ter a real noção da influencia da vazão de ar no arrefecimento de água.



Para poder ter uma maior variação da vazão de ar circulante dentro da torre, foi criado um sistema na entrada de ar do ventilador centrifugo. Este sistema (figura 5.47) foi instalado de tal forma que podemos variar a vazão de ar de 0 m<sup>3</sup>/h até a vazão de 420 m<sup>3</sup>/h.



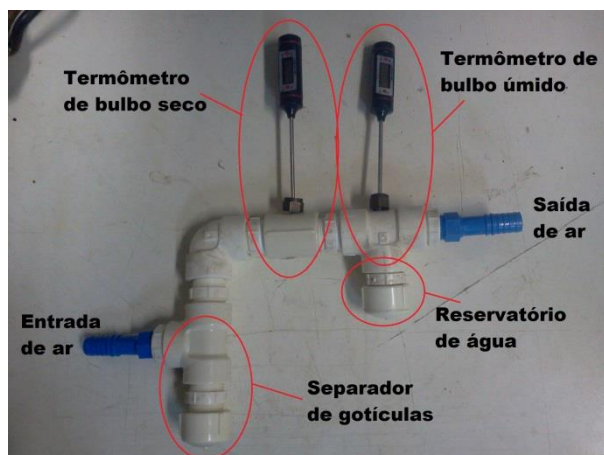
**Figura 5.48 - Sistemas utilizados para variar as vazões de ar.**

Entretanto este sistema não é a melhor solução. Devido a configuração deste sistema, não é aconselhado deixar o ventilador funcionando a baixas vazões de ar (abaixo de 150 m<sup>3</sup>/h), pois como tapamos grande parte da entrada de ar do ventilador, acabamos por forçar mais o motor acoplado ao ventilador, podendo este estragar.

## **5.7. Construção do psicrômetro**

Para melhorar a operação e as práticas da bancada, foi construído um psicrômetro. Este psicrômetro em especial tinha o objetivo de se enquadrar as necessidades da bancada experimental para medir as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar dentro da torre. Resumidamente, o psicrômetro é um equipamento utilizado para se medir a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido do ar.

A figura 5.48 ilustra o psicrômetro construído, com a utilização de dois termômetros tipo agulha e algumas conexões de PVC com rosca.



**Figura 5.49 - Psicrômetro construído para a bancada**

Temos a entrada de ar pelo bocal azul do lado esquerdo. O ar passa pelo separador de gotículas (utilizado para separar eventuais gotículas de água quando este for utilizado na torre), depois pelo termômetro de bulbo seco e depois pelo de bulbo úmido saindo pela saída de ar, como podemos observar na figura 5.48.

Para fazer o termômetro de bulbo úmido, foi utilizado um tecido na ponta do termômetro (figura 78) e o restante do tecido foi imerso no reservatório de água, deixando a ponta do termômetro na altura no escoamento de ar. Por difusão, a água do reservatório de água sobe pelo tecido e configuramos assim um termômetro de bulbo úmido.



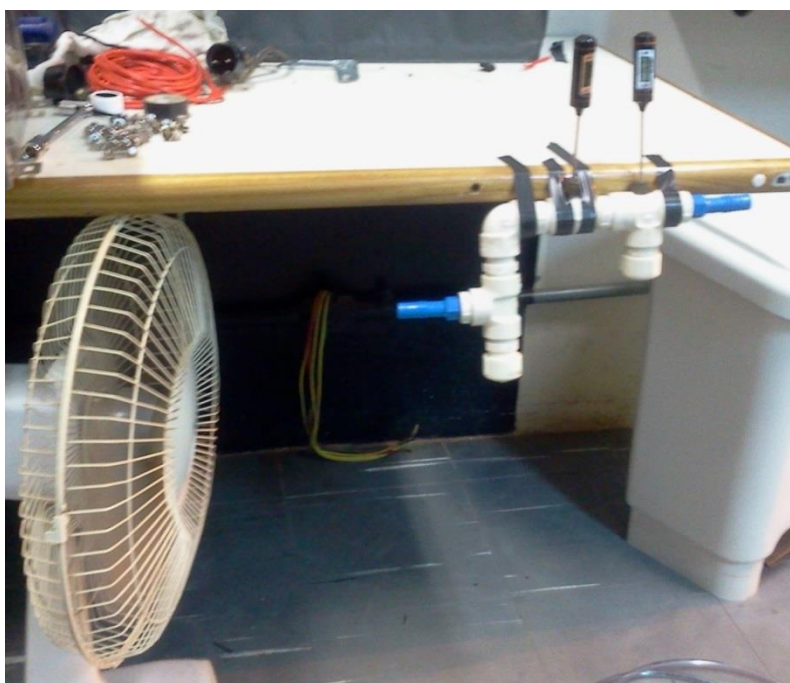
**Figura 5.50 - Termômetro com tecido (bulbo úmido)**

Para validar seu funcionamento, os dois termômetros tipo agulha utilizados marcavam a mesma temperatura no instante antes do teste (para termos um menor erro associado) como mostra a figura 5.50.



**Figura 5.51 - Termômetros do psicrômetro antes do início do teste. Temperatura de bulbo seco igual 20,2°C e temperatura de bulbo úmido igual a 20,2°C.**

Selecionado os termômetros, partimos para a configuração de teste como mostra a figura 5.51.



**Figura 5.52 – Ventilador induzindo corrente de ar no Psicrômetro da bancada**

O ventilador induziu uma corrente de ar por dentro do psicrômetro e a assim, após alguns minutos esperando a temperatura estabilizar, pudemos ver a diferença lida nos dois termômetros, como mostra a figura 5.52.



**Figura 5.53 – Termômetros do Psicrômetro durante o teste quando a temperatura estabilizou. Temperatura de bulbo seco igual a 20,1°C e temperatura de bulbo úmido igual a 15,2°C.**

O teste mostrou que o psicrômetro marcou uma boa variação das temperaturas medidas. Sendo assim sua utilização será testada na bancada experimental.

### **5.8. Primeiros testes realizados após restauração**

Com grande parte dos problemas da torre solucionados, conseguimos fazer os primeiros testes com a bancada. Entretanto alguns testes tiveram de ser interrompidos ou adiados devido a problemas adversos que aconteceram na fase de testes.

Para se entender melhor os testes realizados, os pontos de medição de temperatura da torre foram fixados em 7 pontos sendo estes de 0 a 6, conforme ilustra a figura 5.53.

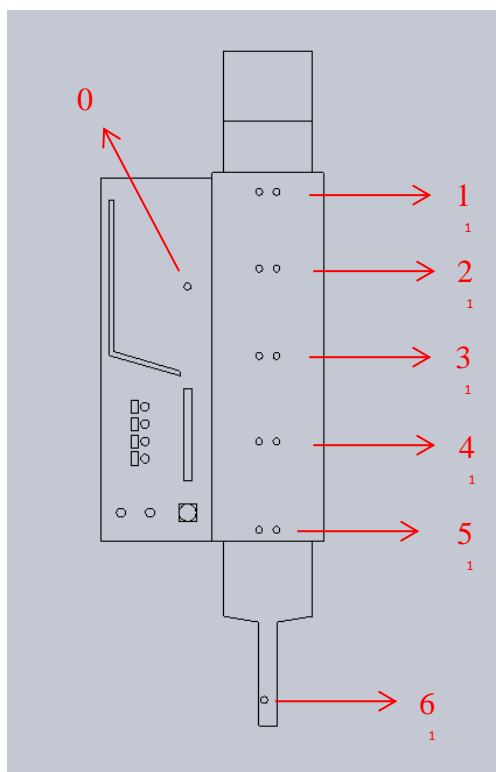


Figura 5.54 - Pontos de medição de temperatura de água da bancada.

O ponto 0 é o ponto imediatamente após a água passar pelas resistências elétricas.

O ponto 1 a 5 corresponde aos pontos do corpo da torre, no sentido da vazão de água.

O ponto 6 corresponde ao ponto no tanque coletor de água.

### 5.8.1. Teste com a vazão de água

Nas tabelas abaixo foram medidas as temperaturas ao longo da torre para duas vazões de água diferentes, com vazão de ar fixa em 410 m<sup>3</sup>/h. Para comparação da taxa de resfriamento, estabilizou-se a temperatura inicial em ambos os casos em aproximadamente 42°C. Na tabela 5.2 a vazão de água (nível 16 do rotâmetro) corresponde a 0,0474 L/s e foi utilizado a potência de três resistências elétricas para se aquecer a água e chegar a temperatura de 41,8°C . Na tabela 7 a vazão de água (nível 12,5 do rotâmetro) corresponde a 0,03725 L/s e foi utilizado a potência de duas resistências elétricas para se aquecer a água e chegar a temperatura de 42,1°C.

Tabela 5.2 - Temperatura da água ao longo da torre para uma vazão de 16,0 na escala do rotâmetro.

	Pontos (altura)	Temperatura °C
<b>Vazão nível 16</b>	0	41,8
	1	39,9
	2	28,9
	3	24,0
	4	21,6
	5	20,3
	6	19,4

Tabela 5.3 - Temperatura da água ao longo da torre para uma vazão de 12,5 na escala do rotâmetro.

	Pontos (altura)	Temperatura °C
<b>Vazão nível 12,5</b>	0	42,1
	1	39,3
	2	26,4
	3	22,7
	4	20,6
	5	19,5
	6	18,9

Com estas tabelas pudemos elaborar um gráfico para comparar os dados:

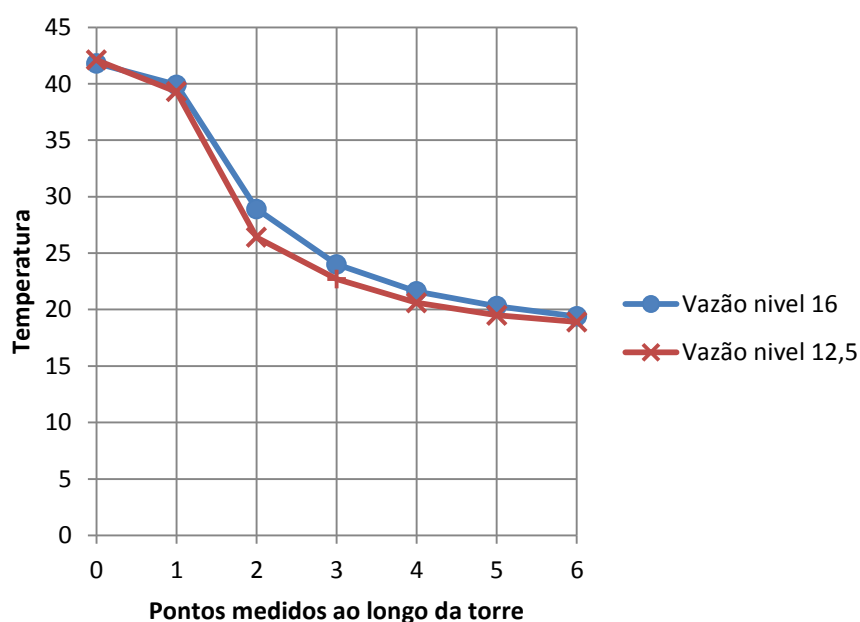


Figura 5.55 - Comparação, para duas vazões de água, da taxa de decaimento da temperatura.

Como o esperado, o comportamento da curva com maior vazão apresenta uma taxa de decaimento da temperatura menor, mesmo no final chegando a um valor muito próximo. Esta proximidade dos valores finais se explica devido a grande vazão de ar (410 m<sup>3</sup>/h). Também como o esperado, é interessante notar que em ambos os casos conseguimos atingir temperaturas abaixo da temperatura ambiente (na hora do experimento a temperatura ambiente marcava aprox. 21,1 °C).

### 5.8.2. Teste com a vazão de ar

Para o teste da influencia da vazão de ar na torre de resfriamento, foi utilizado vários valores de vazão de ar e para cada um deles foi medida a temperatura, para traçar as curvas de decaimento da temperatura. Os gráficos foram colocados juntos (figura 5.55) para melhor análise. Foram utilizadas as vazões de 200 m<sup>3</sup>/h, 300 m<sup>3</sup>/h e 400 m<sup>3</sup>/h. Também foi plotada a curva do ventilador desligado (vazão 0 m<sup>3</sup>/h).

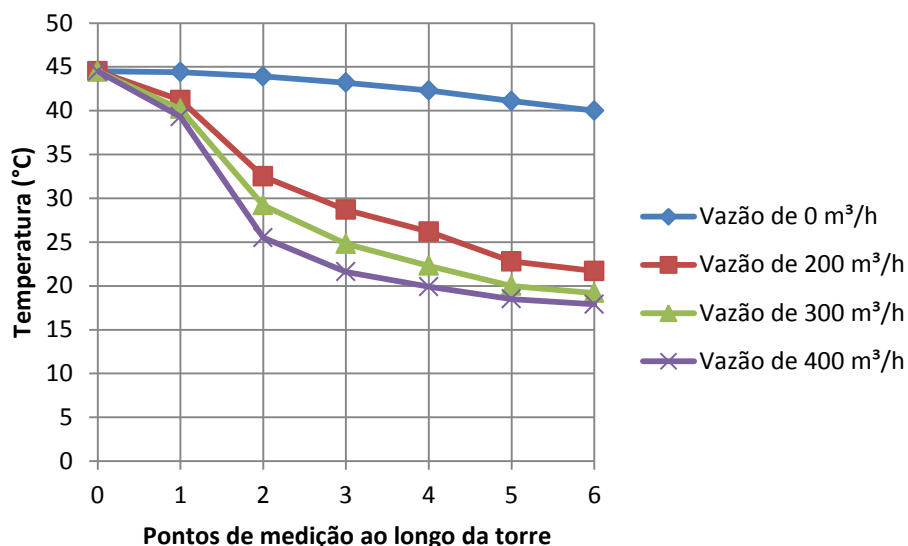


Figura 5.56 – Comparação, para várias vazões de ar, do decaimento da temperatura.

Observou-se neste teste a influencia da vazão de ar no decaimento da temperatura. O resultado obtido foi o esperado.

### 5.8.3. Teste comparativo entre termômetros e equipamento AUTOMATA

Um teste de comparação de medição entre o equipamento fornecido pela empresa AUTOMATA e os termômetros tipo agulha foi feito em condições semelhantes para se avaliar a dispersão dos dados encontrados. Para isso foram realizados dois testes.

Em ambos os testes, as temperaturas medidas foram no corpo da torre (posições 1, 2, 3, 4 e 5 da figura 5.53), para uma mesma vazão de água e mesma vazão de ar.

O primeiro deles foi feito para uma mesma vazão de água (14 na posição do rotâmetro) e com o ventilador desligado.

O gráfico abaixo ilustra a comparação dos dados obtidos.

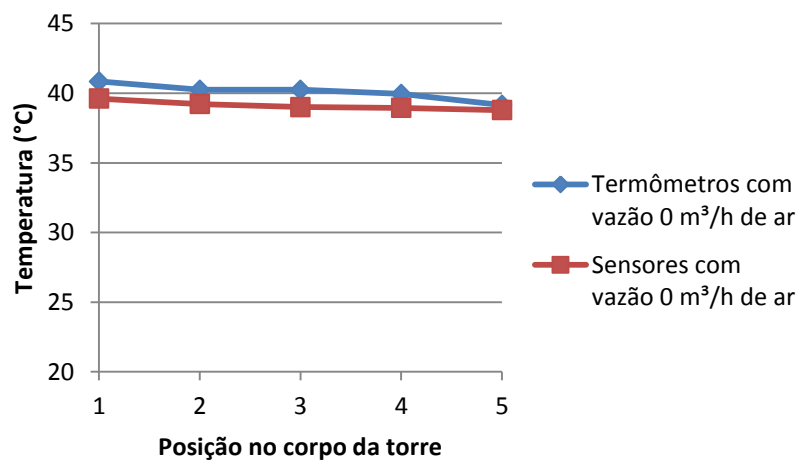


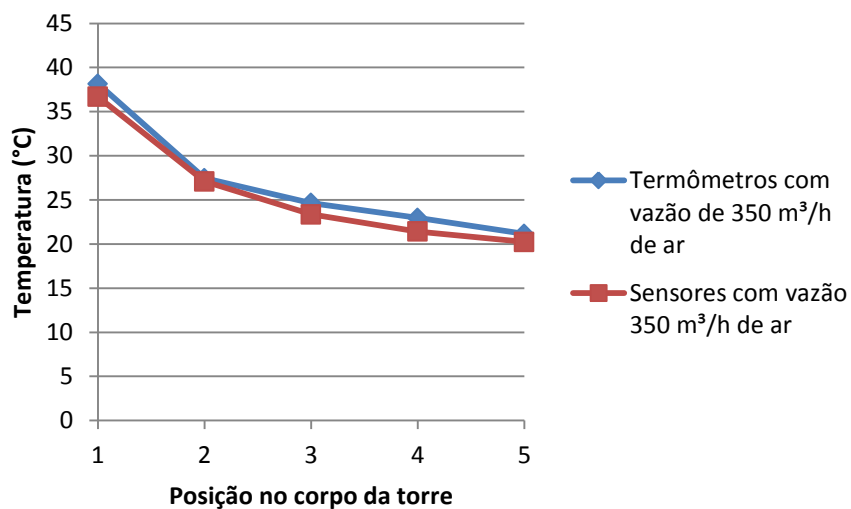
Figura 5.57 – Comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e ventilador desligado.

A tabela abaixo mostra os dados obtidos para traçar o gráfico da figura 5.56.

**Tabela 5.4 – Valores obtidos da comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e ventilador desligado.**

Posição	Temperatura dos Termômetros (°C)	Temperatura dos Sensores (°C)
1	40,85	39,61
2	40,25	39,22
3	40,25	39,01
4	39,95	38,95
5	39,15	38,79

O segundo teste foi realizado com o ventilador ligado a vazão de 350 m<sup>3</sup>/h de ar. E para a vazão de nível 14 no rotâmetro.



**Figura 5.58 - Comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e vazão de ar a 350 m<sup>3</sup>/h..**

A tabela abaixo mostra os dados obtidos para traçar o gráfico da figura 5.57.

**Tabela 5.5 - Valores obtidos da comparação entre os termômetros tipo agulha e equipamento da empresa AUTOMATA para vazão igual a 14 no nível do rotâmetro e vazão de ar de 350 m<sup>3</sup>/h..**

Posição	Temperatura dos Termômetros (°C)	Temperatura dos Sensores (°C)
1	38,15	36,69
2	27,45	27,10
3	24,65	23,36
4	22,95	21,42
5	21,15	20,23

Concluimos que para ambos os equipamentos de medição conseguimos fazer leituras que correspondem ao que se era esperado. Entretanto o equipamento da empresa AUTOMATA apresentou valores um pouco menores que os dos termômetros. Isso por ser causado por uma variedade de erros



de qualquer um dos equipamentos. Para testar qual equipamento apresenta melhor resultado, deve-se fazer a aferição dos termômetros e/ou do equipamento da empresa AUTOMATA.

#### **5.8.4. Teste com o psicrômetro**

O teste do psicrômetro na bancada não apresentou bons resultados. A tentativa de fazer um modelo de psicrômetro utilizando os princípios abordados no manual da torre de resfriamento falhou. Pelo manual, o antigo psicrômetro da bancada (não se sabe o paradeiro do mesmo) funcionava com uma corrente de ar induzida pelo vácuo do ventilador da bancada. Este antigo psicrômetro possuía um canal (com pequenos orifícios para a passagem de ar) que era introduzido no interior da bancada (por meio dos orifícios da no corpo da bancada) e o ar de dentro era sugado pelo vácuo do ventilador. Entretanto, no teste com o novo psicrômetro, houve um grande arrasto de água para o interior do psicrômetro que nem mesmo o separador de gotículas do psicrômetro pode conter. Sendo assim as temperaturas de bulbo seco e úmido do psicrômetro não apresentaram um valor satisfatório para validação deste psicrômetro utilizando a metodologia acima.

## 6. Planejamento e elaboração de experimentos

*No capítulo 6 mostraremos as práticas laboratoriais que foram feitas ao longo do trabalho para a bancada em questão e comentaremos acerca do roteiro, metodologia e resultados obtidos durante as práticas.*

### 6.1. Introdução

Antes de dar início às práticas de laboratório com a bancada de torres de resfriamento, os alunos deveriam ter um primeiro contato com o tema, pois atualmente este tema é apenas citado em aula e não tem uma abordagem adequada. Para isso, uma aula teórica sobre este assunto foi feita na disciplina de Instalações Termomecânicas 2.

### 6.2. Aula teórica

Esta aula foi realizada durante o horário de aula da disciplina Instalações Termomecânicas 2, sobre a supervisão do professor da disciplina, professor Pimenta.

A aula teve duração de aproximadamente 60 minutos e teve como objetivo instruir os alunos acerca do tema. Foi utilizado o computador para apresentação de slides e alguns vídeos para auxiliar no ministério da aula e entendimento do assunto (os vídeos encontram-se no CD deste trabalho). Após esta aula, os alunos deveriam ser capazes de saber o que é e para que serve uma torre de resfriamento, saber diferenciá-las, classificá-las e qual delas é mais indicada para cada tipo de projeto.

Durante e após a aula, os alunos tiraram dúvidas sobre o tema ou alguma situação específica. A partir destas dúvidas foi feita uma pequena mudança na apresentação dos slides da aula para sanar estas possíveis dúvidas numa próxima apresentação.

Ao final da aula, foi dada uma atividade para ser feita em grupo sobre a aula. O objetivo desta atividade era avaliar o entendimento dos alunos sobre o tema. A atividade teve data de entrega de uma semana após o ministério da aula. Esta atividade se encontra no ANEXO Y. Para uma eventual dúvida sobre alguma questão da atividade, o material apresentado na aula e o capítulo dois “2.1 Torres de Resfriamento” foram disponibilizados na internet para os alunos.

Os slides da aula, já com as mudanças, se encontram no ANEXO I no final deste trabalho.

### **6.3. Práticas experimentais com a bancada**

Ao todo foram construídas três práticas de laboratório (ANEXOS II, III, IV e V). Cada prática esta dividida em 6 tópicos:

1. Objetivo;

No objetivo, temos de forma clara e direta o objetivo específico da prática.

2. Visão Geral;

Este item contextualiza o aluno ao tema de interesse da prática.

3. Equipamentos e instrumentação;

Neste item é abordado os equipamentos que serão utilizados na prática específica, assim como a instrumentação utilizada.

4. Atividade proposta;

Neste item elaboramos as questões que deverão ser realizadas pelo aluno para construção do relatório do experimento.

5. Relatório do experimento;

Neste item mostramos como a construção do relatório deverá ser feita.

6. Avaliação do experimento.

Neste item mostramos como será avaliado o experimento.

#### **6.3.1. Experimento 1**

O objetivo deste experimento é fornecer o primeiro contato dos alunos de graduação engenharia com a bancada de torre de resfriamento do Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração – LaAR. Isso será feito mediante a apresentação da bancada, dos seus componentes e de sua instrumentação. Também serão abordados os princípios de funcionamento e o modo de operação dos equipamentos.

#### **6.3.2. Experimento 2**

O objetivo deste experimento é realizar as primeiras medições na bancada experimental de torre de resfriamento e ver a influencia da vazão de ar no processo de troca de calor.

#### **6.3.3. Experimento 3**

O objetivo deste experimento é comparar e analisar a taxa de resfriamento da temperatura da torre em função da altura da torre, para alguns valores de vazão de água combinado com a vazão de ar.

#### **6.3.4. Experimento 4**

O objetivo deste experimento é calcular, com auxílio de dados climatológicos da região, a eficiência, o RANGE e o APPROUCH da torre.

## 7. Conclusões e Recomendações

*Neste, temos as conclusões finais do projeto. Comentaremos e analisaremos os cada um dos objetivos que foram ou não alcançados e o porquê disso. Analisaremos o trabalho como um todo para também fazermos recomendações gerais para o futuro.*

### 7.1. Dificuldades gerais do trabalho

De um contexto geral, este trabalho apresentou uma série de dificuldades que devem ser mencionadas.

Primeiramente a não abordagem deste tema dentro da Universidade de Brasília juntamente com a não utilização da bancada por muitos anos, não trouxe base para o início deste trabalho, dificultando a elaboração dos objetivos propostos.

A falta do manual da bancada durante a 1ª etapa (projeto de graduação 1) deste trabalho tornou mais lenta a manutenção e conserto da banca. Durante o intervalo da 1ª etapa e da 2ª etapa, o manual foi encontrado.

Devido ao longo tempo sem utilização e manutenção, a bancada apresentou uma série de pequenos problemas (que foram corrigidos) que impossibilitavam o avanço no trabalho de forma satisfatória. Destes problemas devemos dar destaque para a caixa de resistências da bancada e também para parte elétrica. A caixa das resistências apresentou varias vezes vazamentos e a parte elétrica constantemente falhava sem um motivo aparente.

Houve muita dificuldade durante a montagem e desmontagem de muitas partes da bancada (como demonstrado no capítulo 5). Em muitos momentos era necessário o auxilio de outra pessoa para desmontar ou montar determinada parte do equipamento com velocidade, entretanto este trabalho foi feito individualmente e nem sempre se tinha alguém disponível para um auxilio, deixando o caminhar do trabalho às vezes, lento. Para não paralisar o trabalho, isso era feito de forma individual, entretanto gastou-se um tempo muito maior para realizar estas atividades.

Houve um grande atraso do material que foi fornecido pela empresa AUTOMATA, impossibilitando a realização de uma gama de testes importantes com o equipamento. O equipamento que estava previsto para ser entregue no começo de maio (de 2013) só foi entregue (uma versão simplificada para ter tempo de testa-lo) na primeira semana de julho (de 2013).

## **7.2. Elaboração de material teórico geral**

Foi elaborado um material de apoio ao ensino teórico geral sobre torres de resfriamento. Este material foi feito com base em muitos trabalhos lidos sobre o tema. Em relação aos aspectos gerais de torres de resfriamento, este trabalho está mais completo que todos os trabalhos lidos. Sendo assim podemos dizer que este objetivo foi alcançado integralmente e satisfatoriamente.

## **7.3. Bancada Experimental**

A bancada foi restaurada com sucesso como demonstrado no capítulo 5. Entretanto houve um extremo trabalho com o conserto de alguns componentes. O uso do aquecedor de água com resistências elétricas está restrito devido ao comprometimento de algumas resistências. Mais detalhes podem ser observados no capítulo 5.

Segue algumas recomendações para esta bancada:

- Ser feita a manutenção da mesma pelo menos uma vez ao semestre para não deixar a bancada voltar a suas condições precárias anteriores a este trabalho;
- Substituir o sistema de aquecimento de água por um novo. O atual sistema apresentou muitos problemas e atualmente esta com restrições de operação. Se possível, colocar um sistema regulável de temperatura da água. Este sistema regulável, mesmo com uma possível dificuldade de torna-lo possível, traria uma maior facilidade de operação da bancada;
- Substituir o atual sistema de variação da vazão do ar. Uma boa maneira seria instalar um variador de frequência para o motor;
- Substituir o reservatório de nível constante na parte superior da bancada por um transparente para facilitar a visualização do seu nível e facilitar o controle de entrada de água na banca, evitando desperdício em excesso de água;
- Mudar as configurações dos drenos e das tubulações na parte inferior da bancada. Os mesmo são um pouco confusos para quem não está acostumando a operar a bancada;
- Rever o sistema elétrico da bancada, pois o mesmo aparenta ter algumas complicações e restrições para utilização da parte elétrica;
- Verificar a possibilidade/viabilidade de se transformar a parte elétrica em um sistema 220V, para possibilitar seu uso em uma tomada convencional;
- Fazer a aferição dos instrumentos de medição da bancada;
- Continuar o contato com a empresa AUTOMATA e testar o equipamento completo deles. O mesmo se mostrou interessante e seu uso pode ir além do uso na bancada.

## **7.4. Elaboração de Práticas Laboratoriais**

Foram elaboradas três práticas de laboratório, cada uma tendo algum foco no experimento. Como a bancada estava em manutenção, algumas de suas funções operacionais estavam comprometidas ou restritas, assim as práticas ficaram um pouco restritas de acordo com as condições de operação da bancada.

Houve atraso no cronograma para passar as práticas experimentais para os alunos. Como dito anteriormente, as práticas estavam condicionadas ao funcionamento da bancada e esta demorou a apresentar condições de operação razoáveis para início das práticas.

O psicrômetro construído falhou no teste com a bancada experimental, por isso as práticas estão deficientes em relação ao uso de um psicrômetro para a bancada. Com o advento de um psicrômetro que consiga trabalhar juntamente com a bancada, a criação de uma prática com este instrumento pode ser feita.

Com a melhora das condições de operação da bancada, as práticas poderiam passar por uma revisão e até ser implementadas.

## **7.5. Trabalho Dentro da Disciplina Instalações Termomecânicas 2**

Espera-se que com este trabalho, o tema Torres de Resfriamento possa ser ministrado dentro do plano da disciplina para os próximos semestres.

Com a elaboração das práticas e com o conserto da bancada, espera-se que as práticas sejam ministradas pelo professor ou por um monitor da disciplina.

## **7.6. Custos gerais**

Neste trabalho houve a necessidade de comprar de alguns materiais para se tornar possível sua manutenção e instrumentação. Abaixo dividimos os custos em custos de manutenção, custos da instrumentação com termômetros digitais tipo agulha e equipamento de medição e monitoramento com CPU (Empresa AUTOMATA).

### **7.6.1. Custos de manutenção**

Estes custos estão relacionados com os gastos necessários para realização da manutenção/substituição dos itens da bancada. Não foram considerados neste cálculo os materiais (e serviços) conseguidos gratuitamente dentro da universidade, como chapa metálica, pontos de solda, diversos tipos de broca, parafusos, porcas, arruelas etc.

Tabela 7.1 - Custos de manutenção da bancada.

	Quantidade (metro)	Preço (metro)	Total
Mangueira trançada 1/2"	25,00	R\$ 2,56	R\$ 64,00
Mangueira siliconada 10x15mm	2,00	R\$ 5,28	R\$ 10,56
Mangueira trançada	2,00	R\$ 8,39	R\$ 16,78
Lençol de borracha 3,2 mm	0,20	R\$ 56,00	R\$ 11,20
Mangueira cristal	3,00	R\$ 5,28	R\$ 15,84
Lençol de borracha 7,9 mm	0,25	R\$ 150,00	R\$ 37,50
<b>TOTAL</b>			R\$ 155,88

### 7.7.2. Custos da instrumentação com termômetros digitais tipo agulha

Estes custos estão relacionados com a compra de termômetros para medição das temperaturas ao longo da bancada.

Tabela 7.2 – Custo da compra de termômetros tipo agulha.

	Quantidade	Preço (metro)	Total
Termômetro cilíndrico tipo agulha	7	R\$ 26,09	R\$ 182,63
<b>TOTAL</b>			R\$ 182,63

### 7.7.3. Custos com equipamento de medição e monitoramento com CPC

Estes custos estão relacionados com a compra de materiais necessários para instalação do equipamento da empresa AUTOMATA. O equipamento foi doado, mas foi necessária a compra de alguns itens que não foram doados pela empresa.

Tabela 7.3 – Custos da compra com equipamento de medição e monitoramento com CPU.

	Quantidade	Preço (metro)	Total
Sensor de temperatura Inj. Eletrô. M4051	5	13,95	R\$ 69,75
Terminais para ponta dos fios	26	0,2	R\$ 5,20
Transistor TIP	1	2,35	R\$ 2,35
Fio AVG branco 2mx2,6mm	15	0,55	R\$ 8,25
Conversor HAYONIK 7.5V 2A	1	57,87	R\$ 57,87
Cabo conversor USB Serial	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
<b>TOTAL</b>			R\$ 178,42



# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**ALPINA S/A Indústria e Comércio** Torres de Resfriamento, Edição 1978.

**Amr Gouda, Basel** Cooling Tower Educational Stand. B.Sc. Graduation Project, Faculty of Engineering, Mechanical Power Department, Cairo University, p1-31.

**Anuje, Kavita; Hegg, Trevor; Lindahl, Paul.** Cooling Tower Operation and Maintenance for Improved Energy Efficiency, <http://www.cti.org/cgi-bin/download.pl>

*ashrae handbook*, <http://www.em-ea.org/Guide%20Books/book3/Chapter%203.7%20Cooling%20Tower.pdf>

**Bosnjakovic, F.** Technische Thermodynamik, Theodor Steinkopf, Dresden, 1965.

**Cortinovis, Giorgia Francine** Funcionamento de uma torres de resfriamento de água, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**CTI Sponsored Educational Program**, Energy – Water Nexus, 2012 AHR Expo – Chicago, Chicago, 2012.

**Duarte, José Urbano; Novais, Mariana Carolina Carvalho** Trabalho de graduação - Instrumentação e controle de um sistema de ar condicionado híbrido utilizando Bacnet sobre Zigbee Universidade de Brasília, 2012.

**Feltzin A.E.; Benton, D.** A more exact representation of cooling tower theory, Cooling Tower Instit. J. 12(2), 1991.

**Gleick, Peter H.; Palaniappan, Meena** Peak Water, The World's Water – Pacific Institute, 2008-2009.

**Grange, J.L.** Calculating the evaporated water flow in a wet cooling tower, Paper presented at the 9<sup>th</sup> LAHR Cooling Tower and Spraying Pond Symposium, von Karman Institute, Brussels, Belgium, September, 1994.

**Jasiulionis, Jaqueline** Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água utilizando redes neurais artificiais, UNICAMP, Campinas, 2012.

**Kloppers, Johannes C.; Kröger, Detlev G.** The Lewis factor and its influence in the performance prediction of wet-cooling towers, International Journal of Thermal Sciences 44, 2005.

**Mello, Lilian** Influencia de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

**Merkel, F.** Verdunstungskühlung, VDI-Zeitschrift 70, 1925.

**Mulyandasari, Viska** Cooling Tower Selection and Sizing, Practical Engineering Guidelines for Processing Plant Solutions, KLM Technology Group, 2011

**OMNI Grupo Industrial de Equipamentos Ltda** Torres de Resfriamento Noções Gerais,  
[http://www.omnigrupo.com.br/pdf/apostila\\_omni.pdf](http://www.omnigrupo.com.br/pdf/apostila_omni.pdf)

**Pinheiro, Paulo Cesar.** A carta Psicrométrica, Dept. Engenharia Mecânica, UFMG, 2011

**Sanchez, Caio Glauco** Ensaio de uma Torre de Resfriamento, EM – 847 Laboratório de Calor e Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2012.

**SPX COMPANY, BALCKE DURR.** A PUBLICATION COMMEMORATING BALCKE-DURR'S 125TH ANNIVERSARY, 2008.

**S. Cline, Daryn** Water Energy Nexus, Sponsored Educational Program In: AHR Expo – Chicago, 2012.

**Silva, José Otávio.** Tratamento Químico de água de resfriamento, Conselho Regional de Química IV São Paulo, MiniCursos, 2009.

**Sutherland, J.W.** Analysis of mechanical-draught conterflow air/water cooling towers, Trans. ASME J. Heat Transfer 105, 1983.

**Trovati, Joubert.** Tratamento de água de resfriamento, Araraquara-SP, 2004.

**Vettor História das Torres de Resfriamento**, 2012, disponível em Site da Vettor:  
<http://www.vettor.com.br/empresa/historia.html>

**Waki, Renata,** Montagem e avaliação de uma torre de resfriamento para uso em atividade de ensino de graduação, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – SP, 2009.

**Yunus A. Çengel** Termodinamica, 5ª Edição

**Yunus A. Çengel** Heat and mass transfer, 2º Ed.

# ANEXOS

---

Anexo I	Slides da Aula sobre Torres de Resfriamento
Anexo II	Experimento 1
Anexo III	Experimento 2
Anexo IV	Experimento 3
Anexo V	Experimento 4

---

## Torres de Resfriamento ou Arrefecimento



*\* Não chamar de torres de REFRIGERAÇÃO*

\* Não é fumaça, é vapor d'água!



## Definição

- \* Dispositivo de remoção de calor residual de um processo para a atmosfera
- \* Resfriamento de fluido de trabalho
  - \* Este fluido pode ser água ou **NÃO** !

## Vídeo 1

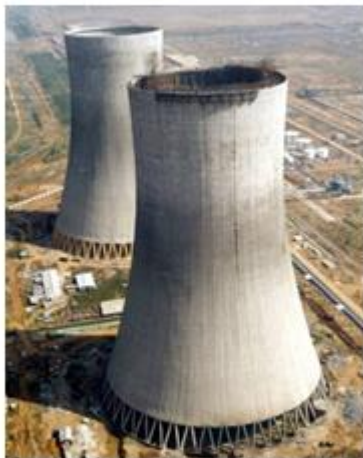
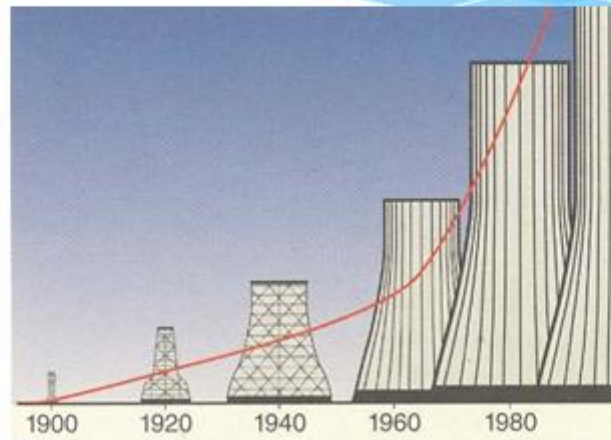
Onde fica alocada uma torre de resfriamento

## História das Torres de Resfriamento

- \* Eng. Hans Joaquim Balcke
- \* Em 1894 primeira torre tipo chaminé com 12 metros
- \* Dez anos depois mais de 1.400 unidades no mundo



## Hoje em dia...



\* Torre de tiragem natural



- \* Torre híbrida (seca e úmida)
- \* Tiragem mecânica induzida e forçada

## Vídeo 2

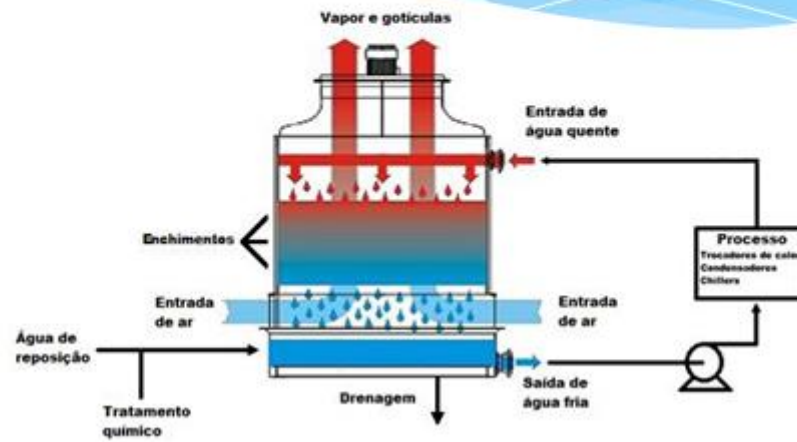
Noção de tamanho de torres de resfriamento de grande porte

## Aspectos Gerais

- \* Resfriamento do fluido de trabalho quente proveniente de processos industriais
- \* Troca de calor sensível e latente (torres úmidas)
  - \* Calor latente maior responsável pelo resfriamento
  - \*  $\pm 80\%$  da troca de calor
- \* Tamanho, projetos e classificação muito variados



# Funcionamento

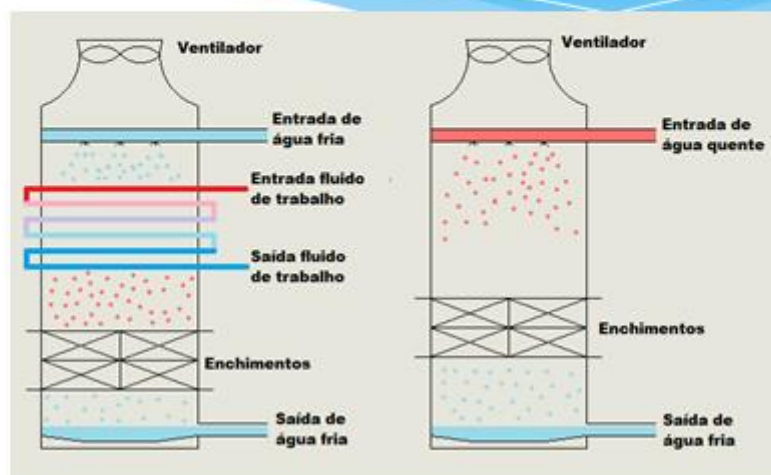


## Vídeo 3 e 4

Funcionamento de uma torre de resfriamento

# Classificação das Torres de Resfriamento

## Circuito fechado ou aberto



# Circuito fechado ou aberto

## \* Circuito fechado

- \* Contato indireto do fluido de trabalho por meio de tubulações
- \* Mais caro
- \* Torres secas
  - ↳ Tubulação em contato com ar
  - ↳ Menos eficiente
- \* Torres úmidas
  - ↳ Tubulação em contato com água
- \* Torres Híbridas
  - ↳ Tubulação em contato com ar e se necessário água é espirrada (maior troca de calor)

## \* Circuito aberto

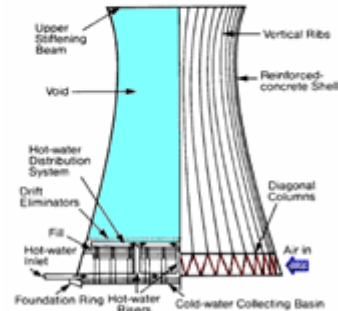
- \* Contato direto do fluido de trabalho com o ar
- \* Neste caso utiliza-se água como fluido de trabalho
- \* Torres úmidas

**OBS:** Em torres úmidas de circuito fechado, quando utiliza-se água como fluido de trabalho, o contato é feito com outra fonte de água



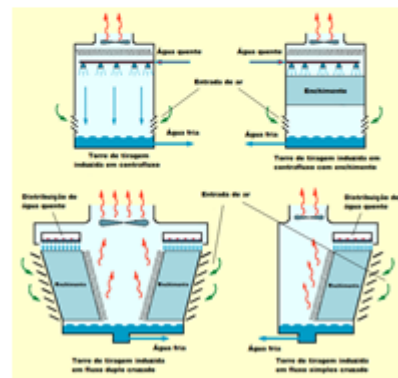
# Torre de tiragem natural ou hiperbólicas

- \* Utilizadas em grandes instalações
- \* Torres de grande porte
- \* Alto tempo de vida
- \* Resfriamento de grandes volumes
- \* Baixos custos de energia e manutenção
- \* Baixa eficiência
- \* Custo inicial muito alto
- \* Mesmo com baixa eficiência, custo de resfriamento de água (por volume resfriado) mais baixo de todas as torres



# Torres de tiragem mecânica

- \* Mais compactas
- \* Mais eficientes
- \* Melhor controle da temperatura
- \* Maior gasto de energia
  - \* Menor gasto com bombeamento
  - \* Maior gasto com ventiladores
- \* Custos de operação e manutenção mais caros



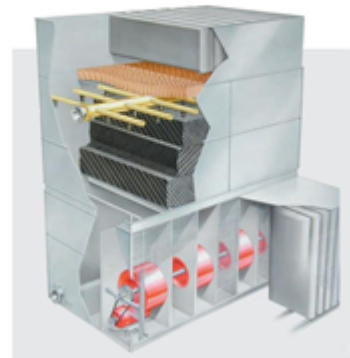
## Tiragem mecânica *induzida*

- \* Utilizadas em médias instalações
- \* Ventiladores na saída de ar
- \* Grandes ventiladores
  - \* velocidades menores
- \* Manutenção mais difícil
  - \* Posição do ventilador
- \* Menor gasto de energia com ventilador
  - \* Comparação com tiragem forçada
- \* Elementos mecânicos sujeitos a correntes de ar úmido e quente



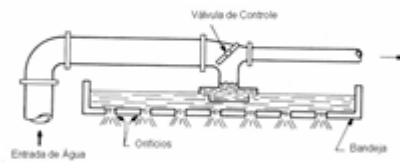
## Tiragem mecânica *forçada*

- \* Utilizado em pequenas instalações
- \* Mais eficientes
  - \* Maior gasto de energia
- \* Manutenção mais fácil
  - \* Posição dos ventiladores
- \* Ventilador
  - \* Maior quantidade
  - \* Maiores velocidades
  - \* Gradiente de pressão
- \* Elementos mecânicos sujeitos a correntes de ar menos úmidas e quentes



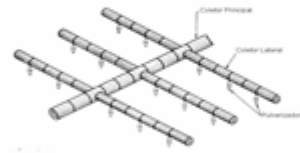
# Sistema de distribuição de água

## Gravidade



- \* Mais barato
- \* Menor gasto de energia
- \* Menor vazão de água
- \* Menor controle da vazão
- \* Mais fácil manutenção

## Pressão

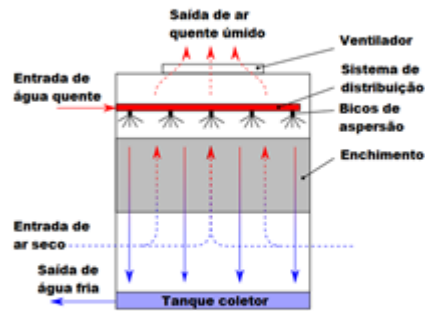


- \* Mais caro
- \* Maior gasto de energia
- \* Maior vazão de água
- \* Maior controle da vazão
- \* Mais difícil manutenção

# Métodos de exposição da água a correntes de ar

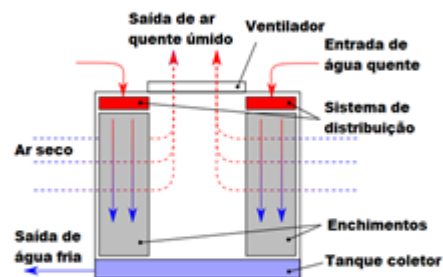
- \* Fluxo em contracorrente
- \* Fluxo cruzado

## Fluxo em contracorrente



- \* Mais eficientes
  - \* Água mais resfriada entra em contato com o ar mais seco

## Fluxo cruzado



- \* Manutenção mais fácil
  - \* Sistemas mecânicos com mais fácil acesso
- \* Entrada de ar em toda a lateral da torre
  - \* Maior quantidade de ar
  - \* Possibilidade de diminuir a altura da torre
    - \* Diminuir gastos com bombeamento

## Enchimentos ou recheios



Aumentar a eficiência

Aumentar superfície de contato

Acelerar a troca de calor

Pouca resistência ao escoamento do ar

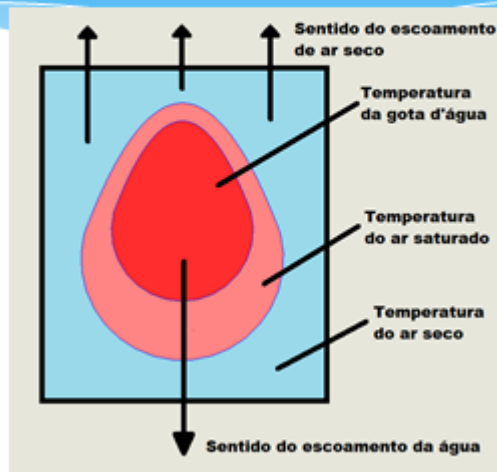
## Enchimentos ou recheios

### \* Divisão em gotas

- \* Aumento da relação:

$$\frac{\text{Superfície de contato}}{\text{vazão}}$$

- \* Aumento da troca de calor entre água e ar





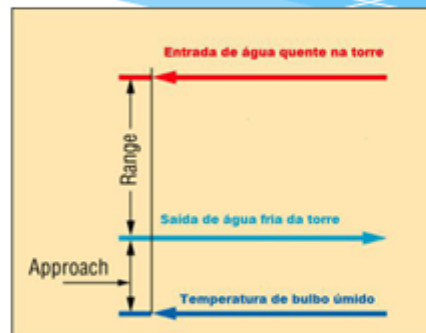
# Tratamento da água

- \* Muito importante para conservação do sistema
- \* Evita
  - \* Incrustações
  - \* Matéria orgânica
  - \* Corrosões
- \* Purga



# Conceitos relacionados

- \* Range
- \* Approach
- \* Eficiência



$$* e_{torre} = \frac{T_{entrada} - T_{saida}}{T_{entrada} - T_{bulbo\ úmido}}$$

## Vídeo 5

Visão mais detalhada da torre

## Torres de Resfriamento ou Arrefecimento



\* *Fim*

ANEXO II: Experimento 1

---

# **Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração**

## **Bancada de Torre de Resfriamento**



### **Prática de Laboratório 1**

#### **Familiarizar com a Torre de Resfriamento**

# Experimento 1

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste experimento é fornecer o primeiro contato dos alunos de graduação em engenharia com a bancada de torre de resfriamento do Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração – LaAR. Isso será feito mediante a apresentação da bancada, dos seus componentes e de sua instrumentação. Também serão abordados os princípios de funcionamento e o modo de operação dos equipamentos.

## 1.2 Visão Geral

A bancada experimental do LaAR (The Hilton Water Cooling Tower) foi fabricada pela empresa P.A. HILTON LTD e é uma pequena torre de resfriamento com variadas condições de operação. Com ela, podemos enfatizar o estudo da troca de calor e massa e da psicrometria. Na figura 1.1 podemos observar a bancada e na figura 1.2 observar seu diagrama esquemático. Sua estrutura consiste numa coluna retangular que possui o lado da frente transparente para visualização dos enchimentos e do local onde temos o processo de troca de calor e massa. É uma torre de tiragem mecânica forçada por um ventilador. O escoamento de água opera em contra-fluxo com a corrente de ar gerada pelo ventilador. Seu sistema de distribuição recebe água de um tanque de alimentação de nível constante que alimenta o sistema de aspersão (na parte superior da torre). A vazão de água é controlada pela válvula localizada abaixo do rotâmetro (no painel da bancada). Mais detalhes explicando o funcionamento serão vistos a seguir.



Figura 59 - Bancada experimental de torre resfriamento – LaAR, UnB.

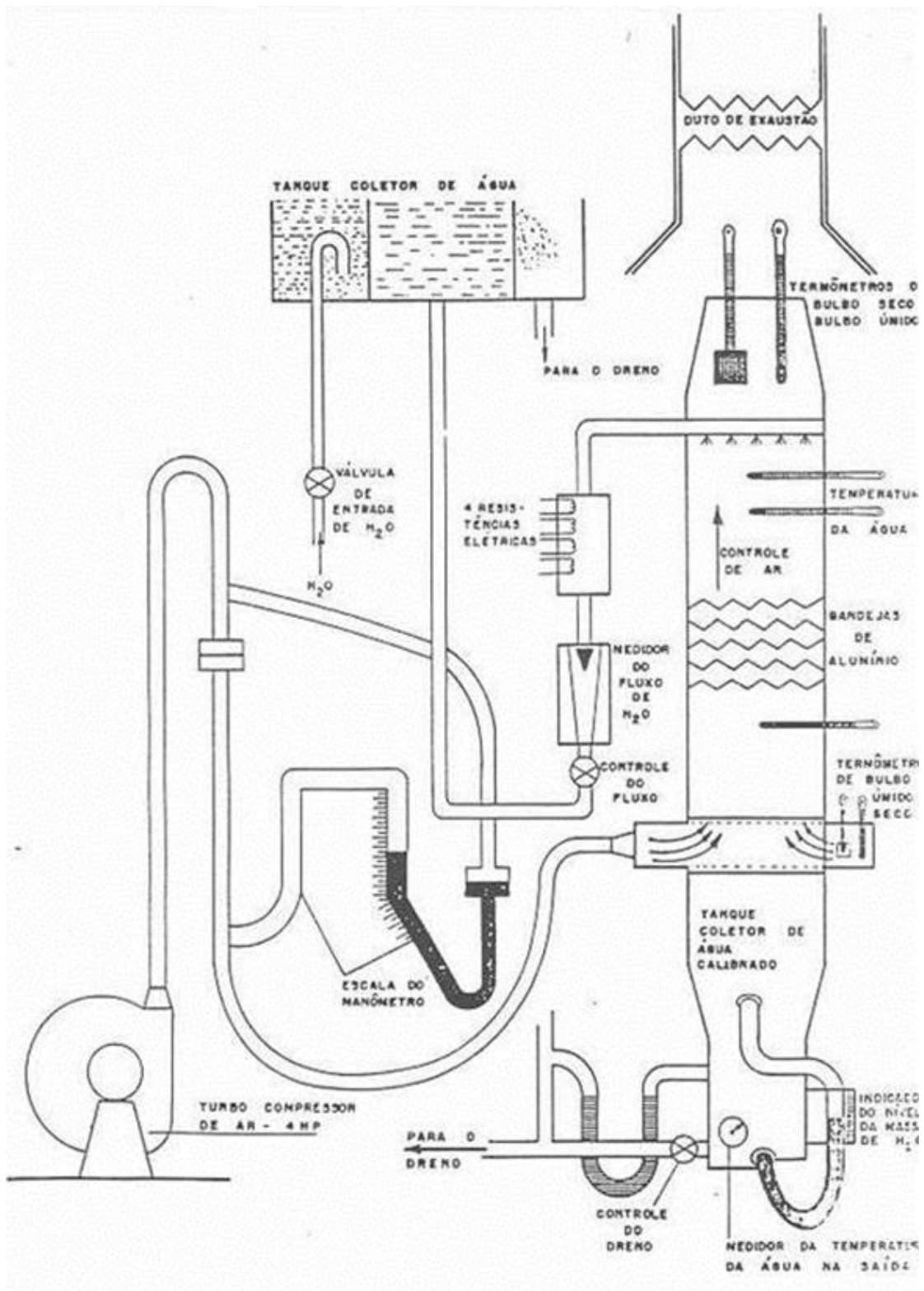


Figura 60 - Diagrama esquemático da torre de resfriamento The Hilton Cooling Water Tower



### 1.3 Equipamentos e instrumentação

Esta bancada possui alguns componentes que estão ilustrados a seguir:



Figura 91 - Painel de controle



Figura 92 - Tanque de nível constante



Figura 93 - Componentes da Bancada

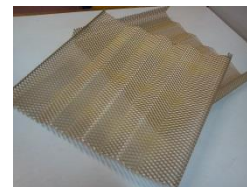


Figura 94 - Enchimentos



Figura 95 - Tanque coletor de água



Figura 97 - Ventilador centrifugo



Figura 96 - Motor elétrico





Figura 98 - Resistências elétricas da bancada



Figura 99 - Eliminadores de gota da bancada

Este equipamento esta instrumentado para permitir a medição de:

- Vazão de ar na entrada da torre, parte inferior (placas de orifício e manômetro);



Figura 100 – Placas de orifício



Figura 101 - Manômetro (m<sup>3</sup>/h)

- Vazão na entrada da torre (rotâmetro calibrado);



Figura 72 - Válvula de controle de vazão e rotâmetro

Prof. João Pimenta

- Vazão na saída da torre (tanque coletor de água - possui marcação de volume de 4 litros - e cronômetro);

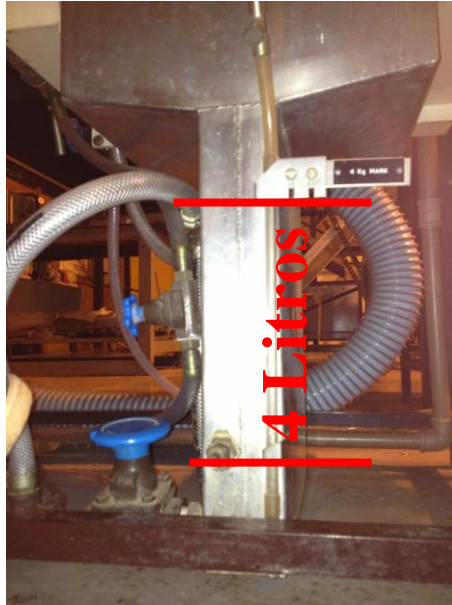


Figura 73 - Marca de 4 Litros do Tanque coletor de água

- Temperatura da água ao longo da torre 7 pontos (termopares);



Figura 74 - Termômetro tipo agulha

- Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente e no corpo da torre (psicrômetro);

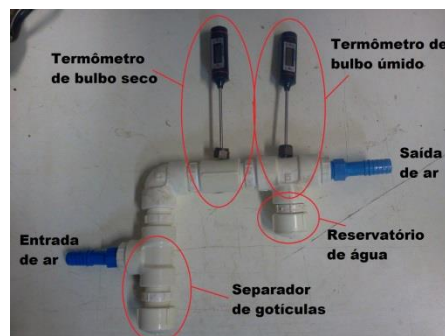


Figura 75 - Psicrômetro

## 1.4 Atividade proposta

Inicialmente, os alunos devem trazer consigo, individualmente, as folhas impressas correspondente ao **EXPERIMENTO 1**. Sendo assim, o monitor da disciplina apresentará a bancada do Laboratório e apresentará seus componentes que foram previamente ilustrados.

### Atividade 1

Abaixo é listada uma série de procedimentos para ligar a torre de resfriamento de maneira correta e também desliga-la ao final das atividades.

Siga os passos para ligar e depois desligar a bancada (e marque no quadrado a direita) para aprender sobre seu funcionamento. Em seguida (não há a necessidade da bancada estar ligada), realize o resto das atividades.

Antes de ligar a bancada alguns procedimentos devem ser efetuados:

- Verifique se a área de trabalho ao redor da bancada esta limpa e livre de obstáculos, para evitar acidentes;
- Verifique se o plug da parte elétrica da bancada esta desconectado da tomada (rede elétrica);
- Se estiver conectado, desconecte o e termine os passos a seguir (a voltagem é alta 380V, tome cuidado);
- Faça uma rápida inspeção visual da zona de trabalho e da bancada para detectar possíveis problemas;
- Feche as válvulas de drenagem de água na parte inferior da bancada;
- Desligue as duas chaves elétricas da bancada (posição OFF);
- Desligue todos os interruptores das resistências elétricas;
- Conecte, com auxilio de uma mangueira, a válvula de entrada de água da bancada a uma torneira próxima;

- **OBS: Poderíamos ligar a fonte de água diretamente na válvula de controle de vazão? Que mudanças isso provocaria no uso da bancada? As condições de operação seriam as mesmas?**

**Depois de realizar TODOS os passos acima, realize os próximos procedimentos para operar a bancada.**

- Abra a válvula da fonte de água e espere até que o tanque de nível constante esteja cheio. Você vai saber quanto ele estiver cheio ao observar uma vazão de água pelo dreno;
- Abra a válvula de controle de vazão de água e observe no rotâmetro a marcação da vazão. Mexa na válvula e veja os limites máximos e mínimos que podem ser marcados;
- Coloque na vazão correspondente ao nível 24 cm no rotâmetro e espere até observar a queda d'água pelos enchimentos da torre (isto pode demorar um pouco); 
  - Se o nível marcado no rotâmetro abaixar, mesmo com a abertura da válvula no máximo, isso indica que a vazão de entrada de água na bancada é menor do que a vazão que você está requerendo. Corrija o problema aumentando a vazão de água na entrada da bancada e depois ajuste novamente para o nível 24 cm. Se não for possível aumentar a vazão de entrada, observe no rotâmetro o nível de vazão marcado e feche gradativamente a válvula até um nível de 1 cm abaixo do valor previamente marcado;
- Deixe a água encher o tanque coletor, na base da torre, e passar através do sistema “overflow” (tubo em “U”) do tanque para o dreno. O sistema de “overflow” deve ser sempre mantido cheio para impedir que o ar retorne.
- Verifique se para a vazão ajustada (24 cm do rotâmetro) ainda há saída de água pelo dreno. Se não houver saída de água pelo dreno, aumente a vazão da fonte de água para a bancada. Espere um pouco e veja se há saída. Repita os procedimentos até termos um pouco de saída de água pelo dreno;
- Abra a válvula de drenagem do tanque coletor para esvaziá-lo. Ajuste a válvula de drenagem de modo que a água sempre cubra o sensor do termopar instalado no tanque coletor. Este termopar mede a temperatura de saída da água e deve sempre estar submerso. A vazão de entrada de água na torre deve ser a mais próxima possível da vazão de saída de água pelo dreno do tanque coletor, para garantir que este termopar esteja sempre coberto por água;

**Agora iniciaremos os procedimentos com a parte elétrica da bancada. Tome cuidado com estes procedimentos pois a bancada possui uma alta tensão de operação (380Volts).**

- Ligue o plug da parte elétrica da bancada na rede elétrica;

Prof. João Pimenta

- Ligue as duas chaves elétricas (posição “ON”);
- Ligue os interruptores das resistências elétricas para aquecer a água. Observe se os LEDs dos interruptores estão ligados. Observe o aumento gradual da temperatura no termopar instalado acima das resistências;
- Ligue o ventilador. O fluxo de ar pode ser controlado pelo orifício na tubulação de ar (perto da saída do ventilador) ou na entrada de ar do ventilador. Um medidor vazão no painel mostra o fluxo de ar em m<sup>3</sup>/h. Mexa nos controladores de vazão e veja os fluxos máximos e mínimos de operação da bancada.

**Após a conclusão destes passos a prática experimental com a bancada esta pronta para ser iniciada. Após a prática a bancada deve ser parada de modo adequado. Abaixo mostramos os procedimentos de parada para depois da realização das atividades.**

Para procedimentos de parada da bancada experimental

- Desligue o ventilador;
- Desligue as resistências;
- Desligue as duas chaves elétricas (retorno para a posição “OFF”);
- Feche a válvula de suprimento de água;
- Abra todas as válvulas de drenagem e esvazie o sistema.

## Atividade 2

Com base nos procedimentos acima citados, faça uma explanação, de forma contundente e sequencial, sobre o funcionamento da bancada. Fale sobre a fonte (de água e de ar), controle de fluxo (de água e de ar), da troca de calor (entre água e ar) e da saída (da água e do ar). Se preferir coloque este roteiro em forma de tópicos.

## Atividade 3

Apresente a funcionalidade (na bancada) de cada um dos componentes abaixo. O grupo deve ser objetivo e sucinto em suas respostas.

1. Painel de controle
  - das resistências



Prof. João Pimenta

- do ventilador
  - do rotâmetro
2. Motor elétrico de 3400 rpm;
  3. Ventilador centrífugo;
  4. Tanque de alimentação de nível constante;
  5. Tanque coletor de água;
  6. Resistências (quatro);
  7. Enchimentos;
  8. Eliminador de gotas.

#### Atividade 4

Utilizando a numeração das figuras dos componentes acima ilustrados, marque o número correspondente do componente na figura “Figura 1.2 - Diagrama esquemático da torre de resfriamento The Hilton Cooling Water Tower” que esta no item “**1.2 Visão Geral**”.

## 1.5 Relatório do experimento

Este relatório deve ser feito de forma simples e possuir:

- Capa;
- Objetivo do experimento;
- Realização da Atividade proposta;
- Tabela de avaliação dos membros do item **1.6 Avaliação do experimento** (preenchida);
- Conclusão.

Formatação básica exigida:

- Papel A4 (outros formatos conforme necessário como por exemplo para desenhos);
- Margens: Superior = 2 cm, Inferior = 2 cm, Esquerda = 2,5 cm, Direita = 1,5 cm;
- Corpo do texto com espaçamento de 1,5 em Times New Roman 11, justificado entre margens;
- Títulos principais em fonte “Arial” de 18 pt, negrito, maiúscula;
- Subtítulos em fonte “Arial” de 12 pt, negrito, maiúscula;
- Numerar páginas no canto inferior direito;
- Figuras centradas entre margens com legenda e créditos.

**O relatório deve ter caráter direto, não ultrapassando seis folhas.**



## 1.6 Avaliação do experimento

Para este experimento será adotado duas formas de avaliação do aluno. A primeira será a nota do grupo, onde será avaliado o relatório do grupo e este terá uma nota entre 0 e 7 pontos. A segunda nota será uma avaliação do próprio grupo sobre seus participantes. Deverá ser avaliado neste segundo item a participação do aluno frente as atividades estabelecidas dentro do grupo. Esta avaliação terá uma nota de 0 a 3 pontos.

Para cálculo da nota final do experimento, deverá ser efetuada uma soma simples da nota do grupo com a nota individual do membro, utilizando a tabela abaixo.

**OBS: Utilize esta tabela ao final de seu relatório devidamente já preenchida com a nota individual de participação de cada integrante do grupo. O não preenchimento desta tabela implicará em perda de nota no relatório.**

Nome	Nota do Grupo (0 a 7)	Nota Individual (0 a 3)	Nota Total

## ANEXO III: Experimento 2

---



Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

# **Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração**

## **Bancada de Torre de Resfriamento**



### **Prática de Laboratório 2 Influencia da vazão de ar na torre de resfriamento**



Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração  
[www.laar.unb.br](http://www.laar.unb.br)

# Experimento 2

## 2.1 Objetivo

O objetivo deste experimento é mostrar a influencia da vazão de ar, ou seja da velocidade do ventilador, no arrefecimento da temperatura da água numa torre de resfriamento.

## 2.2 Visão Geral

Numa torre de resfriamento comumente temos o uso de ventiladores para auxiliarem no arrefecimento de água. Os modelos convencionais que utilizam ventiladores são as torres de tiragem mecânica forçada e induzida. Entretanto até mesmo grandes torres de tiragem natural hiperbólica podem ter um auxílio de ventiladores para aumentarem sua eficiência.

A torre de tiragem mecânica forçada apresenta maior eficiência frente a todos os outros tipos de torre, mas isso tem um custo adicional, o gasto para manter os ventiladores funcionando a altas velocidades, tornando o custo por litro de água arrefecido mais caro.

Para o engenheiro é importante ter a noção que uma maior eficiência traz também um maior custo.

## 2.3 Equipamentos e instrumentação

Para esta prática, teremos uma atenção maior para o ventilador centrífugo da bancada. Ele será utilizado para variarmos o fluxo de ar no corpo da torre, influenciando diretamente nas trocas de calor com o fluxo de água. Pretendemos neste experimento ver a influencia da vazão de ar no processo de troca de calor.



Figura 76 - Ventilador centrífugo.

A bancada esta equipada com termômetros ao longo do corpo da torre. Eles servem para medir a temperatura ao longo da troca de calor do ar com a água e assim entendermos melhor como é a relação desta troca.

O painel de controle fornece o controle das resistências utilizadas, do ventilador e também do fluxo de água através da passagem pelo rotâmetro.



Figura 77 - Painel de controle.

Para controle da vazão de ar temos dois sistemas como mostra a figura 3.



Figura 78 - Sistemas para controle de vazão de água.

Para medição da temperatura, serão utilizados termômetros tipo agulha.



Figura 79 - Termômetro tipo agulha.

## 2.4 Atividade proposta

Inicialmente, os alunos devem trazer consigo, individualmente, as folhas impressas correspondente ao **EXPERIMENTO 2**. Sendo assim, o monitor da disciplina apresentará a bancada do Laboratório e apresentará seus componentes que foram previamente ilustrados.

Abaixo é listada uma série de procedimentos para ligar a torre de resfriamento de maneira correta e também desliga-la ao final das atividades.

Siga os passos para ligar e depois desligar a bancada (e marque o quadrado a direita). Em seguida, realize o resto das atividades.

Antes de ligar a bancada alguns procedimentos devem ser efetuados:

- Verifique se a área de trabalho ao redor da bancada esta limpa e livre de obstáculos, para evitar acidentes;
- Verifique se o plug da parte elétrica da bancada esta desconectado da tomada (rede elétrica);
- Se estiver conectado, desconecte o e termine os passos a seguir (a voltagem é alta 380V, tome cuidado);
- Faça uma rápida inspeção visual da zona de trabalho e da bancada para detectar possíveis problemas;
- Feche as válvulas de drenagem de água na parte inferior da bancada;
- Desligue as duas chaves elétricas da bancada (posição OFF);
- Desligue todos os interruptores das resistências elétricas;
- Conecte, com auxilio de uma mangueira, a válvula de entrada de água da bancada a uma torneira próxima;

**Depois de realizar TODOS os passos acima, realize os próximos procedimentos para operar a bancada.**

- Abra a válvula da fonte de água e espere até que o tanque de nível constante esteja cheio. Você vai saber quanto ele estiver cheio ao observar uma vazão de água pelo dreno;
- Abra a válvula de controle de vazão de água e observe no rotâmetro a marcação da vazão. Mexa na válvula e veja os limites máximos e mínimos que podem ser marcados;
- Coloque na vazão correspondente ao nível 24 cm no rotâmetro e espere ate observar a queda d'água pelos enchimentos da torre (isto pode demorar um pouco);



- Se o nível marcado no rotâmetro abaixar, mesmo com a abertura da válvula no máximo, isso indica que a vazão de entrada de água na bancada é menor do que a vazão que você está requerendo. Corrija o problema aumentando a vazão de água na entrada da bancada e depois ajuste novamente para o nível 24 cm. Se não for possível aumentar a vazão de entrada, observe no rotâmetro o nível de vazão marcado e feche gradativamente a válvula até um nível de 1 cm abaixo do valor previamente marcado;
- Deixe a água encher o tanque coletor, na base da torre, e passar através do sistema “overflow” (tubo em “U”) do tanque para o dreno. O sistema de “overflow” deve ser sempre mantido cheio para impedir que o ar retorne.
- Verifique se para a vazão ajustada (24 cm do rotâmetro) ainda há saída de água pelo dreno. Se não houver saída de água pelo dreno, aumente a vazão da fonte de água para a bancada. Espere um pouco e veja se há saída. Repita os procedimentos até termos um pouco de saída de água pelo dreno;
- Abra a válvula de drenagem do tanque coletor para esvaziarlo. Ajuste a válvula de drenagem de modo que a água sempre cubra o sensor do termopar instalado no tanque coletor. Este termopar mede a temperatura de saída da água e deve sempre estar submerso. A vazão de entrada de água na torre deve ser a mais próxima possível da vazão de saída de água pelo dreno do tanque coletor, para garantir que este termopar esteja sempre coberto por água;

**Agora iniciaremos os procedimentos com a parte elétrica da bancada. Tome cuidado com estes procedimentos, pois a bancada possui uma alta tensão de operação (380Volts).**

- Ligue o plug da parte elétrica da bancada na rede elétrica;
- Ligue as duas chaves elétricas (posição “ON”);
- Ligue os interruptores das resistências elétricas para aquecer a água. Observe se os LEDs dos interruptores estão ligados. Observe o aumento gradual da temperatura no termopar instalado acima das resistências;
- Ligue o ventilador. O fluxo de ar pode ser controlado pelo orifício na tubulação de ar (perto da saída do ventilador) ou na entrada de ar do ventilador. Um medidor vazão no painel mostra o fluxo de ar em m<sup>3</sup>/h. Mexa nos controladores de vazão e veja os fluxos máximos e mínimos de operação da bancada.

**Após a conclusão destes passos a prática experimental com a bancada esta pronta para ser iniciada. Após a prática a bancada deve ser parada de modo adequado. Abaixo mostramos os procedimentos de parada para depois da realização das atividades.**

Para procedimentos de parada da bancada experimental

- Desligue o ventilador;
- Desligue as resistências;
- Desligue as duas chaves elétricas (retorno para a posição “OFF”);
- Feche a válvula de suprimento de água;
- Abra todas as válvulas de drenagem e esvazie o sistema.

## Atividade 1

Para um valor constante de vazão de água igual ao nível do rotâmetro de 14 e para todas as resistências ligadas, elabore um gráfico de posição (altura do ponto mais alto para o mais baixo) X Temperatura com dados obtidos experimentalmente.

Faça um gráfico para cada caso:

1. A não utilização do ventilador;
2. A utilização do ventilador com fluxo de ar de 260 m<sup>3</sup>/h.
3. A utilização do ventilador com fluxo de ar de 300 m<sup>3</sup>/h;
4. A utilização do ventilador com fluxo de ar de 340 m<sup>3</sup>/h.
5. A utilização do ventilador com fluxo de ar de 380 m<sup>3</sup>/h.
6. A utilização do ventilador com fluxo de ar de 420 m<sup>3</sup>/h.

Faça uma análise dos dados obtidos.

## Atividade 2

Faça as mesmas medições da **atividade 1** para uma vazão de água que marque 20 na escala do rotâmetro. Faça uma análise dos dados obtidos.

## Atividade 3

Considerando a atividade 1 e se a torre tivesse uma altura cem vezes maior, qual temperatura medida no tanque coletor na parte inferior da torre? A variação da vazão de ar da atividade 1 iria influenciar nesta temperatura? Justifique sua resposta.

## 2.5 Relatório do experimento

Este relatório deve ser feito de forma simples e possuir:

- Capa;
- Objetivo do experimento;
- Realização da Atividade proposta;
- Tabela de avaliação dos membros do item **2.6 Avaliação do experimento** (preenchida);
- Conclusão.

Formatação básica exigida:

- Papel A4 (outros formatos conforme necessário como por exemplo para desenhos);
- Margens: Superior = 2 cm, Inferior = 2 cm, Esquerda = 2,5 cm, Direita = 1,5 cm;
- Corpo do texto com espaçamento de 1,5 em Times New Roman 11, justificado entre margens;
- Títulos principais em fonte “Arial” de 18 pt, negrito, maiúscula;
- Subtítulos em fonte “Arial” de 12 pt, negrito, maiúscula;
- Numerar páginas no canto inferior direito;
- Figuras centradas entre margens com legenda e créditos.

**O relatório deve ter caráter direto, não ultrapassando seis folhas.**

## 2.6 Avaliação do experimento

Para este experimento será adotado duas formas de avaliação do aluno. A primeira será a nota do grupo, onde será avaliado o relatório do grupo e este terá uma nota entre 0 e 7 pontos. A segunda nota será uma avaliação do próprio grupo sobre seus participantes. Deverá ser avaliado neste segundo item a participação do aluno frente as atividades estabelecidas dentro do grupo. Esta avaliação terá uma nota de 0 a 3 pontos.

Para cálculo da nota final do experimento, deverá ser efetuada uma soma simples da nota do grupo com a nota individual do membro, utilizando a tabela abaixo.

**OBS: Utilize esta tabela (ou semelhante) ao final de seu relatório devidamente já preenchida com a nota individual de participação de cada integrante do grupo. O não preenchimento desta tabela (ou semelhante) implicará em perda de nota no relatório.**

Nome	Nota do Grupo (0 a 7)	Nota Individual (0 a 3)	Nota Total

ANEXO IV: Experimento 3

---



Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

# **Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração**

## **Bancada de Torre de Resfriamento**



### **Prática de Laboratório 3**

### **Influência da variação de vazão de água e de ar na torre de resfriamento**



Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração  
[www.laar.unb.br](http://www.laar.unb.br)

# Experimento 3

## 3.1 Objetivo

O objetivo deste experimento é comparar e analisar a taxa de resfriamento da temperatura da torre em função da altura da torre, para alguns valores de vazão de água combinado com a vazão de ar.

## 3.2 Visão geral

Para o projeto de torres de resfriamento, um dos parâmetros essenciais para dimensionamento de torres é a vazão de água. A vazão de água se relaciona com a temperatura de entrada para nos fornecer a carga térmica necessária para ser arrefecida. Neste ponto, quanto maior a vazão de água, maior será o tamanho da sua torre ou maior será o gasto com ventiladores para poder arrefecer a água até a temperatura desejada.



### 3.3 Equipamento e instrumentação

- Banca experimental de torre de resfriamento do LaAR



Figura 80 - Bancada experimental de torre de resfriamento – LaAR, UnB.

Nesta prática veremos como alguns parâmetros se relacionam com os outros graficamente. Este procedimento é importante para podermos entender melhor como se dá esta relação.

Para esta prática utilizaremos principalmente o rotâmetro do painel de controle e também o ventilador centrífugo. Eles terão seus parâmetros variados para ver como se relacionam.



Figura 81 - Ventilador centrífugo da bancada.

Prof. João Pimenta

A bancada esta equipada com termômetros ao longo do corpo da torre. Eles servem para medir a temperatura ao longo da troca de calor do ar com a água e assim entendermos melhor como é a relação desta troca.

O painel de controle fornece o controle das resistências utilizadas, do ventilador e também do fluxo de água através da passagem pelo rotâmetro.



Figura 82 - Painel de controle.



Figura 83 - Termômetro tipo agulha.

### 3.4 Atividade proposta

Inicialmente, os alunos devem trazer consigo, individualmente, as folhas impressas correspondente ao **EXPERIMENTO 3**. Sendo assim, o monitor da disciplina apresentará a bancada do Laboratório e também o equipamento utilizado nesta prática.

Siga os passos para ligar e ao final do experimento, desligue a bancada. Em seguida, realize as atividades 1, 2 e 3 e construa seu relatório.

Antes de ligar a bancada alguns procedimentos devem ser efetuados:

- Verifique se a área de trabalho ao redor da bancada esta limpa e livre de obstáculos, para evitar acidentes;
- Verifique se o plug da parte elétrica da bancada esta desconectado da tomada (rede elétrica);
- Se estiver conectado, desconecte o e termine os passos a seguir (a voltagem é alta 380V, tome cuidado);
- Faça uma rápida inspeção visual da zona de trabalho e da bancada para detectar possíveis problemas;
- Feche as válvulas de drenagem de água na parte inferior da bancada;
- Desligue as duas chaves elétricas da bancada (posição OFF);
- Desligue todos os interruptores das resistências elétricas;
- Conecte, com auxilio de uma mangueira, a válvula de entrada de água da bancada a uma torneira próxima;

**Depois de realizar TODOS os passos acima, realize os próximos procedimentos para operar a bancada.**

- Abra a válvula da fonte de água e espere até que o tanque de nível constante esteja cheio. Você vai saber quanto ele estiver cheio ao observar uma vazão de água pelo dreno;
- Abra a válvula de controle de vazão de água e observe no rotâmetro a marcação da vazão. Mexa na válvula e veja os limites máximos e mínimos que podem ser marcados;

- Coloque na vazão correspondente ao nível 24 cm no rotâmetro e espere até observar a queda d'água pelos enchimentos da torre (isto pode demorar um pouco); 
  - Se o nível marcado no rotâmetro abaixar, mesmo com a abertura da válvula no máximo, isso indica que a vazão de entrada de água na bancada é menor do que a vazão que você está requerendo. Corrija o problema aumentando a vazão de água na entrada da bancada e depois ajuste novamente para o nível 24 cm. Se não for possível aumentar a vazão de entrada, observe no rotâmetro o nível de vazão marcado e feche gradativamente a válvula até um nível de 1 cm abaixo do valor previamente marcado;
- Deixe a água encher o tanque coletor, na base da torre, e passar através do sistema “overflow” (tubo em “U”) do tanque para o dreno. O sistema de “overflow” deve ser sempre mantido cheio para impedir que o ar retorne.
- Verifique se para a vazão ajustada (24 cm do rotâmetro) ainda há saída de água pelo dreno. Se não houver saída de água pelo dreno, aumente a vazão da fonte de água para a bancada. Espere um pouco e veja se há saída. Repita os procedimentos até termos um pouco de saída de água pelo dreno;
- Abra a válvula de drenagem do tanque coletor para esvaziarlo. Ajuste a válvula de drenagem de modo que a água sempre cubra o sensor do termopar instalado no tanque coletor. Este termopar mede a temperatura de saída da água e deve sempre estar submerso. A vazão de entrada de água na torre deve ser a mais próxima possível da vazão de saída de água pelo dreno do tanque coletor, para garantir que este termopar esteja sempre coberto por água;

**Agora iniciaremos os procedimentos com a parte elétrica da bancada. Tome cuidado com estes procedimentos pois a bancada possui uma alta tensão de operação (380Volts).**

- Ligue o plug da parte elétrica da bancada na rede elétrica;
- Ligue as duas chaves elétricas (posição “ON”);
- Ligue os interruptores das resistências elétricas para aquecer a água. Observe se os LEDs dos interruptores estão ligados. Observe o aumento gradual da temperatura no termopar instalado acima das resistências;
- Ligue o ventilador. O fluxo de ar pode ser controlado pelo orifício na tubulação de ar (perto da saída do ventilador) ou na entrada de ar do ventilador. Um medidor vazão no painel mostra o fluxo de ar em m<sup>3</sup>/h. Mexa nos controladores de vazão e veja os fluxos máximos e mínimos de operação da bancada.

**Após a conclusão destes passos a prática experimental com a bancada esta pronta para ser iniciada. Após a prática a bancada deve ser parada de modo adequado. Abaixo mostramos os procedimentos de parada para depois da realização das atividades.**

Para procedimentos de parada da bancada experimental

- Desligue o ventilador;
- Desligue as resistências;
- Desligue as duas chaves elétricas (retorno para a posição “OFF”);
- Feche a válvula de suprimento de água;
- Abra todas as válvulas de drenagem e esvazie o sistema.

## Observação:

Para a melhor compreensão das atividades abaixo, é importante que a temperatura inicial medida seja de mesmo valor, para podermos analisar melhor o decaimento da temperatura. Para um fluxo maior de água, mais resistências do equipamento devem ser ligadas.

## Atividade 1

Meça a temperatura da água ao longo da torre para dois valores de vazão de água. Ajuste a vazão de ar para 300 m<sup>3</sup>/h. Coloque a marca de vazão de água no nível 16 do rotâmetro. Ligue 3 resistências e espere o regime se tornar permanente. A temperatura de entrada deve chegar a aproximadamente 40,5 °C. Faça um gráfico de posição (altura do ponto mais alto para o mais baixo) X Temperatura. Faça o mesmo procedimento para o nível 12,5, mas agora ligue apenas 2 resistências. A temperatura também deve chegar perto dos 40,5°C. A vazão de ar deve permanecer igual a 340 m<sup>3</sup>/h. Coloque os gráficos das diferentes vazões juntos em apenas 1 gráfico, para compara-los. Faça uma análise dos dados obtidos.

## Atividade 2

Faça o mesmo procedimento da atividade 1, mas agora para uma vazão de ar igual a 400 m<sup>3</sup>/h.

### Atividade 3

Faça o mesmo procedimento da atividade 1, mas agora para uma vazão de ar igual a 280 m<sup>3</sup>/h.

### Atividade 4

Considerando que pudéssemos ter uma vazão infinita de água com temperatura inicial  $T_{quente}$ . Qual seria a forma do gráfico? Se a vazão de ar fosse finita, ele teria alguma influencia sobre a temperatura da água? Justifique.

## 3.5 Relatório do experimento

Este relatório deve ser feito de forma simples e possuir:

- Capa;
- Objetivo do experimento;
- Realização da Atividade proposta;
- Tabela de avaliação dos membros do item **3.6 Avaliação do experimento** (preenchida);
- Conclusão.

Formatação básica exigida:

- Papel A4 (outros formatos conforme necessário como por exemplo para desenhos);
- Margens: Superior = 2 cm, Inferior = 2 cm, Esquerda = 2,5 cm, Direita = 1,5 cm;
- Corpo do texto com espaçamento de 1,5 em Times New Roman 11, justificado entre margens;
- Títulos principais em fonte “Arial” de 18 pt, negrito, maiúscula;
- Subtítulos em fonte “Arial” de 12 pt, negrito, maiúscula;
- Numerar páginas no canto inferior direito;
- Figuras centradas entre margens com legenda e créditos.

**O relatório deve ter caráter direto, não ultrapassando seis folhas.**

### 3.6 Avaliação do experimento

Para este experimento será adotado duas formas de avaliação do aluno. A primeira será a nota do grupo, onde será avaliado o relatório do grupo e este terá uma nota entre 0 e 7 pontos. A segunda nota será uma avaliação do próprio grupo sobre seus participantes. Deverá ser avaliado neste segundo item a participação do aluno frente as atividades estabelecidas dentro do grupo. Esta avaliação terá uma nota de 0 a 3 pontos.

Para cálculo da nota final do experimento, deverá ser efetuada uma soma simples da nota do grupo com a nota individual do membro, utilizando a tabela abaixo.

**OBS: Utilize esta tabela (ou semelhante) ao final de seu relatório devidamente já preenchida com a nota individual de participação de cada integrante do grupo. O não preenchimento desta tabela (ou semelhante) implicará em perda de nota no relatório.**

Nome	Nota do Grupo (0 a 7)	Nota Individual (0 a 3)	Nota Total



ANEXO V: Experimento 4

---



Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

# **Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração**

## **Bancada de Torre de Resfriamento**



### **Prática de Laboratório 4**

### **Determinação do RANGE, APPROUCH e Eficiência da torre**



Universidade de Brasília  
Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração  
[www.laar.unb.br](http://www.laar.unb.br)

# Experimento 4

## 4.1. Objetivo

O objetivo deste experimento é realizar as primeiras medições na bancada experimental de torre de resfriamento e calcular a eficiência, o range e o approach da torre.

## 4.2. Visão Geral

Quando formos tratar do desempenho de uma torre de resfriamento, temos que ter em mente alguns parâmetros essenciais para a análise de performance. Estes parâmetros são:

- RANGE

$$\text{Sendo, } RANGE = T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}$$

- APPROUCH

$$\text{Sendo, } APPROUCH = T_{\text{saída}} - T_{\text{bulbo úmido}}$$

- Eficiência

$$\text{Sendo, } e_{\text{torre}} = \frac{T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}}{T_{\text{entrada}} - T_{\text{bulbo úmido}}}$$

Para cálculo destes devemos conhecer as condições de temperatura ambiente, pois sabemos que todos estes parâmetros são influenciados por elas.

A temperatura da terra varia muito de região e também ao longo do ano e isso, num projeto, pode afetar muito os custos iniciais e/ou os custos operacionais. Abaixo temos uma tabela feita com dados retirados dos slides de aula do professor Pimenta que trata das temperaturas (máxima, média e mínima) de bulbo úmido da Cidade de Brasília ao longo do ano. Esta tabela deverá ser utilizada para consulta de alguns dados.

**Tabela 1 - Valores da temperatura de bulbo úmido ao longo do ano para a cidade de Brasília.**

	Máxima	Média	Mínima
Ano	25,5	17,0	4,1
Janeiro	24,3	19,1	13,5
Fevereiro	25,0	19,2	13,1
Março	22,8	18,7	12,0
Abril	24,5	18,1	9,4
Maio	23,5	16,0	7,0
Junho	21,8	14,2	4,1
Julho	21,2	13,5	5,1
Agosto	21,8	14,1	5,3
Setembro	24,6	16,0	8,2
Outubro	23,1	18,0	10,3
Novembro	25,5	18,7	11,2
Dezembro	24,7	18,7	11,3

### 4.3. Equipamentos e instrumentação

A bancada esta equipada com termômetros ao longo do corpo da torre. Eles servem para medir a temperatura ao longo da troca de calor do ar com a água e assim entendermos melhor como é a relação desta troca.

O painel de controle fornece o controle das resistências utilizadas, do ventilador e também do fluxo de água através da passagem pelo rotâmetro.



Figura 1 - Painel de controle.

Para medição da temperatura, serão utilizados termômetros tipo agulha.



Figura 2 - Termômetro tipo agulha.

## 4.4. Atividade proposta

Inicialmente, os alunos devem trazer consigo, individualmente, as folhas impressas correspondente ao **EXPERIMENTO 2**. Sendo assim, o monitor da disciplina apresentará a bancada do Laboratório e apresentará seus componentes que foram previamente ilustrados.

Abaixo é listada uma série de procedimentos para ligar a torre de resfriamento de maneira correta e também desliga-la ao final das atividades.

Siga os passos para ligar e depois desligar a bancada (e marque o quadrado a direita). Em seguida, realize o resto das atividades.

Antes de ligar a bancada alguns procedimentos devem ser efetuados:

- Verifique se a área de trabalho ao redor da bancada esta limpa e livre de obstáculos, para evitar acidentes;
- Verifique se o plug da parte elétrica da bancada esta desconectado da tomada (rede elétrica);
- Se estiver conectado, desconecte o e termine os passos a seguir (a voltagem é alta 380V, tome cuidado);
- Faça uma rápida inspeção visual da zona de trabalho e da bancada para detectar possíveis problemas;
- Feche as válvulas de drenagem de água na parte inferior da bancada;
- Desligue as duas chaves elétricas da bancada (posição OFF);
- Desligue todos os interruptores das resistências elétricas;
- Conecte, com auxilio de uma mangueira, a válvula de entrada de água da bancada a uma torneira próxima;

**Depois de realizar TODOS os passos acima, realize os próximos procedimentos para operar a bancada.**

- Abra a válvula da fonte de água e espere até que o tanque de nível constante esteja cheio. Você vai saber quanto ele estiver cheio ao observar uma vazão de água pelo dreno;
- Abra a válvula de controle de vazão de água e observe no rotâmetro a marcação da vazão. Mexa na válvula e veja os limites máximos e mínimos que podem ser marcados;

- Coloque na vazão correspondente ao nível 24 cm no rotâmetro e espere até observar a queda d'água pelos enchimentos da torre (isto pode demorar um pouco); 
  - Se o nível marcado no rotâmetro abaixar, mesmo com a abertura da válvula no máximo, isso indica que a vazão de entrada de água na bancada é menor do que a vazão que você está requerendo. Corrija o problema aumentando a vazão de água na entrada da bancada e depois ajuste novamente para o nível 24 cm. Se não for possível aumentar a vazão de entrada, observe no rotâmetro o nível de vazão marcado e feche gradativamente a válvula até um nível de 1 cm abaixo do valor previamente marcado;
- Deixe a água encher o tanque coletor, na base da torre, e passar através do sistema “overflow” (tubo em “U”) do tanque para o dreno. O sistema de “overflow” deve ser sempre mantido cheio para impedir que o ar retorne.
- Verifique se para a vazão ajustada (24 cm do rotâmetro) ainda há saída de água pelo dreno. Se não houver saída de água pelo dreno, aumente a vazão da fonte de água para a bancada. Espere um pouco e veja se há saída. Repita os procedimentos até termos um pouco de saída de água pelo dreno;
- Abra a válvula de drenagem do tanque coletor para esvaziá-lo. Ajuste a válvula de drenagem de modo que a água sempre cubra o sensor do termopar instalado no tanque coletor. Este termopar mede a temperatura de saída da água e deve sempre estar submerso. A vazão de entrada de água na torre deve ser a mais próxima possível da vazão de saída de água pelo dreno do tanque coletor, para garantir que este termopar esteja sempre coberto por água;

**Agora iniciaremos os procedimentos com a parte elétrica da bancada. Tome cuidado com estes procedimentos, pois a bancada possui uma alta tensão de operação (380Volts).**

- Ligue o plug da parte elétrica da bancada na rede elétrica;
- Ligue as duas chaves elétricas (posição “ON”);
- Ligue os interruptores das resistências elétricas para aquecer a água. Observe se os LEDs dos interruptores estão ligados. Observe o aumento gradual da temperatura no termopar instalado acima das resistências;
- Ligue o ventilador. O fluxo de ar pode ser controlado pelo orifício na tubulação de ar (perto da saída do ventilador) ou na entrada de ar do ventilador. Um medidor vazão no painel mostra o fluxo de ar em m<sup>3</sup>/h. Mexa nos controladores de vazão e veja os fluxos máximos e mínimos de operação da bancada.

**Após a conclusão destes passos a prática experimental com a bancada esta pronta para ser iniciada. Após a prática a bancada deve ser parada de modo adequado. Abaixo mostramos os procedimentos de parada para depois da realização das atividades.**

Para procedimentos de parada da bancada experimental

- Desligue o ventilador;
- Desligue as resistências;
- Desligue as duas chaves elétricas (retorno para a posição “OFF”);
- Feche a válvula de suprimento de água;
- Abra todas as válvulas de drenagem e esvazie o sistema.

## Atividade 1

Ligue todas as resistências elétricas e ajuste o valor do rotâmetro para a marca de nível 18 mm. Ligue o ventilador e ajuste a vazão de ar para 350 m<sup>3</sup>/h de ar. Determine os valores de RANGE, APPROUCH e a eficiência ao longo do ano para a cidade de Brasília. Utilize a tabela 1 como forma de consulta.

## Atividade 2

Ligue todas as resistências elétricas. Para a velocidade do ventilador constante igual a 350 m<sup>3</sup>/h, varie a vazão de água em três níveis diferentes. Utilize as marcas de 12 mm, 15 mm e 18 mm do rotâmetro. Determine o RANGE, APPROUCH e a eficiência da torre para o mês de realização do experimento.

## Atividade 3

Ligue todas as resistências. Para uma vazão constante igual a 16 mm na escala do rotâmetro, varie a vazão de ar. Use as vazões de ar de 300 m<sup>3</sup>/h e 400 m<sup>3</sup>/h. Calcule o RANGE, o APPROUCH e a eficiência da torre para o mês de realização do experimento.



## Atividade 4

Considerando que os valores medidos **experimentalmente na atividade 1** fossem constantes ao longo do ano, que mês a torre apresentaria:

- O maior valor de RANGE;
- O menor valor de APPROUCH;
- A maior eficiência.

Explique o resultado encontrado analisando os fatores ambientais que influenciaram estes parâmetros.

## 4.5. Relatório do experimento

Este relatório deve ser feito de forma simples e possuir:

- Capa;
- Objetivo do experimento;
- Realização da Atividade proposta;
- Tabela de avaliação dos membros do item **4.6 Avaliação do experimento** (preenchida);
- Conclusão.

Formatação básica exigida:

- Papel A4 (outros formatos conforme necessário como por exemplo para desenhos);
- Margens: Superior = 2 cm, Inferior = 2 cm, Esquerda = 2,5 cm, Direita = 1,5 cm;
- Corpo do texto com espaçamento de 1,5 em Times New Roman 11, justificado entre margens;
- Títulos principais em fonte “Arial” de 18 pt, negrito, maiúscula;
- Subtítulos em fonte “Arial” de 12 pt, negrito, maiúscula;
- Numerar páginas no canto inferior direito;
- Figuras centradas entre margens com legenda e créditos.

**O relatório deve ter caráter direto, não ultrapassando seis folhas.**

## 4.6. Avaliação do experimento

Para este experimento será adotado duas formas de avaliação do aluno. A primeira será a nota do grupo, onde será avaliado o relatório do grupo e este terá uma nota entre 0 e 7 pontos. A segunda nota será uma avaliação do próprio grupo sobre seus participantes. Deverá ser avaliado neste segundo item a participação do aluno frente as atividades estabelecidas dentro do grupo. Esta avaliação terá uma nota de 0 a 3 pontos.

Para cálculo da nota final do experimento, deverá ser efetuada uma soma simples da nota do grupo com a nota individual do membro, utilizando a tabela abaixo.

**OBS: Utilize esta tabela (ou semelhante) ao final de seu relatório devidamente já preenchida com a nota individual de participação de cada integrante do grupo. O não preenchimento desta tabela (ou semelhante) implicará em perda de nota no relatório.**

Nome	Nota do Grupo (0 a 7)	Nota Individual (0 a 3)	Nota Total