



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



FERNANDO BORSATTO DE FARIA

ESTUDO TEÓRICO SOBRE TORRES DE RESFRIAMENTO

VOLTA REDONDA

2020

FERNANDO BORSATTO DE FARIA

ESTUDO TEÓRICO SOBRE TORRES DE RESFRIAMENTO

Monografia apresentada a graduação de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Coordenador: Prof. Dr. Diniz Felix dos Santos Filho

VOLTA REDONDA

2020



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



FERNANDO BORSATTO DE FARIA

ESTUDO TEÓRICO SOBRE TORRES DE RESFRIAMENTO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“ENGENHEIRO MECÂNICO”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Diniz Felix dos Santos Filho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALEXANDRE ALVARENGA PALMEIRA

1º Membro da banca/UniFOA

Profa. Dr. ALEXANDRE FERNANDES HABIBE

2º Membro da banca/Orientador/UniFOA

Prof. Dr. RUI AURELIO BARBOSA

3º Membro da banca/UniFOA

Junho de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, em seguida a Larissa Brandão por sempre acreditar em mim.

FARIA, F. B. **Estudo Teórico Sobre Torres De Resfriamento**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020.

RESUMO

Este trabalho tem o intuito de oferecer material de apoio ao estudo teórico do tema torres de resfriamento. Por meio dele, o aluno é capaz de iniciar as noções básicas dos aspectos gerais de uma torre de resfriamento, aprender sobre os conceitos relacionados, caracterizar e qualificar as torres de resfriamento através: de seus métodos de exposição da água a corrente de ar; dos tipos de torres existentes; do modo de distribuição da água; dos enchimentos; dos eliminadores de gotas; saber estimar a quantidade de água para reposição; saber o que é os ciclos de concentração; noções sobre tratamento de água; conhecimento de algumas observações gerais; custos básicos dos componentes e da manutenção; e por fim; noções parciais do processo de dimensionamento.

Palavra-chave: Torres de Resfriamento; Refrigeração; Dimensionamento.

FARIA, F. B. **Theoretical Study on Cooling Towers**. 2020. Monograph (Graduation in Mechanical Engineering) - Oswaldo Aranha Foundation, Volta Redonda University Center, Volta Redonda, 2020.

ABSTRACT

This work aims to offer material to support the theoretical study of the theme of cooling towers. Through it, the student is able to begin with basic notions of the general aspects of a cooling tower, learn about the related concepts, characterize and qualify as cooling towers through: their methods of exposing water to an air stream; the types of existing towers; make water distribution mode; fillers; drop eliminators; estimate of quantity of water for replacement; to know what concentration cycles are; notions about water treatment; knowledge of some general presentations; basic component and maintenance costs; and finally; partial notions of the design process.

Keyword: Cooling towers; Refrigeration; Sizing.

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Duas Torres de Resfriamento de tiragem natural -----	20
Figura 2. Torre de resfriamento de tiragem mecânica -----	20
Figura 3. Funcionamento de uma torre de resfriamento mista -----	22
Figura 4. Funcionamento simplificado de uma torre de resfriamento do tipo tiragem mecânica induzida -----	23
Figura 5. Modelos antigos de torre de tiragem natural -----	25
Figura 6. Torres de resfriamento de tiragem mecânica em série -----	27
Figura 7. Torre hibrida (seca e úmida) com tiragem mecânica induzida e forçada -	28
Figura 8. Range e Approach -----	29
Figura 9. Torres de circuito fechado e circuito aberto respectivamente -----	31
Figura 10. Torre com fluxo em contracorrente -----	34
Figura 11. Torre com fluxo cruzado -----	35
Figura 12. Torres de tiragem natural ou hiperbólicas -----	36
Figura 13. Exemplo de Torre de tiragem natural em fluxo cruzado -----	37
Figura 14. Torre de tiragem natural contra corrente -----	37
Figura 15. Demonstrativo do interior de uma torre de tiragem com e sem recheio -	38
Figura 16. Torre de tiragem natural auxiliada por ventiladores -----	39
Figura 17. Torre de tiragem mecânica -----	41
Figura 18. Vários modelos de torre de tiragem mecânica -----	42
Figura 19. Torre de tiragem mecânica induzida -----	43
Figura 20. Vista explodida de torre de tiragem mecânica induzida -----	43
Figura 21. Torre de resfriamento de tiragem forçada em contracorrente -----	45

Figura 22. Torre de tiragem mecânica forçada em contracorrente e circuito aberto --- -----	46
Figura 23. Desenho esquemático do sistema de distribuição da água da torre por gravidade -----	48
Figura 24. Desenho esquemático do sistema de distribuição de água da torre por pressão-----	49
Figura 25. Exemplo de enchimento de gotejamento -----	52
Figura 26. Gotícula de água em um escoamento de ar seco -----	53
Figura 27. Exemplo de enchimento laminar -----	54
Figura 28. Exemplo de eliminador de gotas -----	56
Figura 29. Corrosão em tubulação -----	63
Figura 30. Incrustações -----	64
Figura 31. Crescimento de organismos em torre de resfriamento -----	65
Figura 32. Gráficos psicrométricos representando as linhas das propriedades do ar - -----	74
Figura 33. Análise do topo da torre -----	84
Figura 34. Esquema da interação líquido/gás -----	84
Figura 35. Análise da base da torre -----	85
Figura 36. Esquema da interação líquido/gás -----	86
Figura 37. Balanço de energia no corpo da torre de resfriamento -----	88
Figura 38. Representação da troca térmica no interno da torre -----	89
Figura 39. Linha de operação tangenciando linha de equilíbrio -----	91
Figura 40. Linha de operação Interceptando linha de equilíbrio -----	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfico psicrométrico para temperaturas normais -----	72
Gráfico 2. Gráfico psicrométrico para altas temperaturas -----	73

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. -----	30
Equação 2. -----	58
Equação 3. -----	59
Equação 4. -----	59
Equação 5. -----	59
Equação 6. -----	60
Equação 7. -----	60
Equação 8. -----	76
Equação 9. -----	76
Equação 10. -----	77
Equação 11. -----	77
Equação 12. -----	78
Equação 13. -----	78
Equação 14. -----	78
Equação 15. -----	79
Equação 16. -----	79
Equação 17. -----	79
Equação 18. -----	87
Equação 19. -----	87
Equação 20. -----	87
Equação 21. -----	87

Equação 22.	87
Equação 23.	90
Equação 24.	90
Equação 25.	90
Equação 26.	90
Equação 27.	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivos gerais	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 TORRE DE RESFRIAMENTO	19
2.1 ASPECTOS GERAIS	19
2.2 HISTÓRIA DAS TORRES DE RESFRIAMENTO	25
2.3 CONCEITOS RELACIONADOS A TORRES DE RESFRIAMENTO	29
2.4 TORRES DE CIRCUITO FECHADO OU ABERTO	31
2.5 TORRES SECAS E TORRES ÚMIDAS	32
2.6 MÉTODOS DE EXPOSIÇÃO DA ÁGUA À CORRENTES DE AR	34
2.7 TIPOS DE TIRAGEM EM TORRE DE RESFRIAMENTO	36
2.7.1 Torres de tiragem natural	36
2.7.2 Torres de tiragem mecânica	41
2.7.2.1 Tiragem mecânica induzida	43
2.7.2.2 Tiragem mecânica forçada	45
2.8 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	48
2.8.1 Sistema de distribuição por gravidade	48
2.8.2 Sistema de distribuição por pressão	49

2.9 ENCHIMENTOS (OU RECHEIOS) -----	51
2.9.1 Enchimento de gotejamento ou respingo (splash fill) -----	51
2.9.2 Enchimento de película ou laminar (film fill) -----	54
2.10 ELIMINADORES DE GOTAS -----	56
2.11 REPOSIÇÃO DE ÁGUA E CICLOS DE CONCENTRAÇÃO -----	58
2.12 TRATAMENTO DA ÁGUA DA TORRE DE RESFRIAMENTO -----	61
2.12.1 Corrosão -----	63
2.12.2 Incrustação -----	64
2.12.3 Crescimento biológico -----	65
2.13 OBSERVAÇÕES IMPORTANTES -----	66
2.13.1 Motores -----	66
2.13.2 Bombas de água -----	66
2.13.3 Ventiladores -----	66
2.13.4 Fibra de vidro (PRFV) -----	67
2.13.5 Venezianas -----	67
2.13.6 Vibrações e detector de vibrações -----	67
2.13.7 Redutor de velocidade -----	68
2.13.8 “Plume” -----	68
2.14 CUSTOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO -----	68
2.14.1 Custos de investimento inicial -----	68
2.14.2 Custos fixos operacionais -----	69
3 CONCEITOS USADOS NO DIMENSIONAMENTO -----	70
3.1 PSICROMETRIA E CARTAS PSICROMÉTRICAS -----	70

3.2 UMIDADE ABSOLUTA	76
3.3 UMIDADE RELATIVA	76
3.4 UMIDADE ESPECÍFICA	77
3.5 LEI DE DALTON	77
3.6 ENTALPIA ESPECÍFICA	78
3.7 VOLUME ESPECÍFICO	79
3.8 TEMPERATURA DE BULBO SECO	80
3.9 TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO	80
3.10 TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO	81
4 DIMENSIONAMENTO	82
4.1 UMIDIFICAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO	82
4.1.1 Finalidade da umidificação/desumidificação	83
4.1.2 Análise no topo de uma torre de resfriamento	83
4.1.3 Análise na base de uma torre de resfriamento	85
4.2 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NUM VOLUME DE CONTROLE	86
4.3 LINHA DE OPERAÇÃO	89
5 CONCLUSÃO	93
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em muitos processos industriais a geração de calor é algo a ser controlado, e esta intimamente ligado a boa operação do equipamento, sendo necessário a dissipação deste calor, é feito naturalmente pelo próprio equipamento através do diferencial de temperatura com o ambiente, e quando não se é suficiente, de maneira forçada através de sistemas que proporcionam o contato do equipamento com um fluído refrigerante, mais usualmente a água, por ser um elemento de grande abundância na natureza. 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 conceituado 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 com a finalidade de atender grandes demandas de resfriamento, apresentando um modo limpo e muito econômico de se resfriar a água para ser reutilizada. Em geral são usadas em grandes instalações industriais, mas atendem qualquer área que tenha essa necessidade, podendo ser aplicada em grandes centros comerciais como shoppings, grandes hotéis (devido ao uso de caldeiras) ou qualquer outro grande complexo que demande grande resfriamento de água.

Devido os grandes problemas ambientais que nos afligem, as torres de resfriamento de água passaram a ser modificadas e modernizadas para que ajudassem no uso consciente de água. Desta forma, futuramente a tendência é a integração dos circuitos serem fechados ou híbridos (torres secas e úmidas) e automatizado para ter maior viabilidade econômica.

Segundo a Global Industry Analysts, Inc (2012), o mercado de torres de resfriamento cresceram muito nos anos anteriores e movimentaram cerca de 1,8 bilhões de dólares em 2015 e 2,6 bilhões de dólares em 2018.

Este grande aumento na demanda das torres de resfriamento deve-se 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 a o grande potencial que este modelo de negócio alcança no mundo todo. O crescente aumento do estudo e da tecnologia aplicada a este setor visa cada vez mais, maior disponibilidade a este equipamento ao decorrer dos anos. O Brasil como uma potência emergente, que visa o crescimento industrial, deve acompanhar este mercado, ainda mais com a relação crescente entre indústria/meio ambiente. Sendo assim para que o meio industrial brasileiro se torne mais competitivo, o setor de torres de resfriamento é a área que consegue conciliar uma opção mais econômica com o meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivo geral**

Este trabalho tem como finalidade o estudo sobre torres de resfriamento, para ampliação dos conhecimentos acerca de soluções de resfriamento para processos que utilizam água como fluido refrigerante.

1.2.2 **Objetivo específico**

A primeira parte visa reunir conteúdo do tema em questão visando os aspectos gerais da torre de resfriamento, passando por todos os seus elementos especificando-os e qualificando-os.

Já a segunda parte tem como objetivo demonstrar basicamente o dimensionamento teórico de uma torre de resfriamento através de dois pontos iniciais do dimensionamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

Como no curso de engenharia mecânica não há matéria específica para tal assunto, foi abordado devido a sua importância para o meio industrial.

Notando a necessidade de maior inserção deste assunto no meio acadêmico, e a falta de material disponível do mesmo, tal trabalho será importante para a criação de conteúdo introdutório para os que têm interesse no assunto, sendo assim ponto de partida para um estudo mais aprofundado.

2 TORRE DE RESFRIAMENTO

No capítulo 4 será dissertado sobre torres de resfriamento. Será descrito sobre os 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

Uma torre de resfriamento, torre de refrigeração ou torre de arrefecimento, tem como objetivo principal a refrigeração como seu próprio nome já diz, que é a troca de calor proveniente da diferença de temperatura entre dois fluídos, sendo o fluído refrigerante o mais frio, e o fluído do processo o mais quente, após feita a troca de calor o fluído do processo retorna mais frio e o fluído refrigerante fica mais quente, sendo assim um equipamento que faz a transferência de calor.

Figura 1. Duas Torres de Resfriamento de tiragem natural



Fonte: <http://www.ecology.com/2012/06/05/water-cooled-power-plants-warming-climate/>,
Credit: NRC/First Entergy

Figura 2. Torre de resfriamento de tiragem mecânica



Fonte:

http://www.swlf.ait.ac.th/Old/Visu_CD/photo_collection/china/fieldvisit/Cooling%20Tower%20at%20%20%20the%20Incineration%20plant.JPG

As torres de resfriamento podem ser classificadas de acordo com seus métodos de transferência de calor, sendo eles:

Transferências secas

É o processo de troca de calor onde os fluidos não entram em contato um com o outro (ou também chamado de circuito de sistema fechado pelo fato do fluido a ser refrigerado permanecer em sistema fechado), sendo separados por exemplo pelas paredes de uma tubulação, utilizando a transferência de calor por convecção forçada, tendo assim perdas mínimas de fluídos durante o processo.

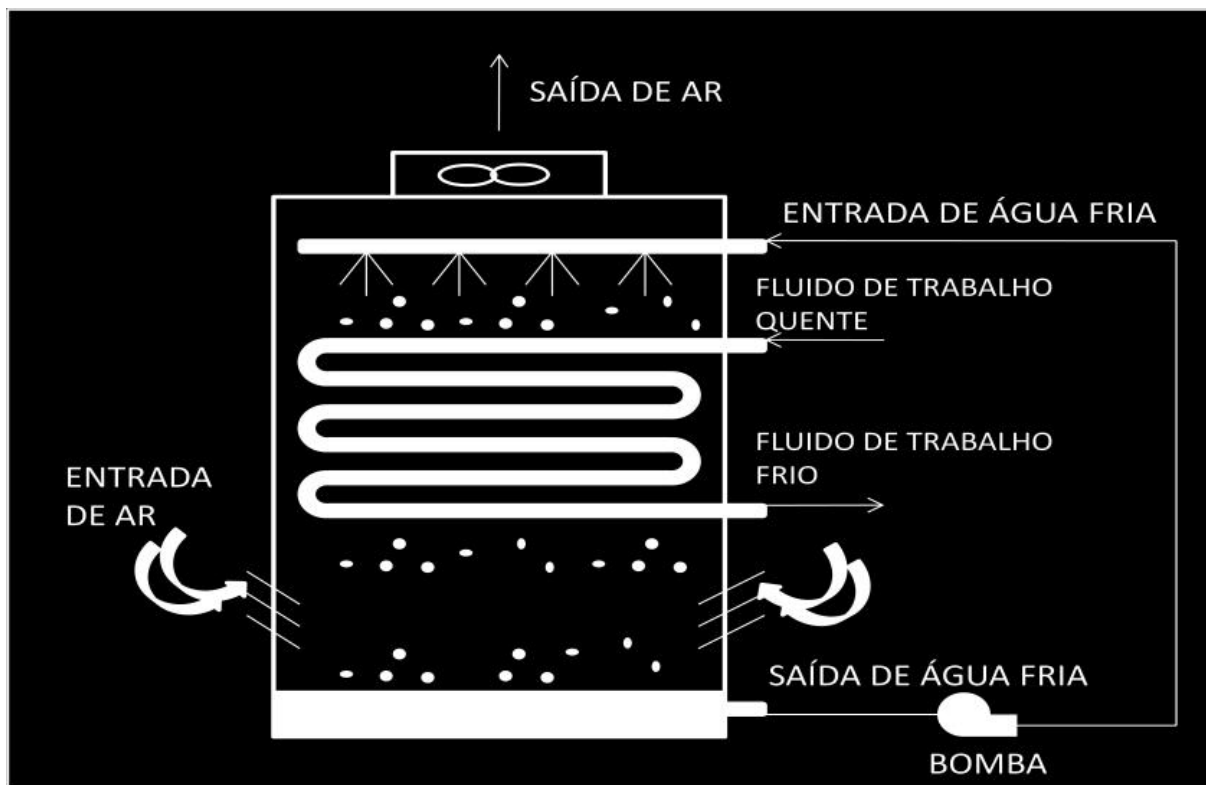
Transferências úmidas

É a transferência onde os fluídos estão em contato direto (também chamado de sistema aberto), conhecido como transferências úmidas de calor trocas que envolvem mudança de fase da água, ou seja, do estado gasoso para o líquido (condensação) e do líquido para o vapor (evaporação). Para que ocorra a evaporação é necessário um dispêndio de energia, essa perda de energia provém do calor latente restante da água.

Transferências mistas

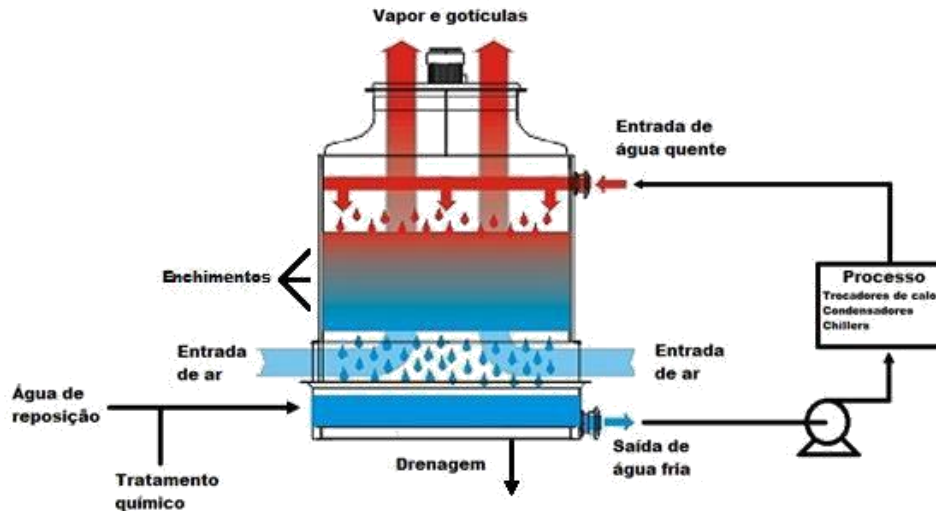
Quando se unem os dois processos de transferências úmida e seca, tentando melhorar a troca de calor, juntamente aumentando o custo de operação, manutenção e o capital inicial. Utiliza-se para casos específicos.

Figura 3. Funcionamento de uma torre de resfriamento mista



Fonte: <http://docplayer.com.br/55504267-Otimizacao-de-torres-de-resfriamento.html>

Figura 4. Funcionamento simplificado de uma torre de resfriamento do tipo tiragem mecânica induzida



Fonte: 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.

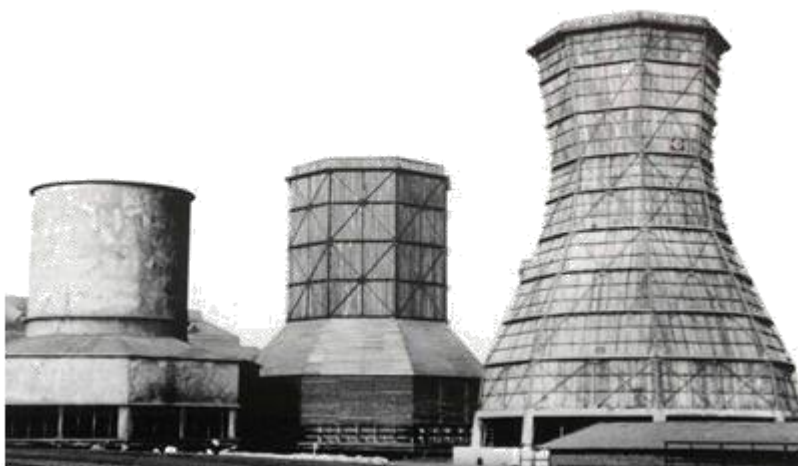
Uma torre de refrigeração é essencialmente um dispositivo de grande remoção de calor de um processo para ser, posteriormente, lançado para a

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 5. 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 Balcke & Co forneceu para uma Usina Termo Elétrica a maior torre de tiragem natural do mundo (até então construída), com capacidade de resfriar 43 mil m³ 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 6. 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 m³/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 m³/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 m³/h, ambas construídas pela Empresa Vettor.

Figura 7. 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 melhor compreensão do assunto, iremos explicar sobre alguns termos usados nas torres de resfriamento.

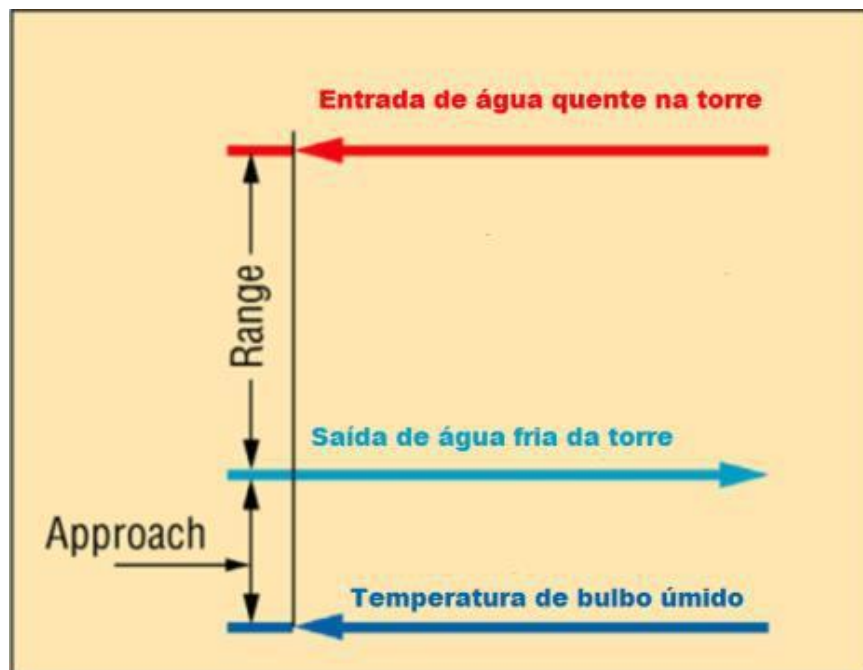
Range (**Figura 8.**)

Range é a diferença de temperatura do fluido de trabalho antes e depois de ser refrigerado, sendo antes a entrada de água quente da torre na parte superior e depois a saída de água fria da torre na parte inferior.

Approach (**Figura 8.**)

O approach é a diferença de temperatura da água fria de saída da torre com a temperatura de bulbo úmido do ar de entrada da torre na parte inferior.

Figura 8. Range e Approach



Fonte: <http://chemicalengineeringsite.in/cooling-tower-efficiency-calculations/>

Eficiência da torre de resfriamento

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

$$e_{\text{torre}} = \frac{T_{\text{entrada da água}} - T_{\text{saída da água}}}{T_{\text{entrada da água}} - T_{\text{bulbo úmido}}}$$

(1)

Purga (blow down)

O reservatório no fundo da torre onde se acumula a água que foi refrigerada é chamado de tanque, que tem a finalidade de reter fluído para que possa ser bombeada novamente para o sistema, neste local pela água ficar represada, há o acúmulo de resíduos (sujeiras, material orgânico, excesso de sais e qualquer outro resíduo depositado no fundo do tanque), tendo a necessidade de ser feita a limpeza para que não haja grande contaminação do sistema de refrigeração, esse processo de retirada de resíduos é caracterizado como purga, que é feito através de drenos instalados no fundo do tanque.

2.4 TORRES DE CIRCUITO FECHADO OU ABERTO

Para melhor compreensão, temos que entender que a torre de resfriamento tem a finalidade de refrigerar um fluido de trabalho, não que seja necessariamente água, sendo o fluido mais usado em torres de resfriamento, mas não o único, sendo assim podemos classificar as torres de resfriamento em circuito aberto ou fechado.

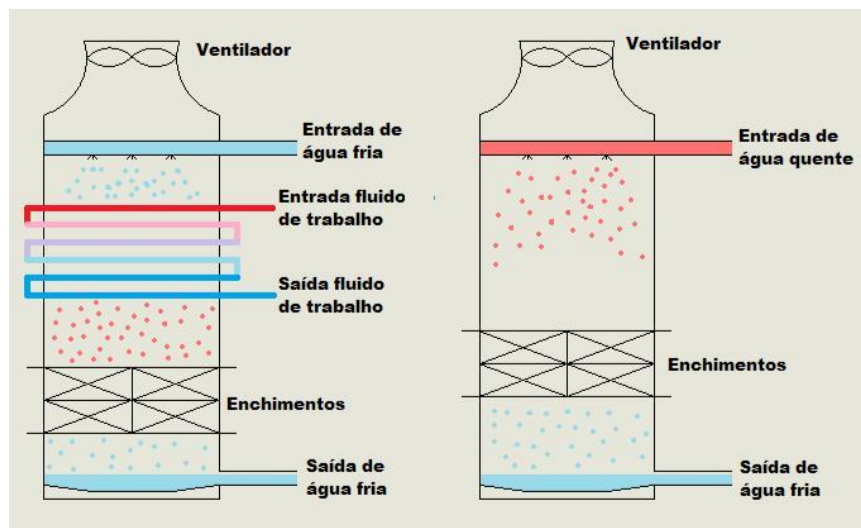
Torres de circuito fechado (figura 2.8):

O circuito fechado se caracteriza pelo fluido de trabalho não entrar em contato com o fluido refrigerante, geralmente sendo separados por tubulação. A refrigeração acontece através de convecção forçada, sendo o fluido de trabalho o mais quente passar entre as tubulações que transportam o fluido refrigerante que está em temperaturas mais baixas.

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 9. Torres de circuito fechado e circuito aberto respectivamente.



2.5 TORRES SECAS E TORRES ÚMIDAS

Essencialmente o termo 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 contato direto entre o fluido de trabalho e o fluido refrigerante, nesse método teremos troca de calor sensível e latente, sendo o latente o responsável pela maior parte da troca de calor, conhecido também como evaporativo, que consiste na adição de vapor de água no ar, o que causa uma diminuição da temperatura do ar e da água também. A energia necessária para evaporar a água é retirada da massa restante de água, reduzindo assim sua temperatura sendo cerca de 1% da água entra no ar na forma de vapor d'água, absorvendo seu calor latente de vaporização da água restante e, portanto, causa a redução na temperatura da água, à medida que o ar ambiente é atraído pelo fluxo de água. Parte dessa água levada em forma de vapor pelo ar será repostada no sistema para que não haja perdas. A água restante (resfriada) é coletada em um poço na parte inferior da torre e retornada ao condensador. 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 relevante nas torres de resfriamento. São variados os métodos para esta exposição, cada um com sua característica específica, mas devemos levar em conta a melhor aplicação de todos para que haja melhor rendimento.

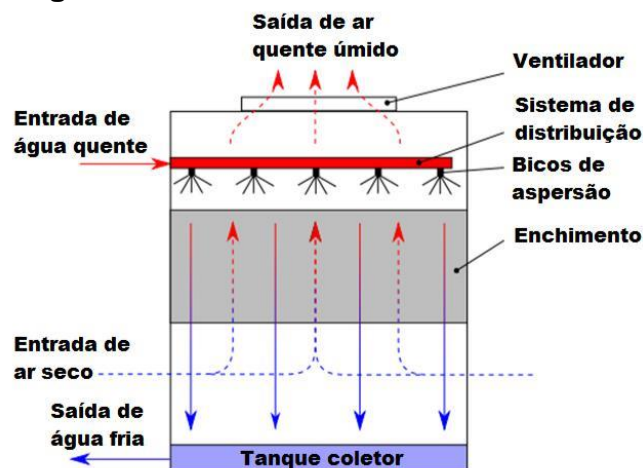
Um dos tipos de classificação é a forma que a água é distribuída ao longo da torre (nos enchimentos) para melhorar a eficácia do contato da água com o ar. Falaremos sobre os enchimentos mais a frente neste capítulo.

Outra forma de classificação são os tipos de fluxo relativos entre as correntes de ar e água.

Há dois métodos existentes:

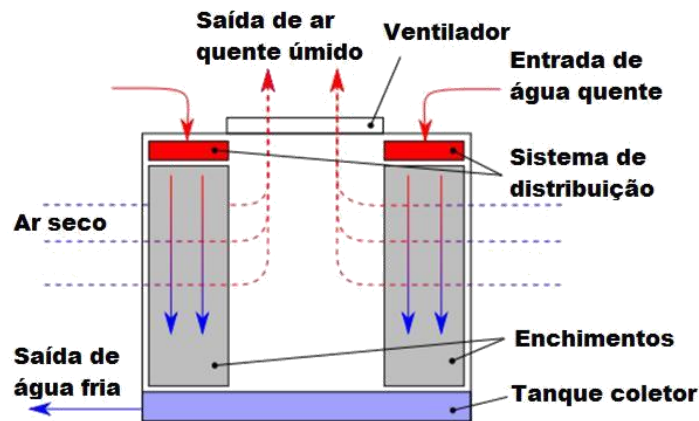
- Torres de fluxo em contracorrente (figura 2.9);
- Torres de fluxo cruzado (figura 2.10).

Figura 10. Torre com fluxo em contracorrente



Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_tower, com adaptações do autor

Figura 11. Torre com fluxo cruzado



Fonte: 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).

2.7.1 Torres de tiragem natural

Figura 12. Torres de tiragem natural ou hiperbólicas

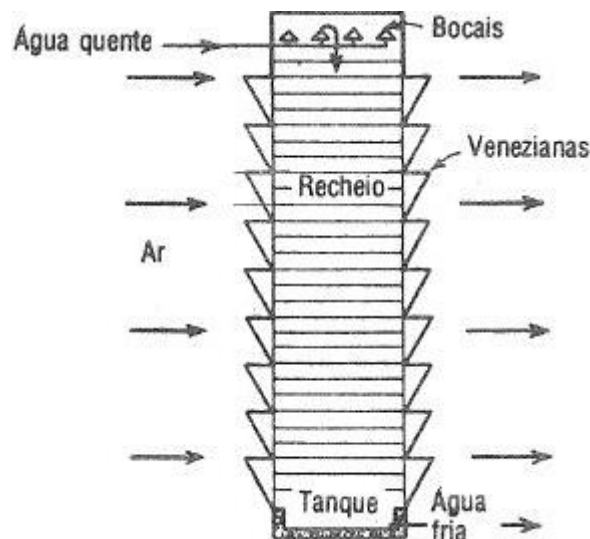


Fonte: <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/392003>

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

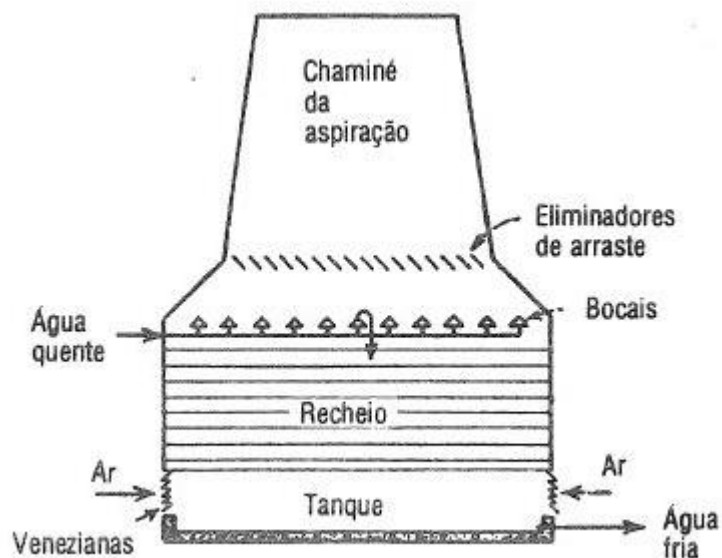
ventos na altura da base faz com que o processo seja acelerado e aumente sua eficiência (por isso a importância de lugares com ventos fortes). Neste tipo de torre a água pode encontrar em contato com a corrente de ar tanto em fluxo em contracorrente como em fluxo cruzado.

Figura 13. Exemplo de Torre de tiragem natural em fluxo cruzado



Fonte: erica.jpg

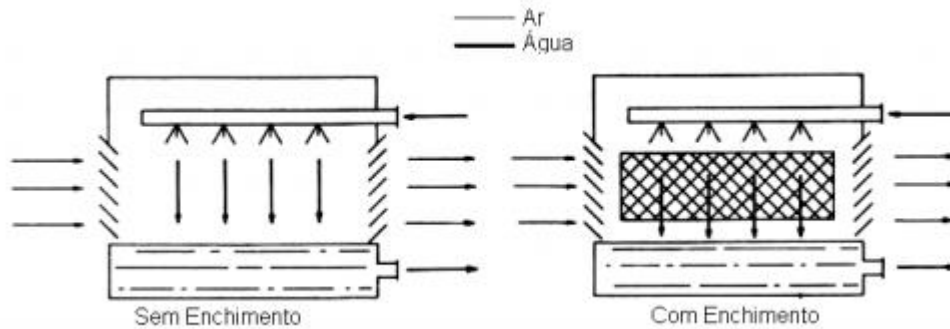
Figura 14. Torre de tiragem natural contra corrente



Fonte: <http://200.20.226.69/rid=1KLWKTYR8-1MK9DC9-JBJ/aspiracao%20natural.jpg>

Em relação a esse tipo de torre, pode-se distinguir entre as que não possuem enchimento e as que possuem enchimento de respingo (**Figura 15.**)

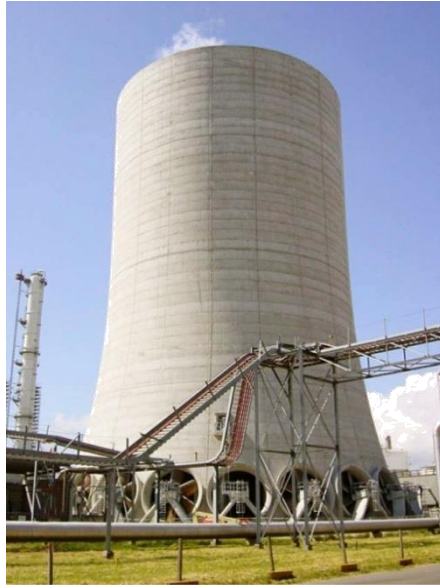
Figura 15. - Demonstrativo do interior de uma torre de tiragem com e sem recheio



Fonte: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4086/torres.de.resfriamento2.pdf>

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 16. 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 ar ficam orientadas para o centro (devido ao formato da parede) aumentando a corrente de ar para a parte superior;
- O formato convergente-divergente cria uma região de baixa pressão na parte superior da torre criando o efeito de arraste 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;

2.7.2 Torres de tiragem mecânica

Figura 17. Torre de tiragem mecânica



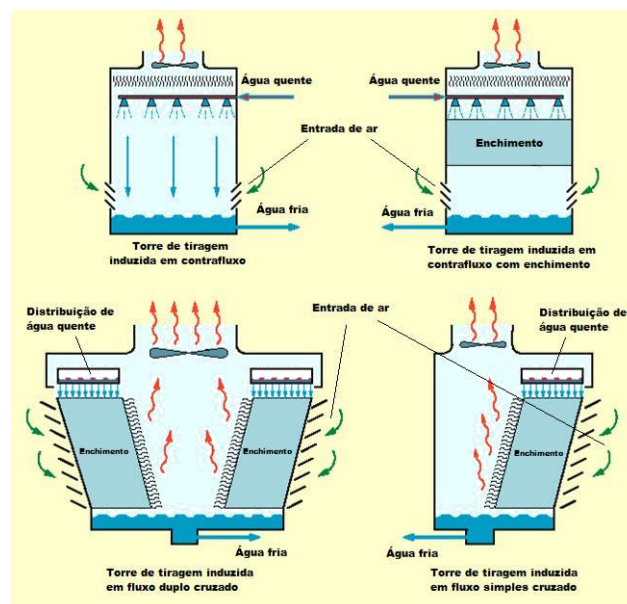
Fonte: <http://blog.thermwood.com/default.aspx?Tag=manufacturing>

É o tipo de torre que para haver o fluxo de ar em seu interior são necessários ventiladores que gerem de forma induzida ou forçada a condução do ar. De maneira geral apresentam as seguintes características quando comparadas as torres atmosféricas:

- Mais compactas;
- Mais eficientes;
- Vários modelos (**Figura 18.**)
- 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 18. Vários modelos de torre de tiragem mecânica



Fonte: <http://cooling-tower-online.com/>

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

2.7.2.1 Tiragem mecânica induzida

Figura 19. Torre de tiragem mecânica induzida



Fonte: http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.

Figura 20. Vista explodida de torre de tiragem mecânica induzida



Fonte: http://spxcooling.com/pdf/a4_CP-10.

Características:

- 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;

2.7.2.2 Tiragem mecânica forçada

Figura 21. Torre de resfriamento de tiragem forçada em contracorrente



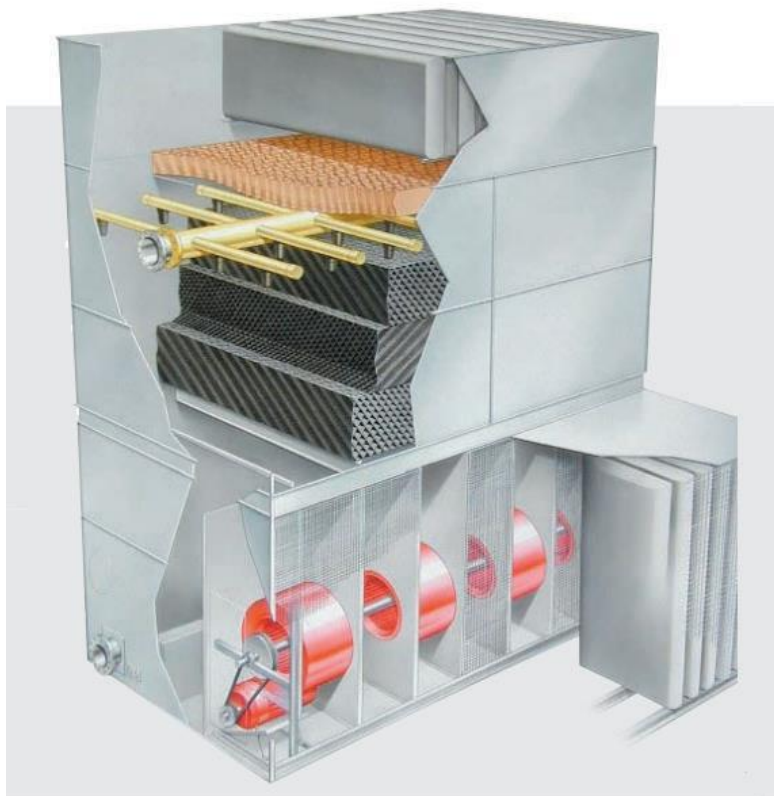
Fonte: <http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf>

Características:

- 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 22. Torre de tiragem mecânica forçada em contracorrente e circuito aberto



Fonte: <http://spxcooling.com/pdf/MC-07.pdf>

A torre de tiragem mecânica forçada tem grande utilidade em instalações onde não se disponibiliza de muito espaço, mesmo sua relação de gasto/resfriamento seja a maior ela dispõe de maior eficiência, não havendo a necessidade de grandes plantas de resfriamento para poder atender a demanda desejada.

2.8 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

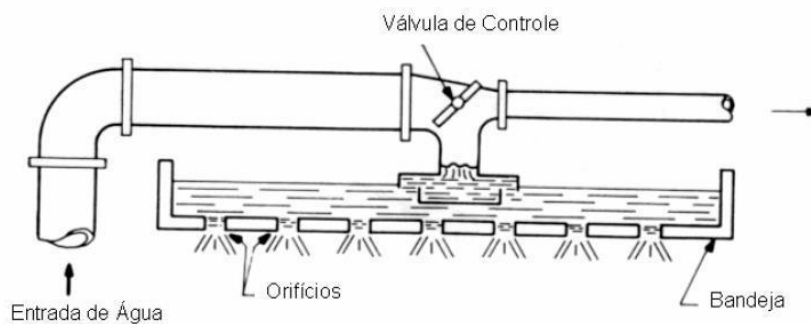
Os sistemas de distribuição de água podem ser classificados em dois tipos:

- Por gravidade
- Por pressão

Para melhor compreensão explicaremos e compararemos algumas de suas características

2.8.1 Sistema de distribuição por gravidade:

Figura 23. Desenho esquemático do sistema de distribuição da água da torre por gravidade



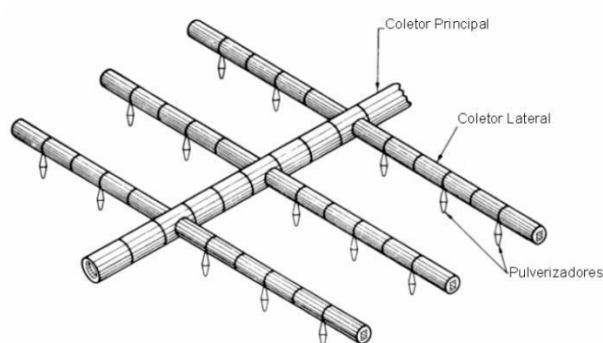
Fonte: <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf>

Características:

- Possui uma bandeja alimentada com água, onde a água escoar (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;
- 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 regulagem 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.
-

2.8.2 Sistema de distribuição por pressão

Figura 24. Desenho esquemático do sistema de distribuição de água da torre por pressão



Fonte: <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/torres-de-resfriamento2.pdf>

Características:

- Este sistema de distribuição esta 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, fazendo com que fique maior tempo em contato os fluidos, favorecendo a presença de uma grande superfície úmida por meio ao surgimento de gotas ou películas finas, 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, os enchimentos e serem fabricados devem ser feitos com material resistente, 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 mais usados:

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

2.9.1 Enchimento de gotejamento ou respingo (splash fill)

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..

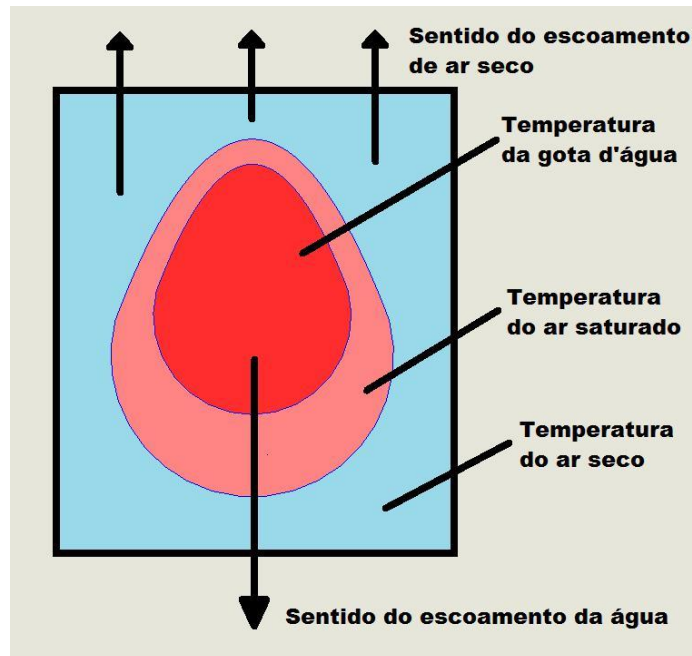
Figura 25. Exemplo de enchimento de gotejamento



Fonte: <http://vettor.com.br/store/index.php/internos/enchimento-de-respingo-v-bar-1500-mm.html>

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:

Figura 26. Gotícula de água em um escoamento de ar seco



Fonte: <https://docplayer.com.br/10518792-Torre-de-resfriamento-modelagem-simulacao-e-testes-experimentais-para-apoio-ao-ensino-de-engenharia-mecanica.html>

Para haver a melhor eficiência da torre, é necessário a distribuição homogênea dos enchimentos por toda a área interna que ela for preenchida, para que não haja desproporcionalidade de distribuição de água em seu interior influenciando assim diretamente o rendimento da torre na hora de haver a troca de calor. Sua eficiência área/resfriamento é menor do que das torres laminares, em compensação se aumenta a altura da torre para haver maior área e tempo de contato da água com o ar, tendo também uma desvantagem de maior arraste de água devido ao sistema de gotejamento, por consequência obriga que os eliminadores de gotas sejam de bom rendimento.

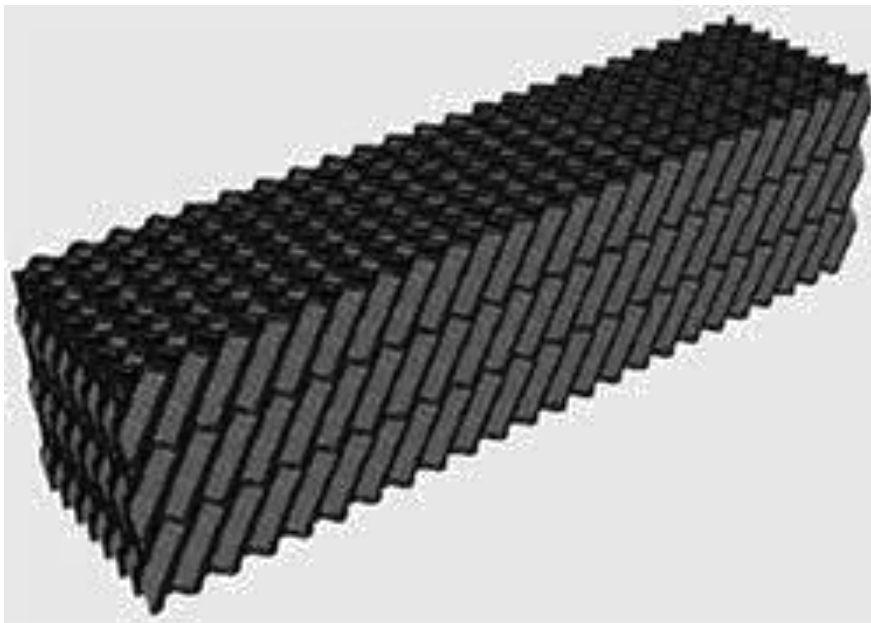
Geralmente esses enchimentos eram feitos de madeira, mas com o passar do tempo foi se tornando obsoleto e novas matérias como os metais e os sintéticos

foram tomando espaço devido suas propriedades atenderem melhor os requisitos que as torres necessitavam para o seu funcionamento.

2.9.2 Enchimento de película ou laminar (film fill)

Seu objetivo obter o escoamento sobre a superfície do enchimento formando finas películas de água com o intuito de aumentar a área de contato com o ar para melhorar a eficiência da troca de calor. Comparada ao enchimento de gotejamento, este apresenta maior eficiência por volume ocupado. Seu desempenho 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.

Figura 27. Exemplo de enchimento laminar



Fonte: <http://www.termoparts.com.br/tp/>

Como esse enchimento não proporciona a formação de gotas há uma maior facilidade no deslocamento do ar, aumento sua velocidade e promovendo uma maior

troca de calor por unidade de volume. Por esse enchimento lidar com a água em forma de película, diminui a perda por arraste de gotas, conseqüentemente economizando com a reposição de água. Por sua eficiência maior seu tamanho fica reduzido, diminuindo a necessidade de grandes quantidades de enchimentos em relação aos enchimentos de gotejamento, diminuindo também o bombeamento de água para a parte superior da torre promovendo um menor gasto.

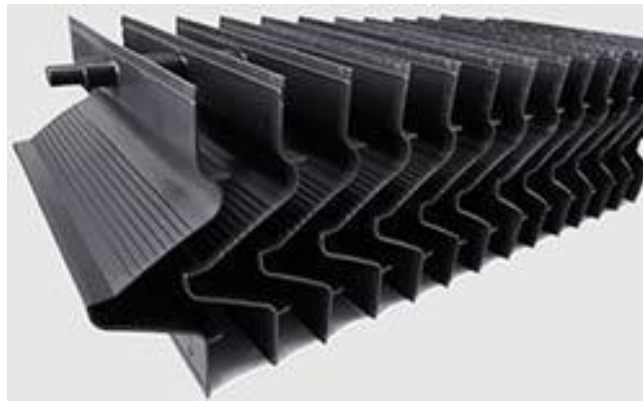
Como este tipo é mais sensível as irregularidades da vazão de ar e a distribuição de água, o desenho da torre deve garantir sua uniformidade através de todo o enchimento. Outro inconveniente destes é sua maior facilidade de acumular sujeiras entre suas placas, obstruindo parcialmente o escoamento, rompendo 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) 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 28. Exemplo de eliminador de gotas



Fonte: <http://www.termoparts.com.br/tp/peças-22/>

Na subida do ar/vapor d'água algumas gotas de água acompanham esse fluxo, sendo que essas gotas não ajudam no resfriamento da água, e só servem para diminuir a eficiência da troca de calor e o volume do fluido de trabalho, tendo

que ser reposta no tanque, para impedir a saída dessas gotas do sistema, o eliminador de gotas funciona provocando uma brusca mudança de direção no fluxo do ar/vapor d'água, tendo em vista sua baixa densidade em relação a gota d'água consegue seguir o caminho em direção ao ventilador, já grande parte das gotas trazidas por arraste perdem velocidade e se misturam com outras gotas, perdendo força para se elevar para fora da torre de resfriamento.

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.

$$R + F = E + G + PU + I$$

(2)

Sendo R o retorno de água, F outra forma de reposição de água, E a evaporação de água, G o arrasto de gotas 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.

$$F = I = 0$$

(3)

Conseqüentemente,

$$R = E = G + PU$$

(4)

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:

$$CC = \frac{E + G + PU}{G + PU} = \frac{R}{G + PU} = \frac{E}{G + PU} + 1$$

(5)

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 evaporação E 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 repostada em função da evaporação e do CC .

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

(6)

Lembrando que, nestes cálculos, não consideramos as perdas indeterminadas I e nem as 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.

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

(7)

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

Para que não haja corrosões, incrustações, crescimento de matéria orgânica, é necessário que as torres sejam tratadas para que não haja a ocorrência da diminuição de sua eficiência acarretando no aumento de manutenções e seus respectivos custos. Este tratamento é, normalmente, efetuado com produtos químicos.

Atualmente novas formas alternativas de tratamento da água como com radiação ultravioleta e a utilização de ozônio começaram a ser utilizadas. Entretanto o tratamento com agentes químicos ainda é o mais utilizado.

São esses os tratamentos administrados na água:

- 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 último item engloba todos os outros, pois acompanha a necessidade de dosagem do produto de acordo com o crescimento dos itens de controle, para que seja ministrado na medida correta, evitando problemas que o excesso ou a pouca dosagem podem causar.

Para facilitar o tratamento da água é recomendado a instalação de filtros de ar e separadores de sujeira, para evitar a entrada de resíduos, melhorando a eficiência do tratamento.

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. Mas

há uma ponderação a ser feita sobre a periodicidade da purga, pois não pode haver o excesso, devido ao desperdício de água e perda de produtos químicos acumulados no tanque para o tratamento da água, mas em contra partida se houver pouca regularidade da limpeza aumenta-se o risco de incrustações e biodepósitos, sendo assim de acordo com as características da água e do processo vai se estabelecer a regularidade da purga.

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_x, óxidos de nitrogênio - NO_x 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 microbiológico;
- 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 microbiológico e a forma de tratamento dos mesmos.

2.12.1 Corrosão

Figura 29. Corrosão em tubulação



Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4148-corrosao-em-metals--principios-e-prevencao/>

Pode provocar destruição do equipamento e aumento de nutrientes microbiológicos. Por consequência pode promover obstruções (tubulações, trocadores de calor, enchimentos etc), perda na eficiência da troca térmica, perda de rendimento de bombeamento de água devido as obstruções, aumento dos custos de manutenção de maneira geral e criação de um ambiente mais propicio 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.

2.12.2 Incrustação

Figura 30. Incrustações



Fonte: Trovati, Joubert, Tratamento de água de resfriamento, Araraquara-SP, Página 28, 2004

Pode provocar, corrosão sob depósito e aumento de nutrientes microbiológicos.

Por consequência pode promover obstruções (tubulações, trocadores de calor, enchimentos etc), perda na eficiência da troca térmica, perda de rendimento de bombeamento de água devido as obstruções, aumento 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: 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).

2.12.3 Crescimento biológico

Figura 31. 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.

No crescimento microbiológico há alguns fatores que contribuem para o seu crescimento. Alguns agentes podem vir pelo ar (sendo o filtro um elemento que diminui muito o aparecimento dos mesmos), e se proliferam se tiverem um ambiente propício para sua reprodução como 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.

2.13.1 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.

2.13.2 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.

2.13.3 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.

2.13.4 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.

2.13.5 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).

2.13.6 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.

2.13.7 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 consequentemente 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.

2.13.8 “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.

2.14.1 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).

2.14.2 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 CONCEITOS USADOS NO DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo vamos abordar alguns conceitos relevantes da área da psicrometria, para esclarecer melhor o assunto abordado. Explicaremos sobre gráficos 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 palavra psicrometria originou-se do termo grego “psychro” que significa “frio” e “metro” que significa “medir”, indicando um dispositivo para “medir a refrigeração”.

Psicrometria é definida como “o ramo da Física relacionado com a medida ou determinação das condições atmosféricas”, particularmente com respeito à mistura ar seco-vapor d’água, ou ainda, aquela parte da ciência que está de certa forma intimamente preocupada com as propriedades termodinâmicas do ar. Na engenharia este estudo é extremamente importante para projeto e dimensionamento de sistemas evaporativos.

O ar atmosférico é constituído de uma mistura de gases, assim como de vapor d’água, e uma mistura de contaminantes tais como: fumaça, poeira e outros contaminantes gasosos não presentes, normalmente, no ar, em lugares distantes de fontes poluidoras. Por definição, o ar seco existe quando todo o vapor d’água e contaminantes são removidos do ar atmosférico. Extensivas medições têm mostrado que a composição do ar seco é relativamente constante, mas pequenas variações na quantidade de componentes ocorrem com o tempo, localização geográfica e altitude, mas normalmente o ar contém um pouco de vapor d’água (ou umidade) chamando-se 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 permanecer

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, por exemplo sendo de extrema importância para projeto e dimensionamento de sistemas evaporativos.

As propriedades termodinâmicas da mistura ar seco-vapor d'água que constituem o ar atmosférico podem ser convenientemente apresentadas em forma de gráfico, denominada de gráfico psicrométrico. Este gráfico é constituído para uma determinada pressão atmosférica, embora às vezes existam curvas de correção disponíveis para outras pressões. Existem diferentes gráficos psicrométricos em uso. Os gráficos diferem com respeito à pressão barométrica, à faixa de temperatura, o número de propriedades incluídas, a escolha das coordenadas e temperatura de referência para a entalpia. O mais usado nas Américas é aquele na qual a razão de mistura e/ou pressão de vapor, que é uma das coordenadas, e traçado "versus" temperatura de bulbo seco, sendo que a outra coordenada escolhida para construção (coordenada oblíqua) é a entalpia. Na Europa, entretanto, o gráfico Mollier, com a razão de mistura e a entalpia como coordenadas, tem sido usado.

São mostrados gráficos psicrométricos para temperaturas normais e temperaturas elevadas, construídos para a pressão atmosférica normal. No Apêndice são apresentados gráficos para pressões atmosféricas menores que a normal. Num gráfico psicrométrico, escolhidas as coordenadas, as demais propriedades aparecem como parâmetros. Duas propriedades independentes, quaisquer, inclusive a temperatura psicrométrica do bulbo úmido, fixam a condição da mistura (ponto de estado).

Gráfico 1. Gráfico psicrométrico para temperaturas normais

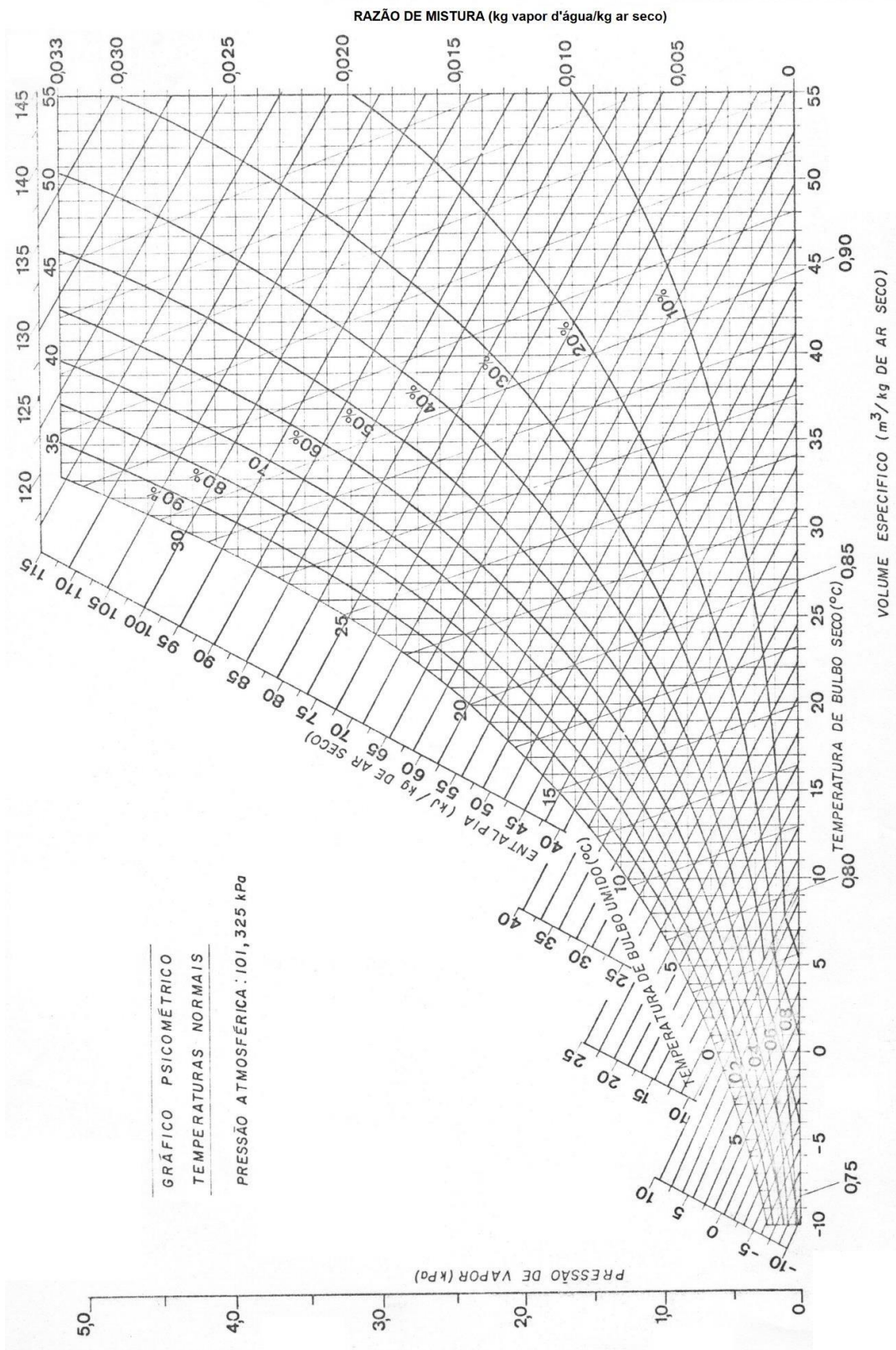
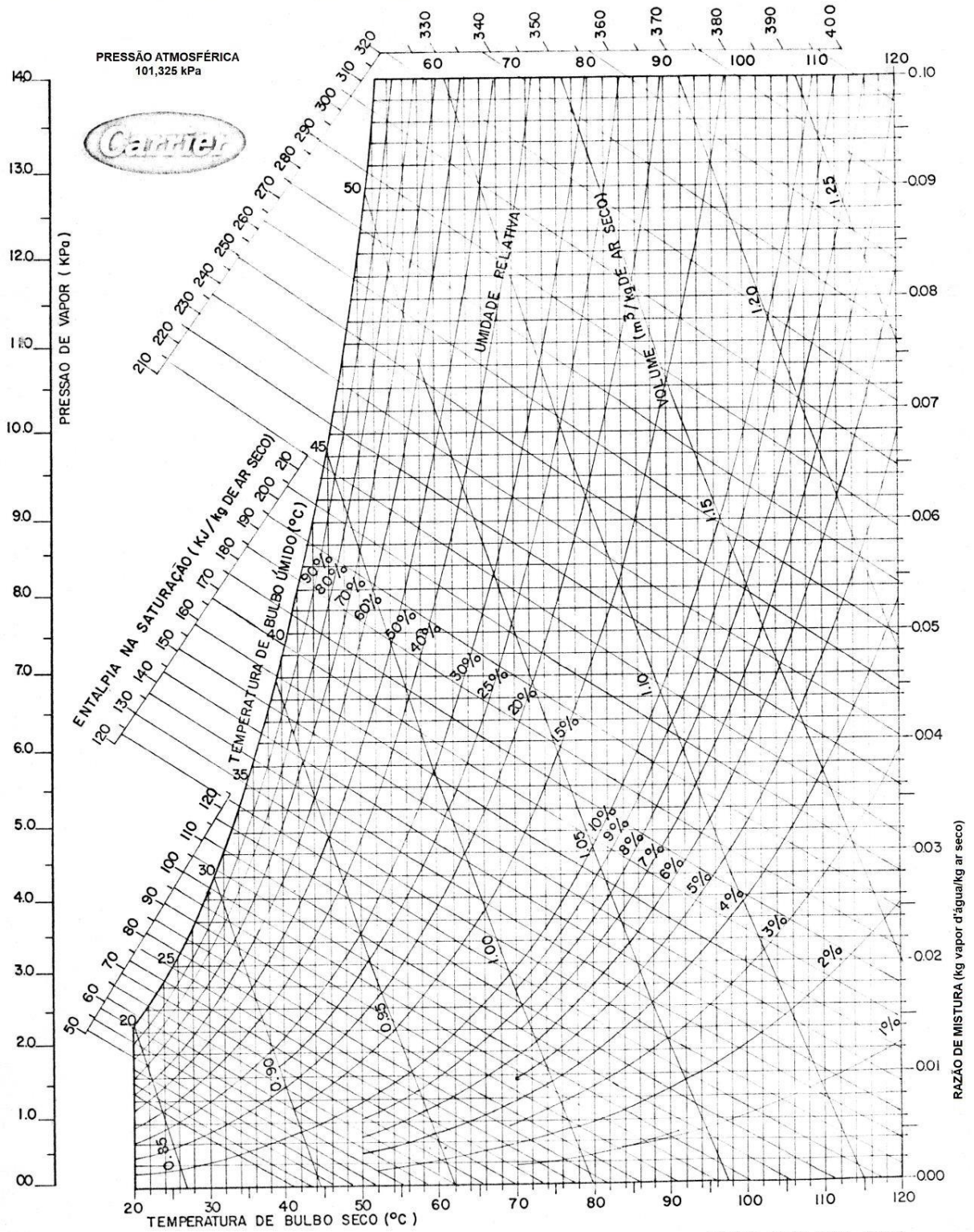


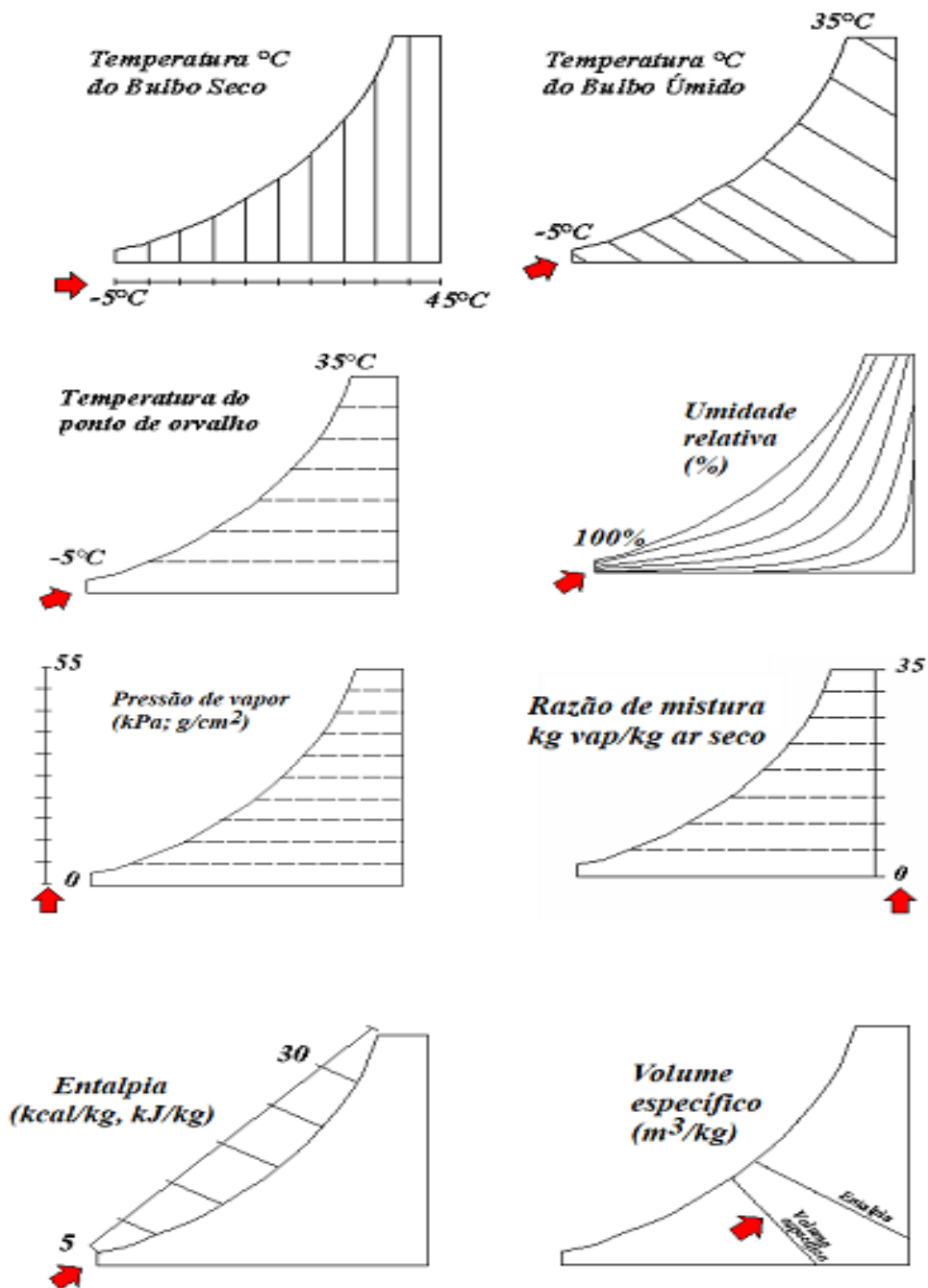
Gráfico 2. Gráfico psicrométrico para altas temperaturas

GRÁFICO PSICROMÉTRICO ALTAS TEMPERATURAS



FONTE : ASAE DATA : 271.2

Figura 32. Gráficos psicrométricos representando as linhas das propriedades do ar



Fonte: <https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2019/10/Psicrometria.pdf>

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 a quantidade de vapor de água existente na atmosfera num dado momento em uma quantidade de ar. A umidade absoluta corresponde a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco

$$W_{abs} = \frac{m_w}{m_{ar}}$$

(8)

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

3.3 UMIDADE RELATIVA

Sendo que a umidade absoluta não varia com a temperatura, não se há o entendimento do que esta umidade significa. Foi criado então outro parâmetro para melhor definição, a umidade relativa do 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.

$$\phi_{ar} = \frac{m_w}{m_{máx w}} \times 100$$

(9)

3.4 UMIDADE ESPECÍFICA

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

$$HE = \frac{m_w}{m_w + m_{ar}}$$

(10)

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

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.

3.5 LEI DE DALTON

Se uma mistura gasosa com componentes está contida em um volume, sendo sua temperatura e sua pressão, 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.

$$P_{total} = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \Sigma P_i$$

(11)

3.6 ENTALPIA ESPECÍFICA

Na análise de determinados tipos de processo, particularmente na geração de potencia e refrigeração, frequentemente encontramos a combinação das propriedades. Essa combinação é chamada de entalpia.

$$H = U + P \times V$$

(12)

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

$$H = H_{ar} + H_w$$

(13)

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

$$h = \frac{H}{m_{ar}} = \frac{H_{ar}}{m_{ar}} + \frac{H_w}{m_{ar}} = h_a + w_{abs} \times h_w$$

(14)

3.7 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:

$$\rho = \frac{m}{V},$$

(15)

e volume específico:

$$v = \frac{V}{m} + \frac{1}{\rho}$$

(16)

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

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.

$$v_m, V_{ar} = \frac{V_{ar} + V_w}{m_{ar}}$$

(17)

3.8 TEMPERATURA DE BULBO SECO

A temperatura de bulbo seco equivale 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 usamos como parâmetro do dia a dia,

3.9 TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO

É a temperatura após o processo evaporativo que gera o a mistura de ar-vapor. A evaporação consome calor sendo um processo de resfriamento, diminuindo assim a temperatura da mistura ar-vapor. Sua medição é efetuada por um termômetro convencional cujo bulbo fica envolto por um tecido umidificado com água destilada e exposto a uma corrente de ar. Esta corrente facilita a evaporação de parte desta água, abaixando 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 conseqüentemente 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 se encontra com a umidade relativa em 100%, chegando assim ao seu ponto de saturação, qualquer variação negativa do valor de sua temperatura influencia na perda de umidade, sabendo que quanto mais quente estiver o ar maior será seu poder de absorção de vapor d'água. Supondo que a temperatura do ar baixe com a pressão constante, o vapor suspenso no ar irá condensar, essa temperatura que inicia a condensação é titulada como temperatura de ponto de orvalho T_{po} , sendo que após este processo se mantém a umidade relativa,

4 DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo tratamos do ensino do tema voltado para a engenharia. Mostramos alguns equacionamentos envolvidos no Balanço de massas e energias, Linha de operação, Estimativa de altura e diâmetro da torre de resfriamento.

4.1 UMIDIFICAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO

Umidificação e desumidificação são operações caracterizadas pela transferência de calor e de massa entre um líquido puro (normalmente água) e um gás (normalmente ar), onde há o contato direto entre os fluidos (contato gás-líquido), caracterizando-se:

Umidificação

Adição de vapor d'água ao gás pelo contato com um líquido puro mais quente.

Desumidificação

Retirada do vapor d'água do gás pelo contato com um líquido puro mais frio.

OBS: Pela maior aplicação dos cálculos da torre de resfriamento serem baseados na umidificação, daremos ênfase a ela (na desumidificação o raciocínio é o inverso ao usado para a umidificação).

4.1.1 Finalidade da umidificação/desumidificação

- Controle da umidade através da alteração da umidade relativa;
- Resfriar um líquido (umidificação) ou um gás (desumidificação),

Para poder ter contato direto entre os fluídos tem que haver a imiscibilidade entre eles, ou seja, não podem se misturar, eles têm que ser heterogêneos e não contaminantes. Obedecendo a essa linha, quando entram em contato direto o líquido aquecido e o gás não saturado, há certas consequências que são:

- Vaporização parcial do líquido
- Redução da TL
- Aumento de TG
- Umidificação do gás

OBS: A umidificação do gás é muito pequena comparada com a redução de TL , e acaba sendo considerada uma operação secundária.

4.1.2 Análise no topo de uma torre de resfriamento

Sendo $T_G < T_i$, acontece o fluxo de umidade e calor da água passando para o ar, através da (**Figura 33**) podemos observar a transferência do fluxo através da interface para o gás, em consequência o líquido resfria ao transferir calor sensível até a interface e calor latente a partir da interface, sendo o calor latente o responsável pela vaporização do líquido para o gás sendo essa fase causadora da maior porcentagem da refrigeração da água cerca de 80%, em quanto os outros

Figura 33. Análise do topo da torre

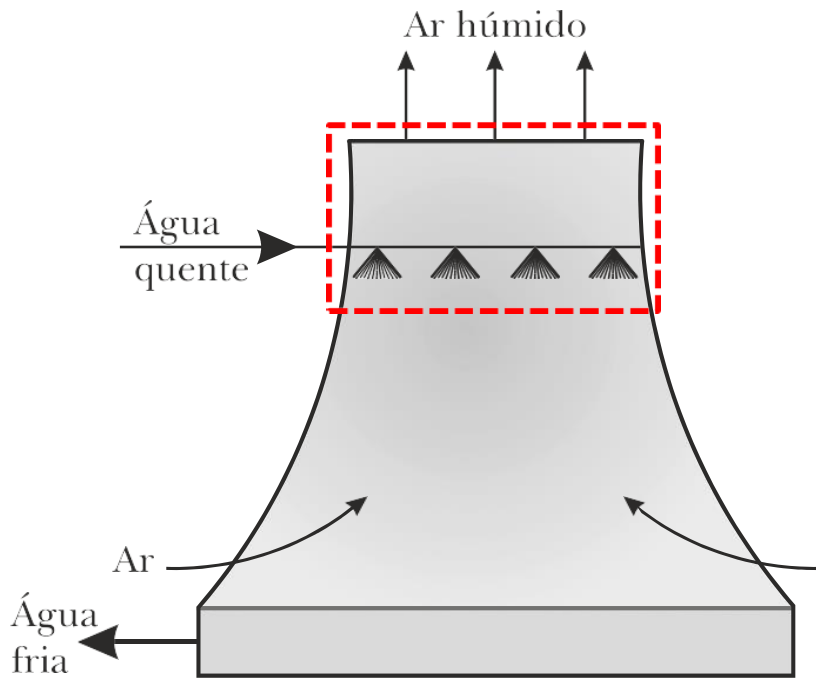
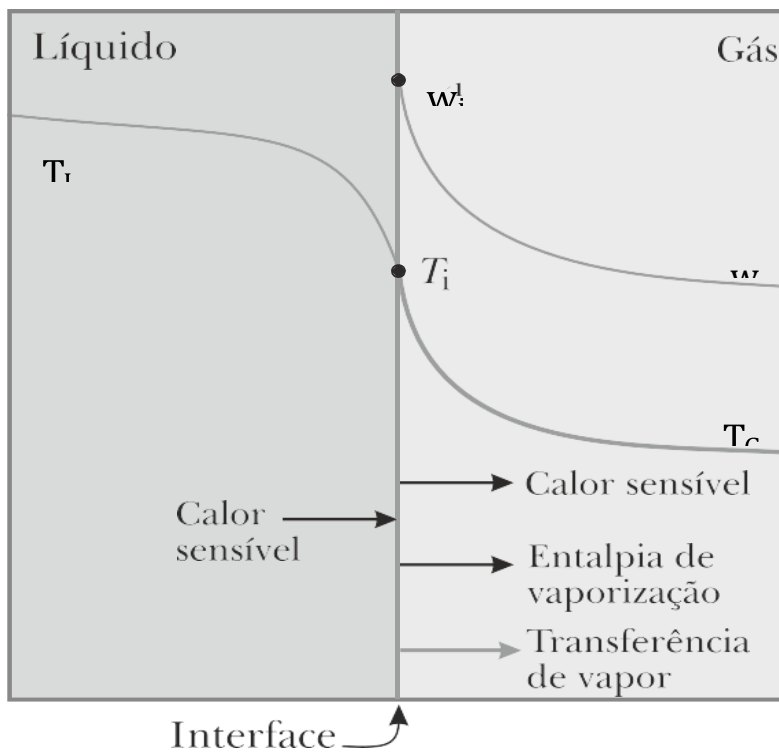


Figura 34. Esquema da interação líquido/gás



OBS: 20% ficam por conta da transferência do calor sensível (TL e TG)

4.1.3 Análise na base de uma torre de resfriamento

Sendo $T_G > T_i$ e $T_L > T_i$, a transferência de calor acontece nesse caso mutuamente, sendo os fluidos que estão na base com baixa temperatura e com baixa entalpia, o fluxo de calor sensível para a interface vem do gás e o líquido.

Figura 35. Análise da base da torre

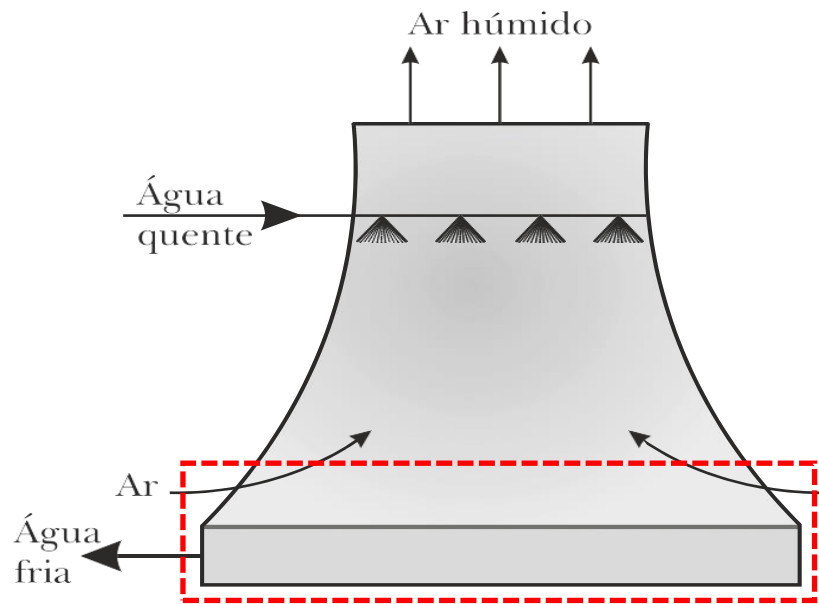
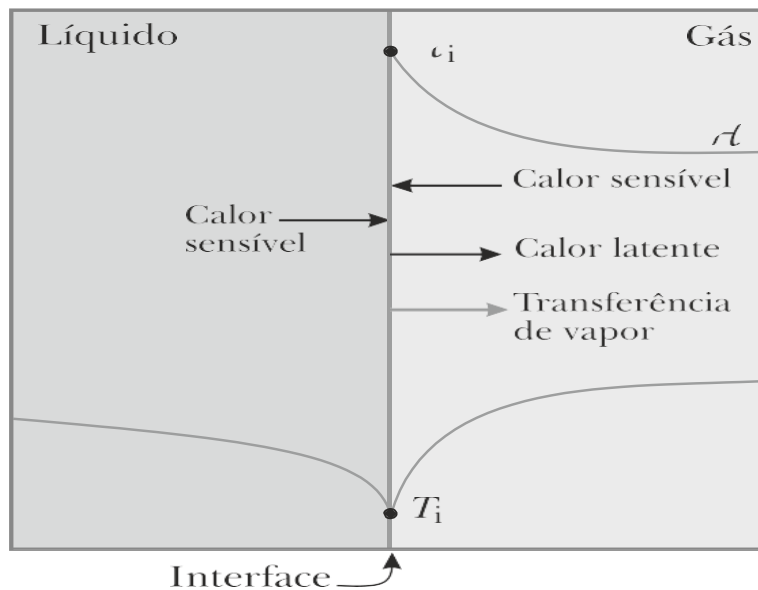


Figura 36. Esquema da interação líquido/gás



4.2 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 37**. Temos assim um volume específico por unidade de área transversal e sejam e 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 37**, aplicamos o balanço de energia para um volume de controle tendo como base:

Balanço global de massa para a água

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_5 + \dot{m}_{v3} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{v4}$$

(18)

Balanço de componente na corrente gasosa para a água

$$\dot{m}_{v3} = \dot{m}_{ar} w_3$$

(19)

$$\dot{m}_{v4} = \dot{m}_{ar} w_4$$

(20)

Balanço de energia

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{v3} h_{v3} + \dot{m}_{ar} h_{ar3} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{ar} h_{ar4} + \dot{m}_{v4} h_{v4}$$

(21)

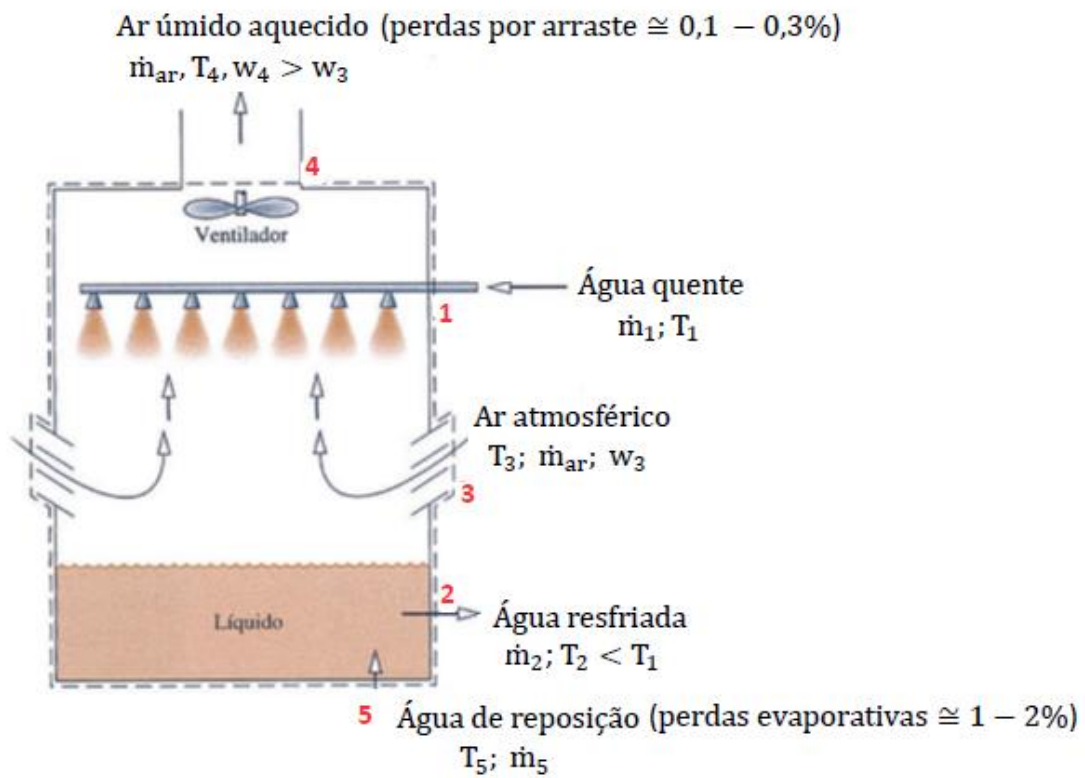
Ou

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{ar} h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{ar} h_4$$

(22)

Sendo h_3 e h_4 as entalpias das misturas ar-vapor

Figura 37. Balanço de energia no corpo da torre de resfriamento

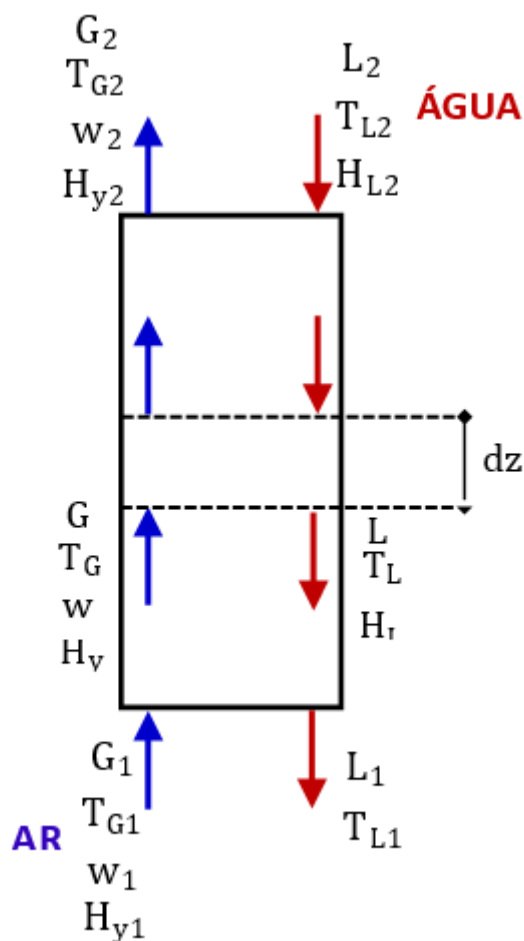


4.3 LINHA DE OPERAÇÃO

Linha de operação é relação da diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o fluido refrigerado de acordo com o fluxo com o ponto de equilíbrio, sendo que seu objetivo é determinar o fluxo mínimo (G_{\min}) do fluido refrigerante sem que altere a temperatura final do fluido refrigerado (T_{L1}), para poder assim determinar o fluxo operacional do fluido refrigerante (G).

Considere uma torre adiabática resfriando água com ar em contracorrente:

Figura 38. Representação da troca térmica no interno da torre



Pontos de operação são definidos por dois pares H_y, T_L .

OBS: A análise pode ser feita também considerando-se as vazões mássicas de água e de ar seco.

Fazendo um balanço de energia em uma seção estreita da torre de altura dz :

$$G dH_y = d(LH_L)$$

(23)

Como apenas uma pequena quantidade de líquido evapora, podemos considerar $L_1 \cong L_2 \cong \text{cte} \cong L$. Considerando isto e expandindo o termo HL :

$$G(H_y - H_{y1}) = LL_{cpl}(T_L - T_{L1})$$

(24)

Da equação (24), plotando H_y vs T_L obtemos a equação da Linha de Operação genérica:

$$H_y = \frac{L_{cpl}}{G}(T_L - T_{L1}) + H_{y1}$$

(25)

$$\text{Coeficiente angular} = \frac{L_{cpl}}{G} = \frac{H_y - H_{y1}}{(T_L - T_{L1})}$$

(26)

Um balanço global de energia nos extremos da torre fornece H_{y2} (saída de gás):

$$H_{y2} = \frac{L C_{pl}}{G} (T_{L2} - T_{L1}) + H_{y1}$$

(27)

Existe um fluxo mínimo (G_{min}) ou vazão mássica mínima que faz a torre atingir seu ponto de estrangulamento.

G_{min} é importante pois serve de referência para definir L . Os projetos das torres são feitos para: $0,75 \leq L/G \leq 1,5$

Figura 39. Linha de operação tangenciando linha de equilíbrio

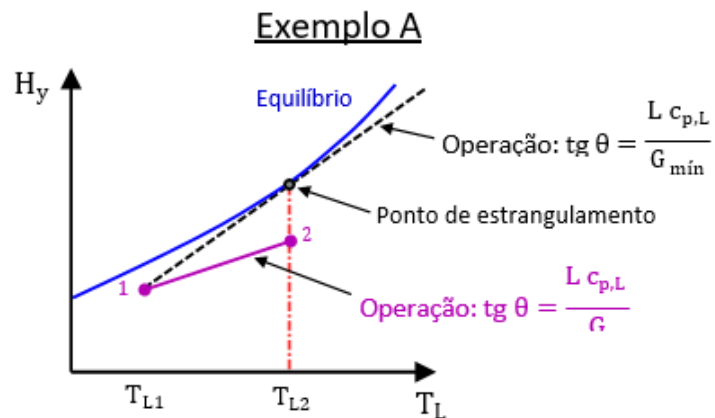
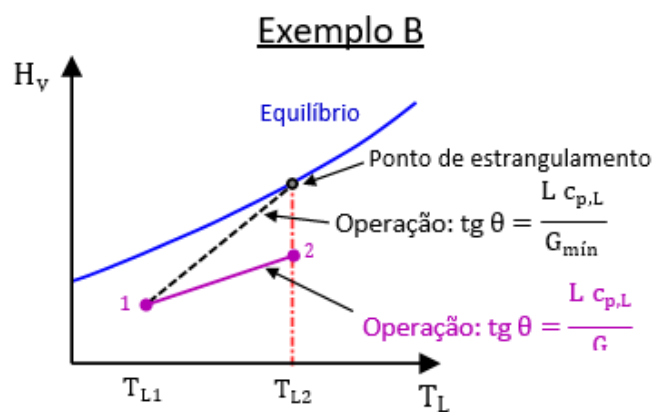


Figura 40. Linha de operação Interceptando linha de equilíbrio



5 CONCLUSÃO

Sendo torres de resfriamento um assunto de grande relevância na área industrial, foi feita a sua introdução neste trabalho, podendo ampliar a visão e a importância de tal equipamento, incentivando mais a pesquisa e a evolução desta área no meio acadêmico. Sendo feita esta introdução através de aspectos gerais do equipamento e demonstrando basicamente seu dimensionamento.

Abrindo assim um precedente para futuros estudos sobre o assunto, podendo abordar as práticas e métodos que as grandes empresas instaladoras deste equipamento detêm, mesmo já sendo a teoria algo de certa complexidade, alguns dados obtidos para se fazer o dimensionamento vem através de experimentos, sendo um ponto onde se abre um campo de estudo para poder entender a influência do projetista na estimativa de parâmetros através de tais experimentos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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](http://www.em-
ea.org/Guide%20Books/book3/Chapter%203.7%20Cooling%20Tower.pdf)

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

Cortinovia, 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 9th 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-Zeitchrift 70, 1925.

Mulyandasari, Viska Cooling Tower Selection and Sizing, Practical Engineering Guidelines for Processing Plant Solutions, KLM Technology Group, 2011 93

OMNI Grupo Industrial de Equipamentos Ltda Torres de Resfriamento Noções Gerais, http://www.omnigrupo.com.br/pdf/apostila_omni.pdf

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

Sanchez, Caio Glaucio 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.