

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME IANUSCKIEWICZ MARQUES

AVALIAÇÃO DE TORRES DE RESFRIAMENTO DE TIRAGEM MECÂNICA
FORÇADA E INDUZIDA EM UM SISTEMA INDUSTRIAL

SANTOS/SP

2016

GUILHERME IANUSCKIEWICZ MARQUES

**AVALIAÇÃO DE TORRES DE RESFRIAMENTO DE TIRAGEM MECÂNICA
FORÇADA E INDUZIDA EM UM SISTEMA INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação da Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno.

SANTOS/SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Marques, Guilherme Ianusckiewicz.

Avaliação de torres de resfriamento de tiragem mecânica forçada e induzida em um sistema industrial/ Marques, Guilherme Ianusckiewicz. -- 2016. 96f.

Orientador: Karina Tamião de Campos Roseno.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. Torre de resfriamento. 2. Transferência de calor e massa. 3. Torre de tiragem mecânica forçada. 4. Torre de tiragem induzida. 5. Eficiência térmica. I. Roseno, Karina Tamião de Campos. II. Avaliação de torres de resfriamento de tiragem mecânica forçada e induzida em um sistema industrial.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

*Dedico este trabalho aos meus pais
Aguinaldo e Jane e ao meu irmão Alexandre.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar ao meu lado dando saúde e força para superar as dificuldades.

À minha orientadora Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno, pela compreensão, ensinamento, amizade e principalmente pela seriedade e competência com que desempenha o seu trabalho.

À Hidromar Indústria Química Ltda, pela oportunidade de utilizar as suas dependências para os estudos das torres de resfriamento deste trabalho.

Em especial ao Engenheiro Químico Frederico da Silva Leite, pelos ensinamentos obtidos dos processos e sua disponibilidade no envio de informações e materiais que muito contribuiu para este trabalho.

Aos profissionais da Hidromar: Engenheiro Industrial Lúcio Cangiano, ao Engenheiro Químico Eduardo Ferreira Leite, ao Técnico Eletricista Roberto Freitas Silva, ao Técnico de Segurança do Trabalho Manoel Messias Vieira da Silva e a Marlene Vedor, do Recursos Humanos, meu muito obrigado.

À Universidade Santa Cecília – Mestrado em Engenharia Mecânica, seu corpo docente, direção e administração.

RESUMO

Em uma indústria de produtos químicos, as torres de resfriamento são equipamentos importantes no processo de troca de calor. Esse equipamento de operação contínua é utilizado para gerar a transferência de massa e energia no processo de resfriamento da água. O objetivo principal deste trabalho foi calcular o rendimento de duas torres de resfriamento, uma de tiragem mecânica forçada e outra de tiragem mecânica induzida, empregadas no processo de resfriamento do cloro na empresa Hidromar Indústria Química Ltda, situada na cidade de Cubatão-SP. O presente trabalho realizou estudos experimentais nas duas torres de resfriamento que conforme o manual da Alpina são de médio porte, sendo a de tiragem mecânica forçada da série INS, tamanhos de 4 a 32 e a de tiragem induzida da série TBS, tamanhos de 25 a 80. Para a obtenção dos dados foram realizadas medições quatro vezes durante o dia, duas vezes por semana, durante quatorze dias. Para isto, foram utilizados os equipamentos de medição, termômetro laser digital infravermelho para as medições das temperaturas de entrada da água quente e saída de água fria, higrômetro analógico bulbo seco e bulbo úmido para se obter as temperaturas de bulbo seco e úmido das entradas e saídas de ar e um anemômetro digital para se medir as velocidades de vento de entrada e saída de ar, uma vez que as torres não eram instrumentadas. Uma média diária das quatro leituras realizadas, para cada uma das variáveis em ambas as torres, foram obtidas e, conseqüentemente, calculadas a eficiência térmica das torres de resfriamento. O estudo teórico foi complementado com o desenvolvimento de cálculos matemáticos e dados fornecidos pelo manual da empresa construtora das torres. Dessa forma, chegou-se aos resultados de rendimento (%), approach ($^{\circ}\text{C}$), calor cedido pela água (kcal/h) e a velocidade do ar (m/s) nas entradas e saídas das torres. A partir dos dados experimentais analisados, conclui-se que tanto no rendimento térmico quanto no calor cedido pela água, a torre de tiragem mecânica forçada mostrou-se mais efetiva que a de tiragem induzida. A análise do approach mostrou que ambas as torres tiveram médias totais próximas do ideal.

Palavras-chave: Torre de resfriamento. Transferência de calor e massa. Torre de tiragem mecânica forçada. Torre de tiragem induzida. Eficiência térmica.

ABSTRACT

In a chemical industry, cooling towers are important equipment in the process of heat exchange. This continuous operation equipment is used to generate the transfer of mass and energy in the process of cooling the water. The main objective of this work was to calculate the yield of two cooling towers, one of forced mechanical drawing and the other of induced mechanical drawing, used in the process of chlorine cooling in the company Hidromar Indústria Química Ltda, located in the city of Cubatão-SP. The present work carried out experimental studies in the two cooling towers that according to the Alpina manual are of medium size, being the forced mechanical drawing of the series INS, sizes from 4 to 32 and the induced drawing of the series TBS, sizes from 25 to 80. The data were measured four times during the day, twice a week, for fourteen days. For this, the equipment of measurement, infrared digital laser thermometer was used for the measurements of the hot water inlet temperatures and cold water outlet, analogue hygrometer dry bulb and wet bulb to obtain the dry and wet bulb temperatures of the inputs and Air vents and a digital anemometer to measure air inlet and outlet wind speeds, since the towers were not instrumented. A daily average of the four readings performed, for each of the variables in both towers, were obtained and, consequently, the thermal efficiency of the cooling towers was calculated. The theoretical study was complemented with the development of mathematical calculations and data provided by the manual of the company constructing the towers. In this way, the results of yield (%), approach ($^{\circ}\text{C}$), heat yielded by water (kcal / h) and air velocity (m/s) at the entrances and exits of the towers. From the experimental data analyzed, it can be concluded that in both the thermal yield and the heat yielded by the water, the forced mechanical draw tower proved to be more effective than the induced draw tower. The analysis of the approach showed that both towers had total averages close to the ideal.

Keywords: Cooling tower. Heat and mass transfer. Forced mechanical drawing tower. Induced draw tower. Thermal efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Hidromar Indústria Química Ltda.	17
Figura 2 - Higrômetro analógico	22
Figura 3 - Fluxograma do ciclo fechado da soda cáustica	24
Figura 4 - Torre de resfriamento hiperbólica	25
Figura 5 - Torre de tiragem mecânica forçada	26
Figura 6 - Torre de tiragem induzida	27
Figura 7 - Torre de tiragem induzida contra corrente	27
Figura 8 - Torre de tiragem induzida em corrente cruzada	28
Figura 9 - Enchimento tipo respingo.....	29
Figura 10 - Ventilador axial.....	30
Figura 11 - Venezianas	31
Figura 12 - Eliminador de gotas de uma torre de tiragem mecânica forçada.....	32
Figura 13 - Motor.....	33
Figura 14 - Distribuidor de água	34
Figura 15 - Local de realização das medições experimentais nas duas torres	40
Figura 16 - Componentes da torre de tiragem mecânica induzida.....	41
Figura 17 - Componentes da torre de tiragem mecânica forçada	41
Figura 18 - Pontos de medição analisados na torre de tiragem mecânica induzida..	42
Figura 19 - Pontos de medição analisados na torre de tiragem mecânica forçada...	42
Figura 20 - Tubulações de entrada de água quente e saída de água fria da torre de tiragem induzida.....	43
Figura 21 - Medições das temperaturas de bulbo seco e úmido nas entradas de ar da torre de tiragem induzida.....	44
Figura 22 - Medições das temperaturas de bulbo seco e úmido nas saídas de ar da torre de tiragem induzida.....	45
Figura 23 - Medições das temperaturas de bulbo seco e úmido nas entradas de ar da torre de tiragem mecânica forçada.....	45
Figura 24 - Medições de entrada de ar na torre de tiragem mecânica forçada	46
Figura 25 - Pontos de medições das velocidades de ar de saída da torre de tiragem induzida.....	46

Figura 26 - Gráfico das médias dos rendimentos da torre de tiragem mecânica forçada	48
Figura 27 - Gráfico das médias dos rendimentos da torre de tiragem induzida	50
Figura 28 - Gráfico comparativo entre os rendimentos das torres de tiragem mecânica forçada e induzida	51
Figura 29 - Gráfico do <i>approach</i> da torre de tiragem mecânica forçada	53
Figura 30 - Gráfico do <i>approach</i> da torre de tiragem induzida	54
Figura 31 - Gráfico comparando o <i>approach</i> entre a torre de tiragem mecânica forçada com a torre de tiragem induzida	56
Figura 32 - Gráfico do calor cedido pela água da torre de tiragem mecânica forçada	57
Figura 33 - Gráfico do calor cedido pela água da torre de tiragem induzida	58
Figura 34 - Gráfico de entrada de ar na torre de tiragem mecânica forçada	59
Figura 35 - Gráfico de entrada de ar na torre de tiragem induzida	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados de projeto das torres de resfriamento mecânica forçada e induzida.40

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Vazão mássica da água de entrada e saída [kg/h]
a_p	<i>Approach</i> [°C]
T_q	Temperatura da água quente de entrada na torre [°C]
T_f	Temperatura da água fria de saída na torre [°C]
$T_{bu,e}$	Temperatura de bulbo úmido de entrada na torre [°C]
$q_{\text{água}}$	Calor cedido pela água [kcal/h]
C_p	Calor específico da água [kcal/kg°C]
Q_{ar}	Vazão volumétrica do ar [m ³ /h]
v	Velocidade do ar de entrada na torre [m/s]
A	Área de entrada de ar na torre [m ²]
Q_{vol}	Vazão volumétrica [m ³ /h]
ρ	Massa específica da água [kg/m ³]
η	Rendimento térmico ou eficiência térmica [%]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Processos de fabricação do cloro	17
2.2. Torres de resfriamento.....	19
2.2.1. Fundamentos para análise de torre de resfriamento de água.....	19
2.2.2. Processo evaporativo	19
2.2.3. Psicrometria.....	20
2.2.4. Umidade do ar	20
2.2.5. Temperatura de bulbo seco	21
2.2.6. Temperatura de bulbo úmido	21
2.2.7. Cartas ou diagramas psicrométricos.....	22
2.2.8. Range e Approach	22
2.2.8.1. <i>Range</i>	23
2.2.8.2. <i>Approach</i>	23
2.3. Função da torre dentro do processo de obtenção do cloro.....	23
2.4. Tipos de torres de resfriamento	25
2.5. Componentes de uma torre de resfriamento	28
2.5.1. Estrutura	28
2.5.2. Enchimento	29
2.5.3. Ventilador.....	30
2.5.4. Venezianas	31
2.5.5. Eliminador de gotas	32
2.5.6. Motores e redutor de velocidade.....	33
2.5.7. Sistemas de distribuição de água	33
2.5.8. Condições ambientais.....	35

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1. Materiais	39
4.1.1. Torres de resfriamento de tiragem mecânica forçada e induzida	39
4.1.1.1. Temperaturas de entrada e saída da água	43
4.1.1.2. Vazão da água.....	44
4.1.1.3. Umidade relativa	44
4.1.1.4. Vazão de ar.....	46
4.2. Procedimentos experimentais.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. Rendimento térmico.....	48
5.2. <i>Approach</i>	52
5.3. Calor cedido pela água	56
5.4. Entrada de ar na torre.....	58
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	61
6.1. Conclusões.....	61
6.2. Sugestões para melhoria das variáveis do rendimento e do <i>approach</i> das torres na Indústria Hidromar.....	61
6.3. Sugestões para trabalhos futuros.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICE A - TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DOS RENDIMENTOS DAS TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA.....	66
APÊNDICE B - TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DE <i>APPROACH</i> DAS TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA	73
APÊNDICE C - TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DO CALOR CEDIDO PELA ÁGUA DAS TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA	80
APÊNDICE D - TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DA ENTRADA DE AR NAS TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA.....	87
ANEXO A1- Carta psicrométrica.	94

ANEXO A2- Fluxograma industrial do processo químico das torres de resfriamento	95
ANEXO A3- Autorização da empresa Hidromar Indústria Química Ltda.....	96

1. INTRODUÇÃO

Os processos industriais normalmente originam calor, que deve ser retirado e dissipado. Em geral, nos sistemas de refrigeração usa-se água como elemento de resfriamento, desde que seja acessível, em quantidade suficiente e temperatura apropriada e não cause problemas econômicos ou ecológicos. A água deve ser utilizada de maneira constante, captando-a, por exemplo, de um rio, porém, caso não seja possível o procedimento mais comum é utilizar uma torre de resfriamento, que propicia por meio da evaporação a transferência de calor da água para o ar de tal forma que água possa ser reaproveitada novamente para resfriar o processo. Portanto, uma torre de resfriamento é uma instalação que resfria a água através do contato com o ar atmosférico (VENTURINI e PIRANI, 2005).

Em uma indústria as torres de resfriamento representam uma operação unitária importante para a transferência de calor. Este equipamento de operação contínua gera a transferência de massa e energia no resfriamento da água. Os processos de operações unitárias químicas normalmente não ocorrem em temperatura ambiente, os reagentes e produtos devem ser aquecidos ou resfriados. Uma torre de resfriamento, basicamente é uma coluna de transferência de calor e massa que resfria a água de condensação procedente do condensador e uma unidade resfriadora. Isto é obtido por meio da aspersão de água que ingressa pela parte superior da torre e desce por gravidade por meio de um enchimento, recaiando no interior da bacia de recolhimento na parte inferior da torre. No decorrer da passagem do enchimento, uma grande superfície da água de condensação é sujeitada ao ar atmosférico, aumentando a dispersão de calor para o ambiente pelo aumento do contato entre água e ar (WANG, 2001).

Este trabalho teve como finalidade verificar o rendimento de duas torres de resfriamento que fazem parte de um processo industrial de obtenção de cloro.

Como o processo de fabricação do cloro gera temperaturas elevadas e uma das preocupações da indústria é manter o cloro em baixa temperatura para evitar vazamentos nas linhas onde ele é manuseado, pois se estiver em temperaturas elevadas se transforma do estado líquido para o gasoso, fazendo com que o gás gerado se eleve para a camada de ozônio propiciando chuva ácida, a qual ocasiona danos ambientais e riscos de intoxicação na população.

1.1. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho foi calcular o rendimento de duas torres de resfriamento, uma de tiragem mecânica forçada e outra de tiragem mecânica induzida, em uma indústria de processamento de cloro. Como objetivo específico tem-se:

- a) Calcular o rendimento, o *approach*, o calor cedido pela água e as vazões de velocidade de entrada e saída de ar de ambas as torres.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processos de fabricação do cloro

A empresa Hidromar Indústria Química Ltda (Figura 1), cuja matriz é situada na cidade de Cubatão, São Paulo, com 42 anos de história, tem como principal atividade a fabricação, venda e distribuição de produtos químicos, com destaque especial para o cloro líquido e hipoclorito de sódio, os quais tem aplicação, principalmente, aos setores de saneamento básico e processos industriais.



Figura 1 - Hidromar Indústria Química Ltda.
Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

O cloro é fabricado através de eletrólise pelos processos de diafragma, mercúrio ou membrana. Em qualquer um dos processos uma solução de sal (cloreto de sódio – NaCl) é eletrolisada pela ação direta da corrente elétrica, a qual converte os íons cloreto em cloro elementar. No processo a mercúrio, o próprio mercúrio que recircula serve como cátodo. O cloro é removido do espaço gasoso acima dos ânodos e o sódio elementar é formado no cátodo. O sódio forma um amálgama com o mercúrio. Esse amálgama de sódio e mercúrio então circula num decompositor, onde reage com água purificada para produzir hidróxido de sódio e hidrogênio enquanto o mercúrio é recirculado. No processo a diafragma, a salmoura de cloreto sódio é eletrolisada para produzir cloro no eletrodo positivo (ânodo), enquanto hidróxido de sódio (soda cáustica) e hidrogênio são produzidos no eletrodo negativo (cátodo).

Para evitar a reação de hidróxido de sódio e hidrogênio com o cloro, as câmaras do ânodo e do cátodo são separadas por um diafragma poroso. No processo a membrana, a salmoura de cloreto de sódio é eletrolisada para produzir cloro no eletrodo positivo (ânodo), enquanto hidróxido de sódio (soda cáustica) e hidrogênio são produzidos no eletrodo negativo (cátodo). Uma membrana seletiva de íons evita a reação do hidróxido de sódio e hidrogênio com o cloro (GRUPO HIDROMAR, 2016).

O cloro, gás ou cloro liquefeito, obtido através da eletrólise da solução de cloreto de sódio tem aparência inicial de um gás amarelo-esverdeado, com odor forte e característico. O gás cloro é pressurizado à baixa temperatura para ser liquefeito, transformando-se em um líquido claro de cor âmbar. É muito utilizado na fabricação de PVC, no tratamento de água potável, de piscinas, no tratamento de esgotos, na fabricação de solventes clorados e de agroquímicos e como intermediário na produção de poliuretanos. Também é usado na obtenção de vários produtos químicos, como: anticoagulantes, lubrificantes, fluidos para freios, fibras de poliéster e insumos farmacêuticos. É também matéria-prima no processo produtivo do cloreto de hidrogênio, do ácido clorídrico, do hipoclorito de sódio e do dicloroetano (GRUPO HIDROMAR- CUBATÃO, 2016).

O hipoclorito de sódio é obtido pela reação do cloro com uma solução diluída de hidróxido de sódio (soda cáustica) e apresenta-se como solução aquosa e alcalina. Com cor amarelada e odor característico, tem propriedades oxidantes, branqueantes e desinfetantes, servindo para várias aplicações. Entre suas principais utilizações estão a produção de água sanitária, a desinfecção de água potável e hospitalar, o tratamento de efluentes industriais e de piscinas e o branqueamento de celulose e têxteis (GRUPO HIDROMAR- CUBATÃO, 2016).

A maioria dos processos industriais requer a remoção de calor para que haja um controle de temperatura. Alguns casos típicos que necessitam desta remoção são condensadores de colunas de destilação e resfriamento de produtos para estocagem em tanques, entre outros por questões econômicas, deve-se aproveitar o máximo a energia rejeitada fazendo uso dessas dentro do próprio processo. A água é o meio de transferência de calor mais favorável para muitas aplicações de indústrias de processos químicos devido à sua disponibilidade, à sua elevada capacidade calorífica e ao relativo baixo custo. No entanto, para que não ocorram problemas no ecossistema, é preciso que a temperatura da água esteja próxima ao do ambiente quando esta for descartada (SMITH, 2005).

O volume de água usado para refrigeração em geral é grande e seu uso seguido de descarte acarretaria em elevados consumo e consequentemente custos. Assim, a reutilização da água de resfriamento é interessante, portanto, grande parte das indústrias possui como componente integrante de seu sistema de recirculação de água de refrigeração as torres de resfriamento.

2.2. Torres de resfriamento

2.2.1. Fundamentos para análise de torre de resfriamento de água

A maior parte das torres de resfriamento de água está em circuito fechado ligadas com outros equipamentos que precisam condensar um fluido de processo ou diminuir a sua temperatura. Nelas é imprescindível a presença de um ventilador para que o ar que circula dentro da torre não fique saturado de umidade, o que significa a equivalência de temperatura entre os termômetros de bulbo seco e bulbo úmido e não pare a força motriz para a transferência de massa.

2.2.2. Processo Evaporativo

Em uma torre a principal contribuição para o resfriamento da água é fornecida pela evaporação. A evaporação é a transferência de massa da fase líquida (água) para a fase gasosa (ar), provocando a diminuição da temperatura da água que passa pela torre de resfriamento. Este processo acontece porque a água, para evaporar, precisa perder calor latente, que é retirado da água que percola pela torre. Este evento ocorre quando a água aquecida é gotejada na parte superior da torre e desce lentamente através de enchimentos em contracorrente com uma corrente de ar frio (em geral à temperatura ambiente). Nesta relação direta das correntes de água e ar ocorre a evaporação da água, sendo o principal fenômeno que gera seu resfriamento. A evaporação de parte da água é responsável por cerca de 80% do resfriamento, sendo os 20% restantes relativo à diferença de temperatura entre o ar e a água (SAPUNARU *et al.*, 2014).

2.2.3. Psicrometria

A psicrometria pode ser definida como a área da termodinâmica que estuda as propriedades das misturas de ar seco e vapor d'água. Processos psicrométricos são verificados em diversos componentes do ciclo de condicionamento de ar, tais como, serpentinas de desumidificação, umidificadores, serpentinas de resfriamento, torres de resfriamento e condensadores evaporativos (STOECKER e JONES, 1985).

2.2.4. Umidade do ar

Umidade é denominada como a quantidade de partículas de água presentes na atmosfera, sendo elevada nas zonas costeiras e baixas em áreas não costeiras (JAGADEESH e REDDY, 2013). A umidade é a quantidade de água existente no ar na forma de vapor, variando de 0 a 4% do volume do ar em que ele se encontra, caracterizando desta forma ar seco (quase isento de vapor de água) ao ar saturado (4% do volume é vapor de água), portanto, é aquele que tem a maior quantidade de vapor. Há dois processos para o ar tornar-se saturado:

- a) Pelo aumento de vapor de água, que ocorre por meio da evaporação, quando uma maior quantidade de vapor vai-se adicionando ao ar, conservando a sua temperatura e pressão;
- b) Pelo resfriamento, quando é verificado que os processos naturais causam a diminuição da temperatura do ar, incorporando mais vapor de água.

A presença de vapor de água pode ser especificada de várias maneiras, como:

- a) Umidade absoluta – é a razão entre a massa de vapor de água por volume de ar. É demonstrada em gramas de vapor por m³ de ar;
- b) Umidade específica – é a relação entre a massa de vapor de água e a massa de ar em que ele se encontra. É demonstrada em gramas de vapor por kg de ar;
- c) Umidade relativa – é a relação entre a quantidade de vapor de água existente numa certa massa de ar e a quantidade máxima que ela pode conter, preservando a mesma temperatura. Caso a

temperatura do ar aumente haverá a diminuição de sua umidade relativa, pois ela se expande, podendo conter mais vapor de água (YUNUS e BOLES, 2013).

2.2.5. Temperatura de bulbo seco

Geralmente atribui-se a temperatura de bulbo seco a temperatura do ar, ou seja, do meio ambiente. Essa temperatura pode ser medida usando um termômetro normal, livremente exposto ao ar, mas protegido da radiação e umidade e, em geral é dada em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Em uma torre de resfriamento a água quente pode ser resfriada a uma temperatura abaixo da temperatura ambiente de bulbo seco de ar, se o ar for relativamente seco. A passagem de água pela torre em contato com ar do meio ambiente resulta em evaporação. O resultado de evaporação em condições de ar saturado diminui a temperatura da água à temperatura de bulbo úmido do ar, que é inferior à temperatura de bulbo seco do ar ambiente (JASIULIONIS, 2012).

2.2.6. Temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura de equilíbrio obtida na superfície da água quando exposta ao ar, de tal forma que o calor transferido pelo ar à água seja igual ao calor latente necessário à vaporização da água. Ela é indicada por um higrômetro, Figura 2, envolto por um algodão umedecido exposto ao fluxo de ar. Quando o ar não está saturado, há evaporação da água contida no algodão, retirando calor do bulbo do termômetro, havendo abaixamento da coluna de mercúrio. Esta evaporação e o efeito de arrefecimento são indicados por uma temperatura de bulbo úmido menor do que a temperatura de bulbo seco no ar. A taxa de evaporação sobre a lâmpada, e a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, depende da umidade do ar. A evaporação é reduzida quando o ar contiver mais vapor de água, sendo a temperatura do bulbo úmido sempre inferior à do bulbo seco, mas será idêntico com 100% de umidade relativa. A temperatura de bulbo úmido, em teoria, é mais baixa à qual se pode resfriar a água. Na prática a temperatura de água fria fica próxima, porém, não atinge a temperatura de bulbo úmido numa torre de resfriamento. Isso ocorre devido ao fato de ser difícil que toda água entre em contato com o ar

ambiente quando desce pela superfície do enchimento molhado até a bacia de água fria (JASIULIONIS, 2012).

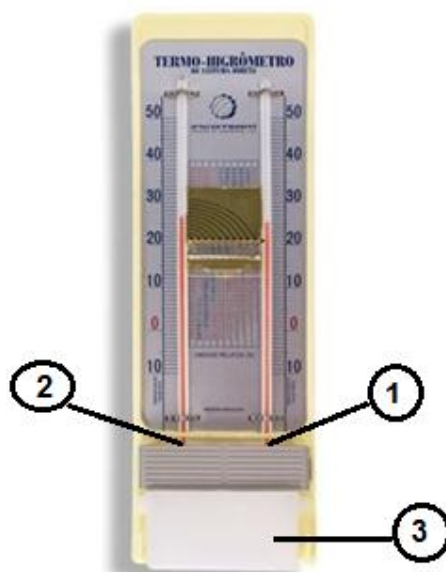


Figura 2 - Higrômetro analógico
 1) Bulbo úmido; 2) Bulbo seco; 3) Reservatório de água.
 Fonte: INCOTERM, 2016.

2.2.7. Cartas ou diagramas psicrométricos

A forma mais empregada para representar os diversos processos de tratamento da mistura de ar e vapor de água são as cartas ou diagramas psicrométricos (ANEXO A1). Estes diagramas permitem uma análise gráfica de dados e processos, facilitando assim, a solução de vários problemas práticos (DOSSAT, 2004). Nela a umidade absoluta está no eixo das ordenadas e a temperatura de bulbo seco no eixo das abscissas (WYLEN e SONNTAG, 1993). Em geral estes gráficos se aplicam a pressões ambientes e a partir de duas propriedades da mistura ar – vapor se consegue ter todas as outras através da leitura gráfica. A carta psicrométrica relaciona temperatura, umidade, densidade e entalpia, permitindo a análise de variação de energia envolvida na mudança das características físicas do ar úmido.

2.2.8. Range e Approach

Em uma torre de resfriamento há duas variáveis necessárias para melhor obtenção do desempenho térmico: o *range* e o *approach*.

2.2.8.1. Range

Define-se *range* como sendo a diferença entre a temperatura da água quente que entra na torre e a temperatura da água fria que sai da torre. O *range* sofre variações em virtude das condições climáticas e, também, da vazão da água de resfriamento na torre (EVANS JR, 1980).

2.2.8.2. Approach

O *approach* de uma torre de resfriamento é a diferença entre a temperatura da água fria que sai da torre e a temperatura de bulbo úmido do ar ambiente (EVANS JR, 1980). Em teoria, a temperatura de bulbo úmido é a temperatura mais baixa a qual se pode resfriar a água. Sabe-se que na prática a temperatura da água fria se aproxima, mas não atinge a temperatura de bulbo úmido numa torre de resfriamento, e isto se deve ao fato de ser impossível o contato de toda a água com o ar fresco do ambiente, quando esta cai pela superfície do enchimento molhado até a bacia de água fria (GOMES, 1997).

2.3. Função da torre dentro do processo de obtenção do cloro

Na empresa Hidromar, são envasados cilindros com cloro líquido de 50kg, 68kg e 90kg. O envase é feito através de pressurização dos tanques de armazenagem e o cloro é transportado por diferença de pressão, da maior para menor pressão, não sendo usado bombeamento para o cloro. Os cilindros são enchidos em 80% de sua capacidade com cloro líquido, os outros 20% é para a expansão do cloro com o aumento da temperatura, ou seja, é cloro gás. Com a degasagem de cilindros e linhas de cloro, consegue-se aproveitar esse cloro gás, sendo encaminhados para as torres de absorção. Uma solução de soda cáustica e água passam a circular no reator e na torre de absorção, essa solução absorve o cloro gás (processo de cloração) e continua a circular no reator e torre. A análise é feita usando o método de titulação quando se atinge a concentração de hipoclorito de sódio (NaClO) desejada interrompe o processo de cloração. O cloro é abatido por exaustores que não deixam o mesmo ir para a atmosfera. No processo de cloração, a solução tem um aumento significativo na temperatura, que se não for controlada, poderá ir degradando o produto, por isso,

na circulação entre o reator e a torre existem os trocadores de calor de placas e a água de refrigeração, oriunda das torres de resfriamento que trocam calor com o *chiller* que envia água gelada para os trocadores de resfriamento da solução. Há também, outro método de produção em que não se utiliza as torres de absorção onde é feito a cloração direta nos reatores borbulhando o cloro na solução, como mostra o fluxograma do ciclo fechado, conforme Figura 3.

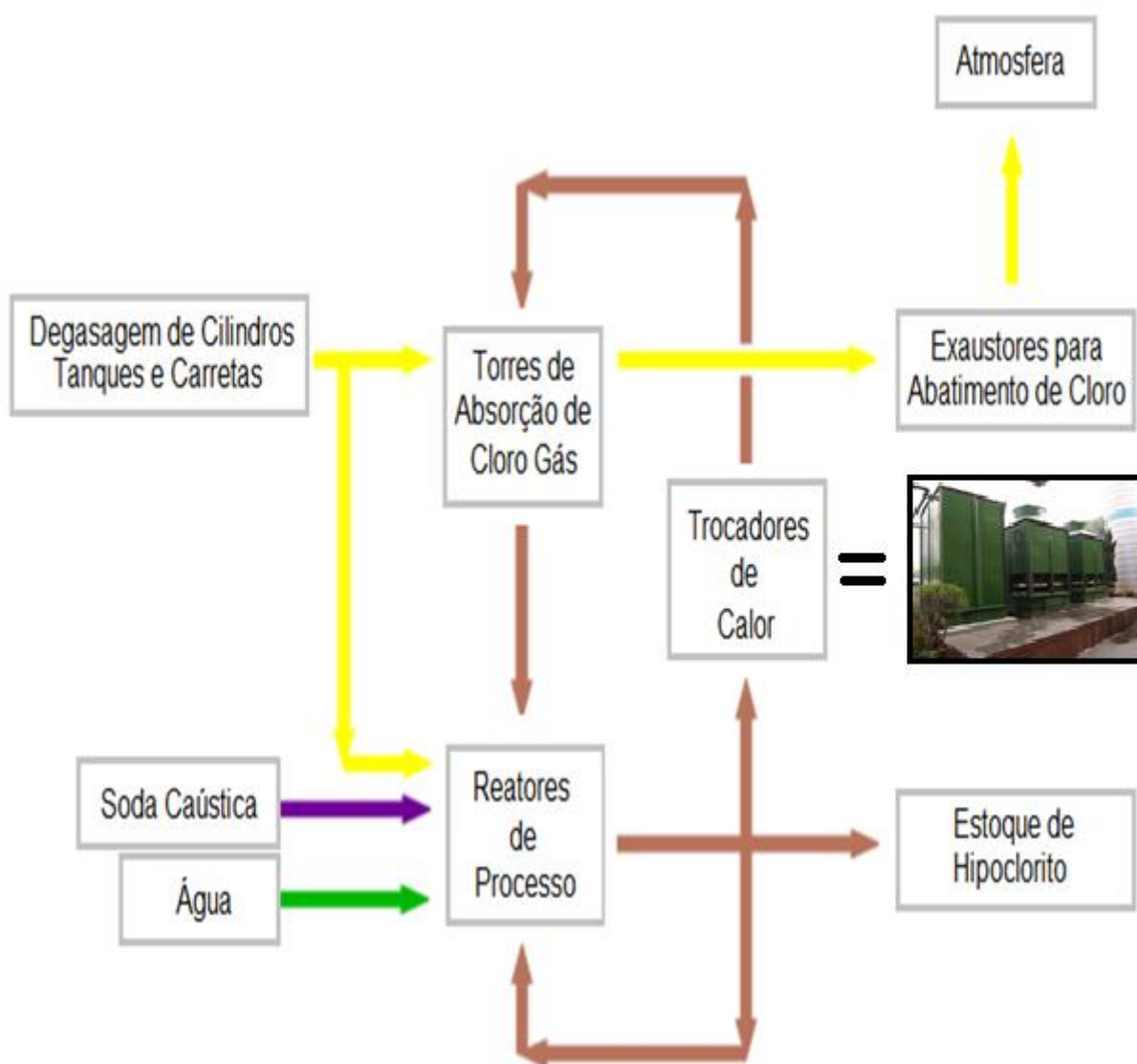


Figura 3 - Fluxograma do ciclo fechado da soda cáustica no processo de cloração para transformação em hipoclorito de sódio.
 Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

2.4. Tipos de torres de resfriamento

As torres de resfriamento são classificadas de acordo com o método de circulação de ar no seu interior como tiragem natural, tiragem mecânica forçada ou induzida. As torres com tiragem natural são classificadas em atmosféricas (ventos) ou hiperbólicas (diferenças de densidades), Figura 4, conforme o movimento das correntes do ar, portanto, o local e o clima são fatores decisivos para a sua escolha, pois caso pare o vento ou diminua a sua velocidade o seu funcionamento e operação estará prejudicada. Possuem venezianas por onde entra o ar, sendo o fluxo entre a água e o ar cruzado. Ao contato com a água quente, o ar aquece e sua densidade diminui a diferença de densidade entre o ar na parte interna da torre e o ar externo produz um escoamento natural do ar frio, que ingressa na parte inferior da torre e o ar mais quente e menos denso sai no topo de tal forma que cria uma zona de baixa pressão na parte inferior da Torre que induz a entrada de nova massa de ar frio. Estas torres normalmente tem uma estrutura hiperbólica que facilita a saída do ar pelo efeito chaminé.

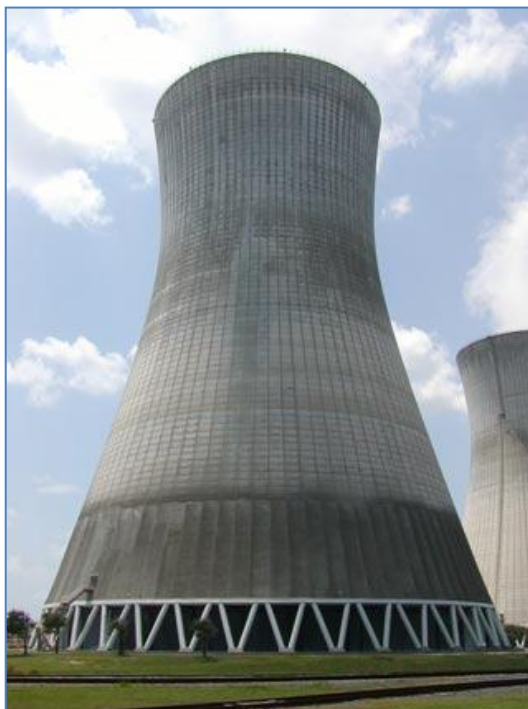


Figura 4 - Torre de resfriamento hiperbólica.
Fonte: PROCESSTECHACADEMY, 2016.

As torres de tiragem mecânica têm como principal propriedade a utilização de ventiladores para movimentar o ar pelo interior da torre. Em virtude da utilização dos ventiladores estas torres têm tamanhos menores para a mesma carga térmica se comparadas às torres de tiragem natural (VENTURINI e PIRANI, 2005). Podem ser por tiragem forçada ou tiragem induzida, nas torres com tiragem forçada, Figura 5, o ventilador está situado na parte lateral da torre, abaixo do enchimento, onde o ar distribuído é mais fraco porque tem a necessidade de fazer um desvio de 90°. Outro inconveniente é que o ar parcialmente saturado que sai da torre tem pequena velocidade e não se dispersa com facilidade, podendo desta forma, afetar o ar que ingressa na torre, alterando o seu desempenho.



Figura 5 - Torre de tiragem mecânica forçada.
Fonte: HAMONGROUP, 2016.

Na tiragem induzida, como mostra a Figura 6, o ventilador está situado acima do enchimento da torre, desta forma o ar sai a uma velocidade mais alta, sendo lançado para cima da sua captação, desfazendo mais facilmente, entretanto, nas torres com aspiração induzida, a perda de carga do ar provocada pelo enchimento da torre é maior, o que resulta no aumento de potência do ventilador (OLIVEIRA, 2010).



Figura 6 - Torre de tiragem induzida.

Fonte: HAMONGROUP, 2016.

Estas modalidades de torres são as mais utilizadas nos vários seguimentos da indústria. Dentro dessa categoria há ainda dois conceitos conforme as trajetórias dos fluxos de ar e água:

- a) **Torre de contracorrente** (Figura 7), onde a água que cai através do enchimento o faz verticalmente, enquanto o ar usado para o resfriamento caminha no sentido contrário. A água mais fria entra em contato com o ar mais seco, conseguindo maior eficiência e há menor risco de recirculação de ar;

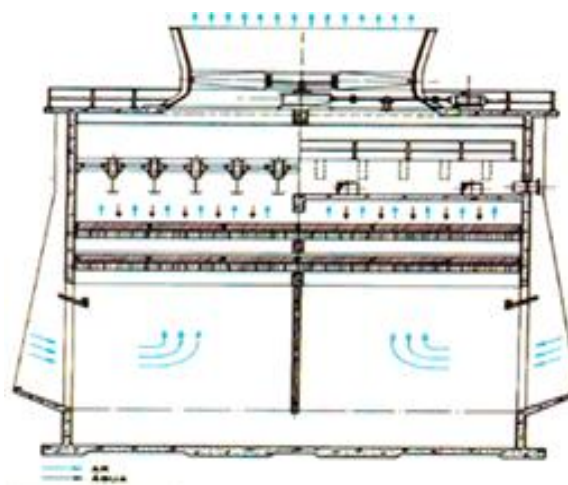


Figura 7 - Torre de tiragem induzida contracorrente.

Fonte: Alpina equipamentos.

- b) **Torre em corrente cruzada** é aquela onde a água que cai através do enchimento o faz verticalmente, enquanto o ar usado para o resfriamento percola na horizontal (Figura 8).

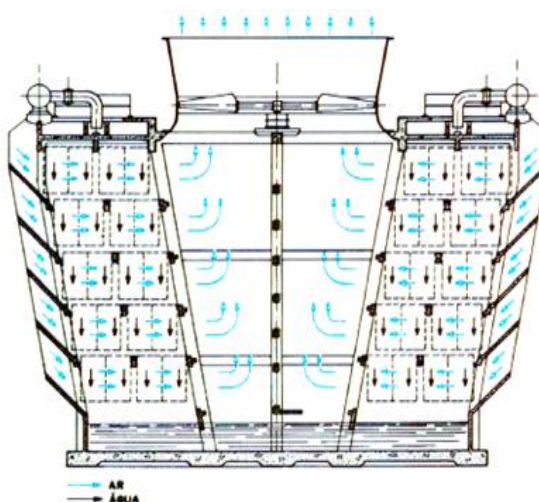


Figura 8 - Torre de tiragem induzida em corrente cruzada.

Fonte: GOMES, 1997.

Nesta categoria há uma maior facilidade de acesso aos componentes mecânicos e ao sistema de distribuição e a entrada de ar pode incorporar toda a altura da torre, desta forma, as torres são menores e reduz a potência de bombeamento (VENTURINI e PIRANI, 2005).

2.5. Componentes de uma torre de resfriamento

2.5.1. Estrutura

A estrutura de uma torre de resfriamento tem que ter a capacidade de suportar o peso de todos os componentes, como também o peso da água de circulação, qualquer acumulo de incrustação, a quantidade de vento e até mesmo possíveis cargas sísmicas (HESLEY, 2009). Não obstante estas características deverão ser planejadas para ter uma vida útil longa em uma atmosfera operacional bastante rigorosa. Seu formato deverá respeitar as necessidades do fluxo de água e de ar, sendo primordial a diminuição de bloqueios à corrente de ar, portanto, na execução do projeto deve-se, também, levar em conta a produção de peças pré-fabricadas para que haja diminuição de custos.

2.5.2. Enchimento

A finalidade do enchimento, Figura 9, é acelerar a dispersão de calor na torre, aumentando o tempo de contato entre a água e o ar, isto é realizado em virtude do aumento da área molhada à exposição prolongada da superfície da água ao ar e à formação de gotas e filmes na torre. O enchimento não deve ter um custo elevado e ser de simples instalação e tendo como uma de suas virtudes, proporcionar uma adequada capacidade de transferência de calor, ter baixa resistência ao fluxo do ar e ter uma distribuição constante da água e do ar. São classificados em dois tipos: o tipo respingo e o tipo filme. Segundo Stanford III (2012), o enchimento tipo respingo foi o primeiro a surgir, apresentando vários modelos diferentes, sendo sua função a de respingar a água de um nível mais alto para o próximo mais baixo, com o ar movimentando-se na direção horizontal (corrente cruzada), ou vertical (contracorrente).



Figura 9 - Enchimento tipo respingo.
Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

A exposição constante da superfície da água ao fluxo de ar é obtida pela repetição da interrupção da queda da água, respingando-se em pequenas gotículas e distribuindo-se sobre tábuas de respingo individuais. É fundamental que seja sustentado corretamente, pois as tábuas de respingo devem estar na posição horizontal, caso não estejam acontecerá que a água e o ar serão canalizados através do enchimento da torre e ocorrerá uma diminuição de sua capacidade.

Da mesma forma é importante que as torres estejam bem niveladas, caso não estejam, a água estará propensa a correr para o lado mais baixo das tábuas de respingo, o que também ocasionará a canalização da água e do ar, ocorrendo, também, redução da sua capacidade. Há os mais variados tipos de suporte para este enchimento, desde grades de aço galvanizado, grades de poliéster reforçados com fibra de vidro e grades em aço inoxidável, mas também tem de madeira, plásticos, cimento amianto, aço galvanizado, alumínio, aço inoxidável e cerâmica. O enchimento tipo filme foi introduzido em 1960 recriando um novo conceito de configuração em torre de resfriamento (STANFORD III, 2012), ele está sendo utilizado à medida que novos materiais e novas configurações são desenvolvidos, porém com um custo elevado se comparado ao tipo respingo e a sua eficiência é de dispersar a água em um fino filme, escoando sobre grandes áreas, provocando a máxima exposição da água a corrente de ar. Da mesma forma que o enchimento tipo respingo ele também precisa ser corretamente suportado e espaçado uniformemente.

2.5.3. Ventilador

Os ventiladores (Figura 10) das torres de resfriamento precisam movimentar grandes volumes de ar, de forma econômica e não deve haver vibrações e pulsações durante seu funcionamento, pois pode provocar danos nos demais componentes mecânicos e em toda estrutura da torre.



Figura 10 - Ventilador axial.
Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

São utilizados dois tipos: centrífugo onde o ar entra através da parte central de uma roda impulsora e sai em ângulo reto para o caminho de entrada e o axial, em que o ar flui pelo outro lado onde há um caminho direto para esse fluxo (STANFORD III, 2012). O axial é o mais indicado na movimentação de volumes de ar com pouco aumento de pressão, sendo o mais utilizado em parques industriais. Há dois tipos de ventilador centrífugo, simples ou dupla aspiração. Quando há várias torres, para evitar os ruídos sonoros usa-se o de dupla aspiração, pois são propícios para proporcionar poucas vazões e pressões (VENTURINI e PIRANI, 2005).

2.5.4. Venezianas

As venezianas, conforme disposto na Figura 11, são projetadas para que não haja perda de água por meio das superfícies de entrada do ar e para um apropriado ingresso deste ar na torre, desta forma o ar deve ser igualmente difundido tendo uma pequena perda de pressão. Para que não aconteça perda de água, as venezianas devem ser planejadas com inclinação, largura e espaçamento adequado (OLIVEIRA, 2009). Também há a possibilidade de serem projetadas para afastar os problemas de congelamento na época de inverno. Seu projeto é diversificado conforme o tipo de torre e de seu fabricante, mas em todos os casos deve ser muito resistente à atmosfera corrosiva em que são instaladas e em alguns casos, suficientemente fortes para aguentar as cargas de gelo. A distribuição da água e sua retenção estão associadas com a inclinação, largura e o espaçamento das venezianas.



Figura 11 – Venezianas.
Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

2.5.5. Eliminador de gotas

A finalidade do eliminador de gotas, Figura 12, é manter a água conduzida pelo ar aspirado pelo ventilador. Seu funcionamento tem como base a mudança da direção do fluxo de ar (OLIVEIRA, 2009). A força centrífuga decorrente, separam as gotículas de água do ar, assentando-as na superfície do eliminador e esta água armazenada retorna a bacia de coleta de água fria. Tem também como função a uniformização do fluxo de ar através do enchimento da torre, a resistência que ele gera a passagem do ar provoca uma pressão uniforme no espaço entre o eliminador e o ventilador, produzindo um fluxo de ar igualmente uniforme através do enchimento da torre. O projeto de um eliminador de gotas deve garantir alta eficiência para impedir a saída de água evitando que ocorram perdas devido à baixa pressão de entrada de ar com intuito de diminuir o consumo de energia (RAMIREZ *et al.*, 2016).



Figura 12 - Eliminador de gotas de uma torre de tiragem mecânica forçada.

Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

2.5.6. Motores e redutor de velocidade

Os motores ocupam um papel importante em virtude da sua eficácia e versatilidade. Nas torres de resfriamento a finalidade dos motores é de variar a velocidade dos ventiladores de acordo com a temperatura ambiente e a exigência de resfriamento (Figura13), assim, um motor eficiente, dependendo do seu tamanho, poderá reduzir o consumo de energia do ventilador entre 4,6 a 6,8% (STANFORD III, 2012). O redutor de velocidade tem como finalidade reduzir velocidade de rotação em eixos, com isso ele altera a entrada de alta velocidade em uma menor velocidade de rotação e com um elevado torque.



Figura 13 – Motor.
Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

2.5.7. Sistemas de distribuição de água

A distribuição de água em uma torre de resfriamento pode ser realizada por gravidade (Figura 14) e por pressão. Por gravidade, é feita por bandeja com água ocorrendo o escoamento através de orifícios na bandeja, normalmente é usada em torres de fluxo cruzado para que a água desça mais lentamente e, desta forma, terá um tempo maior de contato com a corrente de ar perpendicular a queda da água, em contrapartida é muito raro sua utilização em torres com fluxo em contracorrente pelas dificuldades de projeto e acertos da distribuição de água, em virtude da interferência com o fluxo de ar. Neste sistema ocorre um menor trabalho para bombear a água para cima da torre em virtude da pequena altura requerida e também, por não estar

pressurizada. A regulagem da vazão de água por célula, importante para atingir a máxima eficiência, é feita mediante a simples inspeção visual e a consequentemente a variação do nível de água na bandeja. A manutenção das bandejas abertas é de fácil acesso e não apresenta problemas para ser realizada inclusive com a torre em operação. O sistema de pulverização por pressão age não só como distribuidor de água como também colabora diretamente com o rendimento da torre tendo como problemas a manutenção e regulagem do fluxo de água, pois a sujeira que fica nos ramais e nos pulverizadores é de difícil limpeza, além do que se encontram localizados abaixo dos eliminadores de gotas. Há, também, o problema de se igualar a vazão nas diferentes células, que é um requisito indispensável para se conseguir o funcionamento correto da torre. É normalmente utilizada em torres de fluxo em contracorrente para aproveitar o maior fluxo de água (VENTURINI e PIRANI, 2005).

Um dos fatores mais importantes em uma torre de resfriamento é a subdivisão da água em partículas, com a finalidade de aumentar ao máximo as superfícies de água em contato com o ar, aumentando desta forma a troca de calor entre a água e o ar, isso se consegue por meio de:

- a) Aspersão de água: bicos especiais que promovem a aspersão da água em gotículas;
- b) Filme de água sobre uma superfície: obstáculos na queda da água, criando um filme;
- c) Efeito de respingo sobre uma superfície: maiores subdivisões devido ao respingo.



Figura 14 - Distribuidor de água.
Fonte: TORRETELLI, 2016.

2.5.8. Condições ambientais

O funcionamento de uma torre de resfriamento se altera com o clima, seja de acordo com a temperatura do ar ambiente, umidade do ar ou temperatura de bulbo úmido. No inverno, a temperatura do ar diminui e a temperatura de saída da água também cai, se a carga térmica permanecer constante. Para se conservar a temperatura da água de saída constante, pode-se diminuir a vazão de água que circula no sistema de refrigeração. Já no verão, acontece o contrário, a temperatura de saída da água se eleva, como exemplo pode-se citar o trabalho de um condensador em uma coluna de destilação que será prejudicado. Há, também, outros fatores como fontes de calor perto das torres que podem alterar sua operação. A recirculação quando o ar quente e úmido que sai prejudica o ar que está ingressando na torre, isso pode ser causado pelo vento que dependendo de sua velocidade e direção tende a aumentar o resfriamento da torre, neblina ou dissipação do ar quando sai da torre (CORTINOVIS e SONG, 2005).

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Aproximação ou *approach* (equação 1) de uma torre de resfriamento é a diferença das temperaturas de saída da água resfriada e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre. Para torres de resfriamento industriais, o *approach* fica em torno de 5°C, sendo também um critério de projeto (MORAES e MORAES, 2012).

$$ap = T_f - T_{bu,e} \quad (1)$$

Em que:

ap É o *approach*, diferença entre a temperatura da água que sai da torre de resfriamento e a temperatura do bulbo úmido do ar ao redor dela [°C];

T_f É a temperatura da água fria na saída da torre de resfriamento [°C];

$T_{bu,e}$ É a temperatura do bulbo úmido do ar na entrada da torre [°C].

O rendimento nas torres de resfriamento é utilizado como conceito de eficiência sendo a diferença das temperaturas da água quente que entra na torre, e a água fria que sai da torre dividido pela diferença da temperatura da água quente de entrada pela temperatura de bulbo úmido de entrada, multiplicada por cem para se achar a porcentagem, conforme mostra a equação (2) (MORAES e MORAES, 2012).

$$\eta = \frac{T_q - T_f}{T_q - T_{bu,e}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Sendo:

η O rendimento térmico ou eficiência de resfriamento [%];

T_q A temperatura da água quente de entrada [°C];

T_f A temperatura da água fria de saída [°C];

$T_{bu,e}$ A temperatura do bulbo úmido do ar de entrada na torre [°C].

A equação (3) indica o calor cedido pela água através da convecção de calor, o qual ocorre quando a transferência de energia no interior de um fluido é devido aos efeitos associados de condução e do movimento macroscópico do fluido. Normalmente, a energia que se transfere é a energia sensível ou energia interna do fluido (INCROPERA e WITT, 1992).

$$q_{\text{água}} = w \cdot c_p \cdot (T_q - T_f) \quad (3)$$

Em que:

- $q_{\text{água}}$ É o calor cedido pela água [kcal/h];
- w Indica as vazões mássica da água de entrada e saída [Kg/h];
- c_p Representa o calor específico da água [kcal/kg°C];
- T_q É a temperatura da água quente que entra na torre [°C];
- T_f É a temperatura da água fria que sai da torre [°C].

A vazão volumétrica de água na entrada (água quente) e de saída (água fria) demonstradas na equação (4), é um dos recursos mais importantes em uma torre de resfriamento por estarem associados ao meio ambiente, ao consumo de energia e ao desempenho térmico. Quando no processo se controla os ajustes de vazões de entrada e saída de água ocorrerá grandes benefícios, pois proporcionará diminuição do consumo de água e energia além dos impactos ambientais (MARQUES *et al.*, 2009).

$$w = Q_{vol} \cdot \rho \quad (4)$$

Sendo:

- w A vazão mássica da água na entrada e na saída da torre [kg/h];
- Q_{vol} A vazão volumétrica [m³/h];
- ρ A massa específica da água [kg/m³].

A vazão volumétrica do ar (Q_s) pode ser calculada pela equação (5), denominada de equação da continuidade. A equação (5) pode ser rearranjada como mostra a equação (6) e deste modo calcula-se a velocidade do ar que percola a torre a qual é fornecida através de um ventilador.

$$Q_s = v \cdot A \quad (5)$$

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot A_1}{A_2} \quad (6)$$

Sendo:

- Q_s A vazão volumétrica do ar que entra na torre [m³/h];
- v A velocidade do ar que entra na torre [m/h];
- V_1 A velocidade do ar na sucção do ventilador [m/h];
- V_2 A velocidade do ar na descarga do ventilador [m/h];
- A Representa a área de sucção (A_1) e descarga (A_2) [m²].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Torres de resfriamento de tiragem mecânica forçada e induzida

O estudo de duas torres de resfriamento uma de tiragem mecânica forçada e a outra induzida foi realizado nas dependências da Hidromar Indústria Química Ltda (Figura 1). A torre de tiragem mecânica forçada, série 32-INS, possui insuflamento do ar em contracorrente e descarga do ar úmido na vertical para cima. A outra torre é tiragem induzida, série 32-TBS com aspiração do ar em contracorrente e descarga do ar úmido para cima. Ambas as torres têm a estrutura (corpo) construídas em PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro), autoportante, pigmentações em cores verdes escuras, os quais são totalmente desmontáveis de fácil acesso para inspeção, manutenção e limpeza.

A torre de tiragem mecânica forçada avaliada neste trabalho é de médio porte, modelo 32/3-A19-I-INS, cuja dimensão é 1,730 x 2,130 x 3,080 m. Esta possui ventilador axial com 910 mm, tubulação de água para a interligação dos equipamentos de PVC com 127 mm de diâmetro, o volume da bacia compreende 1135 litros e o peso da torre em operação é de 2160 kg. O eliminador de gotas é do tipo ondas, fabricado em polipropileno, com alta resistência mecânica e química. O enchimento no formato de corrugação cruzada (A19) com três camadas chega a limites de temperatura de 55°C, é composto por uma estrutura de PVC auto extingüível. A outra torre de tiragem induzida estudada, também é de médio porte, modelo 32/3-A19-I-TBS e dimensões de 1,770 x 2,170 x 3,390 m. Esta possui ventilador axial, modelo VAP, com tamanho de 910 mm, tubulação de PVC para a interligação dos equipamentos com 127 mm de diâmetro e volume da bacia de 1135 litros, sendo o peso da torre em operação igual a 2150 kg. As duas torres possuem dois maquinários de refrigeração da marca “Alpina”, com especificações de vazões de 60 m³/h de água de entrada nas temperaturas de aquecimento 34°C e de resfriamento de 29°C, com bulbo úmido de 24°C. Ambas as torres estão acopladas ao pátio em um sistema em série formato “*stand-by*”, por um dispositivo de fixação, e uma bomba centrífuga que é aplicada na instalação de recalque, modelo “Santarem”, tipo 65-125, motor trifásico marca WEG, 220/380/440 V. As duas torres possuem válvulas globos na saída de água fria que vai em direção as bombas de recalque.

A Tabela 1, mostra os dados de projeto de ambas as torres, utilizados como base para avaliar as variáveis experimentais coletados neste trabalho.

Tabela 1- Dados de projeto das torres de resfriamento mecânica forçada e induzida.

	Q_{vol} (m ³ /h)	T_q (°C)	T_f (°C)	$T_{bu,e}$ (°C)	Range (°C)	η (%)	$q_{água}$ (kcal/h)
tiragem mecânica forçada	60	39	29	24	4	50	300000
tiragem mecânica induzida	60	39	29	24	4	50	300000

Figura 15 mostra o local onde as duas torres encontram-se instaladas e no ANEXO A2 apresenta-se o fluxograma da planta industrial do processo químico no qual as torres de resfriamento operam.



**Figura 15 - Local de realização das medições experimentais nas duas torres
(1) Torre de tiragem mecânica forçada; (2) Torre de tiragem mecânica induzida.**

Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

A Figura 16 apresenta os componentes da torre de tiragem mecânica induzida.

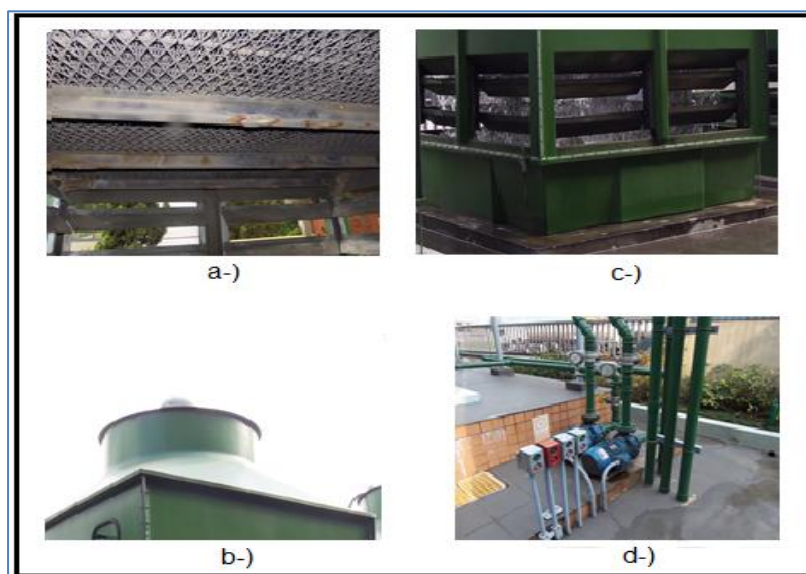


Figura 16 - Componentes da torre de tiragem mecânica induzida
 a) Enchimento filme de corrugação cruzada (A19); b) Motor superior trifásico marca WEG, 220/380/440 V; c) Venezianas; d) Bomba de recalque.
 Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

A Figura 17 demonstra os componentes da torre de tiragem mecânica forçada. Os pontos de análise das torres de tiragem induzida e forçada podem ser visualizados nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

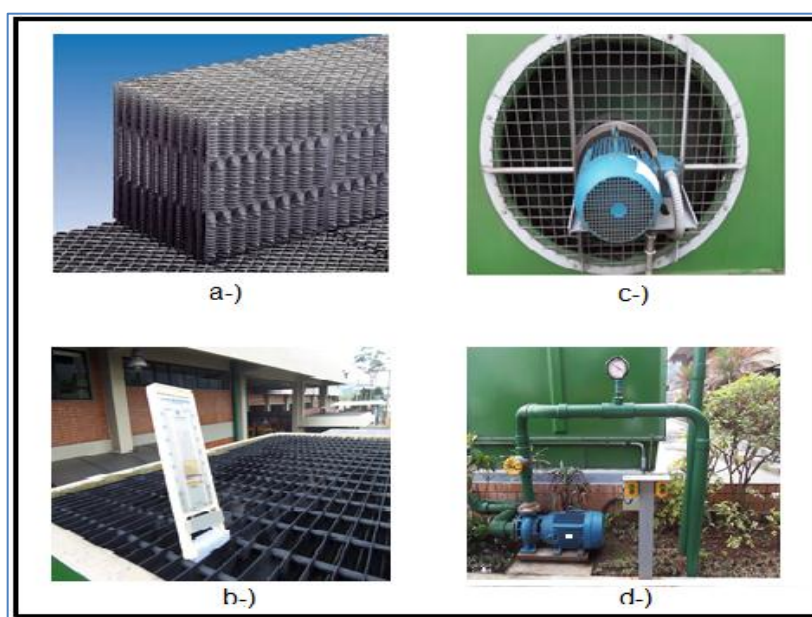


Figura 17 - Componentes da torre de tiragem mecânica forçada
 a) Enchimento filme de corrugação cruzada (A19); b) Eliminador de gotas; c) Motor trifásico marca WEG, 220/380/440 V; d) Bomba de recalque.
 Fonte: Grupo Hidromar, 2016.

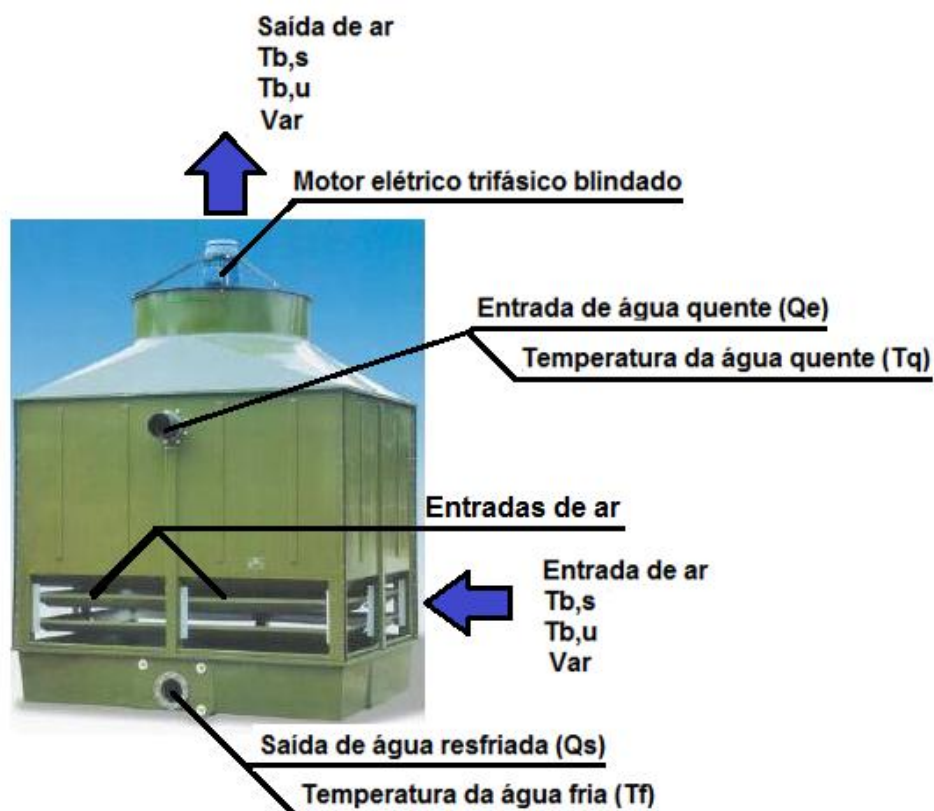


Figura 18 - Pontos de medição analisados na torre de tiragem mecânica induzida.
Fonte: Alpina equipamentos.

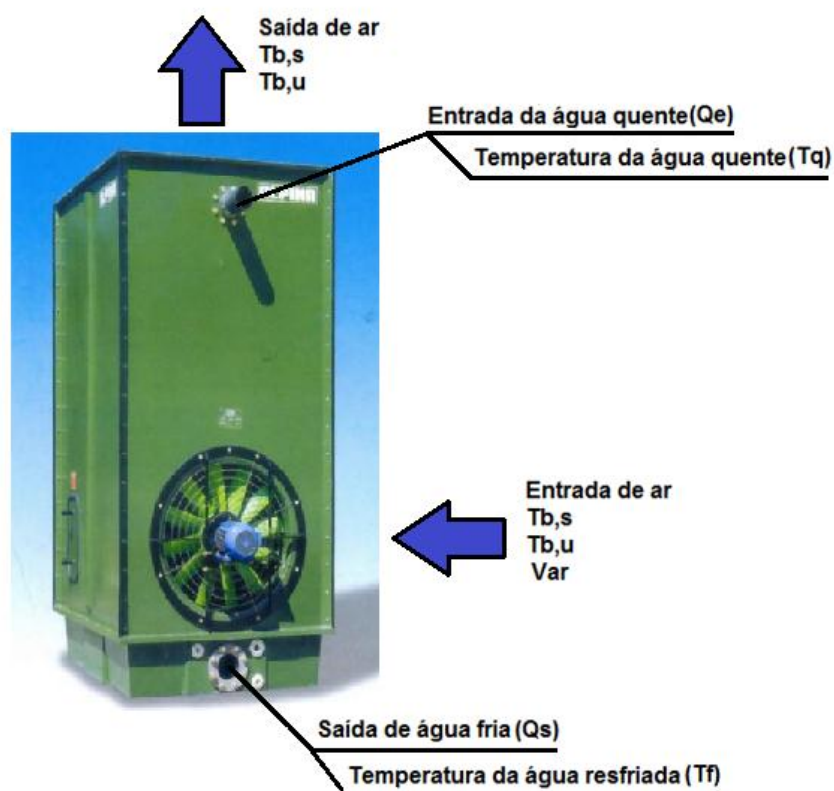


Figura 19 – Pontos de medição analisados na torre de tiragem mecânica forçada.
Fonte: Alpina equipamentos.

4.1.1.1. Temperaturas de entrada e saída da água

As temperaturas de entrada e saída da água nas duas torres foram medidas com um termômetro laser digital infravermelho, marca Dugold, modelo DG 380, que trabalha na faixa de -50°C a 380°C . Foram realizadas quatro (4) medições na entrada e saída em ambas às torres por dia, durante quatorze (14) dias de estudo. Com o objetivo de sempre fazer as medidas de temperatura no mesmo ponto e diminuir o erro experimental, foram fixadas fitas na cor amarela nas entradas e saídas das tubulações de água quente e fria das torres. A Figura 20 mostra as medições de temperatura da água quente e fria.

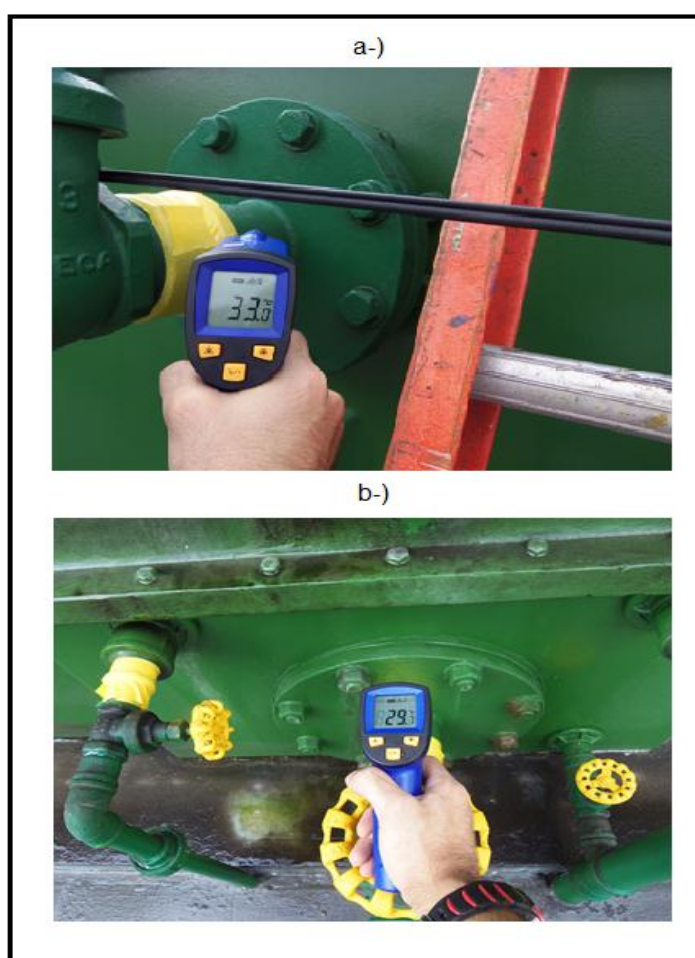


Figura 20 - Tubulações de entrada de água quente e saída de água fria da torre de tiragem induzida.

a) Medição da temperatura da água quente na entrada da torre; b) Medição da temperatura da água fria de saída da torre.

Fonte: Foto tirada nas dependências do Grupo Hidromar, 2016.

4.1.1.2. Vazão da água

As vazões de entrada de água quente e de saída de água fria das torres foram obtidas através do manual do fabricante onde foi adotada uma vazão constante de 60 m³/h. Não foi possível realizar as medições das vazões de ambas as torres em virtude da empresa não possuir instrumentos de medições e não seria possível instalá-los pois interromperia o processo de fabricação de cloro.

4.1.1.3. Umidade relativa

As temperaturas de bulbo seco e úmido do ar de entrada e saída das torres foram realizadas com um termo higrômetro analógico bulbo seco e úmido de -10°C a +50°C, marca Incoterm, modelo 5203.03.0.00.

As Figuras 21, 22 e 23 mostram, respectivamente, as medidas das temperaturas de bulbo seco e úmido na entrada de ar da torre de tiragem induzida, na saída da torre de tiragem induzida e na entrada da torre de tiragem forçada.



Figura 21 - Medições das temperaturas de bulbo seco e úmido nas entradas de ar da torre de tiragem induzida.

Fonte: Foto tirada nas dependências do Grupo Hidromar, 2016.

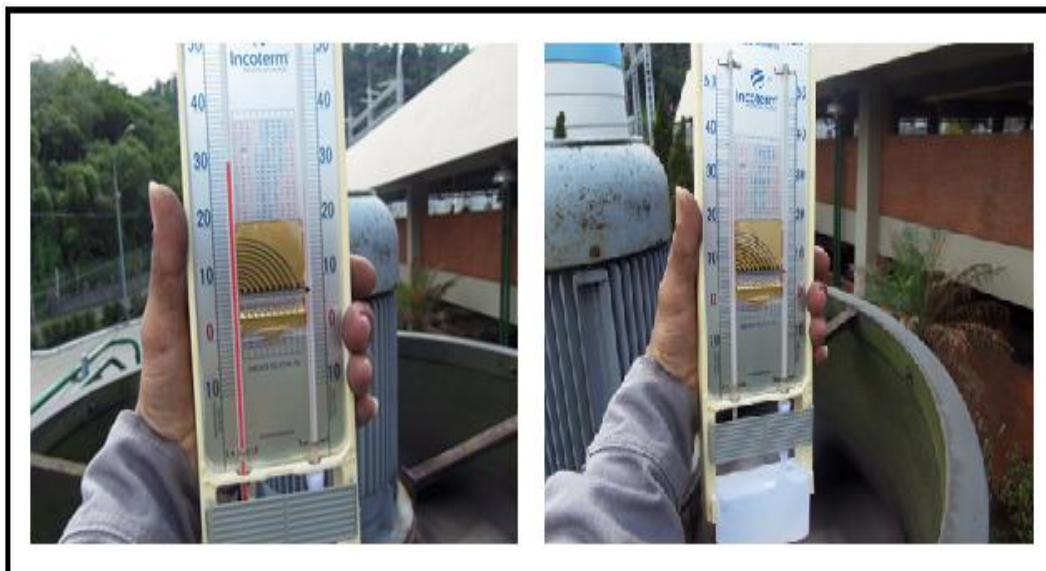


Figura 22 - Medições das temperaturas de bulbo seco e úmido nas saídas de ar da torre de tiragem induzida.

Fonte: Foto tirada nas dependências do Grupo Hidromar, 2016.

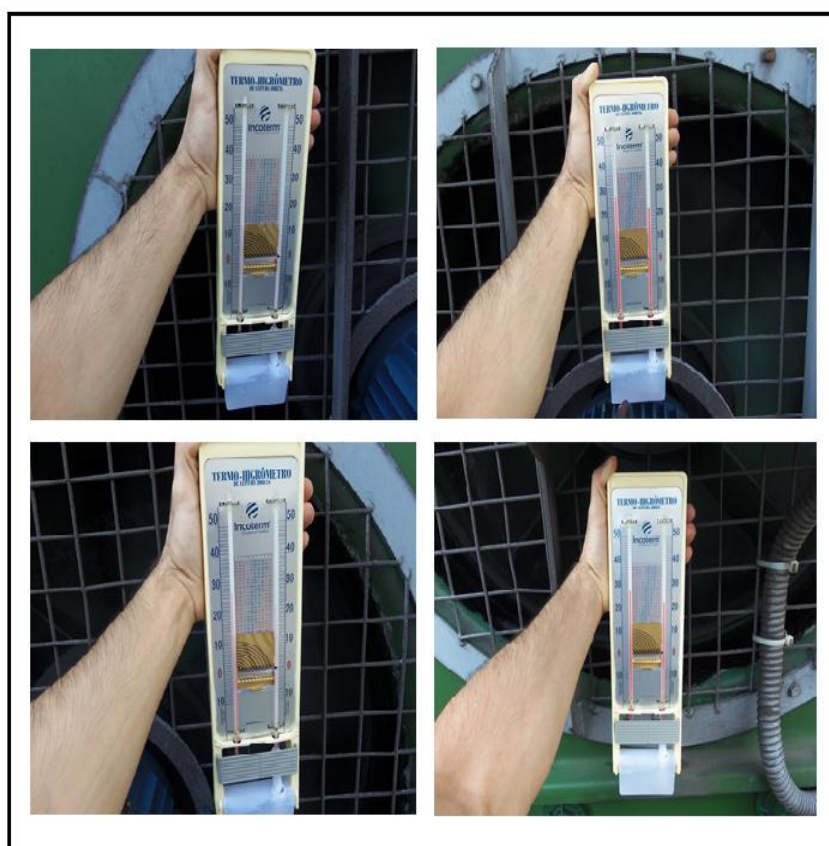


Figura 23 - Medições das temperaturas de bulbo seco e úmido nas entradas de ar da torre de tiragem mecânica forçada.

Fonte: Foto tirada nas dependências do Grupo Hidromar, 2016.

4.1.1.4. Vazão de ar

Um anemômetro digital marca Drone Termome, faixa de medição 0-30 m/s, foi utilizado para medir a velocidade de entrada do ar. A medida da velocidade foi realizada posicionando o anemômetro em quatro (4) pontos na entrada do ar (sucção) da torre de tiragem forçada. Foi feita uma média, como mostra a Figura 24. A vazão do ar foi calculada através da equação da continuidade (equação 5).

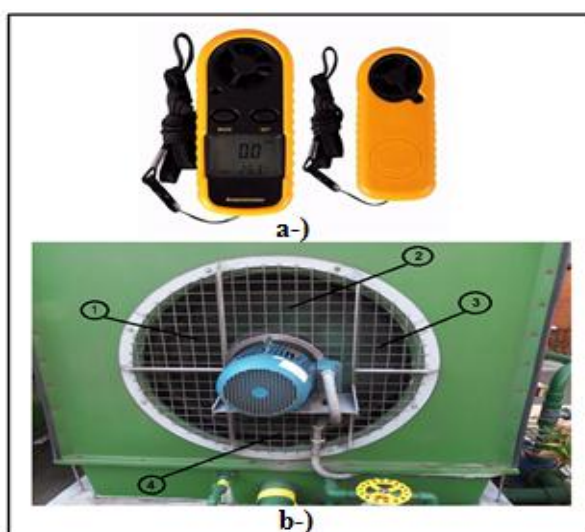


Figura 24 - Medições de entrada de ar na torre de tiragem mecânica forçada.
a-) Anemômetro digital: b) Pontos de medições das velocidades das entradas de ar da torre de tiragem mecânica forçada (1,2,3,4).

Fonte: Hidromar, 2016.

O mesmo procedimento para o cálculo da vazão de ar da torre de tiragem induzida foi realizado. Nesta o ventilador está instalado no topo (Figura 25).



Figura 25 - Pontos de medições das velocidades de ar de saída da torre de tiragem induzida.

Fonte: Hidromar, 2016.

4.2. Procedimentos experimentais

As medidas das temperaturas da água quente de entrada e água fria de saída das torres foram obtidas com um termômetro laser digital infravermelho. As temperaturas de bulbo seco e úmido do ar de entrada e saída das torres foram verificadas com um termo higrômetro analógico. A vazão de água de entrada não foi obtida experimentalmente, pois não havia possibilidade de medições práticas e foi utilizada a vazão do projeto especificada na torre. Um anemômetro digital foi utilizado para medir a velocidade do ar e através desta medida pode-se obter a vazão volumétrica do ar. Para a obtenção das medidas descritas foram realizadas quatro (4) vezes durante o dia, duas (2) vezes por semana durante quatorze (14) dias de acordo com as normas de segurança, autorização e acompanhamento por responsáveis pelo processo imposto pela Empresa Hidromar. Uma média diária das quatro (4) leituras, descritas nas tabelas como medições ao dia letra “a”, “b”, “c” e “d”, realizadas para cada uma das variáveis em ambas as torres foram obtidas e consequentemente calculada a eficiência das torres de resfriamento. As quatro (4) medidas foram divididas em dois (2) períodos, sendo duas no período da manhã das oito (8) às nove (9) horas, letra “a”, e após um intervalo de uma (1) hora a outra das dez (10) às onze (11) horas, letra “b”. No período da tarde, foram feitas as outras duas (2) medições das quatorze (14) às quinze (15) horas, letra “c” e novamente após um intervalo de uma (1) hora, eram feitas as últimas medições do dia, das dezesseis (16) até as dezessete (17) horas, letra “d”, onde se retirou as quatro (4) temperaturas de entrada nas quatro (4) laterais das venezianas e no motor superior se retiraram duas (2) medições de temperatura de saída na torre de tiragem induzida já na torre de tiragem mecânica forçada se retirou quatro (4) medições das temperaturas de saída de ar em cada ponto nas laterais do retângulo da parte superior da torre onde se sai o vapor a fim de se obter uma média da velocidade do ar de saída.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e faz uma discussão sobre o que foi observado durante os quatorze (14) dias de acompanhamento do funcionamento das duas torres estudadas. As Tabelas 2 e 3 (apêndice A1 e A2, respectivamente), mostram os dados experimentais coletados referentes às torres de tiragem mecânica forçada e tiragem mecânica induzida, respectivamente. Observa-se nas Tabelas 2 e 3 a velocidade do vento (V_{vento} (km/h)) e a temperatura do dia (T_{dia} (°C)) obtidas no *site* Climatempo (2016), as temperaturas de entrada da água quente (T_q (°C)) e de saída da fria (T_f (°C)) obtidas com o termômetro laser digital infravermelho e a temperatura de bulbo úmido ($T_{bu,e}$ (°C)), medida com o higrômetro. Com estes valores foram calculados os rendimentos térmicos diários das torres através da equação 2.

5.1. Rendimento térmico

A Figura 26 apresenta o gráfico do rendimento térmico da torre de tiragem mecânica forçada.

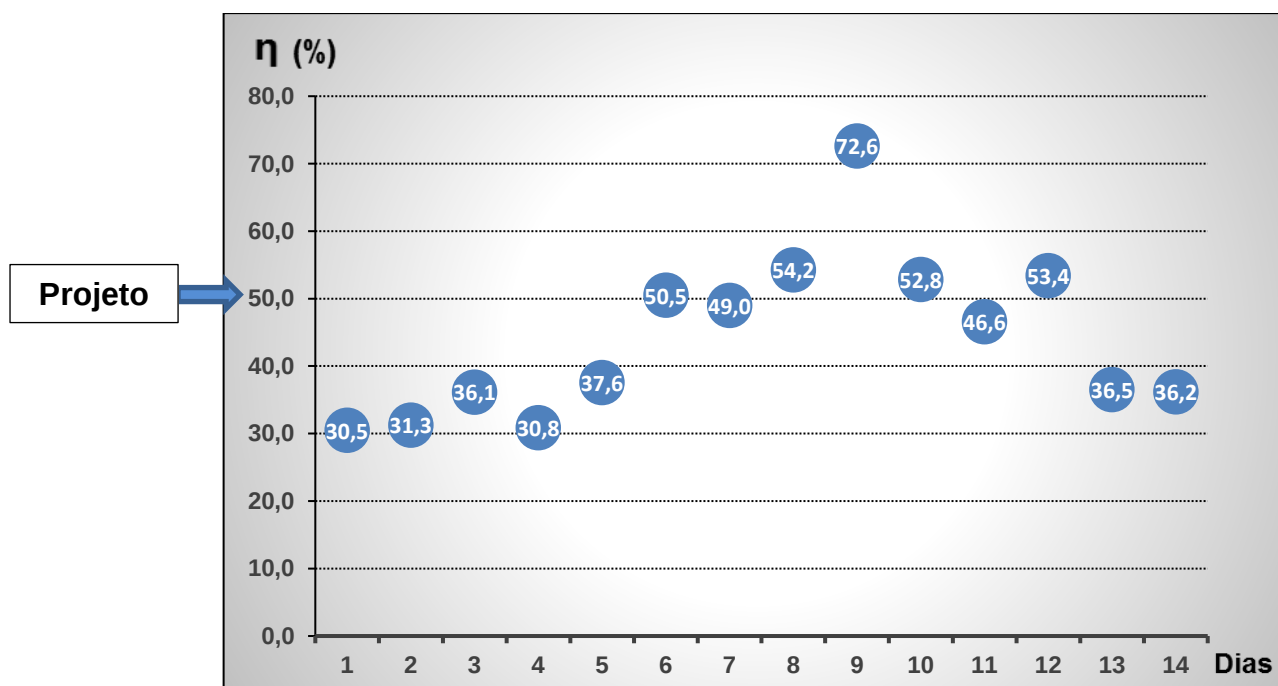


Figura 26 - Gráfico das médias dos rendimentos da torre de tiragem mecânica forçada.

Com os dados de projeto fornecidos pelo manual da torre de tiragem mecânica forçada da Alpina, ou seja, vazão de entrada de água $60\text{m}^3/\text{h}$, temperatura de entrada da água quente de 34°C , temperatura de saída da água fria de 29°C e temperatura de bulbo úmido de entrada de 24°C , obtém-se o rendimento de projeto de 50% , *range* de projeto de 4°C (temperatura da água de entrada quente menos a temperatura da água de saída fria) e a capacidade térmica do calor cedido pela água de 300000 kcal/h. Com o rendimento do projeto pode-se comparar aos resultados experimentais dos quatorze (14) dias de medições realizadas. Conforme mostra o gráfico da Figura 26, construída de acordo com a Tabela 2 do apêndice A1, foram analisados os picos de rendimentos médios por dia, e constatou-se que nos dias 1, 2, 3, 4, 5, 13 e 14, os rendimentos variaram entre 30,5% a 37,5%. Nestes dias, os rendimentos foram os mais baixos, ficando inferiores aos de projeto. Verifica-se que nestes dias não houve grande variação no *range* que ficou em torno de 3°C . Segundo Cortinovis (2005), para melhorar o rendimento de uma torre, pode-se elevar a potência do motor aumentando a rotação dos ventiladores, desta forma entrará mais ar na torre gerando uma maior diferença de temperatura entre o ar e a água, este processo é responsável por 20% do resfriamento, ou seja, convecção forçada.

Nos dias 6, 7, 8, 10, 11 e 12 os rendimentos variaram entre 46,6% a 54,2%, portanto, próximos do ideal e apresentaram um *range* próximo de 4°C . O maior pico de rendimento ocorreu no dia 9 que foi de 72,6%.

Neste dia houve a maior variação de saída de água fria de todos os dados coletados experimentalmente e foi de 25,4% na primeira amostragem, aumentando sucessivamente até 29,5% coletado na última amostragem do dia e, portanto, a maior variação de rendimento do experimento. Esta deve-se ao *range*.

Como o rendimento está acima do ideal (projeto), conforme Tabela 1, devido ao maior *range* observado, pode-se ter um gasto maior de energia elétrica aumentando os custos. Se a torre for automatizada e instalando um redutor de velocidade para controlar a velocidade de giro do motor de indução trifásico podendo, desta forma, alternar a velocidade com a qual o motor vai trabalhar, caso a frequência seja maior e a torre estiver com um baixo rendimento haverá a melhora do processo de resfriamento. Já se a frequência for menor diminui-se a rotação do ventilador que proporcionará economia de energia elétrica.

Somando-se todos os rendimentos médios totais, obteve-se 44,1% durante os quatorze (14) dias, comparando com o rendimento de projeto que é de 50%,

observou-se que durante os experimentos a torre trabalhou em boas condições de operação.

Na Figura 27 é observado o gráfico do rendimento térmico da torre de tiragem induzida.

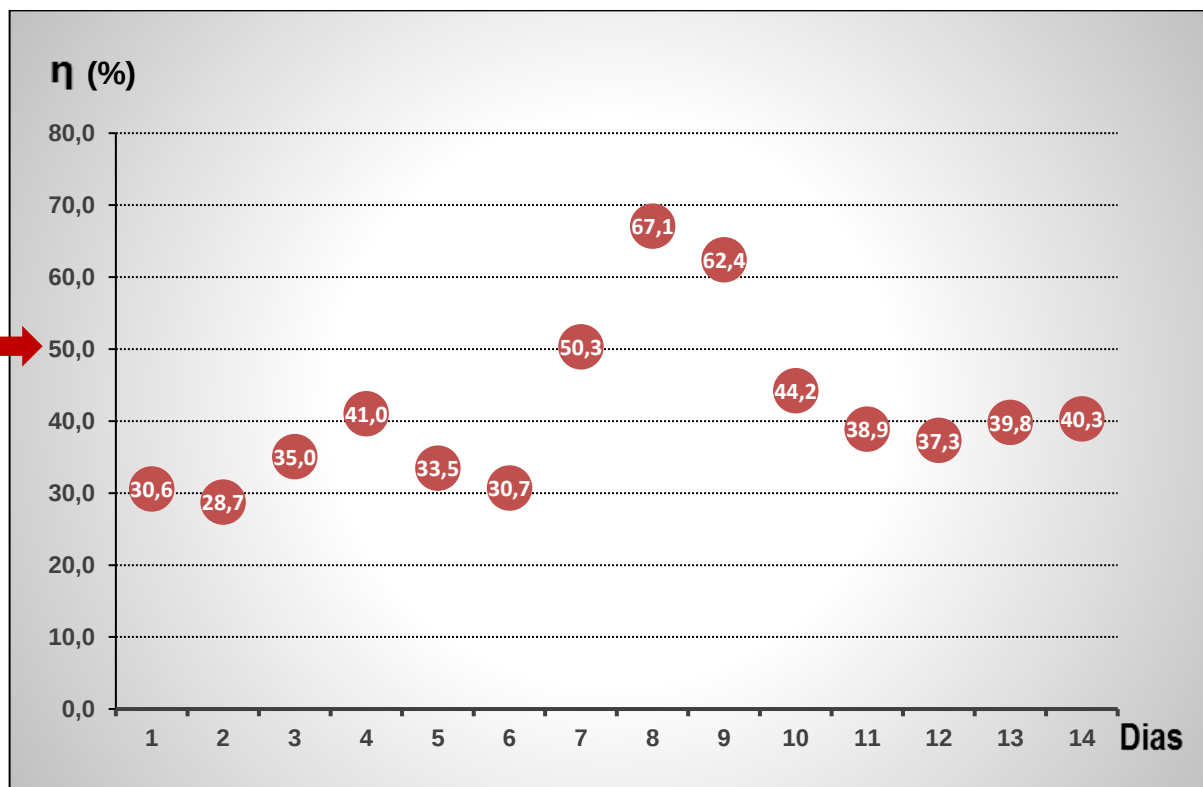


Figura 27 - Gráfico das médias dos rendimentos da torre de tiragem induzida.

Os dados de rendimento de projeto obtidos através do manual da Alpina para a torre de tiragem mecânica forçada são os mesmos apresentados para a torre de tiragem induzida, por possuir as mesmas variações de entrada e saída da torre e o mesmo enchimento. De acordo com o gráfico da Figura 27, conforme apêndice A2, Tabela 3, os picos de rendimentos médios por dia nos dias 1, 2, 3, 5 e 6 variaram entre 28,7% a 35%, estes rendimentos foram os mais baixos dos experimentos, apresentando média de *range* próximos de 3°C. Observa-se que as temperaturas de água fria de saída da torre estão acima do ideal que é de 29°C. Nos dias 4, 7, 10, 11, 12, 13 e 14, os rendimentos foram de 37,3% a 50,3%, apresentando média de *range* próxima a de projeto, ou seja, 4°C. Já nos dias 8 e 9, mostrou um alto rendimento de 67,1% e 62,4% respectivamente com média de *range* de 5,5°C. O aumento do rendimento está gerando um maior resfriamento do que o necessário no processo,

que seria de 29°C. Pode-se como já comentado, reduzir a velocidade do ar, consumindo menos energia no motor do ventilador, desta forma entrará menos ar na torre gerando uma menor diferença de temperatura entre o ar e a água, e consequentemente desta forma, uma redução do *range*.

A Figura 28, ilustra o gráfico comparativo do rendimento térmico entre a torre de tiragem mecânica forçada com a torre de tiragem induzida.

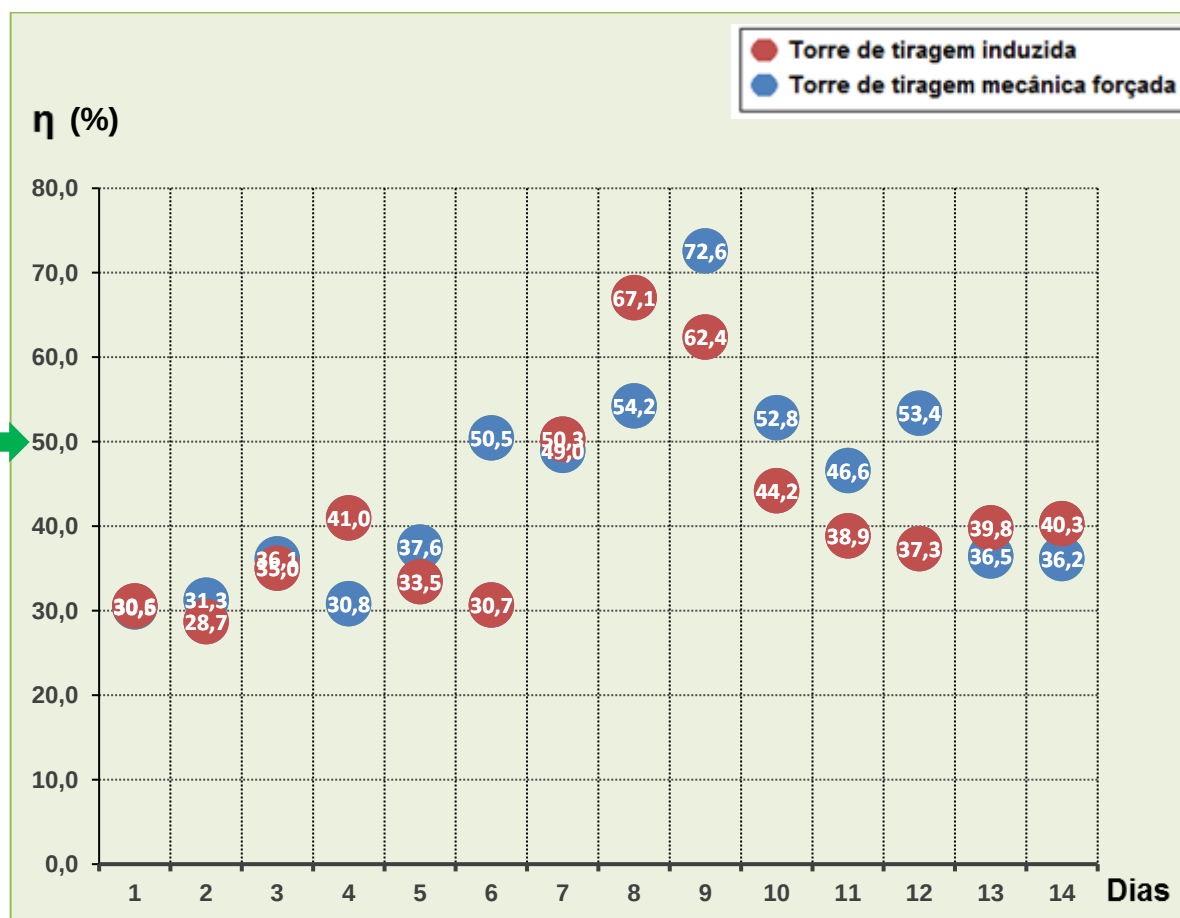


Figura 28 - Gráfico comparativo entre os rendimentos das torres de tiragem mecânica forçada e induzida.

A Figura 28 mostra o comparativo entre os rendimentos das torres de tiragem mecânica forçada e da induzida. Observa-se que nos dias 1, 2 e 3 não houve grandes alterações entre ambas, apesar de apresentarem um rendimento muito abaixo do ideal, mesmo assim a de tiragem forçada apresenta índices melhores. Nos dias 4, 5, 13 e 14, apesar de uma pequena melhora nos índices de rendimento, continuam abaixo do ideal. Nestes dias houve uma proporcionalidade, pois nos dias 4 e 14 a de tiragem induzida teve índices melhores, já nos dias 5 e 13 foi a de tiragem mecânica

forçada, porém, a média de rendimento da induzida mostrou-se melhor com 38,8% em comparação com a mecânica forçada que foi de 36%. No dia 11 a torre de tiragem mecânica forçada apresentou rendimento de 46,6% contra 38,9% da induzida. O rendimento ideal apareceu na torre de tiragem mecânica forçada no dia 6 com 50,5%. A média de temperatura de água quente de entrada e a de água fria de saída na torre, assim como a temperatura e o vento foram similares, porém o rendimento da tiragem induzida foi de 30,7 abaixo da média. Esta diferença foi consequente da diferença do *range* durante as 4 medições do dia que apresentou um *range* de 4°C na de tiragem mecânica forçada e somente 3°C para a induzida. O maior rendimento apresentado na torre de tiragem induzida ocorreu no dia 7 com 50,3% contra 49% da torre mecânica forçada, porém, não é significativo para análise comparativa. Dias onde ambas as torres apresentaram rendimentos acima do ideal como no dia 8 onde a de tiragem induzida à média foi de 67,1% e da mecânica forçada 54,2%, nota-se que a de tiragem mecânica forçada está um pouco acima do ideal. Da mesma forma, nos dias 10 e 12 a mecânica forçada apresentou respectivamente 52,8% e 53,4% contra 44,2% e 37,3% da induzida. Já no dia 9, a mecânica forçada mostra 72,6% e a tiragem induzida 62,4%.

5.2. Approach

De acordo com Cortinovis e Song (2005), para torres de resfriamento industriais, o *approach* fica por volta de 5°C. Ocorrem problemas no resfriamento quando os valores de *approach* estão acima de 10°C, isto aponta uma operação deficiente no sistema de resfriamento devido as obstruções nos recheios, bicos entupidos ou avariados ou baixa velocidade do ar.

A Tabela 4, apêndice B1, apresenta os dados experimentais para o cálculo do *approach* da torre de tiragem mecânica forçada e a Figura 29 mostra o gráfico do *approach* versus dias da torre de tiragem mecânica forçada.

Segundo Gomide (2005), na prática a temperatura da água resfriada terá que ser no mínimo 2 a 5°C maior do que a de bulbo úmido do ar. É esta aproximação do bulbo úmido, que mede a força propulsora da evaporação e ela não deve ser excedida em mais do que 5% do número total de horas de operação durante o verão.

Observa-se na Tabela 4, apêndice B1 e disposto na Figura 29, que nos dias 3, 6, 7, 8, 9, 10 e 11, as umidades relativas do ar estiveram baixas entre 41 a 67%

fazendo com que o ar estivesse mais seco, desta forma, as temperaturas de bulbo úmido diminuíram devido ao calor retirado para evaporar a água.

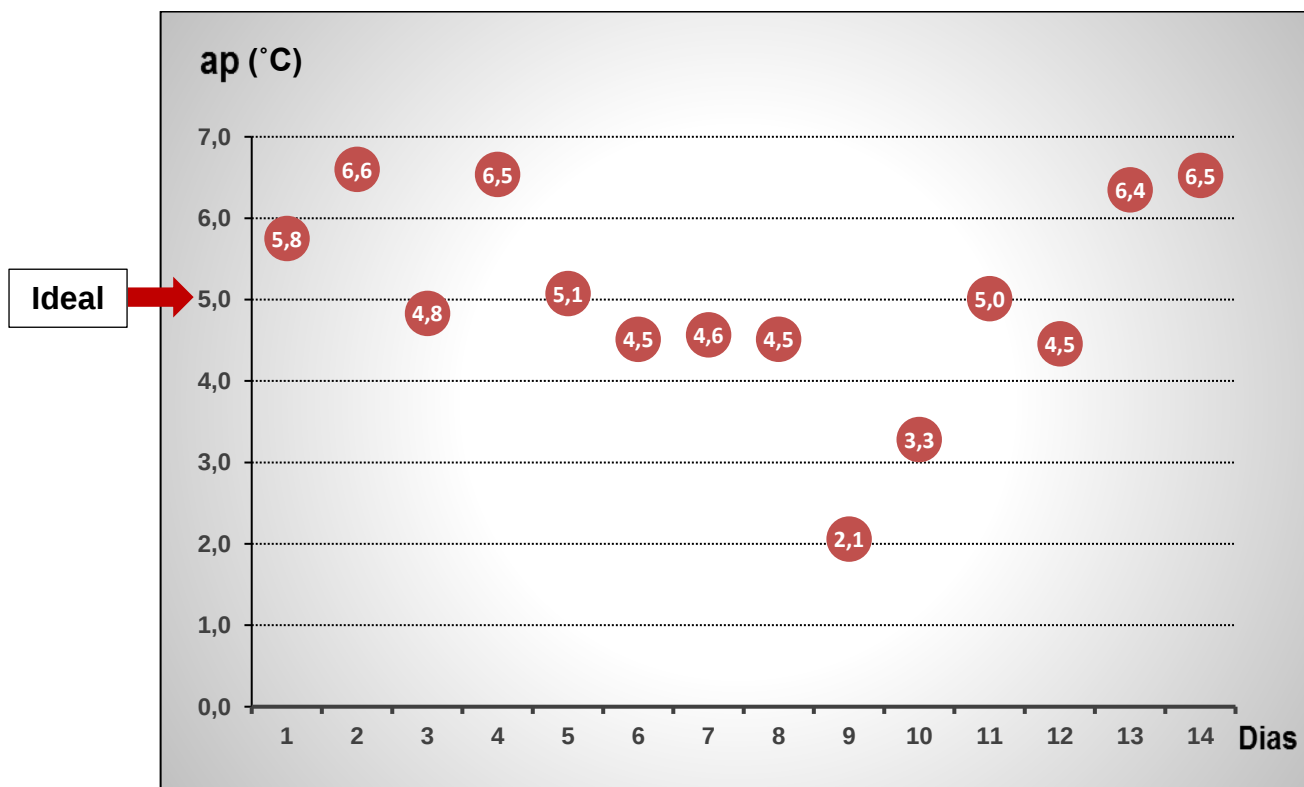


Figura 29 - Gráfico do *approach* da torre de tiragem mecânica forçada.

O seu resfriamento é diretamente proporcional à secura do ar. Quanto mais seco o ar, maior o resfriamento, portanto, quanto maior a diferença entre as temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco, menor será a umidade relativa propiciando um melhor *approach* e, também, as temperaturas da água fria estiveram próximas das temperaturas de bulbo úmido, fazendo com que a média do *approach* estivesse entre 2,1 a 5°C, portanto, abaixo ou próximo do ideal que é de 5°C, desta forma gerando mais resfriamento da água e consequentemente uma maior economia do processo.

Nos dias 5 e 12 em virtude das elevadas cargas de vento de 9 e 12 km/h respectivamente, geraram uma interferência positiva nas médias das temperaturas do *approach* de 5,1 e 4,5°C, apesar de que em ambos os dias as umidades relativas do ar estiveram altas em torno de 77 e 71%.

No dia 1 mostrou baixa carga de vento de 3 km/h e umidade relativa do ar alta de 98%, motivo que se pode atribuir ao valor de *approach* maior de 5,0°C. No dia 2,

em virtude da velocidade do vento de 11 km/h e da alta umidade relativa do ar de 93%, houve uma intervenção no processo evaporativo fazendo com que o resfriamento não atingisse a temperatura ideal, portanto, não houve a estabilidade no processo termodinâmico para gerar a evaporação ideal, assim apresentou uma média do *approach* de 6,6°C. O mesmo fato ocorreu nos dias 4, 13 e 14 que apresentaram umidades relativas do ar elevadas de 82%, 91% e 82% respectivamente, com cargas de ventos de 8 e 9 km/h e, também, apresentaram médias de *approach* muito acima do ideal de 6,4°C no dia 13 e de 6,5°C nos dias 4 e 14.

A Tabela 5, apêndice B2, apresenta os dados experimentais para o cálculo do *approach* demonstrado no gráfico da torre de tiragem induzida, conforme Figura 30.

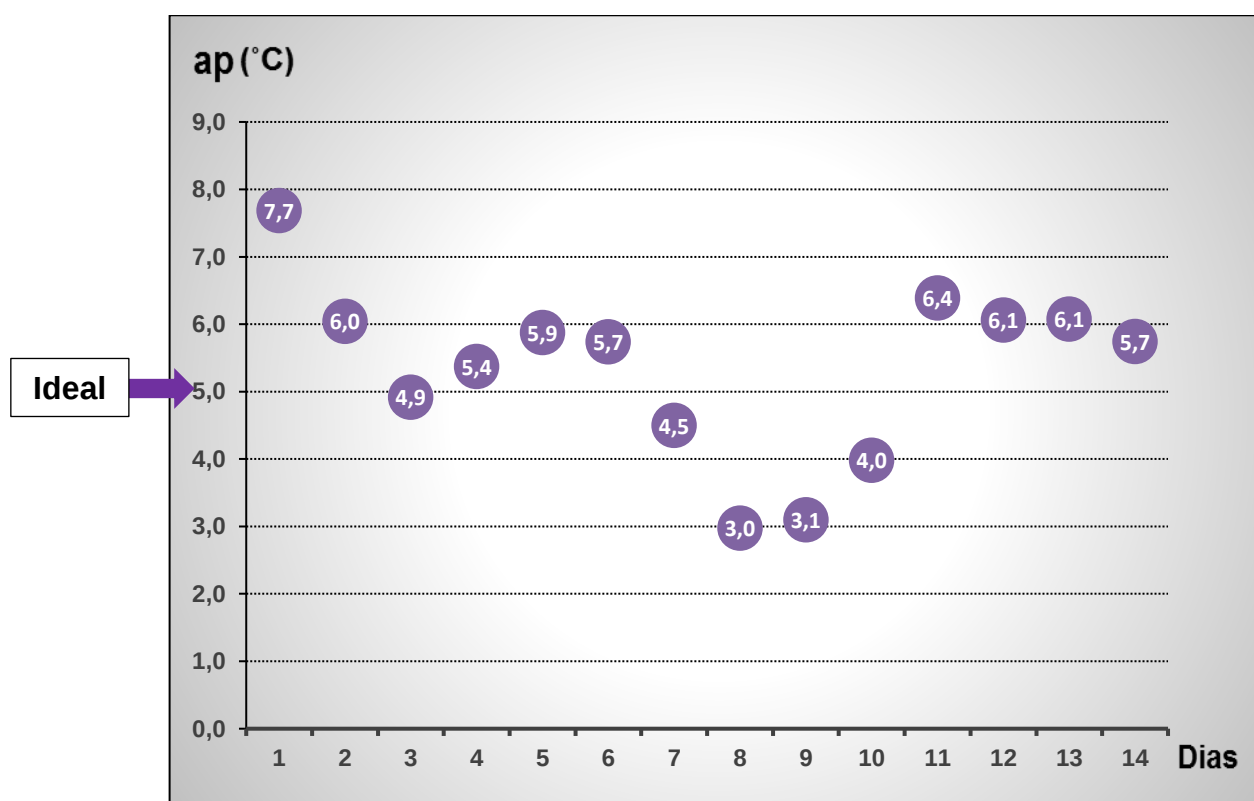


Figura 30 - Gráfico do *approach* da torre de tiragem induzida.

Observa-se na Tabela 5, apêndice B2 e disposto na Figura 30 que nos dias 3, 7, 8, 9 e 10 devido às baixas umidades relativas do ar que variou entre 45 a 60% fazendo com que o ar estivesse mais seco gerando nesses dias uma média do *approach*, que variou entre 3,0 a 4,9°C, mais próxima de projeto (5°C) ocasionando uma temperatura de água de saída na torre mais refrigerada (fria). Nestes dias as temperaturas de resfriamento da água de saída foram próximas às de projeto. Apesar

das cargas de vento baixas, exceto no dia 3 (17 km/h), as temperaturas do dia foram altas, o que pode explicar o bom valor de *approach* (média de 4,9°C). No dia 4 apresentava uma média do *approach* alto de 5,4°C, devido a alta umidade relativa do ar de 82% e uma intermediária carga de vento de 8 km/h. No dia 6 apresentou uma média do *approach* elevado de 5,7°C, isto ocorreu em virtude da diferença entre a temperatura de água fria de saída em comparação com a temperatura de bulbo úmido de entrada da torre, neste dia a umidade relativa do ar estava intermediária 67% e carga de vento, também intermediária de 7 Km/h. A mesma média do *approach* de 5,7°C, ocorreu no dia 14 onde a temperatura da água fria com 29°C e a temperatura de bulbo úmido 23,2°C apesar de estarem próximos do ideal, a alta umidade relativa do ar de 82%, combinado com uma alta carga de vento de 9 Km/h, fez com que a média do *approach* estivesse acima do ideal. Nos dias 2, 5, 12 e 13, apresentaram um *approach* alto que variou entre 5,9°C a 6,1°C, nos dias 2, 5 e 12 todas as temperaturas de água fria estavam acima do ideal variando entre 30,4 a 31,7°C com cargas de vento elevada entre 9 a 12 Km/h, porém não foram suficientes para resfriar a água em virtude das umidades relativas do ar que estiveram entre 71 a 93%. Já no dia 13 apresentou elevada carga de vento de 9 km/h, umidade relativa do ar de 91%, a temperatura de bulbo úmido abaixo da média 22,9°C, gerando uma saída de água ideal de 29°C.

Nos dias 1 e 11 ocorreram os maiores picos médios do *approach* que foram de 7,7 e 6,4°C respectivamente. No dia 1 ocorreu uma maior variação das cargas de ventos entre 1 a 7 Km/h, com elevada umidade relativa do ar de 98% foram determinantes para um alto *approach* de 7,7°C. Já no dia 11 apresentou uma reduzida carga de vento que foi constante em 3 km/h e com baixa umidade relativa do ar de 41%. Um fator sugerido para o aumento do *approach* de 6,4°C pode ter ocorrido em virtude da impossibilidade de se realizar e controlar as vazões de entrada de água na torre, devido à indústria não disponibilizar de equipamentos de medição.

A Figura 31 apresenta o gráfico comparativo entre o *approach* das torres de tiragem mecânica forçada e da tiragem induzida. Mostra que na tiragem induzida apresentou o maior *approach* no dia 1 com 7,7°C, enquanto que na mecânica forçada ocorreu no dia 2 com 6,6°C.

Os menores índices apareceram no dia 9 com 2,1°C na mecânica forçada e no dia 8 com 3,0°C na torre de tiragem induzida.

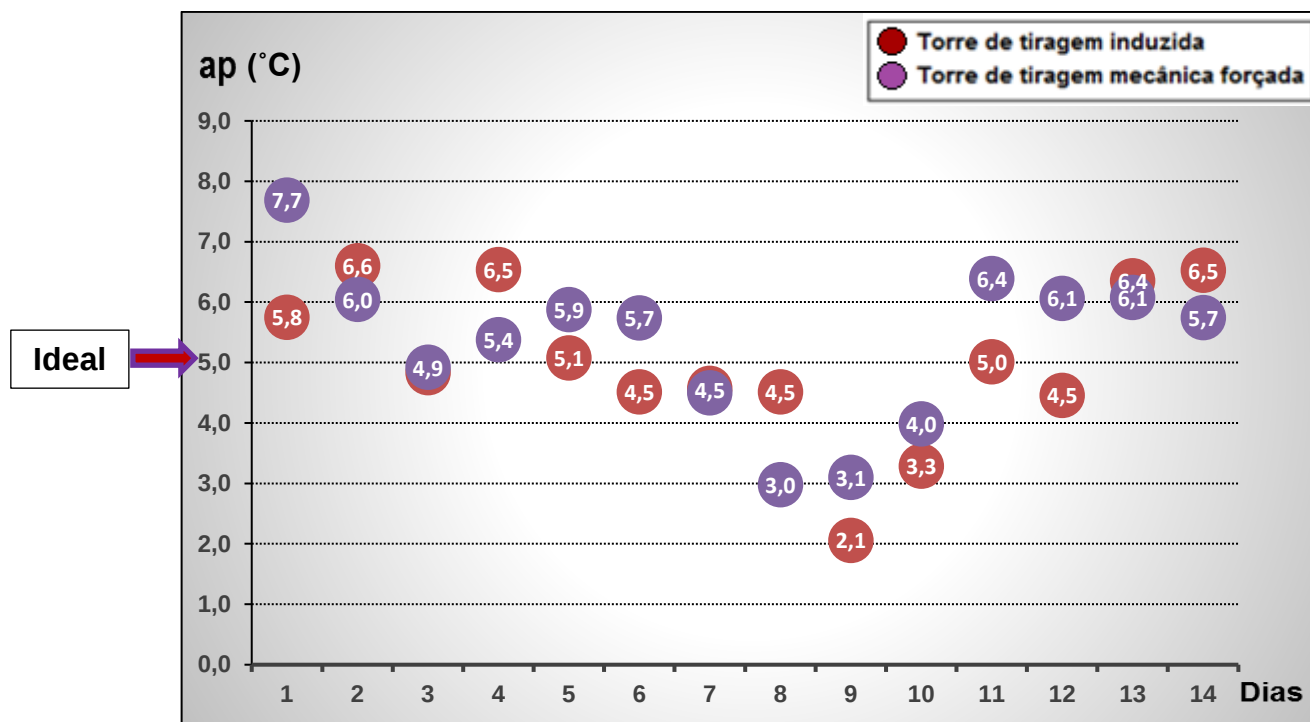


Figura 31 - Gráfico comparando o *approach* entre a torre de tiragem mecânica forçada com a torre de tiragem induzida.

Nota-se que nos demais dias a índices muito próximos, porém, nos dias 2, 5, 6, 11, 12, 13 e 14 a torre induzida apresenta valores maiores de *approach*, enquanto que somente nos dias 1, 4, 13 e 14 ocorreram na mecânica forçada. Em contrapartida os valores menores que o ideal aparece nos dias 6, 7, 8, 10 e 12 na mecânica forçada e na induzida nos dias 7, 9 e 10. Já os valores iguais ou próximos o ideal do *approach* apresenta-se nos dias 3 e 4 na induzida e nos dias 3, 5 e 11 na mecânica forçada. A torre mecânica forçada na somatória dos quatorze (14) dias apresentou uma média ideal de projeto de 5°C, conforme demonstrado na tabela 4, já a induzida apontou a média de 5,3°C de acordo com a tabela 5. Para se melhorar o *approach* de ambas as torres, quando os valores forem maiores que o ideal, deve-se adotar medidas como diminuir a vazão de entrada de água e a potência dos ventiladores, já para os valores menores do ideal deve-se fazer o inverso. Contudo, valores maiores de *approach* elevam os custos operacionais da torre.

5.3. Calor cedido pela água

Para se determinar o calor ideal de projeto cedido pela água nas torres de tiragem mecânica forçada e da tiragem induzida, foi utilizada a vazão de projeto de

entrada e saída de água de $60\text{m}^3/\text{h}$. Foi realizada a conversão para vazão volumétrica, conforme equação 4, onde foi multiplicado a vazão da água de $60\text{m}^3/\text{h}$ pela massa específica da água de 1000 kg/m^3 e determinou-se a vazão volumétrica da água de 60000 kg/h . Para calcular o calor cedido pela água, conforme equação 3, foi multiplicado a vazão volumétrica pelo calor específico que foi adotado constante de $1\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$, multiplicado pelas diferenças de temperatura da água quente de entrada 34°C menos a água fria de saída 29°C , ambas temperaturas de projeto e desta forma foi obtido o calor cedido pela água de projeto de 300000 kcal/h .

As Figuras 32 e 33, conforme Tabela 6 do apêndice C1 e Tabela 7 do apêndice C2, mostram, respectivamente, os gráficos do calor cedido pela água das torres de tiragem mecânica forçada e induzida.

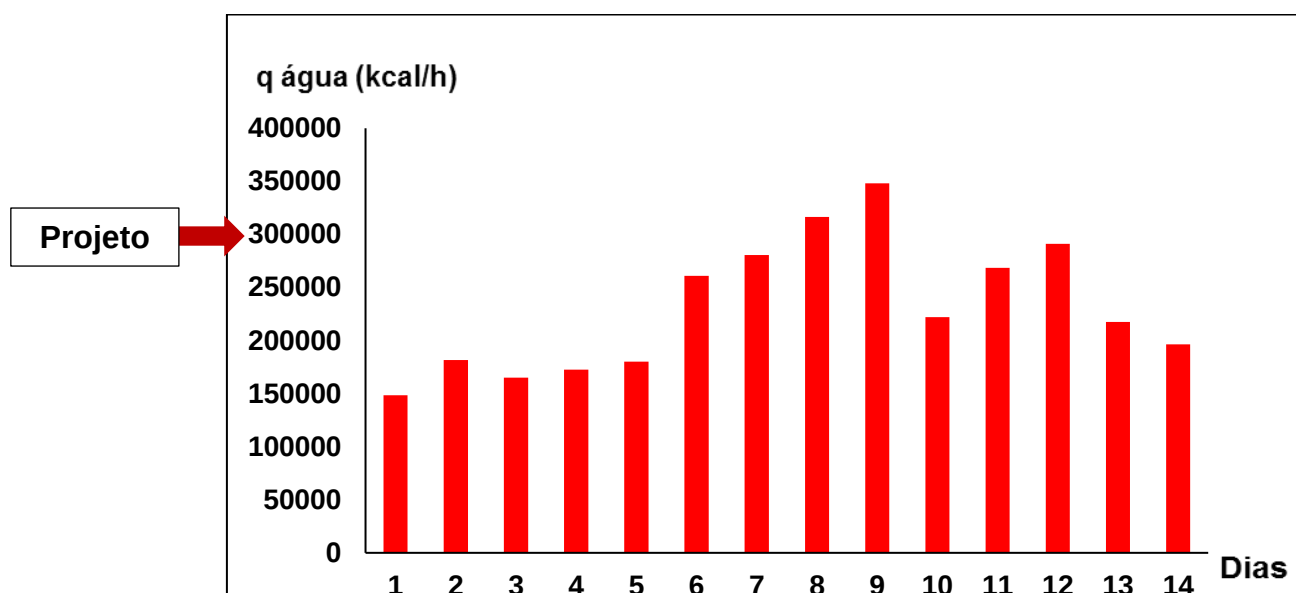


Figura 32 - Gráfico do calor cedido pela água da torre de tiragem mecânica forçada.

As variações do calor experimental cedido pela água devem-se exclusivamente as alterações observadas no *range* da água quente de entrada e água fria de saída, uma vez que não foi possível a medição das vazões experimental da entrada e saída de água das torres.

Para o dimensionamento de uma torre sabe-se que a vazão de água juntamente com o *range* e o *approach* são variáveis de processos necessárias.

O *range* varia com as condições climáticas e a vazão da água de resfriamento. O parâmetro de desempenho de uma torre, que é o produto do coeficiente global de transferência de massa e a área específica do recheio da torre, é um outro dado

necessário para o dimensionamento da torre. Este parâmetro depende do tipo de recheio e das vazões de água e ar a ser empregados.

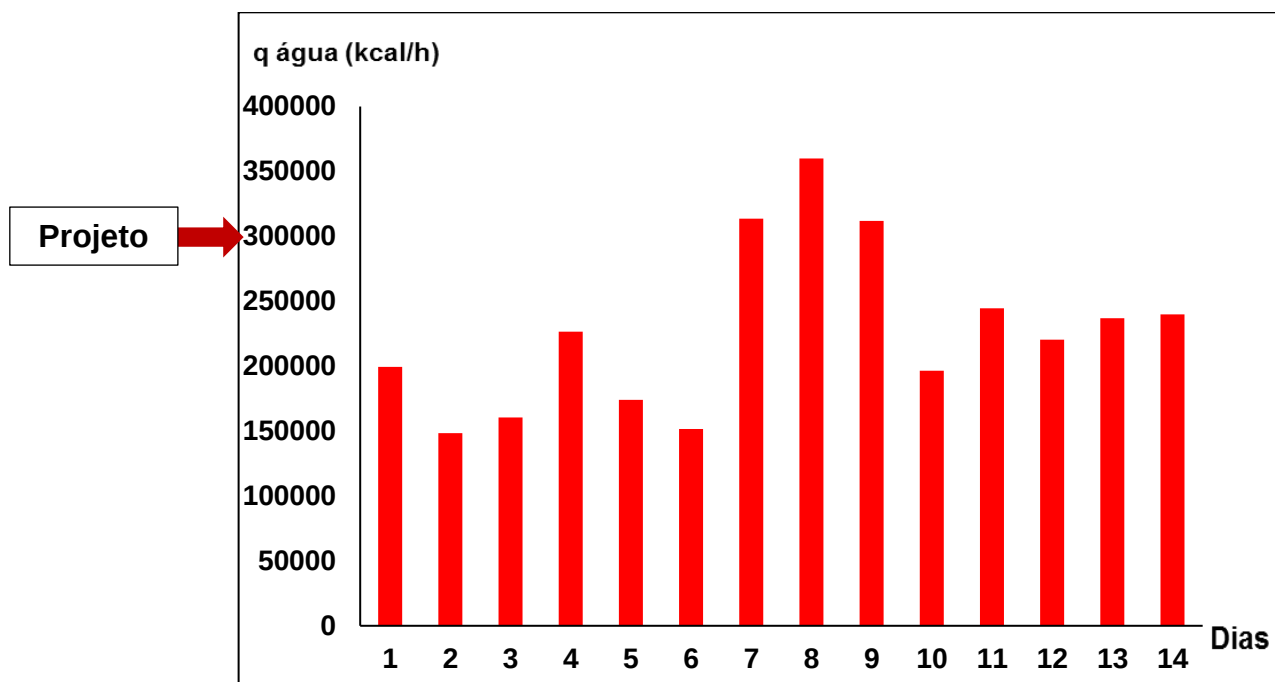


Figura 33 - Gráfico do calor cedido pela água da torre de tiragem induzida.

Assim, pode-se notar a importância do controle da vazão de água de resfriamento para o bom desempenho da torre, ou seja, por exemplo no inverno a temperatura do ar cai e a temperatura da água de saída também cai, caso a carga térmica seja mantida constante. Para manter a temperatura da água de saída constante, pode-se diminuir a vazão de água que recircula no sistema de refrigeração.

O desempenho de uma torre de resfriamento varia entre outros fatores, conforme a temperatura do ar ambiente, umidade do ar, temperatura de bulbo úmido, ou seja, com o clima.

Da mesma forma que na análise da torre mecânica forçada, a de tiragem induzida também ocorreu as mesmas variações na temperatura da água de resfriamento de entrada e saída da torre.

5.4. Entrada de ar na torre

Como já mencionado neste trabalho, a utilização de ventiladores para movimentar o ar através da torre possibilita um controle total da entrada de ar. Nas

torres de tiragem mecânica forçada os ventiladores são instalados na parte lateral da torre, abaixo do enchimento, o ar distribuído é mais fraco porque tem a necessidade de fazer um desvio de 90°, ao contrário da torre com tiragem induzida, na qual o ventilador é instalado no topo. Outro inconveniente é que o ar parcialmente saturado que sai da torre de tiragem forçada tem pequena velocidade e não se dispersa com facilidade, podendo desta forma, afetar o ar que ingressa na torre, alterando o seu desempenho. No local onde estão situados os ventiladores de ambas as torres, as entradas de ar são de 910 mm, conforme manual de projeto das torres Alpina.

Neste trabalho calculou-se a velocidade do ar de entrada da torre de tiragem mecânica forçada através dos dados coletados com um anemômetro na sucção do ventilador e na descarga com a utilização da equação 6 da continuidade.

Os valores obtidos são mostrados na Tabela 8, apêndice D1. A Figura 34 mostra o gráfico com a velocidade do ar de descarga do ventilador instalado na entrada da torre de tiragem mecânica forçada.

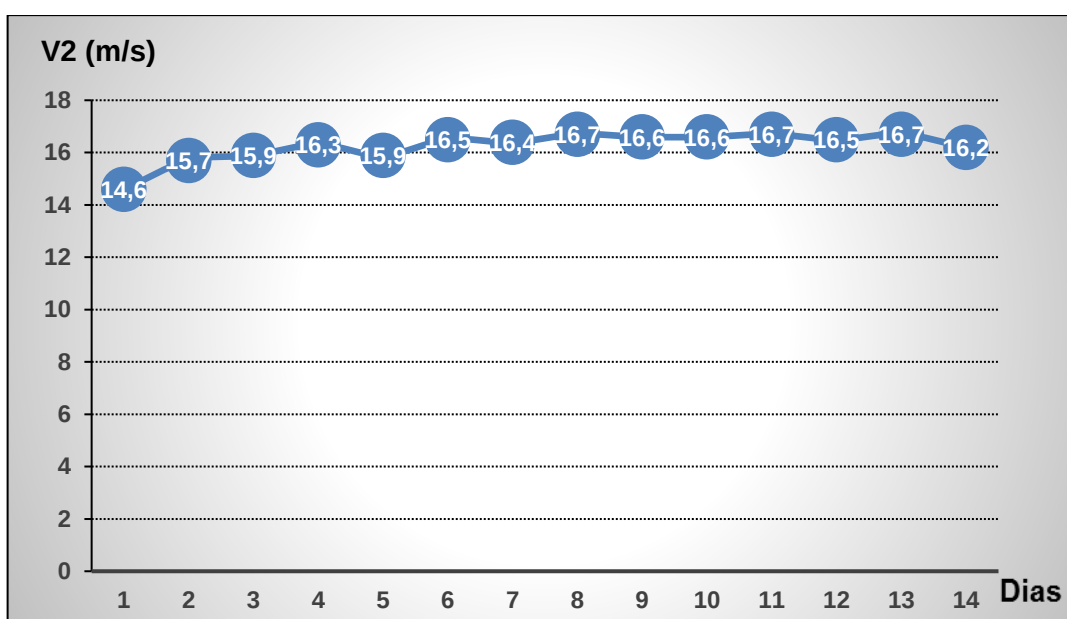


Figura 34 - Gráfico de entrada de ar na torre de tiragem mecânica forçada.

Verifica-se na Figura 34 que a velocidade do ar do ventilador foi praticamente constante durante os quatorze (14) dias de experimento, mostrando que este parâmetro é bem controlado e, portanto, não influenciou na variação dos resultados obtidos anteriormente. A Tabela 9 (apêndice D2) apresenta os dados de velocidade

do ar medidos com o anemômetro na saída do ventilador situado no topo da torre de tiragem induzida.

Neste tipo de torre a entrada do ar é pelas venezianas localizadas nas laterais da torre.

A Figura 35 apresenta o gráfico com as médias da velocidade do ar na saída da torre de tiragem induzida.

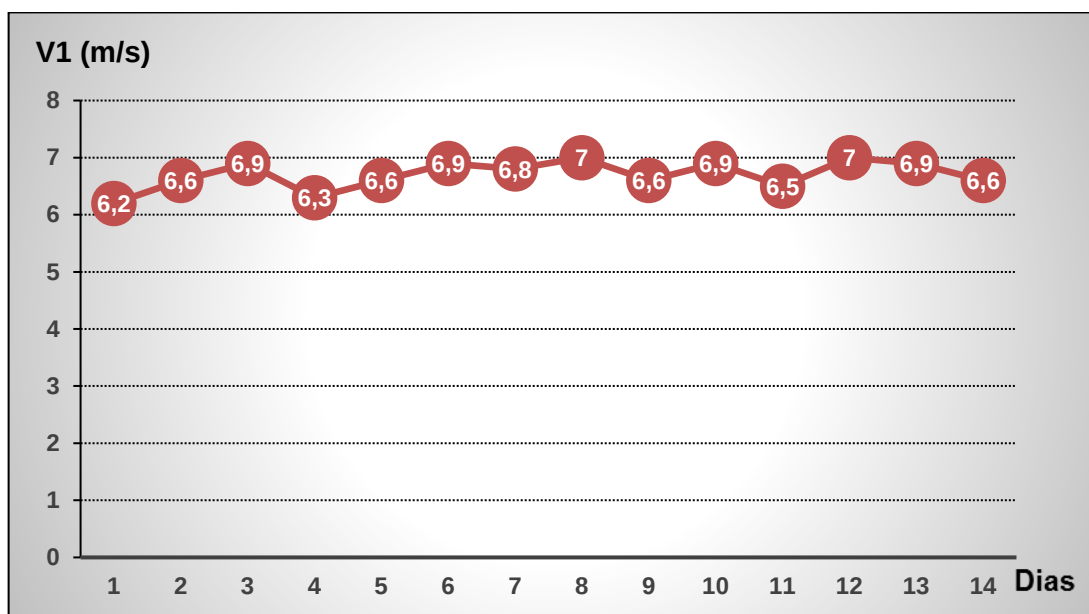


Figura 35 - Gráfico de entrada de ar na torre de tiragem induzida.

Observa-se que neste equipamento também não houve variações significativas de velocidade de saída do ar.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. Conclusões

A análise dos resultados apresentados neste trabalho pode-se concluir os rendimentos médios das torres, sabendo-se que o desempenho de projeto ideal é de 50%, o melhor resultado da mecânica forçada ocorreu no dia 6 com 50,5% e seus piores rendimentos foram nos dias 1 com 30,5%, muito abaixo do ideal e dia 9 com 72,6%, muito acima do ideal. Já o melhor rendimento médio da torre de tiragem induzida aconteceu no dia 7 com 50,3% e os piores nos dias 2 e 8 com 28,7% e 67,1% respectivamente. Porém, o rendimento médio total, mostra que a torre de tiragem mecânica forçada apresentou um leve acréscimo do resultado com uma média total de 44,1% em contrapartida com a de tiragem induzida que foi de 41,4%. Portanto, na análise geral de todos os dados, conclui-se que a mecânica forçada apresentou melhor rendimento.

A análise do *approach* mostrou que a torre de tiragem mecânica forçada obteve uma média geral ideal de 5°C, enquanto que na de tiragem induzida esta média foi de 5,3°C, ambas mostrando médias totais próximas do ideal. Sabendo-se que o *approach* igual ou abaixo de 5°C obtém-se os melhores resultados, a mecânica forçada apresentou estes valores em 8 dias, enquanto que somente em 5 dias o mesmo fato ocorreu na de tiragem induzida. Portanto, na análise do *approach* entre as torres, novamente a de tiragem mecânica forçada mostrou-se superior à de tiragem induzida.

Com relação à velocidade do ar na entrada das torres, ambas apresentaram resultados constantes, portanto, conclui-se que não houve nenhum tipo de influência nos resultados obtidos em todo o experimento.

6.2. Sugestões para melhoria das variáveis do rendimento e do *approach* das torres na Indústria Hidromar, sugere-se:

- a) Não havia medidores de vazão de água. Seria importante instalar rotâmetros na entrada de água quente das torres, com isso facilitará por meio de análise de cálculos matemáticos o aperfeiçoamento e controle com melhor eficiência do processo de resfriamento da água do cloro;

- b) Realização de limpeza programada em manutenção preventiva dos enchimentos de ambas as torres, com isso haverá uma melhor transferência de massa e energia entre o enchimento e a água melhorando o desempenho térmico das torres;
- c) Colocação de redutor de velocidade em ambos os motores das torres, assim se tiver alto pico de rendimento com alta frequência do motor reduz a rotação do motor do ventilador economizando energia elétrica. Já se houver baixos picos de rendimento aumenta-se a potência do motor, melhorando o rendimento e consequentemente o processo;
- d) Com a automatização das torres é possível analisar e coletar dados mais rápidos e precisos, facilitando a detecção de eventuais problemas em menor tempo. Também, ocorrerá um melhor rendimento do processo e controle, facilitando a melhoria do sistema de resfriamento de água gerando, desta forma, economia nos custos financeiros.

6.3. Sugestões para trabalhos futuros

- a) Automatizar as medições com sensores e instrumentos eletrônicos ou digitais;
- b) Testar outros tipos de geometrias de enchimentos para melhorar os rendimentos térmicos das torres;
- c) Analisar os desempenhos térmicos das torres de resfriamento e equipá-las com diferentes eliminadores para uma maior gama de vazões de ar e de água;
- d) Instalar um redutor de velocidades nas duas torres e calcular as melhorias de rendimento controlando as velocidades de ar de entrada e saída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPINA EQUIPAMENTOS. Disponível em: <<http://www.alpinaequipamentos.com.br>>. Acesso em: 28 maio. 2016.

ASHRAE- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineer. **Cooling towers**. Handbook-HVAC Systems and Equipment. cap.39. p.39.1. Atlanta-USA. 2008. Disponível em:<<http://www.me.ua.edu/me416/s09/pdf/ASHRAE2008Equipment-CoolingTowers.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

CLIMATEMPO. 2016. Disponível em:< <http://www.climatepo.com.br/>>.

CORTINOVIS, G. F.; SONG, T.W. **Funcionamento de uma torre de resfriamento de água**. Revista de Graduação de Engenharia Química. Sl.,v. 6, n. 14 , jul.-dez., 2005. Disponível em:<<http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf>>. Acesso em: 27 maio. 2016.

DOSSAT, R. J. **Princípios de refrigeração**. São Paulo: Hemus, 2004.

EVANS JR., F. L. **Equipment desing handbook for refineries and chemical plants**. vol.2, Houston: Gulf Publishing, 1980.

GOMES, C.C.G. **Torres de resfriamento de água**. Revista Oficina do Frio, nº 25, janeiro, 1997. Disponível em:< <http://www.alpinaequipamentos.com.br/pdf/torres-de-resfriamento-de-agua.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

GOMIDE, R. **Umidificação, condicionamento e secagem de gases resfriamento de líquidos. Vol. 5- Parte 2- Operações Unitárias**. São Paulo: Ed. do autor, 2005.

GRUPO HIDROMAR. **Apostila manuseio de cilindros de cloro**. Disponível em: <<http://www.grupohidromar.com.br/wp-content/themes/hidromar/download/Apostila-Manuseio-de-cilindros-de-cloro.pdf>>. Acesso em: 22 maio. 2016.

GRUPO HIDROMAR- CUBATÃO. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.grupo-hidromar.com.br/produtos/>>. Acesso em: 22 maio. 2016.

HAMONGROUP, 2016. Disponível em: <<http://hbra.portal.hamongroup.com>>. Acesso em:14 abr. 2016.

HESLEY, J. C. **Cooling tower fundamentals**. 2 ed. SPX Cooling Technologies. Overland Park:Kansas. 2009.

INCOTERM, 2016. Disponível em: <<http://www.incoterm.com.br/tecnica/termo+higrometros>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

INCROPERA, F P.; WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

JAGADEESH, T.; REDDY, K. S. **Performance Analysis of the Natural Draft Cooling Tower in Different Seasons**. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering

(IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, v. 7, Issue 5 (Jul. - Aug. 2013). Disponível em:<http://www.academia.edu/4815959/PerformanceAnalysisof_the_Natural_Draft_Cooling_Tower_in_Different_Seasons>. Acesso em: 12 mar. 2016.

JASIULIONIS, J. A. E. **Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água utilizando redes neurais artificiais**. 2012. 78f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas:SP. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000874941>>. Acesso em: 07 maio. 2016.

MARQUES, C. A. X.; FONTES, C. H.; EMBIRUÇU, M.; KALID, R. A. **Efficiency control in a commercial counter flow wet cooling tower**. Energy Conversion and Management. v. 50, p. 2843–2855. 2009.

MORAES JR, D.; MORAES, M.S. **Laboratório de operações unitárias II**. Santos: [s.n.], 2012.

OLIVEIRA, A.C.C.T. **Análise da utilização de gargalos e fios de garrafas pet como enchimento de torres de resfriamento**. 2009. 122f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife:PE. Disponível em:< <http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5339>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

OLIVEIRA, V. F. **Diagnóstico de eficiência energética de uma torre de resfriamento de água da Arcelormittal Inox Brasil**. 2010. 110f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte:MG. Disponível em:<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8GGP42/disserta_o_de_mestrado_vagner_ferreira_de_oliveira.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 abr. 2016.

PROCESSTECHACADEMY, 2016. Disponível em:<<http://www.processtechacademy.com/naturally-cool-man/>>. Acesso em: 23 abr.2016.

RAMIREZ, J. R; KAISER, A. S.; ZAMORA, B., LUCAS, M. **CFD analysis of drift eliminators using RANS and LES turbulent models**. Applied Thermal Engineering. Elsevier. DOI: 10.1016. fev. 2016.

SAPUNARU, R. A.; SILVA, O. C.; LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C.; FLORES, T. S.; CRUZ, N. G. S.; DIAMANTINO, H. D.; BARROSO, L. A.; ROCHA, B. A.; SOUZA, R. L. M.; RAMOS, P. C.; MACEDO, M. H. M. **As Influências das Torres Hiperbólicas nas Usinas Termoeletricas: Um Foco Termonuclear**. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas- Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri- MG, v. 37 Ed. Especial. p.30-34. 2014.

SMITH, R. **Chemical process design and integration**. New York: John Wiley & Sons Ltd., chap.24, 2005.

STANFORD III, H. W. **HVAC water chillers and cooling towers:fundamentals, application and operation**. 2 ed. Taylor&Francis Group:New York- USA. 2012.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: Makron Books, 1985.

TORRETELLI, 2016. Disponível em:< <http://www.torretelli.com.br/servicos>>. Acesso em: 20 maio.2016.

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Centrais Elétricas Brasileiras- Eletrobrás. Rio de Janeiro. 2005. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Efic%20En%20em%20Sist%20de%20Refrig%20Ind%20e%20Com-Eletobras-5.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

YUNUS, A. Ç; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7ed., Porto Alegre- RS: AMGH Editora, 2013.

WANG, S. K. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. 2ed., New York: MacGraw-Hill, 2001.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 3 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.,1993.

**APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DOS RENDIMENTOS DAS
TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA.**

APÊNDICE A1 - Tabela 2- Rendimento da torre de tiragem mecânica forçada.

Dias	Medições ao dia	Vento (km/h)	Tdia (°C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	η (%)	Range (°C)
1	a	1	29	32,8	30,3	23,0	25,5	2,5
	b	1	29	30,8	28,6	24,5	34,9	2,2
	c	3	29	32,8	30,7	24,9	26,5	2,1
	d	7	29	33,5	30,4	24,6	34,9	3,1
Médias		3	29	32,5	30,0	24,3	30,5	2,5
2	a	8	27	33,7	30,1	23,8	36,2	3,6
	b	9	27	34,3	31,5	24,4	28,2	2,8
	c	13	27	34,7	33,0	25,6	18,7	1,7
	d	13	27	34,8	30,8	25,3	41,9	4,0
Médias		11	27	34,4	31,4	24,8	31,3	3,0
3	a	17	29	33,9	30,3	26,0	45,6	3,6
	b	17	29	34,2	31,8	26,5	31,2	2,4
	c	17	29	34,6	31,9	26,9	35,0	2,7
	d	17	29	33,5	31,2	26,5	32,9	2,3
Médias		17	29	34,1	31,3	26,5	36,1	2,8
4	a	8	25	32,0	29,2	23,1	31,5	2,8
	b	8	25	35,1	32,4	24,3	24,9	2,7
	c	8	25	33,1	30,1	24,3	33,9	3,0
	d	8	25	33,2	30,2	24,1	33,1	3,0
Médias		8	25	33,4	30,5	23,9	30,8	2,9
5	a	9	29	33,3	29,6	25,0	44,6	3,7
	b	9	29	33,8	31,7	25,0	23,9	2,1
	c	9	29	33,7	31,1	26,0	33,8	2,6
	d	9	29	33,5	29,9	26,0	48,0	3,6
Médias		9	29	33,6	30,6	25,5	37,6	3,0
6	a	7	28	35,5	29,6	24,5	53,6	5,9
	b	7	28	34,7	31,9	24,6	27,8	2,8
	c	7	28	33,4	29,7	27,0	57,8	3,7
	d	7	28	34,1	29,1	26,1	62,7	5,0
Médias		7	28	34,4	30,1	25,6	50,5	4,3

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	Vento (km/h)	Tdia (°C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	η (%)	Range (°C)
7	a	8	29	33,8	29,5	25,3	50,3	4,3
	b	8	29	34,0	29,9	24,3	42,1	4,1
	c	8	29	36,8	29,1	25,6	68,9	7,7
	d	8	29	32,5	29,9	25,0	34,7	2,6
Médias		8	29	34,3	29,6	25,0	49,0	4,7
8	a	5	30	33,9	27,6	23,0	57,8	6,3
	b	5	30	34,3	27,3	25,4	78,4	7,0
	c	5	30	35,8	31,9	26,3	40,8	3,9
	d	5	30	35,9	32,0	26,1	39,9	3,9
Médias		5	30	35,0	29,7	25,2	54,2	5,3
9	a	5	29	33,2	25,4	24,6	91,0	7,8
	b	5	29	32,9	25,6	24,6	88,2	7,3
	c	5	29	32,9	29,1	26,1	56,1	3,8
	d	5	29	33,8	29,5	26,0	55,1	4,3
Médias		5	29	33,2	27,4	25,3	72,6	5,8
10	a	3	31	30,1	27,6	24,3	42,7	2,5
	b	3	31	33,6	29,4	25,6	52,7	4,2
	c	3	31	33,1	29,2	26,9	62,7	3,9
	d	3	31	33,5	29,3	25,6	53,3	4,2
Médias		3	31	32,6	28,9	25,6	52,8	3,7
11	a	3	32	34,2	28,9	23,5	49,5	5,3
	b	3	32	35,7	29,9	24,1	50,1	5,8
	c	3	32	34,5	30,8	26,6	47,0	3,7
	d	3	32	33,8	30,7	26,0	39,7	3,1
Médias		3	32	34,6	30,1	25,1	46,6	4,5
12	a	12	29	34,0	28,7	23,4	50,0	5,3
	b	12	29	34,5	30,8	24,1	35,7	3,7
	c	12	29	35,8	29,9	26,6	64,3	5,9
	d	12	29	33,7	29,2	26,6	63,6	4,5
Médias		12	29	34,5	29,7	25,2	53,4	4,9

Continua

Média total	44,1
--------------------	------

APÊNDICE A2 - Tabela 3- Rendimento da torre de tiragem induzida.

Dias	Medições ao dia	Vento (km/h)	Tdia (°C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	η (%)	Range (°C)
1	a	1	29	40,8	35,9	24,0	29,2	4,9
	b	1	29	34,4	32,6	25,0	19,1	1,8
	c	3	29	33,8	29,4	24,9	49,3	4,4
	d	7	29	33,8	31,6	24,9	24,6	2,2
Médias		3	29	35,7	32,4	24,7	30,6	3,3
2	a	8	27	33,7	31,8	24,3	20,1	1,9
	b	9	27	34,8	31,3	25,0	35,7	3,5
	c	13	27	35,0	32,0	26,0	33,3	3,0
	d	13	27	33,2	31,7	27,4	25,8	1,5
Médias		11	27	34,2	31,7	25,7	28,7	2,5
3	a	17	29	34,0	30,3	26,0	46,3	3,7
	b	17	29	34,3	31,8	27,0	34,2	2,5
	c	17	29	34,5	32,5	27,0	26,7	2,0
	d	17	29	34,2	31,7	26,6	33,0	2,5
Médias		17	29	34,3	31,6	26,7	35,0	2,7
4	a	8	25	33,9	28,6	24,0	53,5	5,3
	b	8	25	33,4	30,6	24,4	31,0	2,8
	c	8	25	33,5	28,9	24,8	52,6	4,6
	d	8	25	33,8	31,4	24,9	26,9	2,4
Médias		8	25	33,7	29,9	24,5	41,0	3,8
5	a	9	29	34,7	32,6	25,4	22,5	2,1
	b	9	29	35,1	31,4	25,3	37,6	3,7
	c	9	29	34,4	31,8	25,9	30,5	2,6
	d	9	29	33,4	30,2	26,0	43,2	3,2
Médias		9	29	34,4	31,5	25,6	33,5	2,9
6	a	7	28	34,0	31,8	24,9	24,1	2,2
	b	7	28	33,9	30,7	24,8	35,0	3,2
	c	7	28	34,5	32,0	27,1	33,9	2,5
	d	7	28	33,4	31,2	26,0	29,7	2,2
Médias		7	28	34,0	31,4	25,7	30,7	2,5

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	Vento (km/h)	Tdia (°C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	η (%)	Range (°C)
7	a	8	29	33,4	29,1	23,3	42,4	4,3
	b	8	29	33,1	29,1	24,0	44,0	4,0
	c	8	29	33,0	29,3	25,5	49,3	3,7
	d	8	29	33,8	28,7	26,0	65,4	5,1
Médias		8	29	33,3	29,0	24,7	50,3	4,3
8	a	5	30	33,8	26,9	24,6	75,2	6,9
	b	5	30	34,4	27,5	25,9	80,9	6,9
	c	5	30	35,4	30,5	26,3	53,6	4,9
	d	5	30	35,3	30,0	26,3	58,6	5,3
Médias		5	30	34,7	28,7	25,8	67,1	6,0
9	a	5	29	32,8	26,8	24,0	68,2	6,0
	b	5	29	33,2	27,4	24,1	63,9	5,8
	c	5	29	32,9	28,6	26,0	62,3	4,3
	d	5	29	33,9	29,2	25,4	55,1	4,7
Médias		5	29	33,2	28,0	24,9	62,4	5,2
10	a	3	31	29,1	27,3	24,1	36,2	1,8
	b	3	31	33,1	29,8	25,6	44,1	3,3
	c	3	31	33,5	29,7	25,4	46,8	3,8
	d	3	31	33,7	29,5	25,3	49,7	4,2
Médias		3	31	32,4	29,1	25,1	44,2	3,3
11	a	3	32	34,3	29,6	24,0	45,6	4,7
	b	3	32	35,8	31,0	24,0	40,7	4,8
	c	3	32	34,6	31,2	24,0	32,1	3,4
	d	3	32	34,4	31,0	25,3	37,2	3,4
Médias		3	32	34,8	30,7	24,3	38,9	4,1
12	a	12	29	34,2	29,5	24,0	46,1	4,7
	b	12	29	33,8	29,8	24,0	40,8	4,0
	c	12	29	34,7	31,0	24,0	34,6	3,7
	d	12	29	33,5	31,2	25,3	27,9	2,3
Médias		12	29	34,1	30,4	24,3	37,3	3,7

Continua

Contin

Dias	Medições ao dia	Vento (km/h)	Tdia (°C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	η (%)	Range (°C)
13	a	9	29	32,3	28,4	21,9	37,4	3,9
	b	9	29	32,9	27,2	23,0	57,6	5,7
	c	9	29	34,1	31,2	23,0	26,1	2,9
	d	9	29	32,3	29,0	23,6	38,0	3,3
Médias		9	29	32,9	29,0	22,9	39,8	3,9
14	a	9	29	32,4	28,5	23,2	42,4	3,9
	b	9	29	32,8	27,3	23,1	56,7	5,5
	c	9	29	32,5	31,1	23,6	15,8	1,4
	d	9	29	34,2	29,0	23,0	46,4	5,2
Médias		9	29	33,0	29,0	23,2	40,3	4,0
Média total							41,4	

**APÊNDICE B – TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DE *APPROACH* DAS
TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA.**

APÊNDICE B1- Tabela 4 - *Approach* da torre de tiragem mecânica forçada.

Dias	Medições ao dia	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	ap (°C)	Umidade relativa do ar (%)
1	a	30,3	23,0	7,3	98,0
	b	28,6	24,5	4,1	98,0
	c	30,7	24,9	5,8	98,0
	d	30,4	24,6	5,8	98,0
Médias		30,0	24,3	5,8	98,0
2	a	30,1	23,8	6,4	93,0
	b	31,5	24,4	7,1	93,0
	c	33,0	25,6	7,4	93,0
	d	30,8	25,3	5,6	93,0
Médias		31,4	24,8	6,6	93,0
3	a	30,3	26,0	4,3	54,0
	b	31,8	26,5	5,3	54,0
	c	31,9	26,9	5,0	54,0
	d	31,2	26,5	4,7	54,0
Médias		31,3	26,5	4,8	54,0
4	a	29,2	23,1	6,1	82,0
	b	32,4	24,3	8,2	82,0
	c	30,1	24,3	5,9	82,0
	d	30,2	24,1	6,1	82,0
Médias		30,5	23,9	6,5	82,0
5	a	29,6	25,0	4,6	77,0
	b	31,7	25,0	6,7	77,0
	c	31,1	26,0	5,1	77,0
	d	29,9	26,0	3,9	77,0
Médias		30,6	25,5	5,1	77,0
6	a	29,6	24,5	5,1	67,0
	b	31,9	24,6	7,3	67,0
	c	29,7	27,0	2,7	67,0
	d	29,1	26,1	3,0	67,0
Médias		30,1	25,6	4,5	67,0

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	ap (°C)	Umidade relativa do ar (%)
7	a	29,5	25,3	4,3	60,0
	b	29,9	24,3	5,7	60,0
	c	29,1	25,6	3,5	60,0
	d	29,9	25,0	4,9	60,0
Médias		29,6	25,0	4,6	60,0
8	a	27,6	23,0	4,6	47,0
	b	27,3	25,4	1,9	47,0
	c	31,9	26,3	5,7	47,0
	d	32,0	26,1	5,9	47,0
Médias		29,7	25,2	4,5	47,0
9	a	25,4	24,6	0,8	59,0
	b	25,6	24,6	1,0	59,0
	c	29,1	26,1	3,0	59,0
	d	29,5	26,0	3,5	59,0
Médias		27,4	25,3	2,1	59,0
10	a	27,6	24,3	3,4	45,0
	b	29,4	25,6	3,8	45,0
	c	29,2	26,9	2,3	45,0
	d	29,3	25,6	3,7	45,0
Médias		28,9	25,6	3,3	45,0
11	a	28,9	23,5	5,4	41,0
	b	29,9	24,1	5,8	41,0
	c	30,8	26,6	4,2	41,0
	d	30,7	26,0	4,7	41,0
Médias		30,1	25,1	5,0	41,0
12	a	28,7	23,4	5,3	71,0
	b	30,8	24,1	6,7	71,0
	c	29,9	26,6	3,3	71,0
	d	29,2	26,6	2,6	71,0
Médias		29,7	25,2	4,5	71,0

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	ap (°C)	Umidade relativa do ar (%)
13	a	28,4	22,1	6,3	91,0
	b	29,6	22,1	7,5	91,0
	c	31,3	25,1	6,2	91,0
	d	29,1	23,6	5,5	91,0
Médias		29,6	23,3	6,4	91,0
14	a	28,3	22,1	6,2	82,0
	b	29,4	23,6	5,8	82,0
	c	33,0	22,1	10,9	82,0
	d	28,4	25,1	3,3	82,0
Médias		29,8	23,3	6,5	82,0
Médias Totais		29,9	24,9	5,0	69,1

APÊNDICE B2- Tabela 5- *Approach* da torre de tiragem induzida.

Dias	Medições ao dia	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	ap (°C)	Umidade relativa do ar (%)
1	a	35,9	24,0	11,9	98,0
	b	32,6	25,0	7,6	98,0
	c	29,4	24,9	4,5	98,0
	d	31,6	24,9	6,7	98,0
Médias		32,4	24,7	7,7	98,0
2	a	31,8	24,3	7,6	93,0
	b	31,3	25,0	6,3	93,0
	c	32,0	26,0	6,0	93,0
	d	31,7	27,4	4,3	93,0
Médias		31,7	25,7	6,0	93,0
3	a	30,3	26,0	4,3	54,0
	b	31,8	27,0	4,8	54,0
	c	32,5	27,0	5,5	54,0
	d	31,7	26,6	5,1	54,0
Médias		31,6	26,7	4,9	54,0
4	a	28,6	24,0	4,6	82,0
	b	30,6	24,4	6,2	82,0
	c	28,9	24,8	4,2	82,0
	d	31,4	24,9	6,5	82,0
Médias		29,9	24,5	5,4	82,0
5	a	32,6	25,4	7,2	77,0
	b	31,4	25,3	6,2	77,0
	c	31,8	25,9	5,9	77,0
	d	30,2	26,0	4,2	77,0
Médias		31,5	25,6	5,9	77,0
6	a	31,8	24,9	6,9	67,0
	b	30,7	24,8	6,0	67,0
	c	32,0	27,1	4,9	67,0
	d	31,2	26,0	5,2	67,0
Médias		31,4	25,7	5,7	67,0

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	ap (°C)	Umidade relativa do ar (%)
7	a	29,1	23,3	5,9	60,0
	b	29,1	24,0	5,1	60,0
	c	29,3	25,5	3,8	60,0
	d	28,7	25,5	3,2	60,0
Médias		29,1	24,6	4,5	60,0
8	a	26,9	24,6	2,3	47,0
	b	27,5	25,9	1,6	47,0
	c	30,5	26,3	4,3	47,0
	d	30,0	26,3	3,8	47,0
Médias		28,7	25,8	3,0	47,0
9	a	26,8	24,0	2,8	59,0
	b	27,4	24,1	3,3	59,0
	c	28,6	26,0	2,6	59,0
	d	29,2	25,4	3,8	59,0
Médias		28,0	24,9	3,1	59,0
10	a	27,3	24,1	3,2	45,0
	b	29,8	25,6	4,2	45,0
	c	29,7	25,4	4,3	45,0
	d	29,5	25,3	4,3	45,0
Médias		29,1	25,1	4,0	45,0
11	a	29,6	24,0	5,6	41,0
	b	31,0	24,0	7,0	41,0
	c	31,2	24,0	7,2	41,0
	d	31,0	25,3	5,8	41,0
Médias		30,7	24,3	6,4	41,0
12	a	29,5	24,0	5,5	71,0
	b	29,8	24,0	5,8	71,0
	c	31,0	24,0	7,0	71,0
	d	31,2	25,3	6,0	71,0
Médias		30,4	24,3	6,1	71,0

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	Tf (°C)	Tbu,e (°C)	ap (°C)	Umidade relativa do ar (%)
13	a	28,4	21,9	6,5	91,0
	b	27,2	23,0	4,2	91,0
	c	31,2	23,0	8,2	91,0
	d	29,0	23,6	5,4	91,0
Médias		29,0	22,9	6,1	91,0
14	a	28,5	23,2	5,3	82,0
	b	27,3	23,1	4,2	82,0
	c	31,1	23,6	7,5	82,0
	d	29,0	23,0	6,0	82,0
Médias		29,0	23,2	5,7	82,0
Médias Totais		30,2	24,8	5,3	69,1

**APÊNDICE C - TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DO CALOR CEDIDO PELA
ÁGUA DAS TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA.**

APÊNDICE C1- Tabela 6- Calor cedido pela água da torre de tiragem mecânica forçada.

Dias	Medições ao dia	W (kg/h)	Cp (kcal/kg °C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Q _{água} (kcal/h)
1	a	60000	1	32,8	30,3	150000
	b	60000	1	30,8	28,6	132000
	c	60000	1	32,8	30,7	126000
	d	60000	1	33,5	30,4	186000
Médias		60000	1	32,5	30,0	148500
2	a	60000	1	33,7	30,1	216000
	b	60000	1	34,3	31,5	168000
	c	60000	1	34,7	33,0	102000
	d	60000	1	34,8	30,8	240000
Médias		60000	1	34,4	31,4	181500
3	a	60000	1	33,9	30,3	216000
	b	60000	1	34,2	31,8	144000
	c	60000	1	34,6	31,9	162000
	d	60000	1	33,5	31,2	138000
Médias		60000	1	34,1	31,3	165000
4	a	60000	1	32,0	29,2	168000
	b	60000	1	35,1	32,4	162000
	c	60000	1	33,1	30,1	180000
	d	60000	1	33,2	30,2	180000
Médias		60000	1	33,4	30,5	172500
5	a	60000	1	33,3	29,6	222000
	b	60000	1	33,8	31,7	126000
	c	60000	1	33,7	31,1	156000
	d	60000	1	33,5	29,9	216000
Médias		60000	1	33,6	30,6	180000
6	a	60000	1	35,5	29,6	354000
	b	60000	1	34,7	31,9	168000
	c	60000	1	33,4	29,7	222000
	d	60000	1	34,1	29,1	300000
Médias		60000	1	34,4	30,1	261000

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	W (kg/h)	Cp (kcal/kg °C)	Tq (°C)	Tf (°C)	Q _{água} (kcal/h)
7	a	60000	1	33,8	29,5	258000
	b	60000	1	34,0	29,9	246000
	c	60000	1	36,8	29,1	462000
	d	60000	1	32,5	29,9	156000
Médias		60000	1	34,3	29,6	280500
8	a	60000	1	33,9	27,6	378000
	b	60000	1	34,3	27,3	420000
	c	60000	1	35,8	31,9	234000
	d	60000	1	35,9	32,0	234000
Médias		60000	1	35,0	29,7	316500
9	a	60000	1	33,2	25,4	468000
	b	60000	1	32,9	25,6	438000
	c	60000	1	32,9	29,1	228000
	d	60000	1	33,8	29,5	258000
Médias		60000	1	33,2	27,4	348000
10	a	60000	1	30,1	27,6	150000
	b	60000	1	33,6	29,4	252000
	c	60000	1	33,1	29,2	234000
	d	60000	1	33,5	29,3	252000
Médias		60000	1	32,6	28,9	222000
11	a	60000	1	34,2	28,9	318000
	b	60000	1	35,7	29,9	348000
	c	60000	1	34,5	30,8	222000
	d	60000	1	33,8	30,7	186000
Médias		60000	1	34,6	30,1	268500
12	a	60000	1	34,0	28,7	318000
	b	60000	1	34,5	30,8	222000
	c	60000	1	35,8	29,9	354000
	d	60000	1	33,7	29,2	270000
Médias		60000	1	34,5	29,7	291000

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	W (kg/h)	Cp (kcal/kg °C)	Tq (°C)	Tf (°C)	q _{água} (kcal/h)
13	a	60000	1	32,5	28,4	246000
	b	60000	1	32,8	29,6	192000
	c	60000	1	34,9	31,3	216000
	d	60000	1	32,7	29,1	216000
Médias		60000	1	33,2	29,6	217500
14	a	60000	1	32,4	28,3	246000
	b	60000	1	32,6	29,4	192000
	c	60000	1	34,7	33,0	102000
	d	60000	1	32,5	28,4	246000
Médias		60000	1	33,1	29,8	196500

APÊNDICE C2- Tabela 7- Calor cedido pela água da torre de tiragem induzida.

Dias	Medições ao dia	w (kg/h)	Cp (kcal/kg °C)	Tq (°C)	Tf (°C)	q _{água} (kcal/h)
1	a	60000	1	40,8	35,9	294000
	b	60000	1	34,4	32,6	108000
	c	60000	1	33,8	29,4	264000
	d	60000	1	33,8	31,6	132000
Médias		60000	1	35,7	32,4	199500
2	a	60000	1	33,7	31,8	114000
	b	60000	1	34,8	31,3	210000
	c	60000	1	35,0	32,0	180000
	d	60000	1	33,2	31,7	90000
Médias		60000	1	34,2	31,7	148500
3	a	60000	1	34,0	30,3	222000
	b	60000	1	34,3	31,8	150000
	c	60000	1	34,5	32,5	120000
	d	60000	1	34,2	31,7	150000
Médias		60000	1	34,3	31,6	160500
4	a	60000	1	33,9	28,6	318000
	b	60000	1	33,4	30,6	168000
	c	60000	1	33,5	28,9	276000
	d	60000	1	33,8	31,4	144000
Médias		60000	1	33,7	29,9	226500
5	a	60000	1	34,7	32,6	126000
	b	60000	1	35,1	31,4	222000
	c	60000	1	34,4	31,8	156000
	d	60000	1	33,4	30,2	192000
Médias		60000	1	34,4	31,5	174000
6	a	60000	1	34,0	31,8	132000
	b	60000	1	33,9	30,7	192000
	c	60000	1	34,5	32,0	150000
	d	60000	1	33,4	31,2	132000
Médias		60000	1	34,0	31,4	151500

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	w (kg/h)	Cp (kcal/kg °C)	Tq (°C)	Tf (°C)	q _{água} (kcal/h)
7	a	60000	1	33,4	29,1	258000
	b	60000	1	33,1	29,1	240000
	c	60000	1	33,0	29,3	222000
	d	60000	1	33,8	28,7	306000
Médias		60000	1	33,3	29,1	256500
8	a	60000	1	33,8	26,9	414000
	b	60000	1	34,4	27,5	414000
	c	60000	1	35,4	30,5	294000
	d	60000	1	35,3	30,0	318000
Médias		60000	1	34,7	28,7	360000
9	a	60000	1	32,8	26,8	360000
	b	60000	1	33,2	27,4	348000
	c	60000	1	32,9	28,6	258000
	d	60000	1	33,9	29,2	282000
Médias		60000	1	33,2	28,0	312000
10	a	60000	1	29,1	27,3	108000
	b	60000	1	33,1	29,8	198000
	c	60000	1	33,5	29,7	228000
	d	60000	1	33,7	29,5	252000
Médias		60000	1	32,4	29,1	196500
11	a	60000	1	34,3	29,6	282000
	b	60000	1	35,8	31,0	288000
	c	60000	1	34,6	31,2	204000
	d	60000	1	34,4	31,0	204000
Médias		60000	1	34,8	30,7	244500
12	a	60000	1	34,2	29,5	282000
	b	60000	1	33,8	29,8	240000
	c	60000	1	34,7	31,0	222000
	d	60000	1	33,5	31,2	138000
Médias		60000	1	34,1	30,4	220500

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	w (kg/h)	Cp (kcal/kg °C)	Tq (°C)	Tf (°C)	q _{água} (kcal/h)
13	a	60000	1	32,3	28,4	234000
	b	60000	1	32,9	27,2	342000
	c	60000	1	34,1	31,2	174000
	d	60000	1	32,3	29,0	198000
Médias		60000	1	32,9	29,0	237000
14	a	60000	1	32,4	28,5	234000
	b	60000	1	32,8	27,3	330000
	c	60000	1	32,5	31,1	84000
	d	60000	1	34,2	29,0	312000
Médias		60000	1	33,0	29,0	240000

**APÊNDICE D – TABELAS DE DADOS E CÁLCULOS DA ENTRADA DE AR NAS
TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA FORÇADA E INDUZIDA.**

APÊNDICE D1- Tabela 8- Dados experimentais e calculados de velocidades do ar na entrada da torre de tiragem mecânica forçada.

Dias	Medições ao dia	v1 (m/s)	A1 (m²)	v2 (m/s)	A2 (m²)
1	a	11,0	0,91	15,9	0,63
	b	9,1	0,91	13,2	0,63
	c	10,0	0,91	14,5	0,63
	d	10,3	0,91	14,8	0,63
Médias		10,1	0,91	14,6	0,63
2	a	10,7	0,91	15,5	0,63
	b	10,9	0,91	15,7	0,63
	c	10,8	0,91	15,6	0,63
	d	11,2	0,91	16,2	0,63
Médias		10,9	0,91	15,7	0,63
3	a	11,2	0,91	16,2	0,63
	b	10,9	0,91	15,8	0,63
	c	10,9	0,91	15,8	0,63
	d	10,9	0,91	15,7	0,63
Médias		11,0	0,91	15,9	0,63
4	a	11,3	0,91	16,4	0,63
	b	11,3	0,91	16,3	0,63
	c	11,2	0,91	16,1	0,63
	d	11,4	0,91	16,4	0,63
Médias		11,3	0,91	16,3	0,63
5	a	11,0	0,91	15,9	0,63
	b	11,3	0,91	16,3	0,63
	c	10,9	0,91	15,8	0,63
	d	10,9	0,91	15,8	0,63
Médias		11,0	0,91	15,9	0,63
6	a	11,2	0,91	16,1	0,63
	b	11,4	0,91	16,5	0,63
	c	11,7	0,91	16,9	0,63
	d	11,5	0,91	16,7	0,63
Médias		11,4	0,91	16,5	0,63

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	v1 (m/s)	A1 (m²)	v2 (m/s)	A2 (m²)
7	a	11,3	0,91	16,3	0,63
	b	11,2	0,91	16,2	0,63
	c	11,7	0,91	16,9	0,63
	d	11,3	0,91	16,3	0,63
Médias		11,4	0,91	16,4	0,63
8	a	11,3	0,91	16,3	0,63
	b	11,5	0,91	16,7	0,63
	c	11,7	0,91	16,9	0,63
	d	11,8	0,91	17,0	0,63
Médias		11,6	0,91	16,7	0,63
9	a	11,4	0,91	16,5	0,63
	b	11,5	0,91	16,6	0,63
	c	11,4	0,91	16,4	0,63
	d	11,7	0,91	16,8	0,63
Médias		11,5	0,91	16,6	0,63
10	a	11,4	0,91	16,4	0,63
	b	11,2	0,91	16,2	0,63
	c	11,2	0,91	16,1	0,63
	d	11,3	0,91	16,3	0,63
Médias		11,2	0,91	16,2	0,63
11	a	11,6	0,91	16,7	0,63
	b	11,6	0,91	16,7	0,63
	c	11,5	0,91	16,6	0,63
	d	11,6	0,91	16,7	0,63
Médias		11,5	0,91	16,7	0,63
12	a	11,2	0,91	16,1	0,63
	b	11,2	0,91	16,2	0,63
	c	11,6	0,91	16,7	0,63
	d	11,7	0,91	16,8	0,63
Médias		11,4	0,91	16,5	0,63

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	v1 (m/s)	A1 (m²)	v2 (m/s)	A2 (m²)
13	a	11,6	0,91	16,7	0,63
	b	11,5	0,91	16,6	0,63
	c	11,6	0,91	16,7	0,63
	d	11,7	0,91	16,9	0,63
Médias		11,6	0,91	16,7	0,63
14	a	11,4	0,91	16,4	0,63
	b	11,2	0,91	16,2	0,63
	c	11,3	0,91	16,3	0,63
	d	11,2	0,91	16,1	0,63
Médias		11,2	0,91	16,2	0,63
Médias Totais		11,2	0,91	16,2	0,63

APÊNDICE D2- Tabela 9- Velocidade do ar na saída da torre de tiragem induzida.

Dias	Medições ao dia	v1 (m/s)	A1 (m²)
1	a	6,3	0,91
	b	6,3	0,91
	c	6,1	0,91
	d	6,2	0,91
Médias		6,2	0,91
2	a	6,3	0,91
	b	6,4	0,91
	c	6,7	0,91
	d	6,8	0,91
Médias		6,6	0,91
3	a	6,8	0,91
	b	7,0	0,91
	c	6,9	0,91
	d	7,0	0,91
Médias		6,9	0,91
4	a	6,0	0,91
	b	6,3	0,91
	c	6,3	0,91
	d	6,6	0,91
Médias		6,3	0,91
5	a	6,4	0,91
	b	6,6	0,91
	c	6,5	0,91
	d	6,8	0,91
Médias		6,6	0,91
6	a	6,8	0,91
	b	7,0	0,91
	c	6,9	0,91
	d	6,9	0,91
Médias		6,9	0,91

Continua

Continuação

Dias	Medições ao dia	v1 (m/s)	A1 (m²)
7	a	6,9	0,91
	b	7,2	0,91
	c	6,7	0,91
	d	6,4	0,91
Médias		6,8	0,91
8	a	6,9	0,91
	b	6,7	0,91
	c	7,1	0,91
	d	7,1	0,91
Médias		7,0	0,91
9	a	6,4	0,91
	b	6,7	0,91
	c	6,5	0,91
	d	6,8	0,91
Médias		6,6	0,91
10	a	6,8	0,91
	b	6,9	0,91
	c	6,8	0,91
	d	6,9	0,91
Médias		6,9	0,91
11	a	6,4	0,91
	b	6,3	0,91
	c	6,6	0,91
	d	6,6	0,91
Médias		6,5	0,91
12	a	6,9	0,91
	b	6,9	0,91
	c	7,0	0,91
	d	7,0	0,91
Médias		7,0	0,91

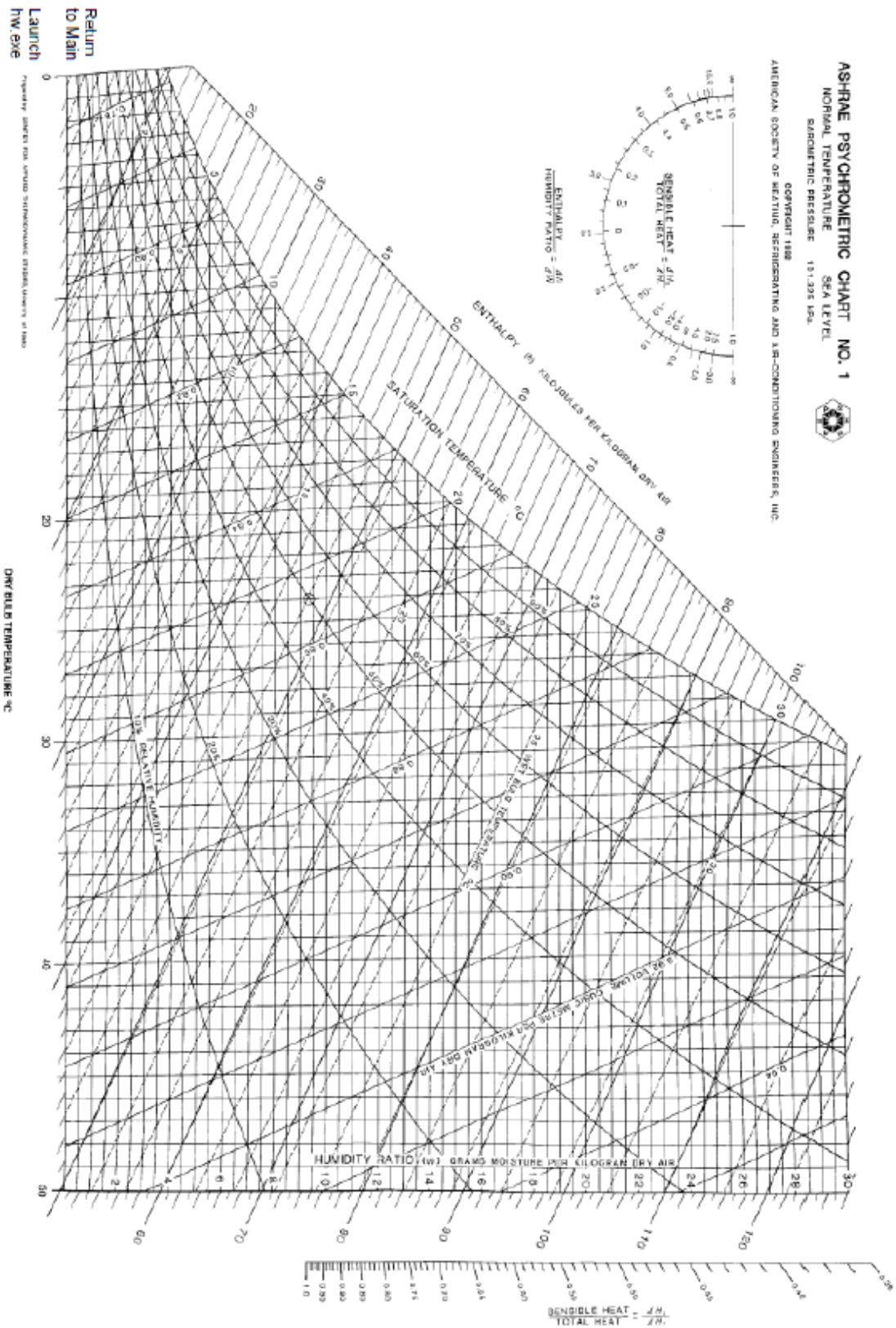
Continua

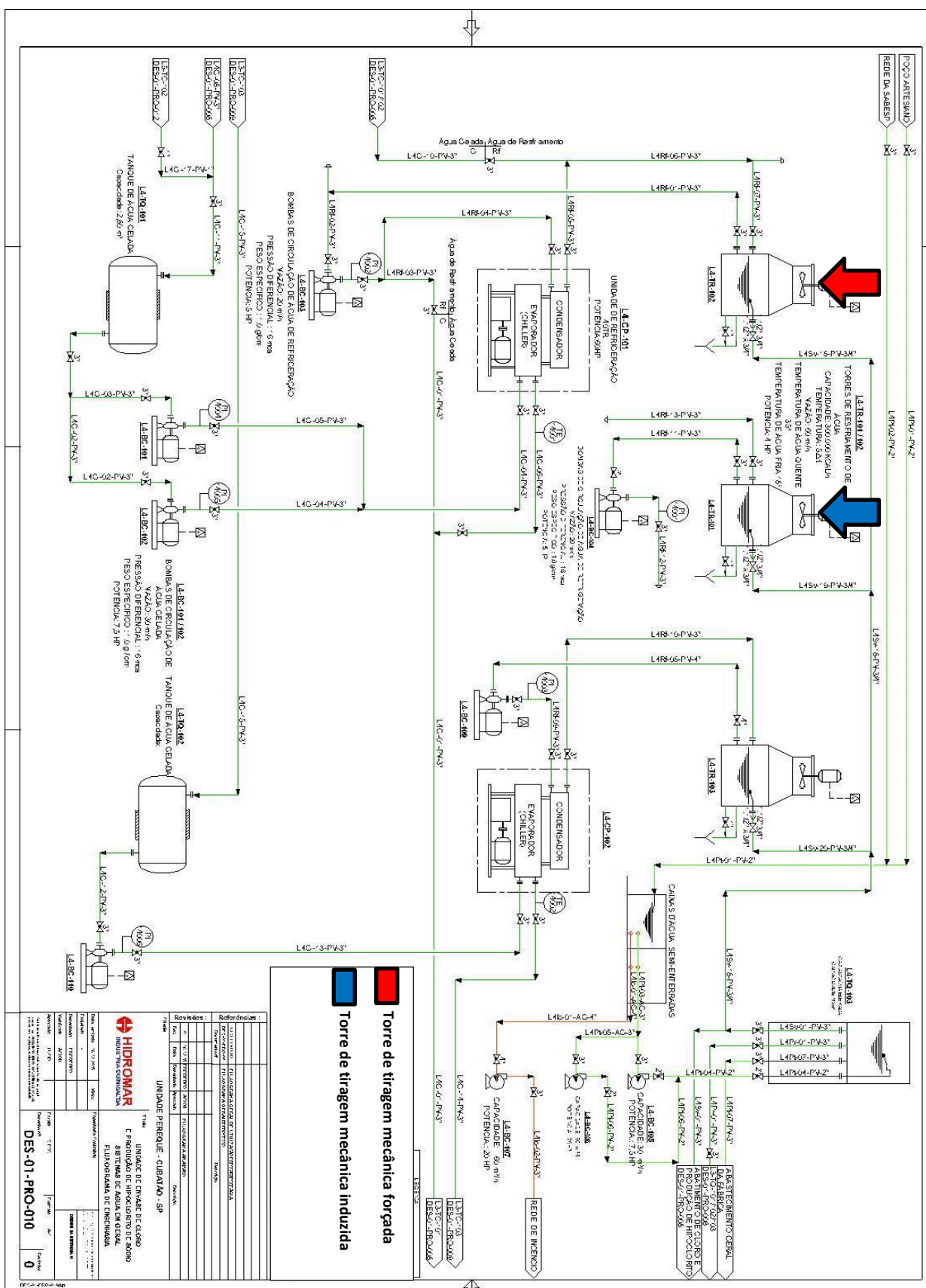
Continuação

Dias	Medições ao dia	v1 (m/s)	A1 (m²)
13	a	6,5	0,91
	b	6,8	0,91
	c	7,0	0,91
	d	7,1	0,91
Médias		6,9	0,91
14	a	6,4	0,91
	b	6,4	0,91
	c	6,7	0,91
	d	6,9	0,91
Médias		6,6	0,91
Médias Totais		6,7	0,91

ANEXO A1- Carta psicrométrica.

Fonte: ASHRAE,2008





ANEXO A3- Autorização da empresa Hidromar Indústria Química Ltda

95


HIDROMAR
 INDÚSTRIA QUÍMICA LTDA.



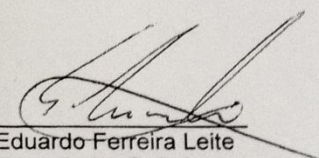


DECLARAÇÃO

A Hidromar Indústria Química Ltda, CNPJ nº46.481.156/0001-32, com sede na Rodovia Cônego Domênico Rangoni km 267,7, s/n - Perequê, Cubatão - SP, CEP: 11573-906, Telefone: (13) 3878-7700, **DECLARA** para os devidos fins que autorizou o mestrando GUILHERME IANUSCKIEWICZ MARQUES, aluno da pós graduação do Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília, Santos –SP, a permanecer em sua unidade industrial pelo período de quatorze dias para a realização de experimentos nas torres de resfriamento da indústria e que autoriza a divulgação de seu nome e fotos no trabalho público com fins acadêmicos.

Santos, 07 de dezembro de 2016.




Eduardo Ferreira Leite
 Engenheiro Químico
 CREA/SP 5061998120
 CRQ/IV 04364439

Matriz: Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n – Km 267,7, lado leste – Perequê – Telefax (13) 3361-1562 – CEP: 11573-906 – Cubatão – SP / Filial PR: Rua Cyro Correia Pereira, 2977 – Tel: (41) 3348-2971 – Curitiba – PR Fielal RS: BR 386 Km 431,5 – Tel: (51) 3479-1098 – Nova Santa Rita – RS / www.grupohidromar.com.br / hidromar@grupohidromar.com.br