

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

IRIO NIZZOLI FILHO

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DESEMPENHO EM
UM CONJUNTO DE TORRES DE RESFRIAMENTO DE TIRAGEM INDUZIDA
PARA AJUSTAR O CONTROLE DA OPERAÇÃO**

SANTOS/SP

2019

IRIO NIZZOLI FILHO

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DESEMPENHO EM
UM CONJUNTO DE TORRES DE RESFRIAMENTO DE TIRAGEM INDUZIDA
PARA AJUSTAR O CONTROLE DA OPERAÇÃO**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Teófilo Salinas Sedano e coorientação do Dr. Aldo Ramos Santos.

SANTOS/SP

2019

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

621.56 Nizzoli Filho, Irio.

N659e Estudo experimental e simulação numérica de desempenho em um conjunto de torre de resfriamento de tiragem induzida para ajustar o controle da operação.

Irio Nizzoli Filho - 2019.

124p.

Orientadores: Prof. Dr. Carlos Teófilo Salinas Sedano
Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2019.

1. desempenho. 2. torre de resfriamento. 3. *approach*. 4. *range*. 5. *chillers*. 6. Conforto térmico.

I. Salinas, Carlos Teófilo Sedano, orient. II Santos, Aldo Ramos, coorient. Estudo experimental e simulação numérica de desempenho em um conjunto de torre de resfriamento de tiragem induzida para ajustar o controle da operação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e ao seu filho Jesus Cristo que me deram os pais Irio Nizzoli e a Alice de Campos Nizzoli que foram pais espetaculares.

A minha segunda mãe, que é minha querida irmã Aliciria Nizzoli e ao meu amado irmão Emerson Nizzoli que topou entrar neste curso de mestrado junto comigo.

A minha esposa Edilene Araujo pela paciência e compreensão nas longas horas e dias de trabalho desses últimos meses.

Ao meu orientador Dr. Carlos Salinas pelo apoio e suporte constante.

Aos Drs. Aldo Ramos Santos, meu coorientador, e Deovaldo de Moraes Junior que ensinaram-me os primeiros fundamentos das torres de resfriamento.

Ao colega e incentivador Ms. Guilherme Januszkiewicz Marques.

A UNISANTA e a todo o corpo docente e de apoio acadêmico pela excelência no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica.

Aos colegas mestrandos que fizeram parte desta jornada.

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram com a realização deste trabalho.

RESUMO

O estudo apresentou a variação das torres de resfriamento nas condições operacionais de um sistema HVAC em um complexo predial localizado em uma cidade quente com alta variação de umidade. O edifício possui 17 andares e 85 mil metros quadrados de área útil. O sistema HVAC opera com um chillers de absorção e dois de compressão centrífuga. Mais recentemente, começou a operar com apenas dois chillers de compressão centrífuga. Um estudo teórico e experimental do desempenho térmico foi desenvolvido para determinar o ponto de ajuste da temperatura de condensação para as novas condições de operação. O monitoramento dos parâmetros operacionais das torres de resfriamento foi realizado para diferentes valores de setpoint. Os parâmetros de alcance, abordagem e eficiência térmica foram calculados para um ponto de ajuste de referência. As simulações teóricas foram realizadas variando os valores dos valores nominais da temperatura de condensação em 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 ° C em relação ao valor nominal de referência para avaliar o comportamento dos parâmetros de desempenho. Verificou-se em simulações teóricas e testes experimentais durante a operação do sistema HVAC que uma alteração apropriada no valor do ponto de ajuste que segue a variação das condições climáticas levará a uma melhoria na eficiência térmica das torres de resfriamento e fornecerá à temperatura adequada . Esses estudos buscam fornecer suporte para a implementação de um sistema de controle para a operação mais eficiente de torres de resfriamento.

Palavras-chave: Desempenho; Torre de resfriamento; *Approach*; Range; *Chillers*; Conforto térmico.

ABSTRACT

The study presented the variation of cooling towers in the operating conditions of an HVAC system in a building complex located in a hot city with high humidity variation. The building has 17 floors and 85 thousand square meters of floor area. The HVAC system operates with one absorption and two centrifugal compression chillers. More recently, it began operating with only two centrifugal compression chillers. A theoretical and experimental study of thermal performance was developed to determine the condensation temperature setpoint for the new operating conditions. The monitoring of the operating parameters of the cooling towers was performed for different setpoint values. Range, approach and thermal efficiency parameters were calculated for a reference setpoint. The theoretical simulations were performed by varying the values of the nominal values of the condensation temperature by 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 ° C in relation to the nominal reference value to evaluate the behavior of the performance parameters. It has been found in theoretical simulations and experimental tests during the operation of the HVAC system that an appropriate change in setpoint value following changing weather conditions will lead to an improvement in the thermal efficiency of the cooling towers and will provide the appropriate temperature. These studies seek to provide support for the implementation of a control system for the most efficient operation of cooling towers.

Keywords: Performance; Cooling tower; Approach; Range; Chillers; Thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de ar e água na torre mecânica induzida	14
Figura 2 - Equipamentos de um ciclo de compressão	20
Figura 3 - Diagrama Temperatura-Entropia.....	21
Figura 4 – Fluxo básico de refrigeração	21
Figura 5 - Fluxograma do circuito de condensação	22
Figura 6 - Chiller.....	23
Figura 7 - Trocador de calor do tipo casco tubo.....	24
Figura 8 - Torres mecânica de tiragem forçada.. ..	25
Figura 9 - Torre de tiragem induzida.....	26
Figura 10 - Vista interna da torre de tiragem mecânica induzida	26
Figura 11 - Conjunto motor com bomba centrífuga.	27
Figura 12 - Vista interna de bomba centrífuga.....	28
Figura 13 - Condicionadores de ar tipo fan coil.....	29
Figura 14 - Tubulações do trocador de calor	37
Figura 15 - Válvula borboleta motorizada	38
Figura 16 - Válvula reguladora de fluxo, <i>Flow Con</i>	38
Figura 17 - Tela IHM do chiller estudado.....	39
Figura 18 - <i>Chiller</i> centrífugo de 500 TR.....	40
Figura 19 - Torres de resfriamento estudadas.....	41
Figura 20 - Esquema da Torre de tiragem induzida com suas temperaturas ...	42
Figura 21 - Enchimento tipo filme da torre estudada.	43
Figura 22 - Distribuidor de água da torre estudada	43
Figura 23 - Atenuador de ruído da torre estudada	44
Figura 24 - Válvulas de enchimento automático e manual rápido da torre.....	45
Figura 25 - Linha para evitar o transbordamento da bacia da torre estudada...	45
Figura 26 - Variador de frequência da torre estudada.....	46
Figura 27 - Bombas centrífugas do circuito de condensação estudado	47
Figura 28 - Válvula de retenção do circuito estudado	48
Figura 29 - Tubulação de entrada de água quente nas torres estudadas	49
Figura 30 - Termo higrômetro utilizado no experimento	51
Figura 31 - Queda de água real perfeita nas torres estudadas	52
Figura 32 - Queda de água real com falha no distribuidor nas torres	52

Figura 33 - Tubulação incrustada que rompeu inesperadamente	53
Figura 34 - Bombas dosadoras automáticas das torres estudadas	53
Figura 35 - Produtos utilizados no tratamento químico da água das torres	54
Figura 36 - Peça de enchimento sem incrustação das torres estudadas	54
Figura 37 - Variáveis coletadas de forma digital e manual..	55
Figura 38 - Posição das coletas manuais das temperaturas e umidade	56
Figura 39 - Coleta de dados real acontecendo nas torres estudadas	56
Figura 40 - Pontos de coleta de velocidade do ar de entrada nas venezianas das torres	57
Figura 41 - Coleta de velocidade do ar ocorrendo na entrada das venezianas das torres	58
Figura 42 - Pontos de coleta de ar na saída das torres	58
Figura 43 - Termo higrômetro e Termo anemômetro utilizados na saída de ar das torres	59
Figura 44 - Variação das temperaturas de bulbo úmido na entrada das torres (T _{bu,e}) e valor do <i>setpoint</i> (SP) nos quatro primeiros dias, no horário das 8:00 às 17:00 horas.....	63
Figura 45 - Variação de T _{bu,e} e valor fixo do SP nos quatro primeiros dias, no horário das 8:00 às 17:00 horas.....	64
Figura 46 - Valores do <i>approach</i> horário dos quatro primeiros dias, das 8:00 às 17:00 horas comparado com o valor de <i>approach</i> de projeto.	65
Figura 47 - Valores de T _{bu,e} e de <i>setpoint</i> em 22°C na parte de cima e valores experimentais de <i>approach</i> e de projeto, que é 2,7°C na parte de baixo	66
Figura 48 - Valores do rendimento térmico horário das 8:00 às 17:00 horas dos quatro primeiros dias comparado com o valor de rendimento térmico de projeto 68,7%.....	67
Figura 49 - Valores de <i>approach</i> do dia B com as simulações de redução do SP para 21,5°C, 21°C, 20,5°C e 20°C comparando com o real e o de projeto	68
Figura 50 - Valores de <i>approach</i> experimentais dos quatro primeiros dias comparado com os valores do dia B com a simulação do SP em 20°C.....	69
Figura 51 - Valores de T _{bu,e} e de SP com a simulação para 20°C no dia B na parte de cima e valores da simulação do dia B de <i>approach</i> e de projeto, que é 2,7°C, na parte de baixo.....	70

Figura 52 - Valores de rendimentos térmicos do dia B com as simulações de redução do SP de 22°C para 21,5°C, 21°C, 20,5°C e 20°C comparando com o rendimento real e o de projeto	70
Figura 53 - Valores de rendimento térmico experimentais dos quatro primeiros dias comparado com a simulação dos valores do dia B caso o SP fosse colocado em 20°C.....	71
Figura 54 - Valores de SP e de Tbu,e no período dos dias E8 até J17	72
Figura 55 - Valores do <i>approach</i> horário dos dias E, F, G, H, I e J das 8:00 às 17:00 horas comparado com o valor de <i>approach</i> de projeto	73
Figura 56 - Valores de SP e Tbu'e comparado com os valores do <i>approach</i> real e de projeto nos dias E, F, G, H, I e J.....	73
Figura 57 - Valores de SP e Tbu'e comparado os valores do rendimento térmico real e de projeto dos códigos E8 até J17	74
Figura 58 - Valores do rendimento térmico do experimento do dia E até dia J comparado com a simulação teórica caso não houvesse a alteração do SP para 20°C no dia G.....	75
Figura 59 - Valores de <i>approach</i> e de rendimento térmico do experimento dos códigos K8 até X17 comparado com os valores de projeto	76
Figura 60 - Valores de Tf, Tbu'e, e SP no período de K8 a X17.....	76
Figura 61 - Vazão de ar de saída das torres e a somatória das potências dos ventiladores em funcionamento no período dos códigos K8 a X17.....	77
Figura 62 - Valores de vazão de ar de saída das torres e valores de <i>approach</i> no período dos códigos K8 a X17	78
Figura 63 - Número de torres em funcionamento comparado com o rendimento térmico real e de projeto do dia P	78
Figura 64 - Calor cedido pela água do experimento comparada com a de projeto e o range do experimento comparado com o de projeto	79
Figura 65 - <i>Approach</i> de todo o experimento comparado com o de projeto e a Tf, Tbu,e comparadas com o SP dos códigos A8 a X17.....	80
Figura 66 - Variação típica de Temperaturas no diagrama T-S.....	82
Figura 67 - Causas do alto <i>approach</i>	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Código de cada conjunto de medição	60
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TR - Tonelada de Refrigeração

CV - Cavalo Vapor

CAG - Central de Água Gelada

ASME - American Society of Mechanical Engineers

CPD - Centro de Processamento de Dados

VFD - Variador de frequência

PRFV - Perfis de plástico reforçado

RPM - Rotações por minuto

HFC - hidrofluorcarbono

CH₂F₂ - difluormetano

CHF₂CF₃ - pentafluoroetano

PVC - Policloreto de vinila

ISO - *International Organization for Standardization*

IPW - Proteção contra intempéries

IHM – Interface Homem Máquina

HVAC – Heating, ventilating and air conditioning

SI - Sistema Internacional de Unidades

SP - *Setpoint*

S - Entropia

CPA – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

UR- Umidade relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Vazão mássica da água de entrada e saída	[kg/h]
ap	<i>Approach</i>	[°C]
Tq	Temperatura da água quente de entrada na torre	[°C]
Tf	Temperatura da água fria de saída na torre	[°C]
Tbu,e	Temperatura de bulbo úmido de entrada na torre	[°C]
q água	Calor cedido pela água	[kcal/h]
Cp	Calor específico da água	[kcal/kg°C]
q ar	Vazão volumétrica do ar	[m³/h]
v	Velocidade do ar de entrada na torre	[m/s]
A	Área de entrada de ar na torre	[m²]
Q vol	Vazão volumétrica	[m³/h]
ρ	Massa específica da água	[kg/m³]
η	Rendimento térmico ou eficiência térmica	[%]
mca	Metros de coluna d'água	[m]
kW	Potência Elétrica	[kW]
mA	Miliampère	[A]
J	Joule	[J]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivo.....	18
1.2. Objetivo secundário	18
1.3. Justificativa e relevância do tema	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. Ciclo de Refrigeração por compressão de vapor	20
2.2. Equipamentos na central de água gelada	21
2.2.1. Sistema de expansão indireta	22
2.2.2. <i>Chiller</i>	23
2.2.3. Trocador de calor do tipo carcaça e tubo (<i>Shell and tub</i>)	24
2.2.4. Torre de resfriamento	24
2.2.4.1. Torre de tiragem mecânica induzida.....	25
2.2.5. Bombas centrífugas.....	27
2.2.6. Condicionador de ar	28
2.2.7. Automação	29
2.3. Breve resumo dos fundamentos teóricos	30
2.3.1. Psicrometria	30
2.3.2. Umidade do ar	30
2.3.3. Temperatura de bulbo seco.....	30
2.3.4. Temperatura de bulbo úmido	31
2.3.5. Evaporação.....	31
2.3.6. Condições ambientais.....	32
2.4. Formulação	32
2.4.1. Indicador principal de desempenho em torres - <i>Approach</i>	32
2.4.2. Valor da redução de temperatura de água da torre - Range	32
2.4.3. Indicador de desempenho - Rendimento térmico.....	33
2.4.4. Calor cedido pela água	33
2.4.5. Vazão volumétrica do ar pela velocidade	34
2.4.6. Cálculo da vazão volumétrica do ar de saída pelo rendimento	34
2.4.7. Cálculo do calor recebido pelo ar	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1. Geradores de Água Gelada	38

3.1.1. <i>Chillers</i>	39
3.1.2. Trocadores de calor de condensação dos <i>chillers</i>	41
3.2. Torres de resfriamento	41
3.2.1. Variador de frequência dos motores elétricos dos ventiladores	46
3.3. Bombas centrífugas horizontais do circuito de condensação	47
3.4. Tanque de equalização de água de condensação	48
3.5. Tubulações hidráulicas do circuito de condensação	49
3.6. Sistemas de controle e instrumentos de medições	49
3.6.1. Torres de resfriamento	50
3.6.2. Instrumentos de medição	50
3.6.2.1. Medições digitais	50
3.6.2.2. Medições manuais	51
3.6.2.3. Sistema coletor e registrador de dados	52
3.7. Operação	52
3.8. Procedimentos experimentais	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5. CONCLUSÕES.....	84
5.1. Trabalhos futuros	85
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
APÊNDICE A – Approach	90
APÊNDICE B – Range	96
APÊNDICE C – Rendimento térmico.....	102
APÊNDICE D – Calor cedido pela água	108
APÊNDICE E – Vazão volumétrica de ar de saída pela velocidade	114
APÊNDICE F – Calor recebido pelo ar	120

1. INTRODUÇÃO

A análise do desempenho de torres de resfriamento é um fator importante a ser estudado por serem equipamentos imprescindíveis e críticos em sistemas de climatização de ambientes, principalmente quando são assistidos por unidades de refrigeração do tipo *chillers* de condensação a água e quando são empregadas em edifícios selados, isto é, não existem janelas para serem abertas nos pavimentos em caso de falha do sistema de climatização. O desempenho, operação e manutenção correta dessas torres colaboram significativamente para rendimento do sistema de *Heating, ventilating and air conditioning (HVAC)* de edifícios e/ou complexos administrativos.

Segundo Huang et al. (2017), o circuito de água gelada transfere a energia de resfriamento gerada pelo *chiller* para os ambientes a serem climatizados e o circuito de água do condensador rejeita o calor residual para o ambiente externo, através da evaporação da água em torres de resfriamento. A Figura 1 mostra uma torre de resfriamento do tipo mecânica de tiragem induzida.

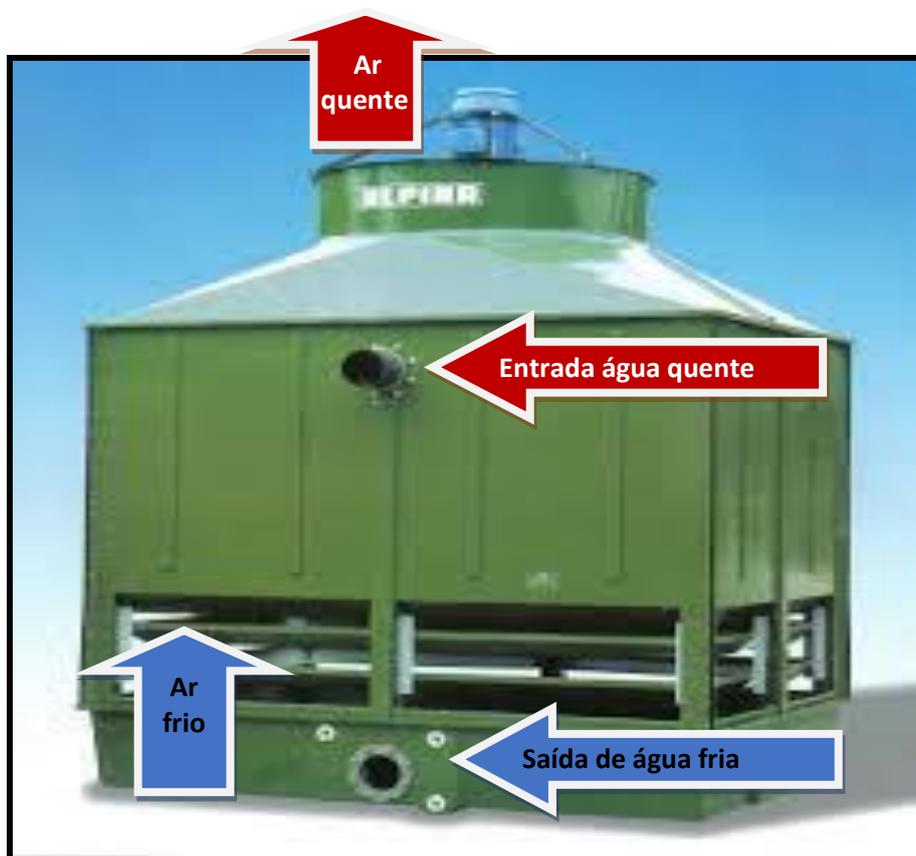


Figura 1 – Fluxo de água e de ar na torre mecânica induzida.
Fonte: Alpina, 2019.

A entrada de água quente na parte de cima e a saída de água fria na parte de baixo. E na contracorrente dessa água, é induzido a entrada do ar externo pelo ventilador, que está no topo da torre, a entrar pelas venezianas laterais e sair por cima. O princípio de operação das torres requer a distribuição ou pulverização da água sobre uma superfície de transferência de calor, através do qual um fluxo de ar está passando. Nesses equipamentos é obrigatório a reposição da água que acaba evaporando e gerando uma grande nuvem, causada pela condensação do vapor de água em pequenas gotas que se misturam com o ar atmosférico. Esse vapor normalmente é visto saindo da parte superior da torre, como uma fumaça branca, conforme Borgnakke e Sonntag (2016).

Existem diferentes mecanismos de transferência de massa e calor entre a água e os fluxos de ar dentro das torres de resfriamento, sendo uma tarefa muito difícil de gerenciar ou otimizar nas operações, devido a fatores como: tipos de enchimento, temperatura da água de entrada, taxa de fluxo de ar e taxa de fluxo de água que afetam a operação das torres. Rahmati et al. (2018) descrevem que muitas pesquisas têm sido dedicadas ao desempenho térmico das torres, mediante análises experimentais e teóricas dos mecanismos de transferência de massa e energia térmica.

Os resultados indicam que o coeficiente de eficiência está em relação direta com o fluxo de massa de ar, temperatura da água quente e os números de estágio de enchimento da torre. Além disso, o calor é retirado pelo do ar, por meio do aumento de temperatura. No entanto, este calor sensível removido é menor em comparação com o componente latente devido a vaporização da água, conforme citado por El-Wakil (1988). As propriedades que mais afetam o desempenho térmico da torre de resfriamento são: pressão de vapor, densidade e capacidade específica do calor. Além disso, a condutividade térmica, a viscosidade e a tensão superficial afetam os coeficientes de transferência de calor e massa dentro da torre, Sharqawy et al. (2011), Lemouari e Boumaza (2010), concluíram que o desempenho da torre diminui com um aumento na relação fluxo de água/fluxo de ar, porém, eles não sugerem nenhuma correlação em seu trabalho.

As velocidades ideais do ventilador das torres de resfriamento podem ser afetadas pela carga de resfriamento e pelas condições climáticas. Portanto, encontrar a velocidade ideal do ventilador da torre de resfriamento se torna um problema de múltiplas entradas. Lemouari e Boumaza (2010), afirmam que o calor

rejeitado pela torre de resfriamento, Q_w , aumenta com o aumento das taxas de fluxo de massa de ar e água. Assim, nota-se que a relação do fluxo de massa, água e ar, bem como a temperatura da água de entrada, parecem ser um parâmetro de grande importância na determinação do desempenho de torres de resfriamento e, essa escolha, tem um efeito imprescindível no desempenho da torre. Em grande parte dos estudos relacionados a melhoria do desempenho é indicado a automação do sistema de ventilação das torres, isto é, instalação de inversores de frequência e controle automático da rotação dos ventiladores, assim como as quantidades de torres em funcionamento. No complexo aqui estudado esta automação já se faz presente.

Wang e Ma (2008) desenvolveram o controle ideal de supervisão na construção de sistemas *HVAC*, demonstrando a possibilidade de economia de energia ou de custos em edifícios, quando as estratégias são aplicadas corretamente. A maioria das estratégias propostas de controle de supervisão são validadas por simulações ou por testes-piloto em pequena escala.

Outro fator relevante no desempenho das torres, é a sua inspeção e manutenção adequadas. Ning et al. (2015) demonstraram que o desempenho térmico da torre de resfriamento é muito reduzido, sob condições de queda dos bicos de distribuição de água, situados na parte de cima das torres e entupimentos com objetos estranhos ou pelo próprio enchimento, reduzindo seu desempenho. Eles concluem que em comparação as condições normais, a eficiência da torre reduz mais de 60% quando 15% dos seus bicos de distribuição de água caem de suas posições. Rangel et al. (2011) fizeram orientações em relação ao tipo e doses recomendadas de produtos químicos; frequência de inspeções gerais; manutenção total do sistema; procedimentos corretos de desinfecção e limpeza; tipo e frequência dos procedimentos de teste e a interpretação dos resultados dos testes.

Constataram que, em geral, as diretrizes de manutenção não tinham procedimentos suficientemente detalhados para evitar os problemas que foram observados durante as investigações por eles realizadas, constataram que a falta ou uso inadequado de tratamento químico da água das torres ou a falta de limpeza total do sistema são incapazes de prevenir o aparecimento de bactérias e da famosa doença *Legionella*, que é um grupo de bactérias que pode causar uma doença e até levar a morte.

Wang (2013) forneceu diretrizes para ajudar os profissionais e operadores a

obter o conhecimento e manter sistemas de *HVAC* em condições adequadas, priorizando o plano de trabalho da manutenção desses sistemas. Quando corretamente mantidos, podem operar de maneira eficaz, proporcionando o melhor conforto dos ocupantes de áreas climatizadas, garantindo maior confiabilidade do sistema, podendo prolongar a vida útil dos equipamentos de *HVAC*.

O sistema de climatização deste complexo administrativo opera de forma automática, de acordo com a carga térmica requerida aos três *chillers*, isto é, entram em operação de acordo com a necessidade, tanto os *chillers* como as torres. Em 2017 o *chiller* de absorção foi desativado. Por consequência a limitação da água de saída das torres não abaixo de 29,9°C não se faz mais necessária, portanto os dois outros *chillers* centrífugos, que não têm essa limitação operacional, podem operar com água de condensação com temperatura mais fria possível e, com isso, aumentar seu rendimento.

O sistema de operação das torres opera de forma automática, dependendo do valor de temperatura desejada de saída de água. Este valor, chamado de *setpoint* é inserido manualmente pela operação. Conforme o valor de temperatura estabelecido, todas as quatro torres irão operar para manter a temperatura de saída das mesmas de acordo com o valor de *Setpoint*. Para que as torres mantenham o valor o estabelecido, o número de torres em funcionamento e a velocidade dos seus ventiladores serão alterados automaticamente.

A água mais fria do sistema de condensação evitará falhas mecânicas quando ocorrer demandas de carga térmica menores nesses *chillers*. Portanto, a operação do sistema pode colocar no *setpoint* de saída de água das torres, o valor mais baixo, gerando um melhor desempenho dos *chillers* centrífugos. Contudo no período analisado, foi observado que a operação não varia o *setpoint* de acordo com a temperatura de bulbo úmido do ambiente das torres, mas o deixa em 22°C sem alteração.

1.1. Objetivo

Este estudo tem o objetivo de verificar de forma teórica e experimental o desempenho de um conjunto de quatro torres de resfriamento do sistema de água de condensação dos *chillers* que estão há cinco anos em operação. Devido a desativação do *chiller* de absorção, um novo cenário operacional se apresentou. Assim, o *setpoint* de controle de saída de água das torres deve ser alterado para atender de forma satisfatória o novo cenário.

1.2. Objetivos secundários

a. Avaliar a necessidade de aquisição da instalação de um sensor de bulbo úmido nas áreas das torres de resfriamento para controlar a temperatura de saída da água das torres. Com o intuito de automatizar o sistema, tornando auto ajustável, uma vez que a temperatura do bulbo úmido oscila durante o dia e a noite.

b. Demonstrar matematicamente a eficácia de inserir o sensor de búlbo úmidosobre o desempenhp das torres do sistema.

c. Verificar se as manutenções preventivas e preditivas das torres são feitas de modo correto e eficaz, e também as condições operacionas.

d. Avaliar o conhecimento e atuação da operação em relação ao controle e inspeção diária das instalações do circuito de condensação.

1.3. Justificativa e relevância do tema

As torres de resfriamento são amplamente utilizadas em diversas aplicações, inclusive na refrigeração e em sistemas de climatização de ambientes, onde o sistema de condensação é a água. Estudos sobre a análise de desempenho das torres de refrigeração mecânicas e as diversas condições operacionais, foram abordadas por diversos pesquisadores. Uma vez que as torres de resfriamento, em funcionamneto 24 horas por dia, envolvem custos de capital e operação, como neste complexo administrativo em estudo, uma avaliação de sua eficiência têm suma importância.

Todo equipamento identificado como crítico em uma instalação, que é o caso dessas torres, deve passar por manutenções e verificações de seu desempenho. E, conforme o objeto deste trabalho, houve a desativação de um dos três *chillers*, se fazendo necessário uma observação do impacto que isso causou ao processo de climatização do complexo e se houve mudanças operacionais.

O sistema de climatização estudado neste complexo administrativo opera ininterruptamente 24 horas por dia e em todos os dias da semana. Caso haja falha no sistema, as duas mil pessoas que trabalham neste edifício deverão evacuar os ambientes que se encontram.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica descreve sucintamente os principais equipamentos e fundamentos de um ciclo de refrigeração de vapor e de um sistema de expansão indireta para climatização do ar de grandes ambientes. Equações aqui usadas para obtenção do desempenho das torres de resfriamento de tiragem induzida de contato direto (foco deste trabalho) consideradas parte essencial no processo de esfriamento da água de condensação utilizada para o funcionamento de *chillers*.

2.1. Ciclo de Refrigeração por compressão de vapor

A Figura 2 mostra basicamente os equipamentos de uma máquina térmica, formando um ciclo de refrigeração por compressão e o sentido do fluxo deste sistema.

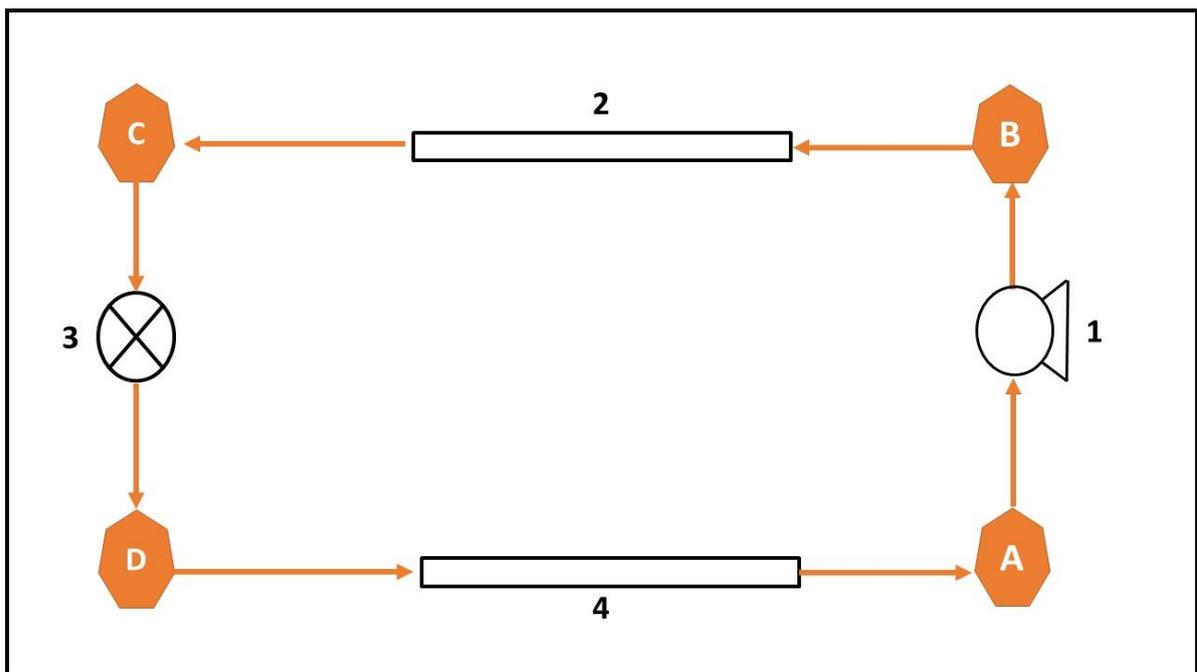


Figura 2 – Equipamentos de um ciclo de compressão. 1) Compressor, 2) Condensador, 3) Dispositivo de expansão, 4) Evaporador

A Figura 3 mostra o diagrama T-S (temperatura-entropia) do ciclo de refrigeração de vapor e o sentido que ela acontece.

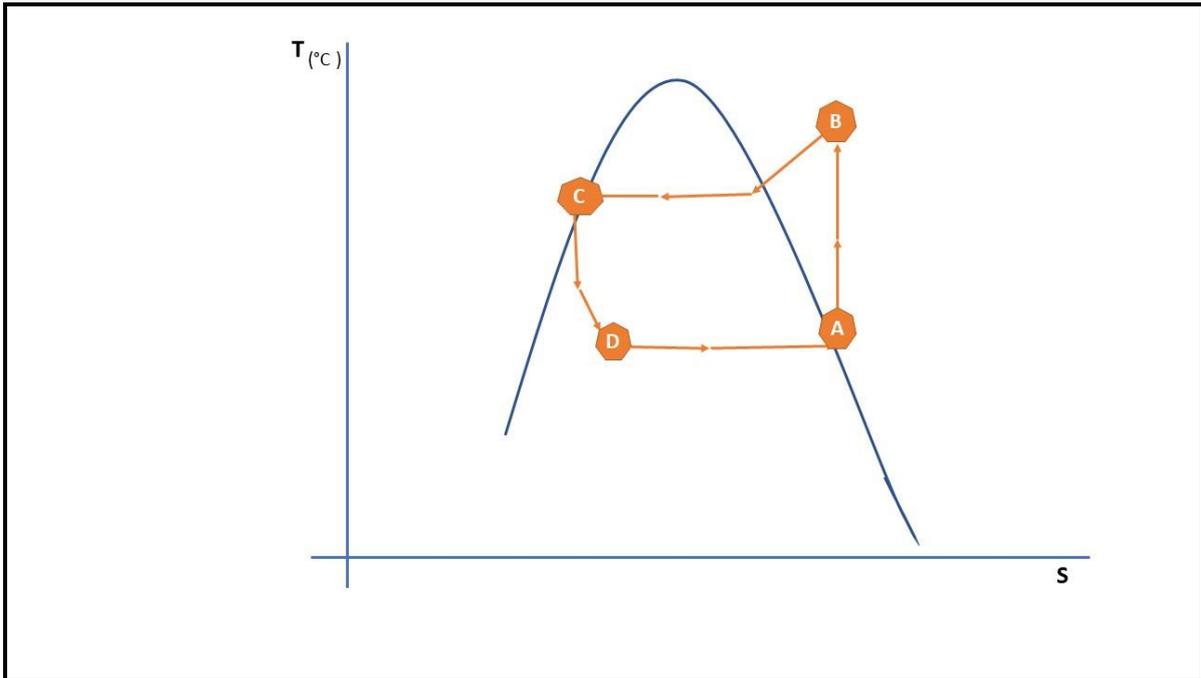


Figura 3 – Diagrama Temperatura-Entropia. Processo A-B: compressão isentrópica do fluido refrigerante. Processo B-C: transferência de calor a pressão constante. Processo C-D: expansão isentálpica. Processo D-A: transferência de calor a pressão constante.

2.2. Equipamentos da Central de Água Gelada

A Figura 4 mostra os principais equipamentos e fluxo de sistema de climatização de ambientes através de uma central de água gelada (CAG).

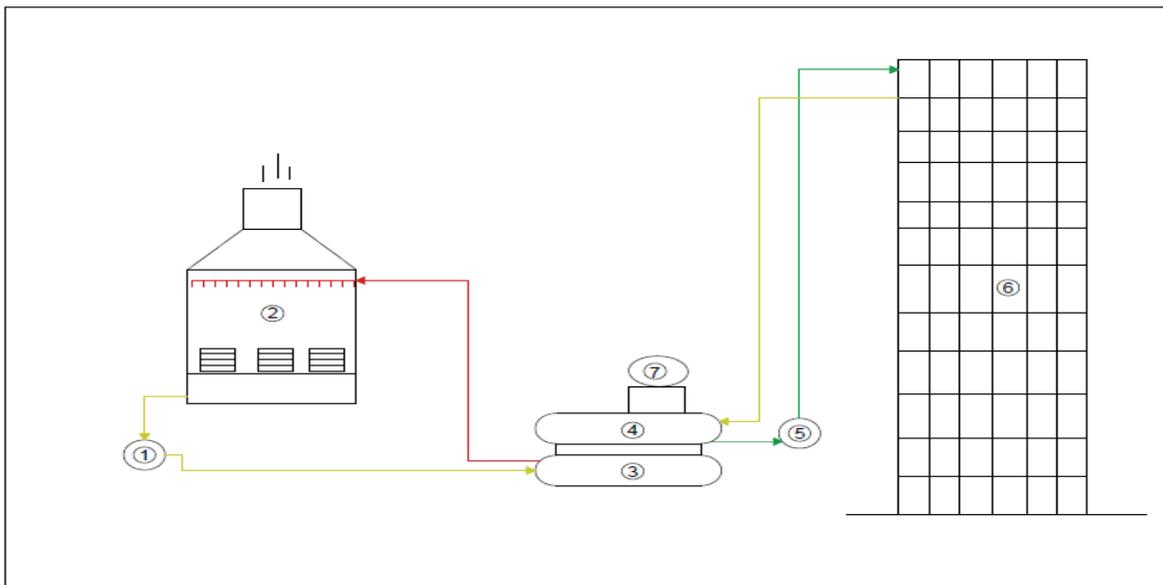


Figura 4 – Fluxo básico de refrigeração. 1- Bomba do circuito de condensação, 2- Torre de resfriamento, 3- Trocador de calor casco tubo de condensação do *chiller*, 4- Trocador de calor casco tubo de evaporação do *chiller*, 5- Bomba do circuito de água gelada, 6- Complexo administrativo

2.2.1. Sistema de expansão indireta

Os sistemas do tipo expansão indireta são os sistemas de água gelada que utilizam as unidades resfriadoras de líquidos, *chillers*, como equipamentos do processo de refrigeração. Os sistemas de água gelada são mais complexos, onde o sistema de refrigeração fica restrito apenas aos *chillers*, ou seja, em equipamento compacto e em área restrita, normalmente chamada de Central de Água Gelada (CAG), fora dos ambientes condicionados. Na Figura 5 mostra um fluxograma básico do circuito de condensação de uma CAG, que é aonde acontece a dissipação térmica para o ar externo através das torres de resfriamento.

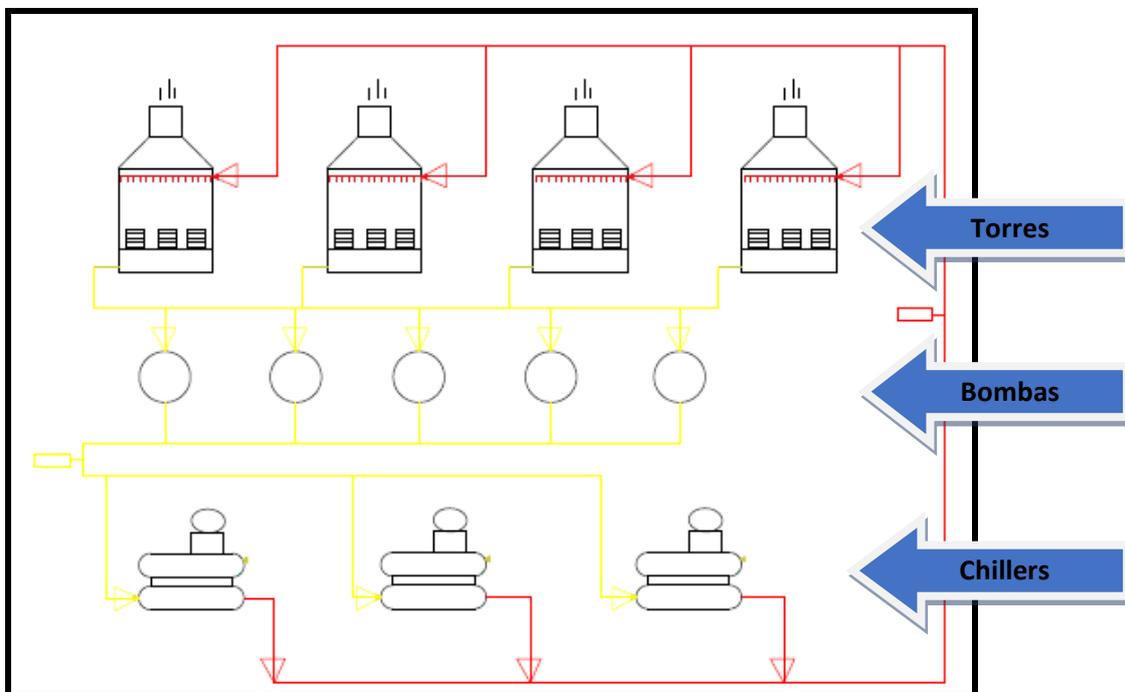


Figura 5 - Fluxograma do circuito de condensação. Composto por 4 torres, 5 bombas e 3 *chillers*.

O ar a ser insuflado no ambiente a ser climatizado é resfriado, em uma serpentina que utiliza um fluido secundário, normalmente é utilizado a água gelada no estado líquido. O fluido secundário é bombeado e circula por uma rede hidráulica (tipicamente um circuito hidrônico fechado) e, após passar pela serpentina de resfriamento do ar, retorna para o trocador de calor do sistema de refrigeração, no qual é resfriado pelo fluido frigorífico que evapora em uma temperatura mais baixa (no caso de aquecimento, se condensa em uma temperatura mais elevada). São 3 redes de distribuição e circulação de água: circuito de água gelada dos *chillers* para os condicionadores de ar, denominado circuito secundário; dos condicionadores de

ar para os *chillers*, denominado circuito primário e, finalmente, circuito da água de condensação entre as torres de resfriamento e os *chillers*.

2.2.2. Chiller

Chillers são equipamentos compostos por compressores e trocadores de calor de condensação e de evaporação. São equipamentos térmicos que trabalham segundo o ciclo de refrigeração a vapor, onde o fluido de trabalho, que são gases refrigerantes, retiram calor de um certo meio a partir da mudança de fase, conforme observado por Gomes e Formiga (2009). A Figura 6 mostra o *chiller* da empresa estudada.



Figura 6 - Chiller.

O princípio do funcionamento do *chiller* está baseado no efeito *Joule-Thompson* onde o gás refrigerante R-410A, que segundo Jadhav e Mali (2015) é uma mistura azeotrópica de dois fluidos refrigerantes de igual proporção em massa a base de HFC (hidrofluorcarbono). A mistura dos gases CH_2F_2 (difluormetano) e CHF_2CF_3 (pentafluoroetano), é comprimido, depois resfriado e passa por uma expansão onde a vaporização encerra o processo do gás refrigerante, que volta ao compressor para reiniciar o ciclo. A água fria que vem das bacias das torres entra no trocador de calor, tipo casco tubo, inferior (condensação) e a água que vem dos condicionadores de ar entra no superior (evaporação).

2.2.3. Trocador de calor do tipo casco e tubo (*Shell and tube*)

Este tipo de trocador de calor é composto de casco cilíndrico, onde contém um feixe de tubos dispostos paralelamente ligados em duas placas dispostas em suas extremidades, conforme mostrado na Figura 7.

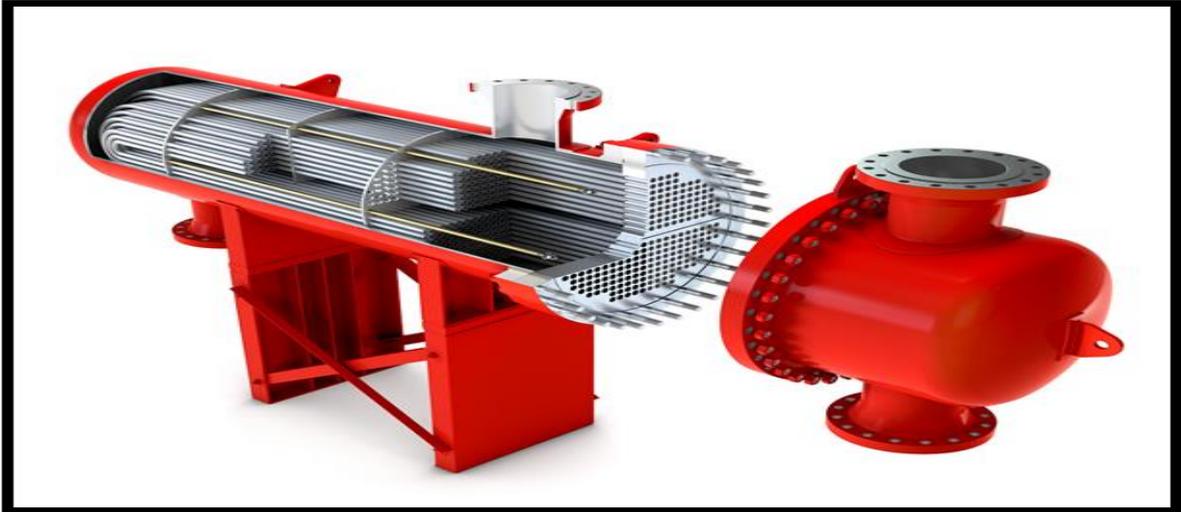


Figura 7 - Trocador de calor do tipo casco tubo.

Fonte: API (2019).

A água de resfriamento circula no interior dos tubos e o fluido refrigerante passa por dentro do casco. Os tubos são de cobre e os espelhos de aço. A melhor velocidade da água em um condensador *shell and tube* deve ser da ordem de 1,0 a 2,0 m/s e, nunca, deverá ultrapassar 2,5 m/s. Já o fluxo de água deve ser em torno de 0,10 a 0,15 l/s por TR e deverá ser distribuído entre os tubos, de forma a não ultrapassar a velocidade indicada acima.

2.2.4. Torre de resfriamento

Uma torre de resfriamento, basicamente é uma coluna de transferência de calor e massa que resfria a água de condensação procedente do condensador ou trocador de calor casco tubo de uma unidade resfriadora, o *chiller*. Isto é obtido por aspersão de água que ingressa pela parte superior da torre e desce por gravidade, por meio de um enchimento, recaindo 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 sujeita ao ar atmosférico, aumentando a dispersão de calor para o ambiente pelo aumento do contato entre água e ar (WANG, 2001). São classificadas de acordo com o método de circulação de ar no seu interior como

tiragem natural, tiragem mecânica forçada ou induzida.

São vários os métodos para expor a água à corrente de ar. Cada um tem suas vantagens específicas e devem ser consideradas de acordo com a aplicação e o rendimento requeridos em cada caso. O foco desta pesquisa são as torres de tiragem mecânica induzida.

Este equipamento de operação contínua transfere massa e energia no processo de resfriamento da água. A Figura 8 mostra torres mecânicas de tiragem forçada.



Figura 8 - Torre mecânica de tiragem forçada.

Fonte: Hamongroup, 2019.

2.2.4.1. Torre de tiragem mecânica induzida

As torres de tiragem mecânica induzida têm como princípio o uso de ventiladores para mover o ar do seu interior. Em razão da utilização dos ventiladores, estas torres têm tamanhos menores para a mesma carga térmica, se comparadas às torres de tiragem natural, conforme demonstraram Venturini e Pirani (2005). A Figura 9 mostra um conjunto de torres mecânica de tiragem induzida.



Figura 9 - Torre de tiragem induzida.

Fonte: Hamongroup, 2019.

O uso de ventiladores para movimentar o ar no interior da torre, possibilita o controle total da entrada de ar. Na torre mecânica forçada, os ventiladores estão situados na entrada de ar, para forçar o ar através do enchimento. Enquanto na torre por tiragem induzida, objeto deste estudo, o ventilador está na posição acima do enchimento. Desta forma, o ar sai em velocidade mais alta, sendo lançado para fora. Oliveira (2010) afirma que nas torres com aspiração induzida, a perda de carga do ar provocada pelo enchimento é maior, o que resulta no aumento da potência do ventilador. A Figura 10 mostra os principais componentes internos de uma torre mecânica de tiragem induzida e de contato direto.

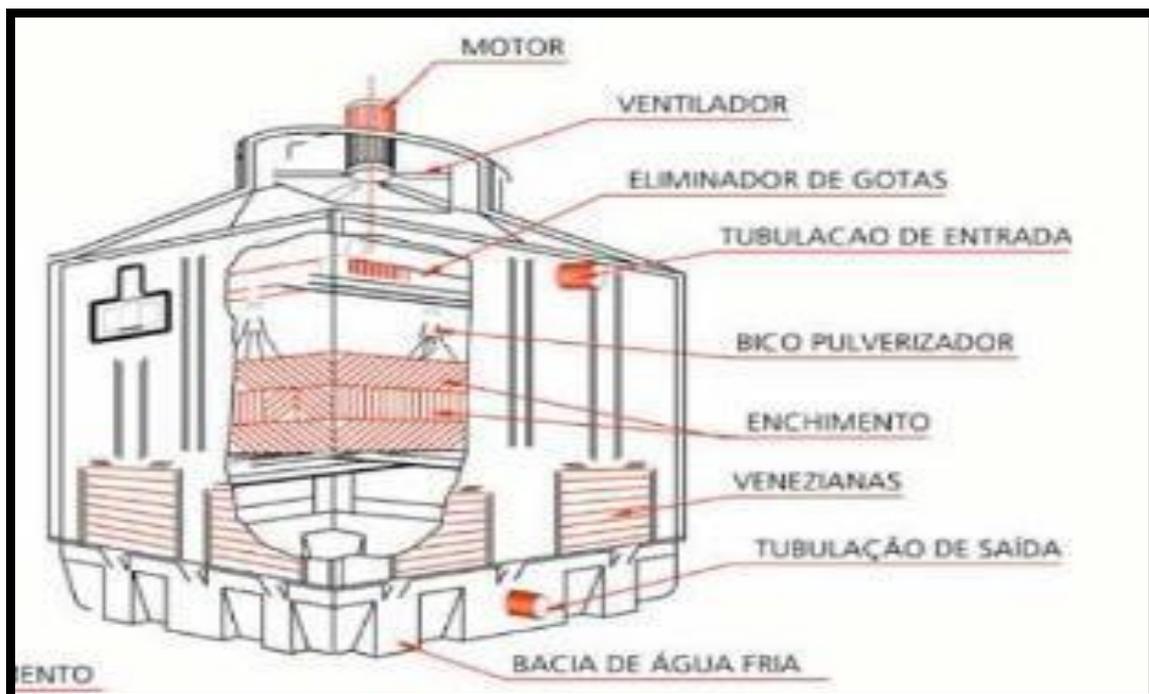


Figura 10 – Vista interna da torre de tiragem mecânica induzida.

Fonte: Termoparts, 2019.

2.2.5. Bombas centrífugas

As bombas centrífugas são utilizadas para transportar água ou outros fluidos por meio da conversão da energia cinética de rotação em energia potencial. Essas bombas são particularmente úteis para as transferências dos fluidos livres de impurezas. Segundo Dunaiski (2015) as bombas centrífugas são usadas em áreas de espaçosas, como na indústria, complexos administrativos, edifícios corporativos, *shopping*, entre outros.

A Figura 11 mostra bombas centrífugas do circuito secundário de água gelada.



Figura 11 – Conjunto motor com bombas centrífugas.

Bombas centrífugas tem como objetivo o adição de pressão a um fluido, e dessa forma garantir o escoamento. Isso ocorre, porque a energia cinética procedente de um eixo agregado a um motor é transferida para o fluido, por meio de um componente rotativo (rotor ou impelidor). Desta forma, a energia é transformada em pressão com o uso de um difusor, provocando um aumento na área de seção transversal por onde o fluido escoar fazendo com que haja uma diminuição de velocidade e um conseqüente aumento de pressão. A Figura 12 mostra um exemplo de como é internamente uma bomba centrífuga com um impelido (rotor) apenas.

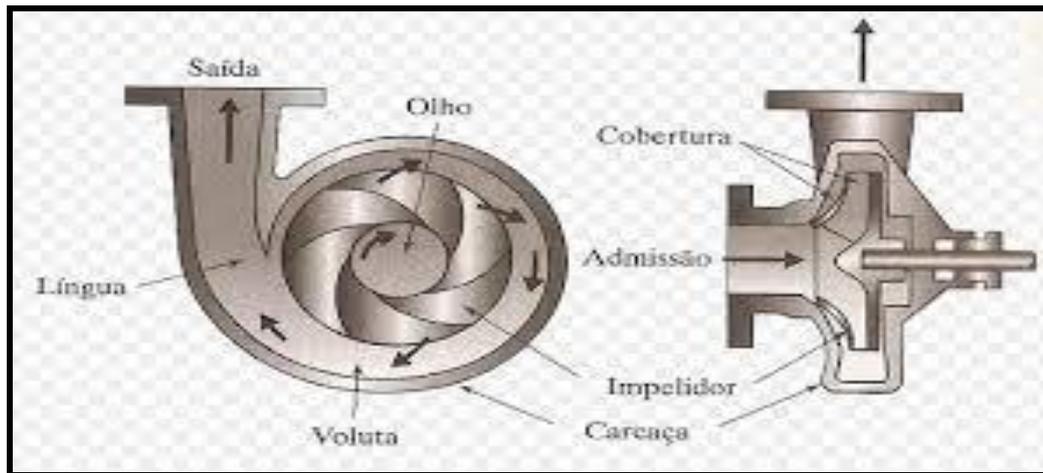


Figura 12 – Vista interna de bomba centrífuga.

Fonte: Cristovão, 2019.

Estas bombas normalmente acionadas por motores elétricos, consomem fração importante da potência requerida para o sistema de resfriamento da CAG. São empregadas nos circuitos de bombeamento para recirculação de água entre as torres de resfriamento e os trocadores de calor de condensação dos *chillers*, entre os trocadores de calor dos evaporadores dos *chillers* e os condicionadores de ar espalhados por todo o complexo, finalizando, entre condicionadores de ar e os evaporadores dos *chillers*. No caso aqui estudado, esses quatro circuitos estão instalados.

2.2.6. Condicionador de ar

O condicionador de ar é um aparelho que por meio de sua programação proporciona controle de temperatura de um determinado local, aquecendo ou refrigerando, de acordo com as necessidades. Segundo Varrasi (2014), no ano 2000, o condicionador de ar foi nomeado entre as dez maiores realizações de engenharia mecânica do século 20, de acordo com uma pesquisa com membros da *ASME (American Society of Mechanical Engineers)*. De acordo com Alahmer e Alsaqoor (2018), o principal objetivo de qualquer sistema de ar condicionado é promover o conforto térmico, ideal para os ocupantes do edifício, com qualidade do ar interior aceitável e com eficiência energética. Wang (2001) afirma que o conforto térmico é definido como o estado de espírito em que se identifica a satisfação em relação ao ambiente térmico. A Figura 13 mostra dois condicionadores de ar do tipo fan coil do complexo administrativo estudado.



Figura 13 – Condicionadores de ar tipo *fan coil*.

A principal finalidade dos sistemas de ar condicionado é propiciar as pessoas um ambiente interno confortável e saudável para exercer suas atividades. Vários setores da economia usam sistemas de condicionamento para manter o conforto térmico, em edifícios de escritórios, supermercados, universidades e bibliotecas, além de setores como o transporte, que compreendem: aeronaves, automóveis, vagões ferroviários, ônibus e cruzeiros de navios.

2.2.7. Automação

Nos últimos anos, houve um aumento significativo na área da tecnologia de automação, no aumento de pesquisas e no desenvolvimento para utilização nas indústrias e nos comércios. Segundo Ferreira (2007), a automação é como sistemas automáticos de controle, pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuando medições e introduzindo correções, sem interferência do ser humano. Portanto, pode-se dizer que automação é a tecnologia pela qual um processo ou um procedimento é realizado, sem o auxílio humano, usando para sua execução um programa combinado com um sistema de controle. Já Silveira e Santos (2002), o definem como um conjunto de técnicas que desenvolvem sistemas ativos capazes de exercer com eficiência o uso de informações recebidas do meio onde atuam. Com base nas informações, o sistema calcula a ação corretiva mais adequada para a execução da ação.

2.3. Breve resumo dos fundamentos teóricos

Descrição dos principais conceitos envolvidos e aplicados em sistemas de condensação e evaporação em torres de resfriamento.

2.3.1. Psicrometria

Na área de termodinâmica, a psicrometria pode ser definida como o estudo das propriedades das misturas de ar seco e vapor d'água, conforme definição de Borgnakke e Sonntag (2016).

Os processos psicrométricos, de acordo com Stoecker e Jones (1985), 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.

2.3.2. Umidade do ar

A umidade do ar é caracterizada pela quantidade de água existente no ar, na forma de vapor, variando entre 0 a 4% do volume do ar, representando desta maneira ar seco (quase isento de vapor de água) ao ar saturado (4% do volume é vapor de água). Ocorrem dois processos para saturação do ar: primeiro pelo aumento de vapor de água que acontece através da evaporação. Quanto maior quantidade de vapor se adiciona ao ar, em constante temperatura e pressão; e, segundo pelo resfriamento, quando os processos naturais diminuem a temperatura do ar, incorporando mais vapor de água.

2.3.3. Temperatura de bulbo seco

A temperatura de bulbo seco corresponde a temperatura do ar do meio ambiente. Ela pode ser medida com um termômetro normal exposto ao ar, mas protegido da radiação do sol e da umidade. A temperatura é lida em graus Celsius (°C). Pode ser posicionado para medir a temperatura da água a ser resfriada em uma torre de resfriamento. O caminho da água pela torre em contato com ar do meio ambiente resulta na evaporação. A evaporação em condições de ar saturado, diminui a temperatura da água à temperatura de bulbo úmido do ar, que é menor que a temperatura de bulbo seco do ar ambiente, como demonstra Jasiulionis (2012).

2.3.4. Temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura de equilíbrio alcançada na superfície da água quando exposta ao ar, de maneira que o calor transferido do ar para a água seja igual ao calor latente essencial à sua vaporização. Medida por um higrômetro, envolto por um algodão umedecido, exposto ao fluxo de ar. Se o ar não estiver saturado, há evaporação da água que está no algodão, retirando calor do bulbo do termômetro, ocorrendo uma diminuição da coluna de mercúrio, (JASIULIONIS, 2012). É muito utilizado instrumentos eletrônicos para a medição desta temperatura de bulbo úmido.

2.3.5. Evaporação

Em uma torre de resfriamento a principal colaboração para o resfriamento da água é oferecida pela evaporação. A evaporação é a transferência de massa da fase líquida (água) para a fase gasosa (ar), causando a diminuição da temperatura da água que percorre a torre. Para evaporar, a água necessita perder o calor latente, da água que flui por dentro da torre. O processo acontece quando a água aquecida é gotejada na parte superior da torre e desce lentamente através de enchimento, e em contracorrente a uma corrente de ar, que sobe, à temperatura ambiente. Essa relação direta entre as correntes de água e ar ocorre a evaporação da água, sendo este o principal fenômeno do resfriamento.

A evaporação de parte da água é responsável por cerca de 80% do resfriamento, sendo os 20% restantes referente à diferença de temperatura entre o ar e a água (SAPUNARU et al., 2014). A perda de água por evaporação está sujeita às leis da física e dependem da carga térmica, da vazão de água em circulação, do diferencial térmico entre as temperaturas de entrada e saída da torre, das condições meteorológicas do local e da diferença entre a temperatura de saída de água da torre menos a temperatura de bulbo úmido do ar ambiente. Já o arraste não deve ultrapassar a 0,1% da vazão da água em circulação. A purga de desconcentração é necessária para evitar a concentração excessiva de sais que aumentam a probabilidade de incrustações e oxidações nas paredes internas de todo o circuito da água. No processo de evaporação da água na torre, apenas a água evapora mas os sais contidos permanece e acumulam no fundo da bacia da torre. Os sais aumentam de volume a medida que o nível da bacia da torre diminui e ocorre a entrada automática de água de reposição (ALPINA EQUIPAMENTOS,

2019).

2.3.6 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 isso acontece também com a temperatura de saída da água, caso a carga térmica permanecer constante. Para manter a temperatura da água de saída constante, uma maneira é diminuir a vazão de água que circula no sistema de refrigeração. No verão ao contrário, a temperatura de saída da água aumenta. Outros fatores de interferências que prejudicam o sistema operacional são a presença de neblina ou vento que dissipa o ar quente na saída da torre. como fontes de calor perto das torres que podem alterar sua operação.

2.4. Formulação

Na Formulação foi usada um conjunto de equações para obtenção dos indicadores de desempenho em torres de resfriamento de tiragem induzida, que são o foco deste trabalho.

2.4.1. Indicador principal de desempenho em torres – (*Approach*)

O principal indicador de desempenho em torres de resfriamento é o *approach*, que é a diferença entre a temperatura de água fria que sai da torre de resfriamento e a temperatura do bulbo úmido do ambiente, conforme Eq.1. Quanto menor o *approach* melhor o desempenho da torre. Embora, tanto o *range* como o *approach* devem ser monitorados, este último é um melhor indicador de desempenho de uma torre de resfriamento (KUMAR, 2016).

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

Sendo que:

ap - *approach* (°C);

T_f - Temperatura de saída de água fria da Torre (°C);

$T_{bu, e}$ - Temperatura de bulbo úmido de entrada (°C). .

2.4.2. Valor da redução da temperatura da água da torre – *Range*

Kumar (2016) define *range* como sendo a diferença entre a temperatura de entrada e saída da água da torre, ou seja, é a diferença entre a temperatura da água quente que entra na torre e a temperatura da água fria que sai da torre, conforme Eq. 2.

$$Range = T_q - T_f \quad (2)$$

Sendo:

T_q - Temperatura da água quente de entrada na torre (°C);

T_f - Temperatura da água fria de saída na torre (°C);

2.4.3. Indicador de desempenho – (Rendimento térmico)

Para determinar o rendimento térmico nas torres de resfriamento, é calculada pela Eq. 3, faz-se a diferença da temperatura 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, multiplicado por cem (MORAES JR e MORAES, 2012).

$$\eta = \frac{T_q - T_f}{T_q - T_{bu,e}} \cdot 100 \quad (3)$$

Sabendo que:

η - Rendimento térmico (%);

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 (°C).

2.4.4. Calor cedido pela água

O calor cedido pela água por meio da convecção, acontece quando a transferência de energia no interior de um fluido ocorre em virtude dos efeitos associados de condução e do movimento macroscópico do fluido. Esta energia transferida é a energia sensível interna do fluido segundo Incropera e Witt (1992), conforme Eq. 4.

$$q_{\text{água}} = w \cdot C_p \cdot (T_q - T_f) \quad (4)$$

Em que:

$q_{\text{água}}$ - Calor cedido pela água (kcal/h);

w - Vazão mássica da água na entrada e na saída (kg/h);

C_p - Calor específico da água (kcal/kg °C);

T_q - Temperatura da água quente de entrada na torre (°C);

T_f - Temperatura da água fria de saída na torre (°C).

2.4.5. Vazão volumétrica do ar

Define-se vazão volumétrica como a multiplicação entre a velocidade do fluido e a área de secção por onde o fluido passa. É chamada Equação da Continuidade, disposto na Equação 5.

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

Representado por:

Q_s - Vazão volumétrica do ar (m³ar/h);

v - Velocidade do ar (m/h);

A - Área da seção circular da saída de ar da torre (m²).

2.4.6. Cálculo da vazão volumétrica do ar de saída

A Eq. 6, apresenta outra forma alternativa para obter a vazão volumétrica do ar onde se define a vazão volumétrica do ar de saída pelo rendimento, sendo a quantidade em massa de um fluido que escoar através de uma certa secção geométrica, normalmente circular ou quadrada em um intervalo de tempo dividido pela massa específica de ar de saída da torre.

$$Q_s = \frac{w_{ar}}{\rho_{ar}} \quad (6)$$

Em que:

Q_s - Vazão volumétrica do ar de saída (m³ar/h);

ρ_{ar} - É massa específica do ar de saída (kg/m³);

W_{ar} - É a vazão mássica do ar (kg/h).

2.4.7. Cálculo do calor recebido pelo ar

É a quantidade de energia recebida na forma de calor pelo ar através da divisão entre o calor cedido pela água e o rendimento térmico, cuja unidade em porcentagem foi transformada para uma unidade adimensional para a realização do cálculo, demonstrado na Eq. 7.

$$q. ar = \frac{q \text{ água}}{\eta} \quad (7)$$

Sabendo que:

q_{ar} - Calor recebido pelo ar (J);

$q_{\text{água}}$ - Calor cedido pela água (kcal/h);

η - Rendimento térmico encontrado na equação 3.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo deste trabalho foi realizado em um complexo administrativo situado na cidade de Santos - SP, que fica ao nível do mar, tem clima subtropical úmido (CPEA, 2019), com elevado índice pluviométrico com média mensal de 267mm (EMBRAPA, 2019) e com temperatura ambiente média em torno de 23°C, sendo utilizado por pessoas em trabalhos rotineiros de escritório. O complexo é composto de 1º, 2º e 3º embasamentos, 1º, 2º e 3º subsolos e 17 pavimentos verticais destinados a escritórios, perfazendo uma área total aproximada de 86 mil metros quadrados. Seu regime de trabalho é 24 horas por dia em todos os dias da semana. Não existem janelas com possibilidade de abertura nos seus 17 andares.

O sistema de ar condicionado e ventilação mecânica tem como objetivo propiciar condições adequadas de conforto térmico e qualidade do ar interior aos ocupantes e nas áreas técnicas, onde existem equipamentos que são sensíveis a condições inadequadas de temperatura e umidade relativa.

Neste complexo a central de água gelada (CAG) está localizada no primeiro e segundo pavimentos, sendo dotada inicialmente de três unidades resfriadoras de água gelada, *chillers*, que trabalham automaticamente e em paralelo, sendo duas com compressores centrífugos resfriados a água e uma unidade de refrigeração de absorção de fogo direto, empregando gás natural, e também resfriado a água.

Em conjunto com os *chillers*, quatro torres de resfriamento mecânica de tiragem induzida também operam de forma automática e paralela.

A operação para o funcionamento da CAG, é composta principalmente pelos seguintes equipamentos: 1 *chiller* de absorção; 2 *chillers* centrífugos; 4 bombas primárias; 4 bombas secundárias; 1 tanque de expansão de água gelada; 1 tanque de equalização de água de condensação; 5 bombas de condensação; 4 Torres de resfriamento; 1 válvula de duas vias no *by-pass*; 6 válvulas de bloqueio para os *chillers* (3 para água gelada e 3 para água de condensação); 8 válvulas de bloqueio para as torres de resfriamento; sensores de temperatura, pressão e vazão instalados nas tubulações e sensores de nível para os tanques de expansão e equalização.

A redução da temperatura ambiente de todo o complexo administrativo ocorre por meio da circulação da água gelada entre *chillers* e os 400 equipamentos de climatização espalhados pelos ambientes. A circulação desta água é feita por bombas centrífugas. Este circuito é denominado “circuito secundário de água gelada”, e opera com vazão variável, isto é, utiliza variadores de frequência. A

circulação de água gelada entre condicionadores de ar e os *chillers* é feita por bombas centrífugas. Este circuito é chamado de “circuito primário de água gelada”. A circulação da água de condensação, que é entre os *chillers* e as torres de resfriamento, é feita também por bombas centrífugas. Todos estes circuitos operam de forma automática e em sistema fechado.

A Figura 14 mostra as tubulações de entrada e saída de água no trocador de calor tipo casco tubo, do sistema de condensação, no *chiller* centrífugo.



**Figura 14 - Tubulações do trocador de calor.
Entrada e saída do trocador
de calor de condensação do *chiller*.**

A operação das bombas, tanto de água gelada quanto de condensação é feita em função do número de *chillers* que se deseja manter em operação. Como as bombas operam em sistema de barrilete único, isto é, ligadas em uma tubulação geral única, a água é encaminhada aos *chillers* em conjunto. A vazão para cada um dos *chillers* é definida em função da válvula limitadora de fluxo, tipo *Flow-Con*. Estas válvulas estão instaladas na saída dos trocadores de calor casco tubo de cada *chiller* (na água gelada e na condensação) visando ajustar de forma automática a vazão de água em cada um em função do valor de projeto, pré-ajustado de fábrica. Desta forma, a automação da CAG liga automaticamente o número de bombas necessárias a operação dos *chillers* e das torres que ao serem acionados abrem as válvulas borboletas motorizadas (*on-off*), mostrada na Figura 15. As vazões para

cada *chiller* são reguladas e mantidas pelas válvulas *Flow-Con*, mostrada na Figura 16.



Figura 15 - Válvula borboleta motorizada.



Figura 16 - Válvula reguladora de fluxo, *Flow Con*.

3.1 Geradores de água gelada

São comumente chamados de *chillers*. Compostos de compressores, motores e trocadores de calor.

3.1.1 Chillers

São três *chillers*, sendo dois de compressão centrífugo (elétrico), modelo WME500, vazão unitária de água gelada 227,20 m³/h, capacidade unitária de refrigeração de 500 TR e condensação a água e um *chiller* com circuito de absorção por queima direta de gás natural da marca *York- Johnson Controls*, modelo YWA-DF, onde o evaporador tem capacidade unitária de refrigeração de 500 TR e também com condensação a água. A Figura 17 mostra uma das telas do IHM situado no *chiller* centrífugo.



Figura 17 - Tela IHM do *chiller* estudado.

Os *chillers* de compressão utilizam um compressor centrífugo mecânico, acionado por um motor elétrico de 292 kW de potência, de forma a aumentar a pressão em determinada fase do ciclo termodinâmico do sistema. A desvantagem deste processo reside no seu, relativamente elevado, consumo energético. Esses *chillers* operam mais eficazmente quanto mais fria for a temperatura da água de condensação que sai das torres de resfriamento, porque a água fria reduz a pressão de condensação e tem o efeito de reduzir a pressão do compressor.

O *chiller* de absorção foi projetado para não operar com temperaturas de água de condensação na entrada do seu trocador de calor, tipo casco tubo, abaixo de 29,9°C, porque seu processo de resfriamento utiliza como principal energia o gás liquefeito de petróleo, caso isso ocorra seu rendimento cai bruscamente.

A Figura 18 mostra o *chiller* com compressor centrífugo e os trocadores de calor tipo casco tubo de evaporação e de condensação deste equipamento.



Figura 18 - Chillers centrífugos de 500 TR.

Os outros dois *chillers* centrífugos funciona ao contrário, quanto mais fria for a água de condensação a entrar no trocador de calor, tipo casco tubo, melhor será seu rendimento. Cada 0,5°C de redução da temperatura da água de entrada no condensador dos *chillers*, reduzirá 2% do consumo de energia elétrica, conforme manual do fabricante (DAIKIN, 2012).

O projeto foi concebido para priorizar a operação do *chiller* de absorção, pois ele é o único que pode operar com baixa carga térmica, o que acontece no horário noturno e nos finais de semana deste complexo. Também é considerada sua potência elétrica, dez vezes menor do que os outros *chillers*, gerando com isso uma economia, principalmente no horário de ponta da concessionária de energia elétrica. Devido a essa prioridade e justificativa, a água de saída das torres de resfriamento deve estar com seu *setpoint* em 29,9°C.

Os *chillers* tem válvulas limitadoras de vazão de água, permitindo o balanceamento da distribuição da água entre eles.

As tubulações que encaminham a água são construídas com tubos de aço carbono preto e soldados.

Em maio de 2017, o *chiller* de absorção foi desativado e com isso apenas os *chillers* centrífugos operam na CAG. Isso gerou um problema porque nos dias e horários de baixa demanda do complexo administrativo, estes *chillers* só podiam

operar com baixa carga, isto é, menor do que 50% de sua capacidade se a temperatura de entrada de água de condensação estivesse menor que 18,3°C.

Sem essa condição, além da redução da performance, o equipamento sofre desgastes forçados, vindo a quebrar seus componentes internos, fato já ocorrido nestes *chillers* do complexo estudado.

Devido a esse novo cenário, sem o *chiller* de absorção e sem a limitação de 29,9°C, abriu-se a possibilidade de alterar o valor do *Setpoint* de saída de água das torres.

3.1.2. Trocadores de calor de condensação dos *chillers*

Os trocadores de calor são do tipo casco tubo, de duplo passe, da marca Daikin, tendo como dados de projeto: vazão máxima: 340,9 m³/h; temperatura entrada da água: 29,5°C; temperatura saída da água: 35°C e máxima perda de pressão (entrada/saída): 8 mca.

3.2. Torres de resfriamento

As quatro torres de resfriamento são o motivo principal deste trabalho. Dispostas conforme ilustração na Figura 19, estão instaladas no 2º embasamento em área externa. Estão posicionadas duas a duas em paralelo, trabalham em conjunto e de forma automática, com uma distância entre as torres de 3,2 m em um dos lados e em outro lado com distância de 0,3 m.



Figura 19 - Torres de resfriamento estudadas.

Todas as quatro torres são mecânicas e de tiragem induzida, do mesmo modelo, fluxos em contracorrente, da marca Alpina, modelo 200/5-A19-II-AE-E, ordem de fabricação E/30.470. Fabricadas em 2013, com as seguintes dimensões 4,54 m de comprimento, 4,25 m de largura e 8,42 m de altura, com fluxos de ar e água em sentidos contrários, descarga do ar úmido no sentido vertical, com capacidade de rejeição de calor de 1.568.810 kcal/h, que é equivalente a 3.649.052,06 J/s, vazão de água de 265,9 m³/h.

Foram projetadas para temperatura de entrada da água na torre de 35,3°C, temperatura de saída da água da torre de 29,4°C e com uma temperatura de bulbo úmido calculada para o local de 26,7°C e pressão de 2,0 mca. *Approach* de projeto é de 2,7°C e rendimento de projeto de 68,6%. As paredes externas são de PRFV auto extingüível. A Figura 20 mostra um esquema da torre com suas temperaturas.

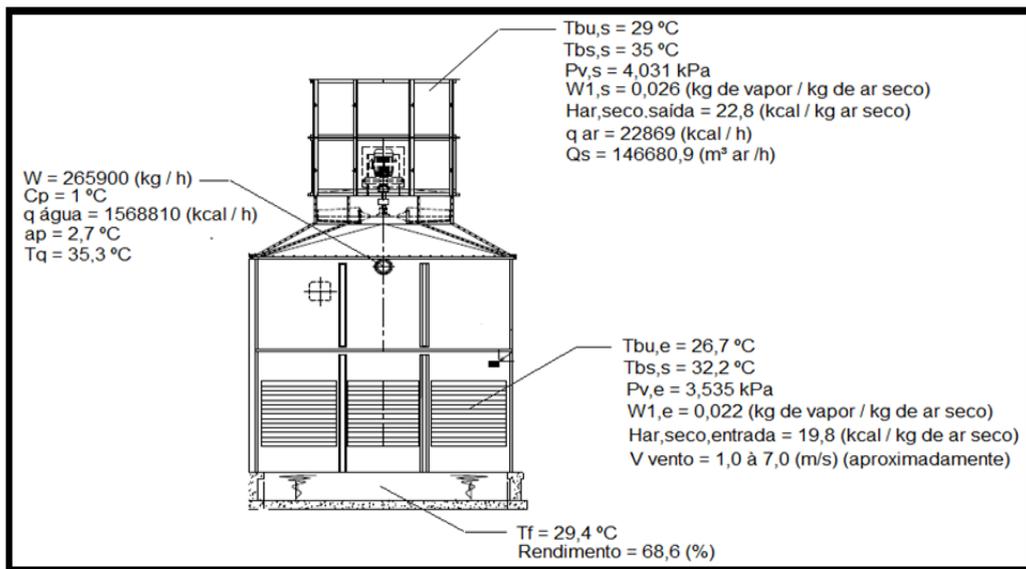


Figura 20 - Esquema da Torre de tiragem induzida com suas temperaturas.

As torres têm três venezianas de entrada de ar em cada um dos seus quatro lados e estão localizadas na parte inferior, acima da bacia da torre. Não têm regulagem e começam, na parte de baixo, a 550 mm do nível da água da bacia. Com as seguintes dimensões: 1.400 x 3.850 mm de cada um dos quatro lados da torre, e cada uma com três divisões de entradas de ar, medindo 130 x 130 cm e com 10 aletas de espessura de 3,0 mm, sendo a distância entre as aletas de 13,5 cm e o material é de PRFV (perfis de plástico reforçado) auto extingüível. Constituiu sua estrutura em PRFV autoportante e auto extingüível na cor verde escuro. O

enchimento da torre é feito de placas onduladas de PRFV, tipo filme, conforme visto na Figura 21.



Figura 21 - Enchimento tipo filme da torre estudada.

Existem bicos distribuidores de água de polipropileno auto extingüível, instalados na parte superior da torre com a função de separar em partes menores a água para que ocorra uma distribuição homogênea por toda a área superior da torre e caia da parte de cima, através do seu enchimento, até a bacia da torre situada na parte de baixo, de forma uniforme. A Figura 22 mostra o modelo de distribuidor utilizado nestas torres. Existem 24 bicos distribuidores em cada torre situados na parte superior abaixo do ventilador.



Figura 22 - Distribuidor de água da torre estudada.

A área total de enchimento é de 3.305,1 m² por torre. O volume de água da

bacia de cada torre é de aproximadamente 9.500 litros. O eliminador de gotas é do tipo onda dupla em PVC (Policloreto de vinila). Têm um ventilador axial fixado na parte de cima das torres composto por três pás com flanges numa extremidade, reguláveis de material PRFV auto extingüível presa por parafusos ao cubo que são de aço carbono com pintura epóxi, com diâmetro externo total de 2.500 mm, com velocidade de 311,7 RPM e velocidade periférica de 40,8 m/s. O peso do ventilador é de 1656,2 N.

O cubo, com suas três pás, é movido por um motor elétrico com as seguintes características: potência: 11 kW, amperagem: 19,8 A e corrente em vazio: 10,0 A, tensão: 440 volts, frequência: 60 Hz, RPM: 1.175, classe de proteção: IPW (proteção contra intempéries) 55, sem redutor de velocidade, mas com um sistema de transmissão por polias e correia com uma taxa de redução de 1:3,69 e com eficiência de 96% e são capazes de operar em condições adversas, já que se encontram expostos às condições do tempo, a atmosferas contaminadas e a alta umidade.

A pressão estática gerada pelo ventilador é de 113,9 Pa, pressão dinâmica de 48,3 Pa e pressão total de 162,2 Pa. Na parte de cima das torres, em torno do motor e ventilador existe um atenuador de ruído na descarga do ar, conforme visto na Figura 23. O diâmetro do atenuador é de 2650 mm e altura de 2500 mm, gerando uma perda de carga de 2 mca.



Figura 23 - Atenuador de ruído da torre estudada.

Na bacia de cada torre existem três válvulas: uma para possibilitar a drenagem na parte mais baixa da bacia; outra para possibilitar o enchimento rápido

manual quando necessário; e outra para enchimento automático por meio de bóia mecânica para manter o nível constante de água na bacia, conforme mostrado na Figura 24.



Figura 24 - Válvulas de enchimento automático e manual rápido da torre estudada.

Existe uma tubulação sem válvula para água de saída, na parte mais alta da bacia da torre, com a função de evitar o transbordamento da água, caso ocorra falha no processo, normalmente chamada de “ladrão”, conforme indicado na Figura 25.



Figura 25 - Linha para evitar o transbordamento da bacia da torre estudada.

Interligando as bacias das quatro torres, as válvulas da linha, tem a função

de manter o nível da água igual entre elas. Estas são de acionamento manual de volante, tipo borboleta, do fabricante Interativa, ficam permanentemente abertas, sendo fechada em caso de parada para manutenção de uma das torres. Na alimentação e retorno da água de cada torre existem válvulas automáticas de bloqueio, tipo borboleta, do fabricante *Honeywell* de 12" de diâmetro, que são comandadas automaticamente quando a torre de resfriamento entra em funcionamento ou é desligada. Um sensor de temperatura está instalado na tubulação de água na entrada e outro na saída das torres, fixado na tubulação principal. Estes instrumentos fazem a leitura e esse valor é mostrado na tela do supervisório como Tq e Tf. A Tf (temperatura de saída de água da torre) é utilizada para se comparar automaticamente com o valor de *setpoint* ajustado pela operação do sistema.

A temperatura de *setpoint* de saída da água fria das bacias das torres é inserida manualmente pelo operador do sistema.

3.2.1. Variador de frequência dos motores elétricos dos ventiladores

Existem variadores de frequência de fabricação *WEG* e modelo CFW701, demonstrado na Figura 26, instalados nos motores elétricos de acionamento das pás de ventilação das torres que operam com variação de sua rotação. Essa variação é remota/automática ou manual/local. O valor da frequência do motor dos ventiladores é registrado no sistema informatizado.



Figura 26 - Variador de frequência da torre estudada.

O controle de acionamento e modulação do ventilador das torres é realizada pela temperatura de saída de água no barrilete (saída geral), liga com o valor do *setpoint* estabelecido pela operação e desliga com um diferencial. Quando ele é selecionado, as válvulas de bloqueio na alimentação e no retorno são comandadas e, se após alguns segundos o *feedback* das válvulas não indicar estado de aberto, ou o estado do variador não indicar condição de ligado, uma falha é gerada e sinalizada no sistema. Logo após essa falha o ventilador de outra torre será escolhido para substituição, porém, entra em funcionamento apenas se a bomba de condensação for ligada e a chave seletora tiver na posição “remoto”.

3.3. Bombas centrífugas na posição horizontal do circuito de condensação

As bombas de condensação são responsáveis por fazer circular água pelo condensador casco tubo dos chillers e pelas torres de resfriamento, elas estão em barrilete e estão situadas próximas as torres no 2º embasamento. As bombas puxam a água do fundo da bacia das torres e mandam para a entrada do trocador de calor casco tubo do condensador do *chiller*, onde ganham calor e voltam para a parte de cima da torre onde será resfriada pelo ar novamente. Quando uma bomba é selecionada, um comando de ligar é feito e, se após alguns segundos, o controlador não notar a presença de estado de funcionamento dessa bomba, uma falha é gerada e sinalizada no sistema. Logo após essa falha outra bomba é escolhida para substituição.

Na Figura 27 são mostradas as bombas centrífugas, motores e amortecedores de vibração do circuito de condensação das torres.



Figura 27 - Bombas centrífugas do circuito de condensação estudado.

As cinco bombas que fazem parte deste processo, são centrífugas da marca KSB, modelo *Meganorm*, modelo 150-315, com vazão de catálogo de 340,7 m³/h, diâmetro nominal do flange de recalque de 150 mm, diâmetro nominal do rotor 315 mm, 35 mca e 1.750 RPM para os três chillers, todas fabricadas em 2013, construídas baseada no manual do fabricante (KSB, 2012), de estágio único, sucção simples horizontal e recalque na posição vertical para cima, de construção “*back-pull-out*”. São acopladas em motores elétricos da marca WEG de 75 CV, modelo W 22 Plus, com potência de 55 kW, corrente de 87,0 A, tensão 440 V , frequência de 60 Hz e RPM de 1.775. Todas as bombas deste circuito e dos demais têm válvula de retenção.

A Figura 28 mostra que no recalque das bombas existem as válvulas de retenção, para evitar que a bomba que esteja desligada receba pressão da água vinda da bomba que está em operação.



Figura 28 - Válvula de retenção do circuito estudado.

3.4. Tanque de equalização de água de condensação

São do tipo fechado, instalados dentro da CAG, próximos ao *boiler*, cada um com 200 litros de volume líquido (excluído o volume ocupado pelo ar) dotado de membrana de borracha para isolamento do ar/água, pressurizado, mantendo a pressão constante nas linhas atendidas, com isolamento térmico em 50 mm de espuma elastomérica com alumínio 0,7 mm de espessura externa.

3.5. Tubulações hidráulicas do circuito de condensação

As tubulações que levam e buscam água entre as torres e os *chillers* são de aço carbono preto soldadas de *Schedule 80* e pintada externamente na cor verde, que é o padrão para linhas de água. Na entrada de água quente, também chamada de alimentação, na parte superior das torres, o diâmetro das tubulações são de 12" para cada uma delas e estão interligadas na linha principal por uma tubulação de 24", mostrada na Figura 29.



Figura 29 - Tubulação de entrada de água quente nas torres estudadas.

Na saída de água fria, isto é, retorno, na parte inferior das torres, o diâmetro das tubulações são de 12" e estão interligadas na linha principal por uma tubulação de 24". Também, existe uma tubulação de 8" que interliga as bacias das quatro torres com a função de manter o mesmo nível de água entre elas. Em cada bacia existe também uma tubulação de diâmetro de 3" para dreno e ladrão. O diâmetro das tubulações na sucção e recalque das bombas centrífugas são de 12". Existe um amortecedor de vibração nas tubulações de sucção e recalque antes das bombas para evitar que esta vibre e transmita para tubulação e, também, antes da conexão de entrada e saída da água nessas torres evitando, assim, que as vibração das quatro torres passem para a tubulação.

3.6. Sistemas de controle e instrumentos de medições

Descreve como é o controle de operação e de velocidade das torres de resfriamento, os instrumentos de medições e o sistema coletor e de supervisão informatizado, que foram utilizados neste experimento.

3.6.1. Nas torres de resfriamento

As torres de resfriamento são controladas em função da temperatura de saída de água no barrilete geral de saída de água resfriada, T_f , e vão para as unidades resfriadoras de água gelada (*chillers*), atuando de forma paralela (com o mesmo sinal) para os VFD (variadores de frequência) dos ventiladores das torres, que estão instalados em todos os motores elétricos deste sistema, reduzindo a rotação e com isso a vazão de ar de todas à medida que esta temperatura diminui. A lógica de comando deverá começar a desligar as torres quando a temperatura da água comum em todas elas (barrilete de saída para as bombas) atingir o *setpoint* que é colocado pela operação do sistema e as torres chegarem na mínima RPM (por volta de 15 Hz).

As torres têm registros de bloqueio (válvulas borboleta com atuadores elétricos *on-off*), que fecham a saída e entrada de água de cada uma quando esta estiver desligada. O *setpoint* de controle é colocado pela operação direto no supervisor e sem restrição de qualquer valor. Durante todo o experimento foi observado que o valor colocado foi de 22°C e permaneceu fixo.

3.6.2. Instrumentos de medição

Descreve os tipos e as especificações dos instrumentos digitais e os portáteis manuais do circuito de condensação utilizados neste experimento para a coleta das medições.

3.6.2.1. Medições digitais

As medições digitais são aquelas que são registradas automaticamente pelo supervisor *Metasys* da *Johnson*, do sistema da CAG. Foram programadas para registrarem a cada hora os valores de temperatura da água de entrada e saída das torres, foram obtidas pelos sensores de temperaturas que estão instalados na tubulação principal de interligação das quatro torres e tem apenas um na entrada e outro na saída. São do fabricante *Kele* e tem saída de 4 a 20 mA, faixa de medição de 0 a 50°C, resolução de 0,2°C e com erro de no máximo 2% e, as partes em contato com o líquido são construídas em material não corrosivo, não agressivo ao ambiente e não nocivo a saúde.

A frequência em *Hertz* (Hz) e potência elétrica (kW) de cada motor do ventilador da torre, a quantidade de bombas do circuito de condensação estavam

ligadas, horário, data e temperatura de *Setpoint*, também foram programados para registrar os seus valores a cada hora. O valor de *Setpoint* é colocado pela operação de forma manual e durante todo o experimento esteve fixado em 22°C.

3.6.2.2. Medições manuais

As medições manuais foram obtidas no local aonde estão localizadas as torres. As variáveis foram das temperaturas de bulbo úmido ($T_{bu,e}$), bulbo seco (T_{bs}) e umidade relativa (UR), tanto na entrada como na saída das torres. O instrumento utilizado é digital portátil, calibrado, tipo termo higrômetro da marca Minipa modelo MTH-1362, mostrado na Figura 30. Conforme as seguintes especificações: indicação de polaridade positiva automática e negativa indicada, ambiente de operação de 0°C a 50°C, umidade relativa $RH \leq 80\%$, coeficiente de temperatura de 0,1 x (precisão especificada/°C <18°C ou >28°C, amplitude de operação de 2000 m, com as seguintes dimensões (Altura x Largura x Profundidade) = 160x83x38 mm e operaram com baterias novas e calibração validada.



Figura 30 – Termo higrômetro utilizado no experimento.

Para as medições de velocidade do ar na entrada das venezianas das torres e na saída do ar no duto de descarga situado na parte de cima da torre, foi usado um instrumento portátil denominado termo anemômetro digital calibrado da marca *Instrutherm*, modelo TAD500, com escala de temperatura de 0 a 60°C , precisão $\pm 2\%$, resolução de 0,1°C, escala de velocidade entre 0,3 - 45,0 m/s, média de período para a medição da velocidade do vento de 0,6 seg. (m/s), temperatura de operação

entre 0° a 50°C e umidade de operação abaixo de 80% UR.

3.6.2.3. Sistema coletor e registrador de dados

O sistema de controle e supervisão de todo o sistema de HVAC do complexo é o da *Metasys* da empresa *Johnson Controls* e foi configurado para coletar e registrar os parâmetros a cada 1 (uma) hora dos instrumentos mencionados neste trabalho e foram considerados como medições digitais.

3.7. Equipe de operação

Durante o experimento, foi observado como é planejada a execução e operação do sistema de condensação. A observação de como o perfil de queda da água nas torres é um fator de inspeção importante: se está caindo de forma uniforme conforme demonstrado na Figura 31, ou não uniforme, como visto na Figura 32, indicando que um bico quebrou ou soltou da tubulação.



Figura 31 - Queda de água real perfeita nas torres estudadas.



Figura 32 - Queda de água real com falha no distribuidor nas torres estudadas.

Um fator relevante para o bom funcionamento e desempenho das torres e de todo o sistema de condensação, é manter o controle da qualidade da água. Para isso, existe tratamento químico para garantir a qualidade da água e impedir que aconteça o demonstrado na Figura 33, cuja água que vem da concessionária para as bacias das torres, não têm tratamento químico, ocasionando o rompimento inesperado da tubulação no período estudado. O tratamento impede, basicamente, as incrustações, corrosões, entupimentos e formação de bactérias e fungos.

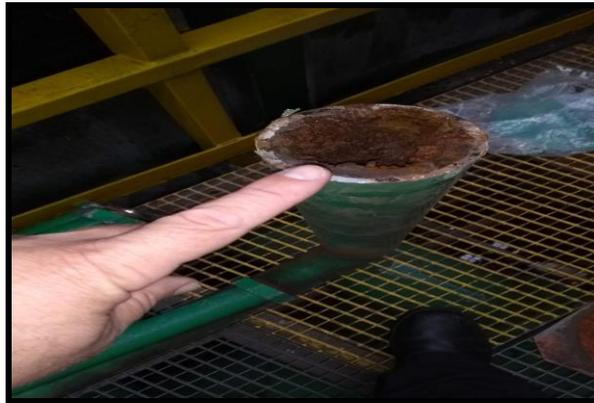


Figura 33- Tubulação incrustada que rompeu inesperadamente.

Nas torres analisadas os parâmetros da qualidade da água são monitorados mensalmente pela liderança da manutenção e por uma empresa especializada. Os parâmetros são: cor, aspecto, PH, alcalinidade total, cloreto, ferro total, nitrogênio amoniacal, condutividade, dureza total, dureza de carbonatos, dureza não carbonatos, fosfato e sólidos totais. As bombas dosadoras puxam os produtos das bombonas aonde estão os produtos químicos e jogam diretamente na bacia das torres, conforme exibido na Figura 34.



Figura 34- Bombas dosadoras automáticas das torres.

Suas vazões são ajustadas mensalmente de acordo com os resultados nas amostras colhidas e analisadas. Na Figura 35 é mostrado os acondicionamento e estoque correto dos produtos químicos.

Existe também um regime de “purga de desconcentração” que é uma pequena drenagem de água no fundo das bacias para evitar o acúmulo de excesso de sais, já que no processo de evaporação dentro das torres apenas a água evapora, os sais não. Para efetuar a purga existe uma válvula de esfera manual de diâmetro de 2” no fundo da bacia de cada torre onde o operador executa a manobra e abertura e fechamento. O tempo e a frequência da purga, isto é, de abertura da válvula, é determinado pela empresa especializada após as análises da qualidade da água e varia em torno de 1% do volume da água de reposição.



Figura 35 – Produtos utilizados no tratamento químico da água das torres estudadas.

Na figura 36 mostra um pedaço do enchimento da torre estudada e em uso a mais de 5 anos.



Figura 36 - Pedaço de enchimento sem incrustação das torres estudadas.

3.8. Procedimentos experimentais

Para a obtenção das variáveis do ar ambiente, do processo e dos indicadores de desempenho do sistema de condensação das torres, para resfriamento de água dos *chillers*, foram realizadas várias medições segundo as normas de segurança, foi obtida autorização e acompanhamento dos responsáveis técnicos da empresa, no período de novembro de 2017 a abril de 2018. Na Figura 37, mostra-se as variáveis coletadas de forma digital e manual.

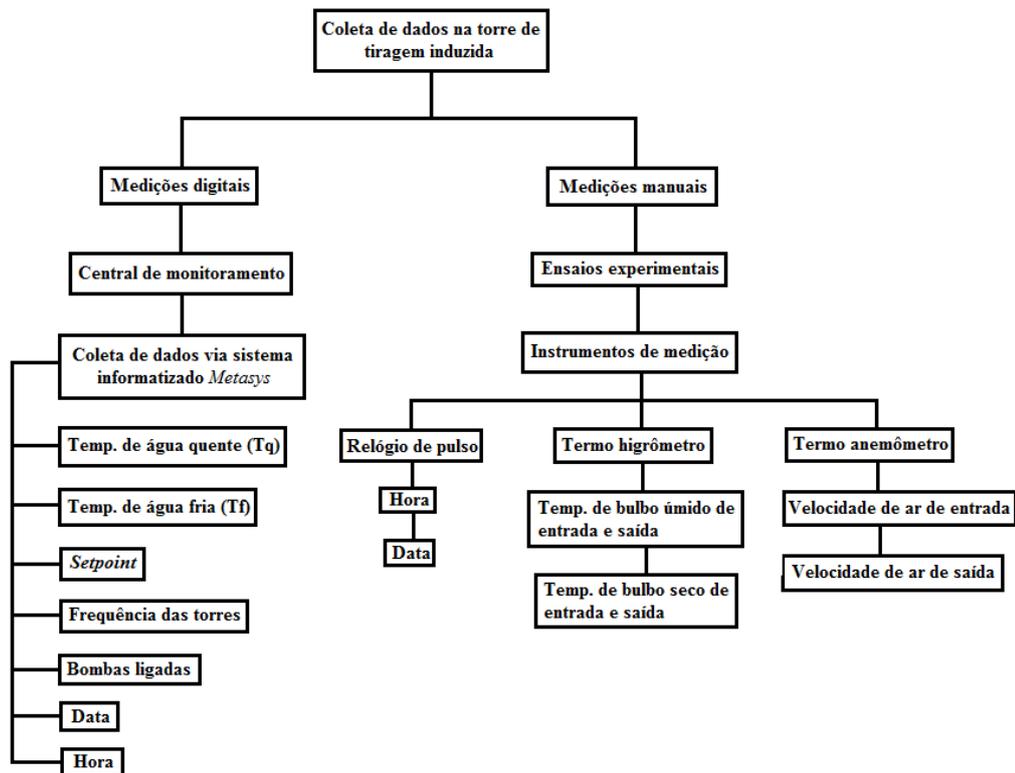


Figura 37 – Fluxograma das variáveis coletadas de forma digital e manual.

Todos as leituras digitais e manuais do mesmo dia e horário foram transferidas para uma planilha de Excel, para serem analisadas e formarem os gráficos.

As medições ocorreram sempre em dias de semana e nos horários fixos das 8:00, 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 e 17:00 horas, pois é quando se tem a maior carga térmica neste complexo administrativo.

As medições só ocorriam se o perfil de caída de água na bacia das torres estivesse uniforme.

Para as medições manuais, usou-se um relógio de pulso sincronizado com o relógio digital do sistema informatizado da *Metasys*. As leituras de Tbu,e, Tbs, UR,

foram todas obtidas manualmente na entrada de ar das torres, no centro das quatro torres e a 1 metro do piso, que é no centro das venezianas, conforme indicado com uma seta na Figura 38.

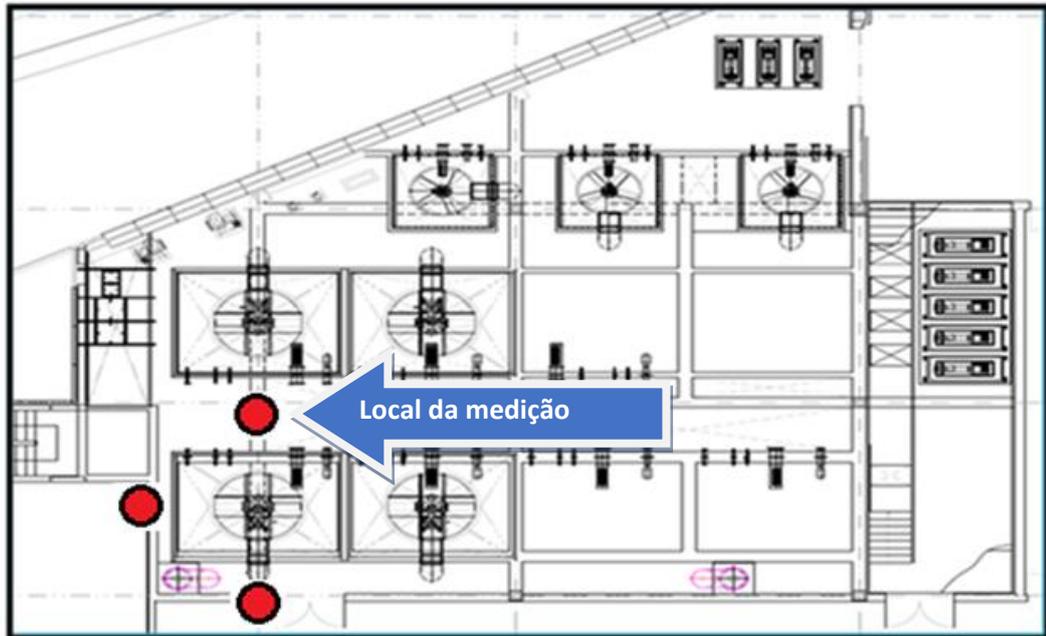


Figura 38 - Posição do local das coletas manuais das temperaturas e umidades.

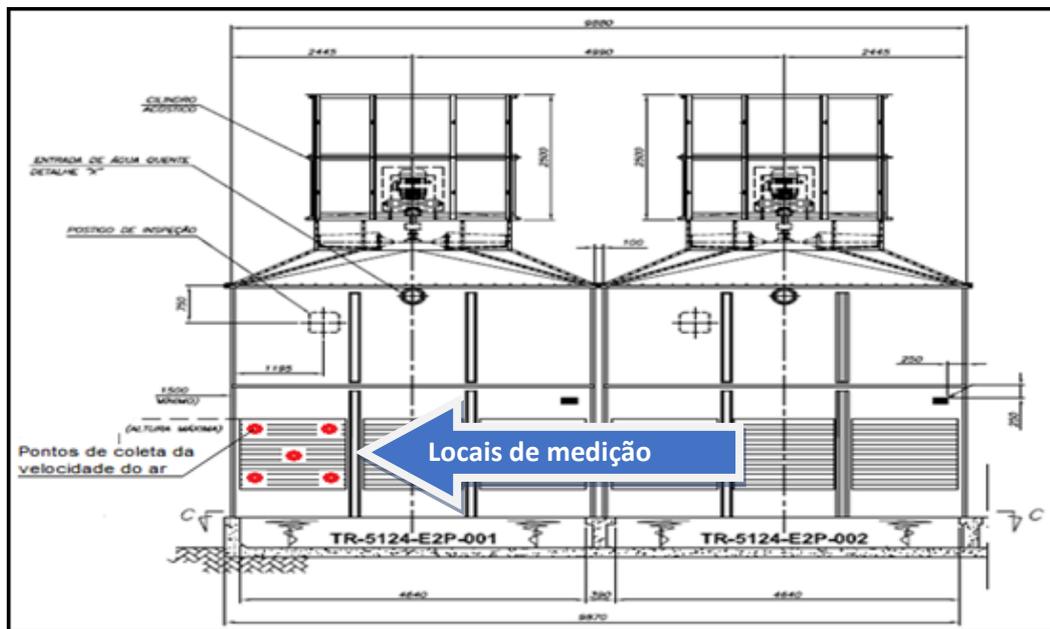
Na Figura 39 mostra uma coleta real de temperatura e umidade do ar ocorrendo no centro das quatro torres de resfriamento com o instrumento Termo higrômetro MTH-1362.



Figura 39 - Coleta de dados real acontecendo nas torres estudadas.

Para se obter a velocidade média de entrada de ar nas torres, foram coletados os valores com o instrumento termo anemômetro nas nove venezianas

situadas nas três laterais, conforme mostrado na Figura 40.



**Figura 40 – Local dos pontos de coleta de velocidade do ar.
Entrada das venezianas das torres.**

Foi determinado cinco pontos de coletas de entrada de ar em cada uma das venezianas, sendo quatro pontos nas extremidades, 10 cm de distância, e um no centro, respeitando sempre as mesmas distâncias entre os pontos e 1,0 cm de distância da veneziana. Desta forma, manteve-se um padrão de coleta para se achar a média amostral da velocidade de ar na entrada das torres conforme mostra Figura 41 e com isso encontrar a velocidade média do ar de entrada. Essa média foi obtida após a repetição de 3 vezes da leitura em horários diferentes, porém com a mesma velocidade dos ventiladores.



Figura 41 - Coleta de velocidade do ar ocorrendo na entrada das venezianas das torres.

Para se achar a média da velocidade do ar na saída das torres, foram coletados os valores em quatro pontos alinhados com a mesma distância de espaçamento entre eles: uma no centro da torre, e as outras três coletas a distância entre si de 0,3 m do centro até a parte externa do duto de descarga a 0,5 m de altura acima do ventilador, Figura 42.

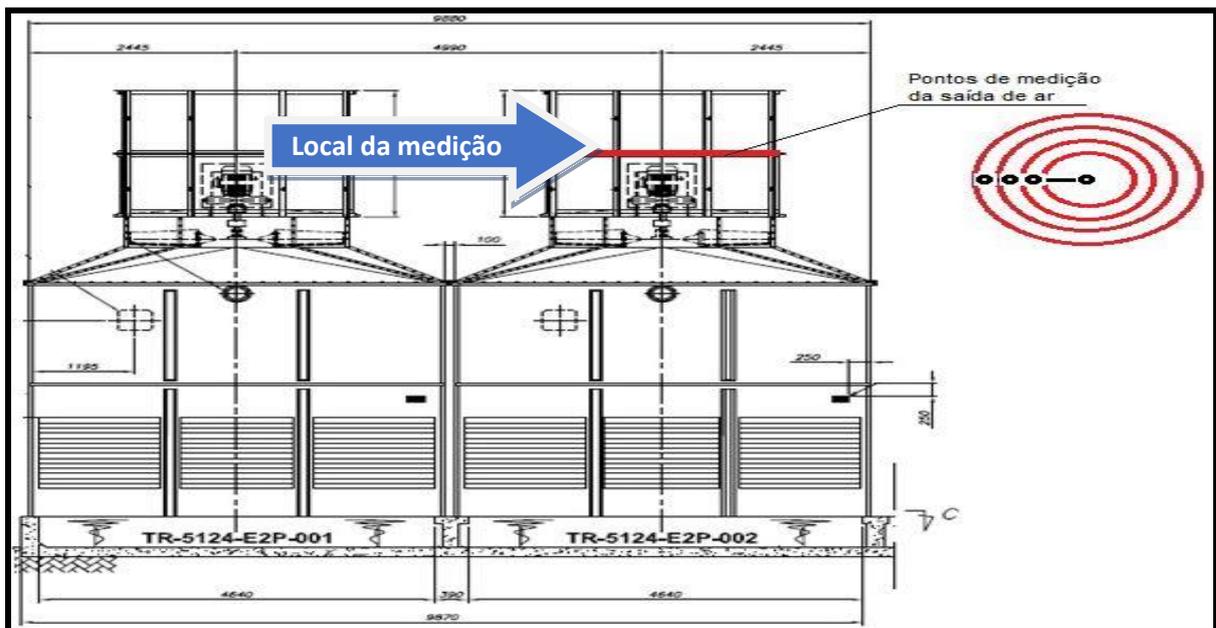


Figura 42 - Pontos de coleta de ar na saída das torres.

A Figura 43 mostra uma coleta de dados ocorrendo.



Figura 43 – Termo higrômetro a esquerda e Termo anemômetro a direita, utilizados na saída de ar das torres.

A média adotada da velocidade de saída do ar, após as leituras, foi de 7,66 m/s com frequência dos motores em 60 Hz, isto após a repetição de três vezes em uma das torres. Devido as frequências variarem durante o período estudado, também foi verificado a velocidade do ar com as seguintes frequências, 45, 42, 36, 30 e 24 Hz para se obter a vazão de ar dos ventiladores das torres.

As avaliações constituíram em coletar as leituras dos instrumentos digitais e manuais e depois aplicar as equações, já descritas neste trabalho. As coletas manuais horárias feitas na área das torres foram de Tbu,e, Tbs, UR, velocidade do ar, data e hora da coleta. As coletas digitais colhidas diretamente no supervisão na sala de monitoramento foram do Tq, Tf, valor do *setpoint*, frequência e potência dos ventiladores, quantidade de bombas ligadas, data e hora.

Os dados coletados foram transcritos para diversas tabelas e gráficos que estão no item resultados deste trabalho. As tabelas estão no apêndice deste trabalho.

Através destas informações foram calculados o *approach* (°C), o rendimento (%), o range (°C), vazão volumétrica de ar (m³/h) e calor cedido pela água (kJ/s).

As coletas e análise dos dados foram feitas em partes: primeiro, após os quatro primeiros dias, depois foram feitas simulações no segundo dia de medição, isto é, 13/11/2017, porque foi o dia que teve os piores indicadores de desempenho durante todo o dia, nos primeiros quatro dias de análise. Na simulação teórica o setpoint foi reduzido, em decréscimos de meio grau, de 22°C a 20°C para averiguar o

comportamento dos indicadores: rendimento térmico e *approach*. Foi utilizado para isso o programa Excel aplicado nas equações 1 e 3 deste experimento.

Após autorizado pela operação, foi feita uma mudança real do valor de *setpoint* de 22°C para 20°C em 23/11/2017, por todo este dia e foi comparado com dois dias de medições anteriores a ele e três dias de medições posteriores.

Em seguida foram analisados mais 12 dias, com o objetivo de obter mais dados e verificar se algo mais poderia impactar o desempenho do sistema. Finalmente, foram analisados todos os 23 dias de coletas para analisar o desempenho deste sistema de torres e descobrir os motivos que impediram o alcance dos indicadores de desempenho de projeto, e propor soluções para sua melhora.

As datas com coletas completas e válidas em novembro de 2017, ocorreram nos dias 13, 14, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 26 e 27, em fevereiro de 2018, a medição ocorreu no dia 27. Em março de 2018, as medições válidas ocorreram nos dias primeiro, 2, 5, 7, 12, 14, 15, 20, 21 e 22. Para terminar, em abril de 2018 as medições válidas ocorreram nos dias 2 e 3, totalizando 23 dias de experimento.

Foram efetuadas dez (10) medições por dia e por dez horas consecutivas, em intervalos de hora em hora com início às 8:00 horas e término às 17:00 horas. Para simplificar as tabelas e gráficos, cada conjunto de coletas recebeu um código de medição, composto por uma letra do alfabeto e um número que corresponde ao horário da medição, sendo a primeira letra do alfabeto correspondente a data da primeira coleta, exemplo, 13/11/2017 a letra A, o segundo dia de coleta foi em 14/11/2017 e corresponderá a letra B, e assim, sucessivamente.

Quanto aos horários da medição, o código é a hora sem os decimais, exemplo, 8:00 horas corresponderá ao número 8, 9:00 horas corresponderá ao número 9 e assim até o número 17 que corresponderá a 17:00 horas. Na Tabela 1 é mostrada a correlação da data e hora da coleta com o código recebido para simplificação.

Tabela 1 - Código de cada conjunto de medição

Data	Código	Data	Código
13/11/2017	A8 a A17	01/03/2018	L8 a L17
14/11/2017	B8 a B17	02/03/2018	M8 a M17
16/11/2017	C8 a C17	05/03/2018	N8 a N17
17/11/2017	D8 a D17	07/03/2018	O8 a O17
21/11/2017	E8 a E17	12/03/2018	P8 a P17
22/11/2017	F8 a F17	14/03/2018	Q8 a Q17
23/11/2017	G8 a G17	15/03/2018	R8 a R17
24/11/2017	H8 a H17	20/03/2018	S8 a S17
26/11/2017	I8 a I17	21/03/2018	T8 a T17
27/11/2017	J8 a J17	22/03/2018	U8 a U17
27/02/2018	K8 a K17	02/04/2018	V8 a V17
		03/04/2018	X8 a X17

Alguns procedimentos básicos nas leituras manuais foram observados, como de não deixar incidir o sol nos instrumentos, esperar 10 segundos de intervalo entre as leituras dos valores e utilizar instrumento com a calibração válida. Já as leituras digitais das temperaturas de entrada da água quente em cima das torres e da saída da água resfriada na parte de baixo, foi obtida por sensores instalados diretamente dentro das tubulações de aço carbono há aproximadamente 10 (dez) metros de distância dos *chillers* e dentro da CAG.

Como as quatro torres trabalham em paralelo e as tubulações são interligadas entre elas, existe um instrumento apenas na tubulação de entrada (alimentação) das quatro e outro instrumento na tubulação de saída (retorno) das quatro, isto é, não existe instrumento individual para cada torre. O instrumento faz a leitura e envia para o sistema informatizado *Metasys* (supervisório), onde será registrado o valor das temperaturas, bem como a frequência e potência elétrica do motor do ventilador de cada torre. O valor de *setpoint* para o sistema, também foi registrado, e é colocado manualmente pelo operador do sistema que o mantém em 22°C.

Foram colocadas todas essas leituras em forma de tabela para que fosse possível analisar, a cada hora, o desempenho do sistema, principalmente os indicadores *approach* e o de rendimento térmico das torres, que são o foco deste trabalho e os principais indicadores para se determinar o desempenho em torres de resfriamento. Para facilitar a visualização dos valores encontrados das leituras diretas ou dos indicadores obtidos através das equações, foram mostrados em forma de gráficos do programa *Excel*. Um espaço entre um dia de medição e outro foi

imputado nos gráficos iniciais para indicar que as medições não ocorreram, em muitos casos, em dias corridos e que não ocorreu durante as 24 horas do dia e sim sempre das 8:00 às 17:00 horas. As tabelas estão no apêndice deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O experimento começou com uma análise de todas as variáveis de temperatura coletadas e a umidade relativa do ar ambiente na área aonde estão instaladas as torres, isto, nos primeiros quatro dias deste trabalho. O horário das coletas foi sempre em hora em hora cheia, isto é, das 8:00 às 17:00 horas. Esses dias foram denominados de dia A, dia B, dia C e dia D, e ao lado de cada letra o horário da coleta. Foram denominados com os códigos de medição de A8 a D17.

As coletas foram da temperatura de saída da água das torres (T_f), temperatura de bulbo úmido do ar ambiente na entrada das torres ($T_{bu,e}$), temperatura do *setpoint* (SP) colocado pela operação, temperatura de bulbo seco do ar ambiente na entrada das torres (T_{bs}), temperatura de entrada da água quente nas torres (T_q) e umidade relativa do ar na entrada das torres (UR).

A Figura 44 mostra, nos primeiros quatro dias do experimento, a variação de hora em hora dessas variáveis, mas com um espaço no gráfico, entre um dia e outro, demonstrando que os dias não foram corridos.

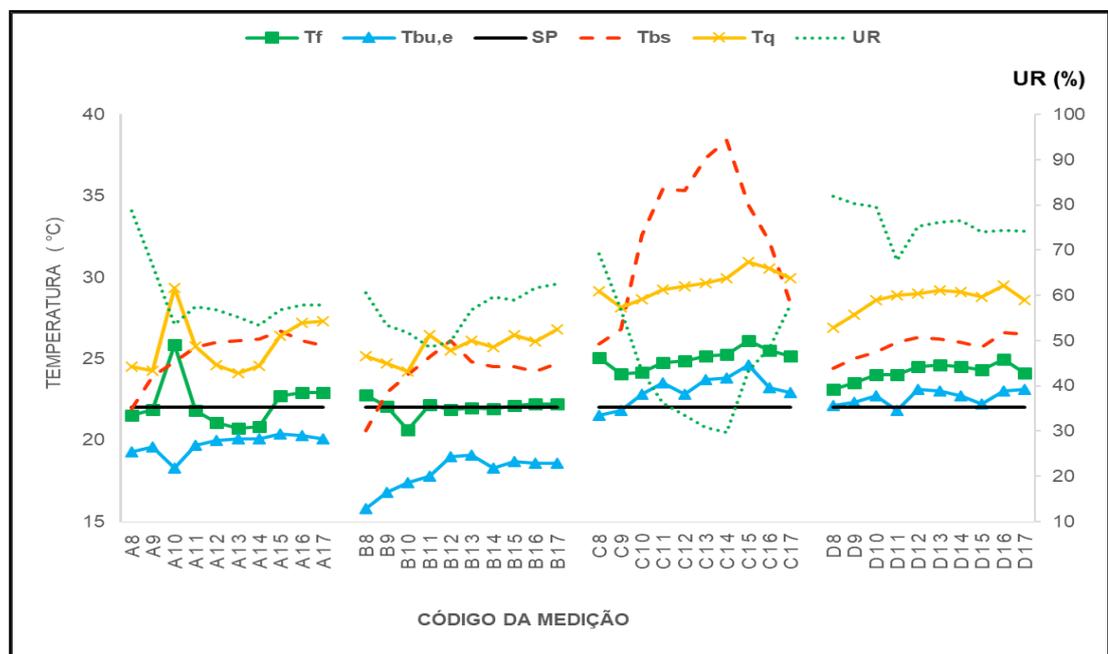


Figura 44 - Variação das temperaturas de T_f , $T_{bu,e}$, SP, T_{bs} , T_q e UR nos quatro primeiros dias, no horário das 8:00 às 17:00 horas.

Pode-se observar a grande variação que há entre as variáveis do experimento, sendo constante apenas o valor de SP. Este SP controla a quantidade de torres em funcionamento e as frequências dos seus ventiladores, e com isso a temperatura T_f .

Uma análise mais focada desse primeiro gráfico foi a análise da $T_{bu,e}$ do local onde está localizada o conjunto das quatro torres e a temperatura de controle de saída da água das torres, T_f .

A Figura 45 mostra os primeiros quatro dias do experimento, a variação horária da $T_{bu,e}$ e o valor fixo do SP.

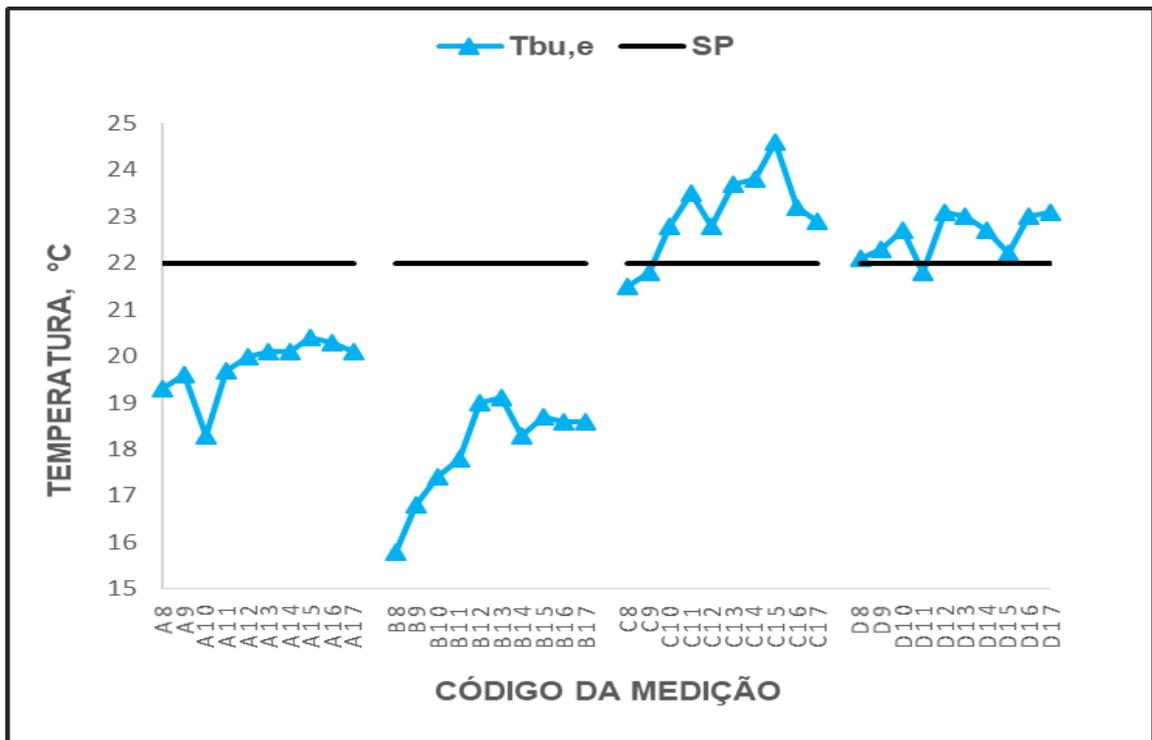


Figura 45 - Variação de $T_{bu,e}$ e valor fixo do SP nos quatro primeiros dias, no horário das 8:00 às 17:00 horas.

Nota-se que nos quatro primeiros dias de coleta de dados, que não houve mudança do valor do SP de controle da temperatura de água de saída das torres pela operação do sistema, mesmo com a variação das temperaturas de $T_{bu,e}$, nos dias que corresponderam aos códigos A8 até B17. A variação de $T_{bu,e}$ é justificada pela variação de umidade do ar ambiente externo. Por todos os horários dos dias A e B, as $T_{bu,e}$ ficaram abaixo da linha do SP, que foi 22°C, gerando variações de 15,8 à 20,4°C que significa que nesses dias não houve o aproveitamento da temperatura mais baixa de $T_{bu,e}$ disponível no ambiente externo das torres para promover maior desempenho desses equipamentos, principalmente no dia B onde ocorreu o menor $T_{bu,e}$ que foi de 15,8°C, gerando o maior distanciamento para baixo da linha do *setpoint*.

Nos dias dos códigos C8 à D17 as temperaturas de Tbu,e estavam acima da linha do SP, com variações entre 21,5 à 24,6°C, demonstrando que houve melhor aproveitamento das temperaturas de Tbu,e onde no dia do código C15 teve o maior pico de temperatura de Tbu,e, 24,6°C.

A Figura 46 mostra o comportamento de hora em hora do indicador de desempenho denominado *approach* (ap), conforme Equação 1, dos quatro primeiros dias, denominados A, B, C e D, em forma de linha para cada dia, das 8:00 às 17:00 horas, comparado com o valor de *approach* de projeto, que é de 2,7°C.

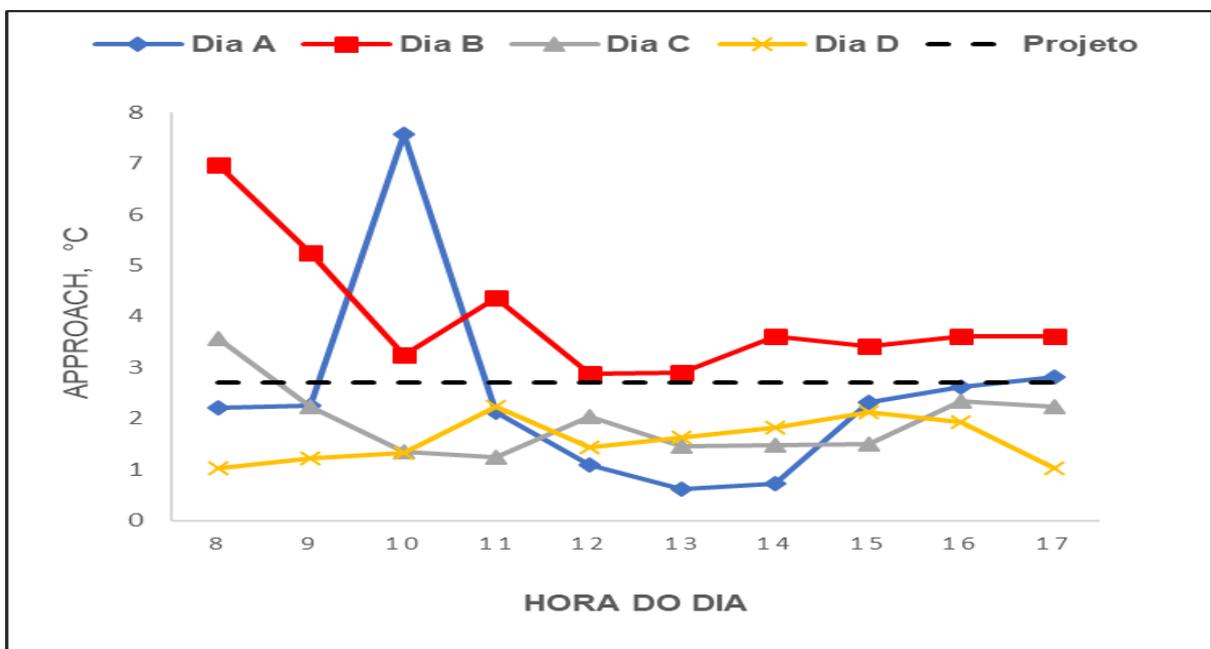


Figura 46 - Valores do *approach* horário dos quatro primeiros dias, das 8:00 às 17:00 horas comparado com o valor de *approach* de projeto.

Valores de *approach* abaixo da linha de projeto indicam um bom desempenho. Foi possível observar que o dia B foi o único dia em que ele esteve acima da linha de projeto, por toda a coleta diária, das 8:00 às 17:00 horas, variando de 2,8 à 7°C, o que indica um baixo desempenho do sistema, sinalizando o não aproveitamento dos valores baixos das temperaturas de Tbu,e nas entradas das torres, conforme mostra a Figura 45.

O dia A indicou o maior valor do *approach* de 7,8°C na coleta das 10:00 horas demonstrando uma descontinuidade operacional momentânea, voltando a ficar com bons desempenhos nos horários seguintes, das 11:00 às 16:00h, porque ficaram com valores abaixo da linha de projeto. No dia C, apenas às 8:00 horas o

approach ficou acima da linha de projeto, com um valor de 3,6°C, nos demais horários variou de 2,3 a 1,2°C, abaixo do valor de projeto.

No dia D o *approach* foi bom por todo o período, variando de 1,0 a 2,2°C.

A Figura 47 mostra o alinhamento entre os resultados experimentais da variação da temperatura de Tbu,e e a variação do *approach* do experimento nos quatro primeiros dias, do código A8 a D17.

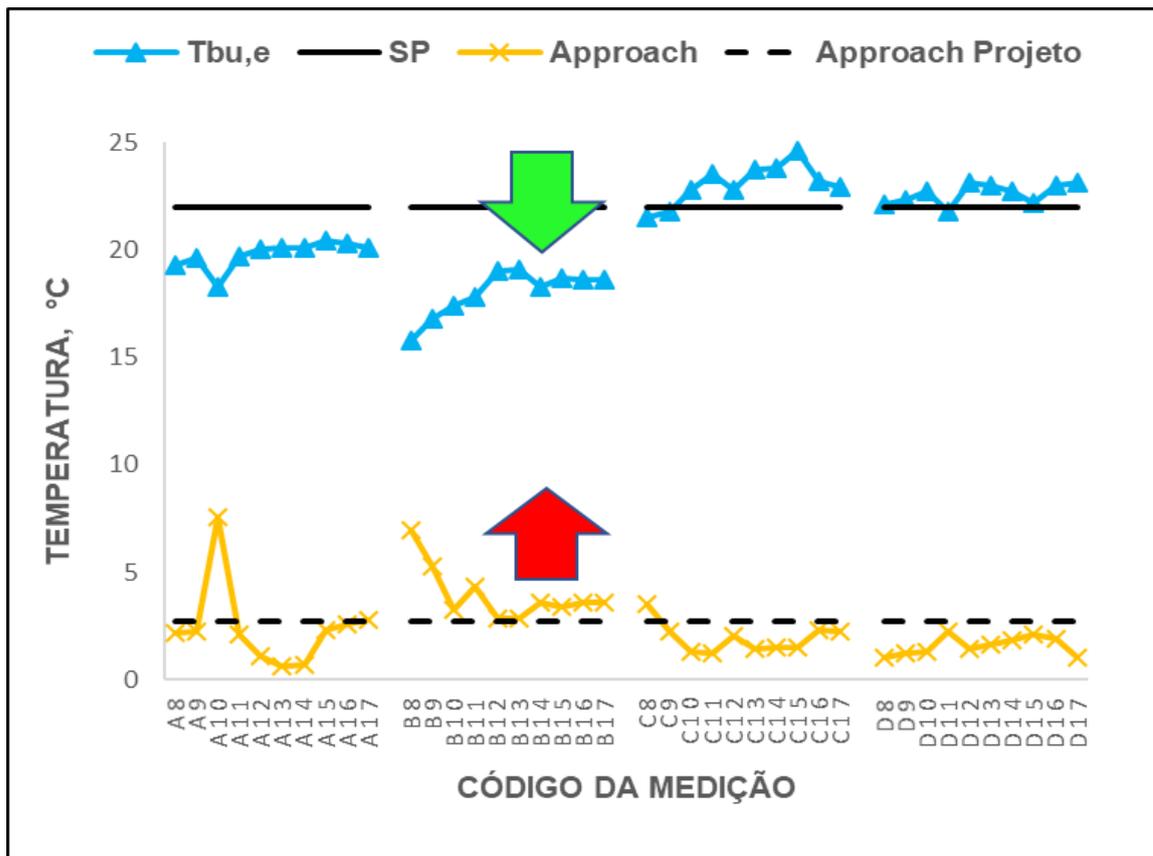


Figura 47 - Valores de Tbu,e e de SP em 22°C na parte de cima e valores experimentais de *approach* e de projeto, que é 2,7°C na parte de baixo.

O alinhamento por todo o dia B entre o Tbu,e, que ficou bem abaixo da linha do *setpoint* e o *approach* que ficou acima da linha de valor de projeto, 2,7°C, pode ser observado, confirmando o baixo desempenho do sistema de refrigeração das torres neste dia B devido a não redução do valor de SP

Outro indicador de desempenho em torres de resfriamento é o rendimento térmico (n). A Figura 48 mostra a variação do rendimento térmico, conforme

Equação (3), dos quatro primeiros dias das 8:00 às 17:00 horas, comparado com o valor de rendimento térmico de projeto, que é de 68,7%.

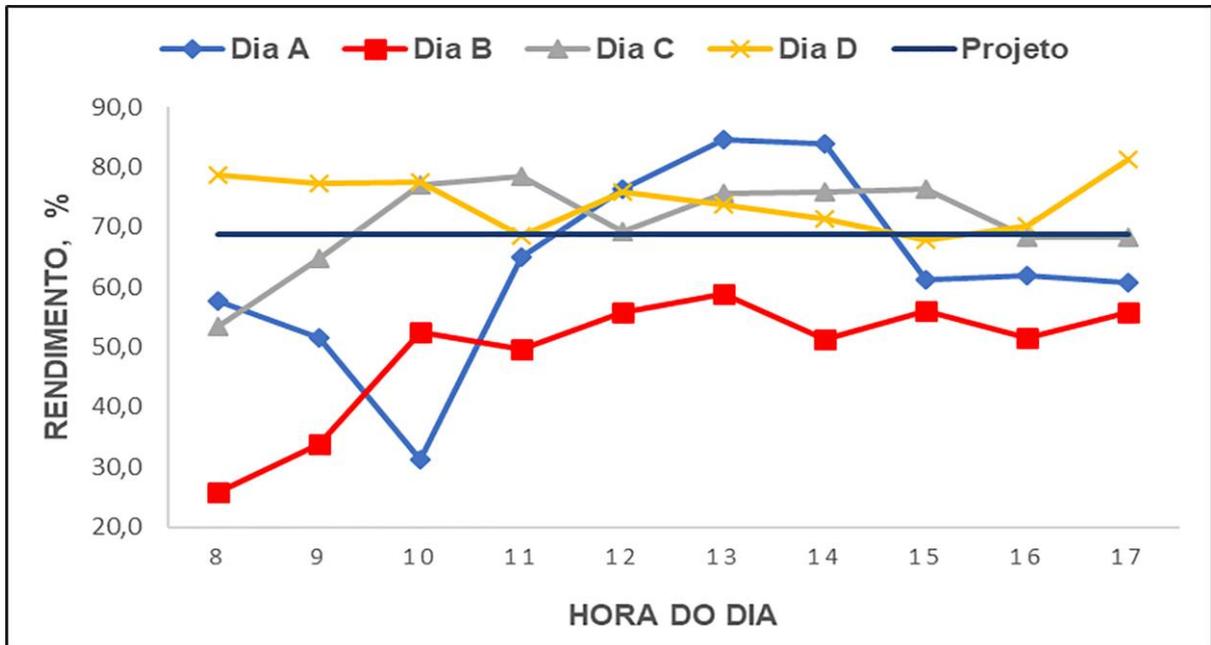


Figura 48 - Valores do rendimento térmico horário das 8:00 às 17:00 horas dos quatro primeiros dias comparado com o valor de rendimento térmico de projeto, 68,7%.

Foi possível observar que o pior rendimento térmico diário ocorreu no dia B, porque ficou abaixo da linha de projeto por todo o período de medição, variando de 25,8 a 55,8%, das 8:00 às 17:00 horas, o que indica um baixo desempenho do sistema de resfriamento das torres e foi justamente o dia em que foi a menor temperatura de bulbo úmido. O rendimento térmico do dia A ficou abaixo nas três primeiras e nas três últimas horas de coleta, indicando um desempenho instável do sistema, variando de 32,3 a 84,5%. No dia C, apenas às 8:00 horas o rendimento térmico ficou abaixo, com 53,3%, nos demais horários variou de 68,3 a 78,4%, demonstrando um bom rendimento térmico. No dia D, o rendimento térmico ficou apenas às 15:00 horas abaixo, com 67,7%, nos demais horários ficou acima, variando de 68,6 a 81,3%.

Devido as observações experimentais acima indicadas nas Figuras 38 a 40, o dia B teve o mais baixo desempenho nesses quatro primeiros dias do experimento. A Tbu,e ficou bem abaixo do valor de *setpoint*, e o mesmo não foi alterado pela operação do sistema.

Com isso foi realizado uma simulação teórica com a mudança do *setpoint* de 22°C para até 20°C apenas neste dia B. A simulação foi realizada, reduzindo o

setpoint em decréscimos de $0,5^{\circ}\text{C}$, isto é, nos valores de $21,5$, 21 , $20,5$ e 20°C e observar com isso qual seria o rendimento e o *approach* do sistema com essas variações.

Simulou-se então as reduções em $0,5^{\circ}\text{C}$, $1,0^{\circ}\text{C}$, $1,5^{\circ}\text{C}$ e $2,0^{\circ}\text{C}$ da temperatura de entrada da água nas torres e se estimou os novos indicadores de desempenho.

A Figura 49 mostra a variação do *approach* no dia B para os valores simulados de *setpoint* de 20°C , $20,5^{\circ}\text{C}$, 21°C e $21,5^{\circ}\text{C}$, comparado com o *approach* real e o de projeto, que é $2,7^{\circ}\text{C}$.

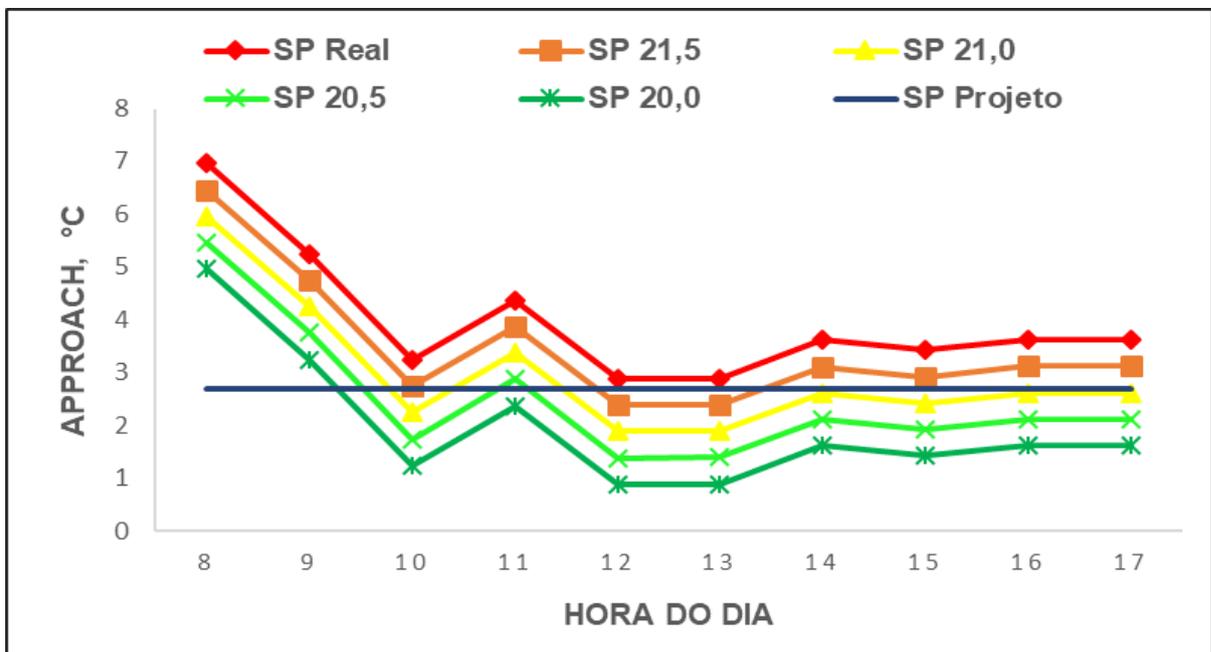


Figura 49 - Valores de *approach* do dia B com as simulações de redução do SP para $21,5^{\circ}\text{C}$, 21°C , $20,5^{\circ}\text{C}$ e 20°C comparando com o real e o de projeto

Com os resultados dessas simulações teóricas, mostraram para as condições ambientais do dia B, que quando o SP é reduzido para se aproximar da T_{bu} , ocorre o aumento do desempenho do sistema de resfriamento das torres, reduzindo-se este *approach*. Com a redução do *setpoint* para 20°C pode-se observar o resultado positivo do *approach* dos horários das 10 às 17:00 horas, praticamente durante todo o dia.

Outra forma de observar este ganho é mostrado na Figura 50. Nos quatro primeiros dias e os valores simulados do *approach* para o dia B considerando o *setpoint* simulado de 20°C .

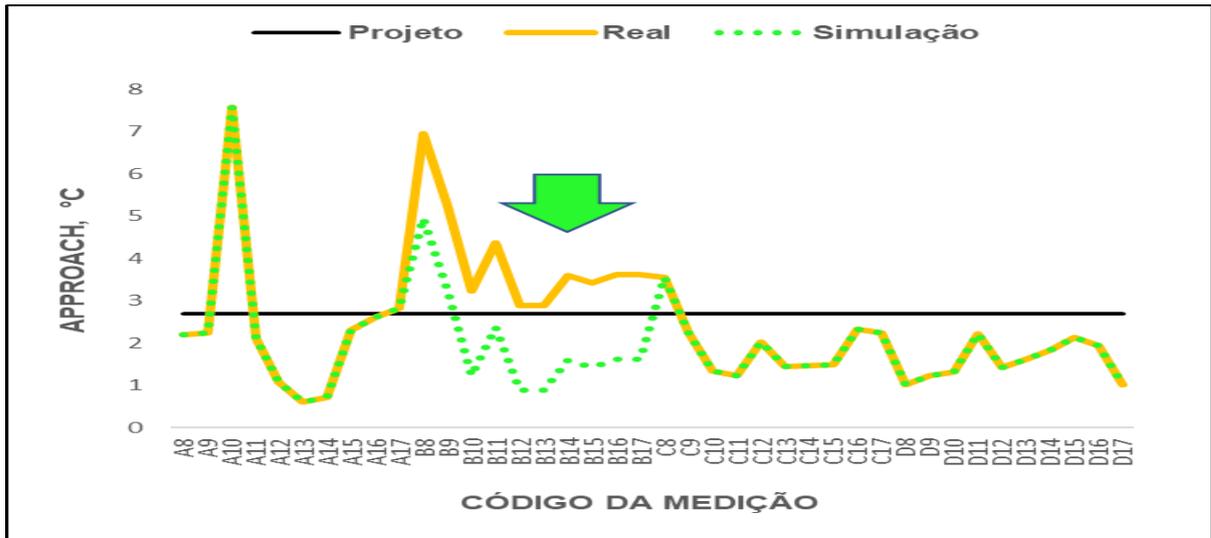


Figura 50 - Valores de *approach* experimentais dos quatro primeiros dias comparado com os valores do dia B com a simulação caso o SP fosse colocado em 20°C.

Observa-se na simulação o ganho de desempenho no indicador *approach* no dia B. Os valores ficaram abaixo da linha de projeto, caso a operação tivesse reduzido o valor de *setpoint* para 20°C, pois a temperatura do ar ambiente de bulbo úmido neste dia B ficou abaixo de 20°C, variando de 15,8 a 19,0°C, permitindo esta redução.

A Figura 51, mostra na parte de cima o valor de *setpoint* com a simulação de redução para 20°C por todo o dia B e a variação da temperatura do ar ambiente de bulbo úmido na entrada das torres. Já na parte de baixo da mesma figura, mostra a variação do *approach* do experimento com a simulação dos novos valores de *approach* do dia B e com o valor de *approach* de projeto.

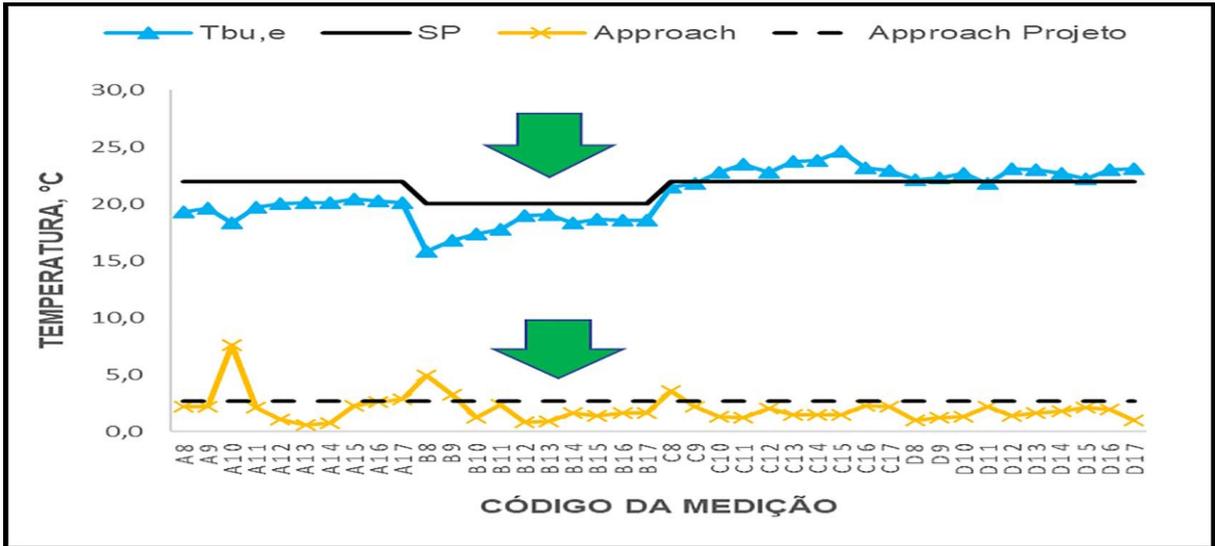


Figura 51 - Valores de Tbu,e e do SP com a simulação para 20°C no dia B na parte de cima e valores da simulação do dia B de *approach* e de projeto, que é 2,7°C, na parte de baixo.

Percebe-se, com a simulação teórica do dia B, que o valor do SP se aproximou do Tbu,e obtendo-se com isso um *approach* abaixo do valor de projeto, o que indica alto desempenho do sistema neste dia. A Figura 46 mostra como foi na realidade este dia B.

A Figura 52, mostra a variação do rendimento térmico do dia B para os valores simulados de SP de 20, 20,5, 21, e 21,5°C comparado com o rendimento térmico real e o de projeto, que é de 68,7%.

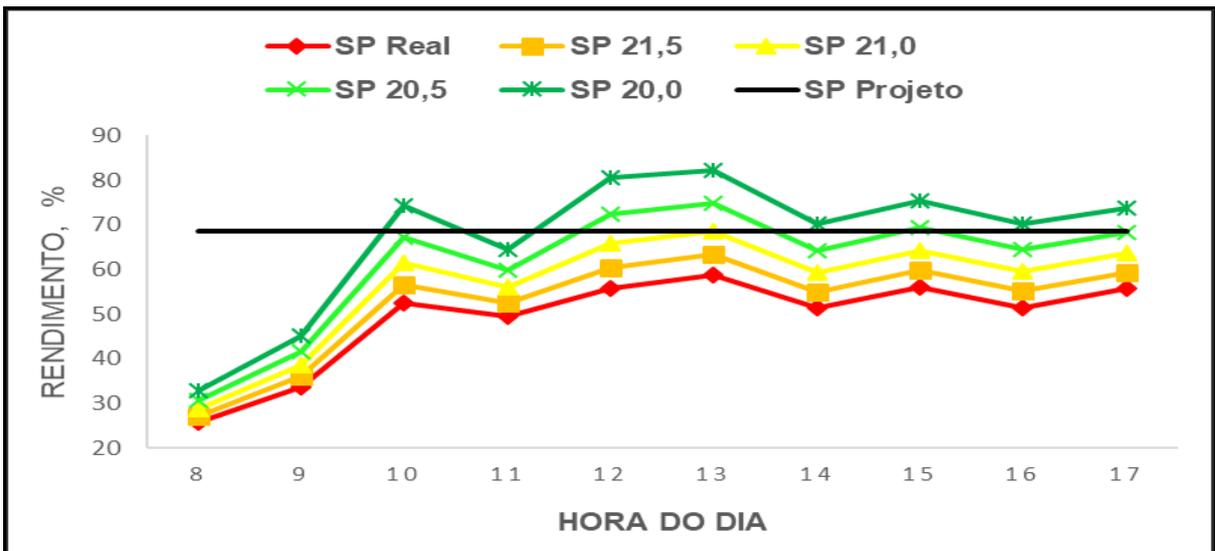


Figura 52 - Valores de rendimentos térmicos do dia B com as simulações de redução do SP de 22°C para 21,5°C, 21°C, 20,5°C e 20°C comparando com o rendimento real e o de projeto.

A partir dos resultados das simulações, foi mostrado que as condições ambientais do dia B, uma vez que o SP foi reduzido para se aproximar da temperatura de $T_{bu,e}$, ocorreu o aumento do desempenho do sistema de resfriamento das torres, aumentando o indicador do rendimento térmico. Com a redução do SP para 20°C , pode-se observar a superação do valor de projeto nos horários às 10:00 horas e das 12:00 às 17:00 horas, praticamente durante todo o dia do experimento.

Outra forma de observar o ganho de desempenho térmico é mostrado na Figura 53, onde estão os valores experimentais do sistema nos quatro primeiros dias e os valores simulados do rendimento térmico para o dia B, considerando o SP simulado de 20°C .

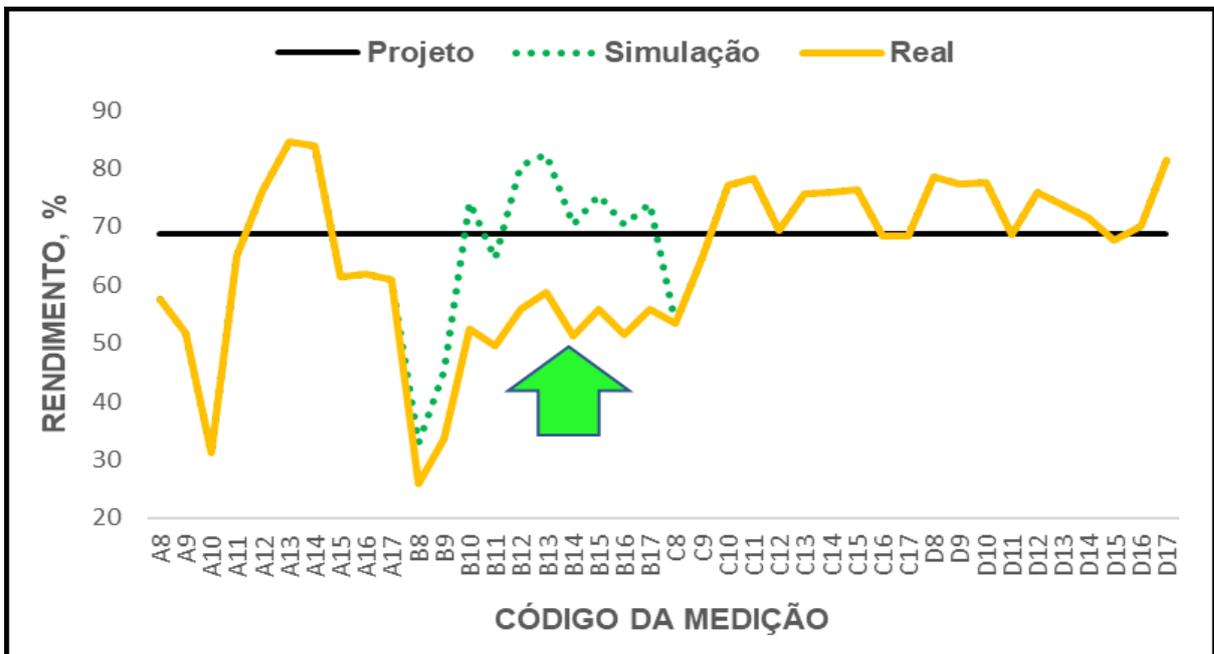


Figura 53 - Valores de rendimento térmico experimentais dos quatro primeiros dias comparado com a simulação dos valores do dia B caso o SP fosse colocado em 20°C .

É possível observar na simulação o ganho de desempenho no indicador rendimento térmico no dia B, caso a operação tivesse alterado o valor de SP para 20°C pois a temperatura do $T_{bu,e}$, neste dia B, ficou abaixo deste valor, permitindo esta redução, variando de $15,8$ a $19,0^{\circ}\text{C}$. Apenas os valores B8, B9 e B11 ficaram abaixo do valor de projeto, nos demais sete horários ficaram acima.

Devido ao exposto acima, as coletas de dados continuaram em outros dias em busca de um dia em que a temperatura de $T_{bu,e}$ estivesse abaixo de 22°C , e

também que fosse permitido pela operação mudar de forma real, no sistema automatizado, o valor do SP de 22°C para 20°C por um dia inteiro.

Então, após as coletas dos dias E e F, foi permitido pela operação do sistema, para este experimento, no dia G, efetuar esta mudança real de SP das 9:00 até às 17:00 horas para analisar o desempenho do sistema de resfriamento das torres.

Para obter o melhor panorama, foi continuado as coletas nos dias H, I e J, porém com o valor de SP voltando aos 22°C.

A Figura 54 mostra os valores de SP e as Tbu,e nas medições dos códigos E8 até J17.

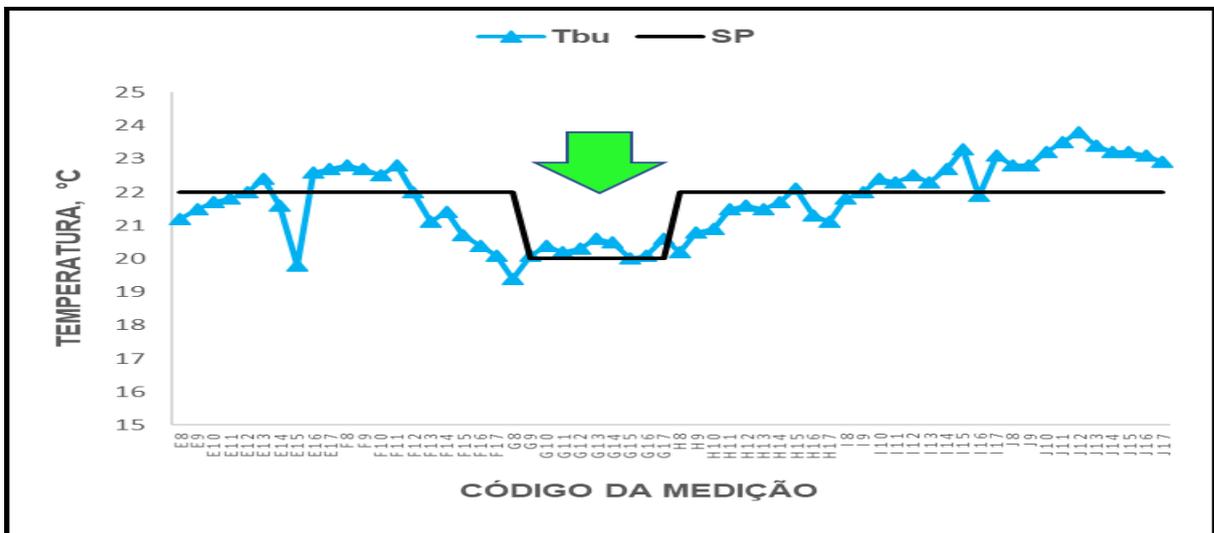


Figura 54 - Valores de SP e de Tbu,e no período dos dias E8 até J17.

Pode-se observar a variação do Tbu,e e o valor de SP no dia G de 22°C para 20°C após a solicitação para este experimento. O SP ficou abaixo do Tbu,e durante o período de coleta por todo o dia G.

O comportamento do indicador *approach* nos códigos E8 até J17, juntamente com a alteração do *setpoint* de 22 para 20°C do dia G, é mostrado na Figura 55 os dias E, F, G, H, I e J, comparado com o *approach* de projeto que é 2,7°C.

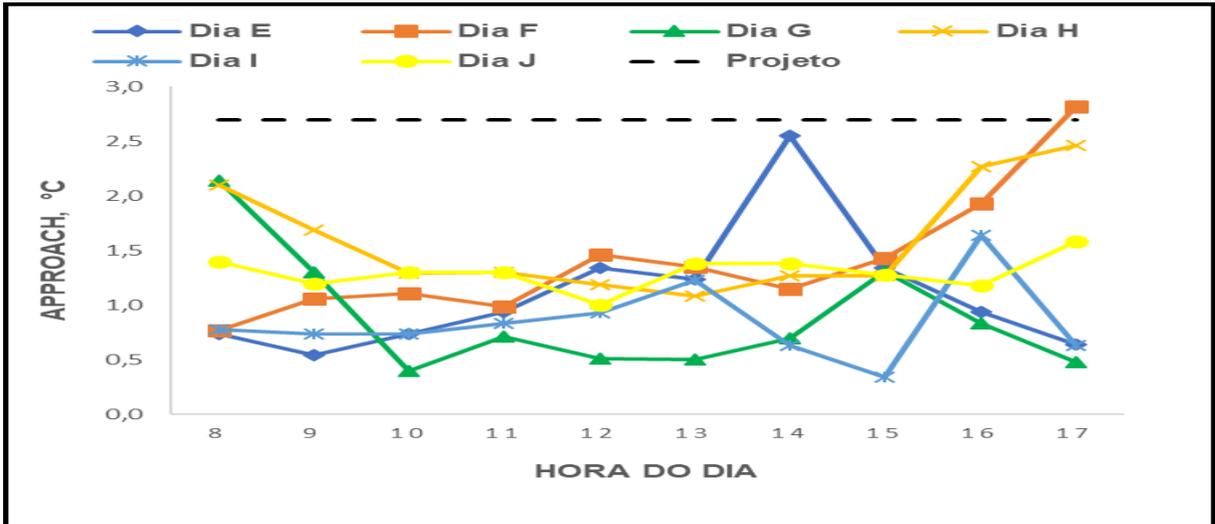


Figura 55 - Valores do *approach* horário dos dias E, F, G, H, I e J das 8:00 às 17:00 horas comparado com o valor de *approach* de projeto.

Observa-se que por todos os dias e horários os resultados ficaram abaixo do valor de projeto do *approach* que é 2,7°C, o que indica um ótimo desempenho do sistema de resfriamento das torres nesse período experimental, principalmente o dia G, que teve os melhores e menores valores de *approach*, que foi justamente o dia solicitado a operação do sistema a reduzir de forma real o seu valor de SP de 22°C para 20°C.

A Figura 56 mostra os valores de Tbu,e e SP, inclusive com a mudança real do dia G de 22°C para 20°C comparada com os valores reais de *approach* e de projeto no período dos códigos E8 até J17.

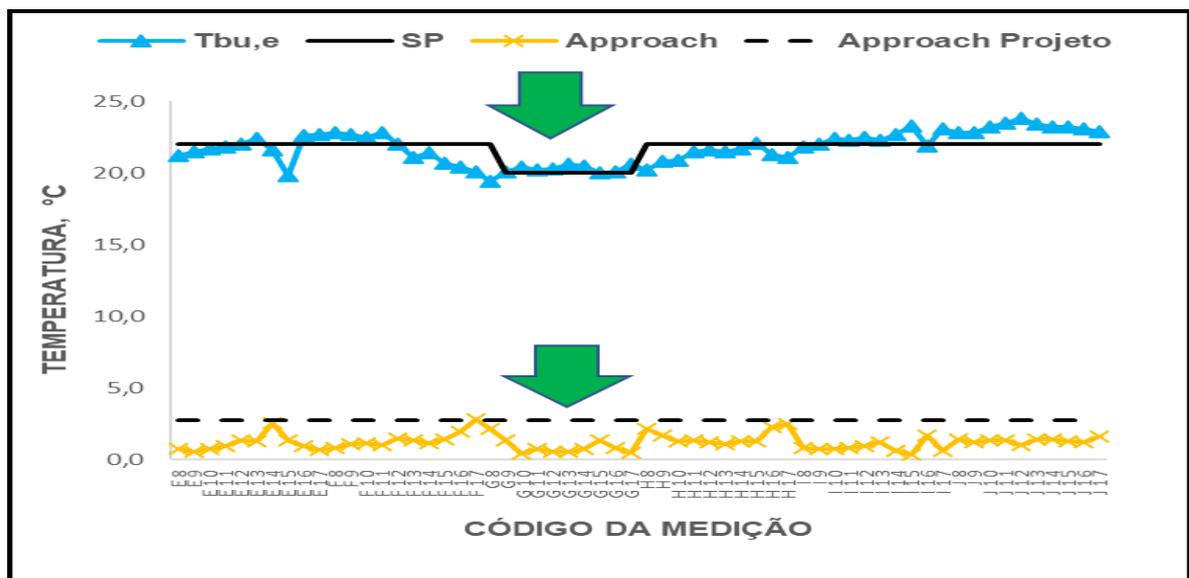


Figura 56 - Valores de SP e Tbu,e comparado com os valores do *approach* real e de projeto nos dias E, F, G, H, I e J.

É possível observar que com a mudança do SP do dia G, o valor aproximou-se do $T_{bu,e}$ obtendo-se com isso os valores de *approach* abaixo do valor de projeto, o que indica alto desempenho do sistema neste dia, variando de 0,4°C a 2,1°C, valores excelentes para este sistema de resfriamento indicando que a alteração do SP foi acertada e trouxe aumento do desempenho estável conforme este indicador.

A Figura 57 mostra os valores de $T_{bu,e}$ e SP, inclusive com a mudança real do dia G de 22°C para 20°C e o comportamento do indicador de rendimento térmico dos códigos de medição E8 até J17 comparado com o rendimento térmico de projeto que é de 68,7%.

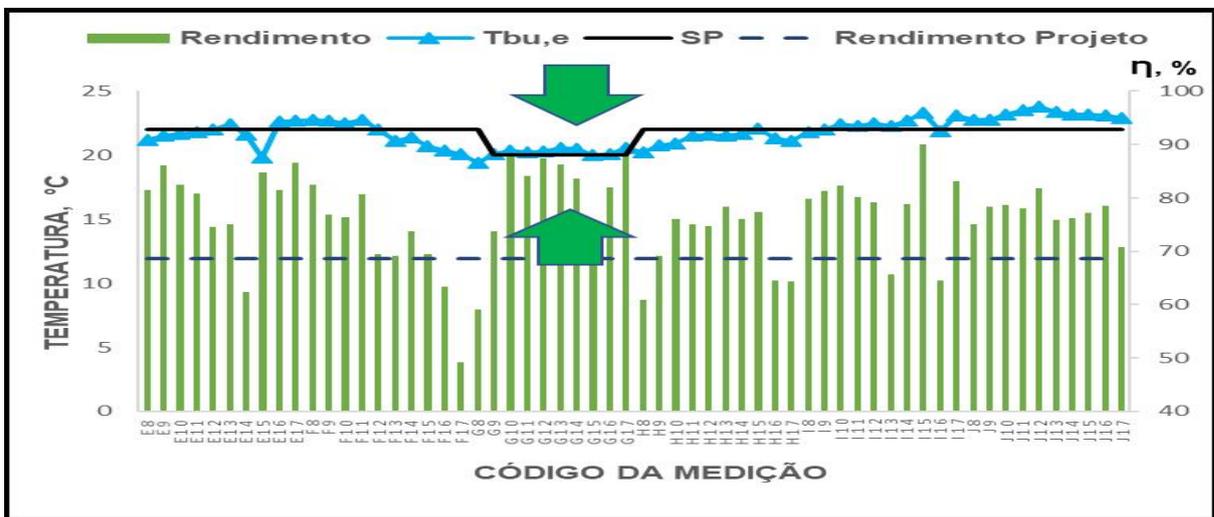


Figura 57 - Valores de SP e $T_{bu,e}$ comparado com os valores do rendimento térmico real e de projeto dos códigos E8 até J17.

Observa-se especificamente que o excelente e melhor desempenho de todo o dia G, esteve acima da linha de projeto, que é 68,7%. Este foi o dia que a mudança de SP de 22°C para 20°C foi solicitada para realização deste experimento. Este indicador mostra que a decisão de alterar para baixo o SP foi acertado. Apenas a medição G8 ficou abaixo do projeto, 59,2% nos demais horários deste dia ficaram acima, entre 70,2 a 88,7%. Com o intuito de verificar o que ocorreria com o desempenho, caso não fosse alterado o SP de 22°C para 20°C, foi feita mais uma simulação teórica, por todo o dia G. A Figura 58 mostra a comparação dos rendimentos térmicos do experimento com uma simulação teórica do dia G. Caso a solicitação de redução do SP para 20°C não fosse atendida, o valor do SP ficaria mantido fixo em 22°C nos dias E, F, G, H, I e J.

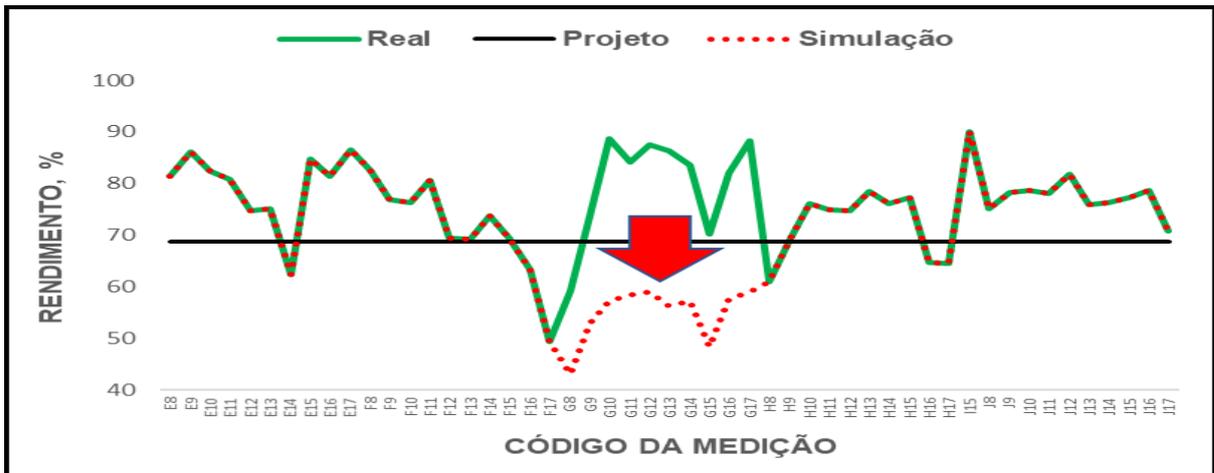


Figura 58 - Valores do rendimento térmico do experimento do dia E até dia J comparado com a simulação teórica caso não houvesse a alteração do SP para 20°C no dia G.

Conforme a simulação teórica dos valores de rendimento térmico sem a mudança solicitada para o dia G, é possível comparar graficamente, a redução significativa do rendimento térmico do sistema de resfriamento das torres caso não fosse permitida a redução do SP de 22°C para 20°C neste dia. Eles ficariam, teoricamente, entre 43,1 a 59,0%, bem abaixo do valor de projeto de rendimento térmico.

Conforme informação do fabricante *Daikin* dos *chillers* centrífugos deste experimento, a cada redução de 0,5°C na temperatura de entrada de água no trocador de calor desses modelos de *chillers*, possibilitaria uma redução no consumo de energia elétrica em 2%. Então, como reduziu-se 2°C na saída de água das torres, possibilitou-se uma redução de 6% no consumo de energia elétrica dos *chillers*. Um *chiller* centrífugo desta instalação tem potência de 292 kW, então no dia G que teve este cenário, a redução do consumo no período de 10 horas foi, supostamente, de 175 kWh.

Após a simulação anterior, foi efetuada mais coletas de dados, agora do dia K até dia X, isto é, mais 12 dias, com o objetivo de continuar o experimento e verificar o comportamento do desempenho do sistema. A Figura 59, mostra o comportamento dos indicadores de desempenho *approach* e rendimento térmico dos códigos K8 até X17, comparado com os valores de projeto.

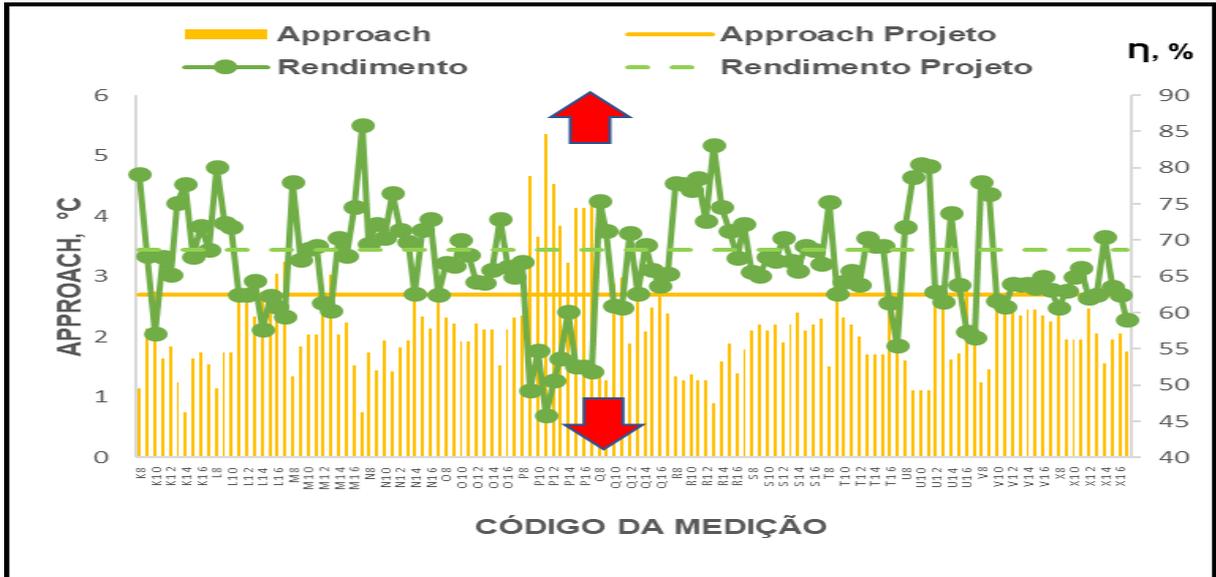


Figura 59 - Valores de *approach* e de rendimento térmico do experimento dos códigos K8 até X17 comparado com os valores de projeto.

O dia P teve, tanto o *approach* como o rendimento térmico, os piores desempenhos por todo o dia, das 8:00 às 17:00 horas, comparando entre os dias dos códigos K8 a X17. *Approach* variando de 3,2 a 5,4°C e o rendimento variando de 49,3 a 67,0%. Em nenhum horário deste dia P os indicadores superaram os valores de projeto. A Figura 60 mostra o comportamento horário das temperaturas de Tbu,e e SP e da Tf, nos dias dos códigos K8 até X17, para entender a causa do baixo desempenho do dia P.

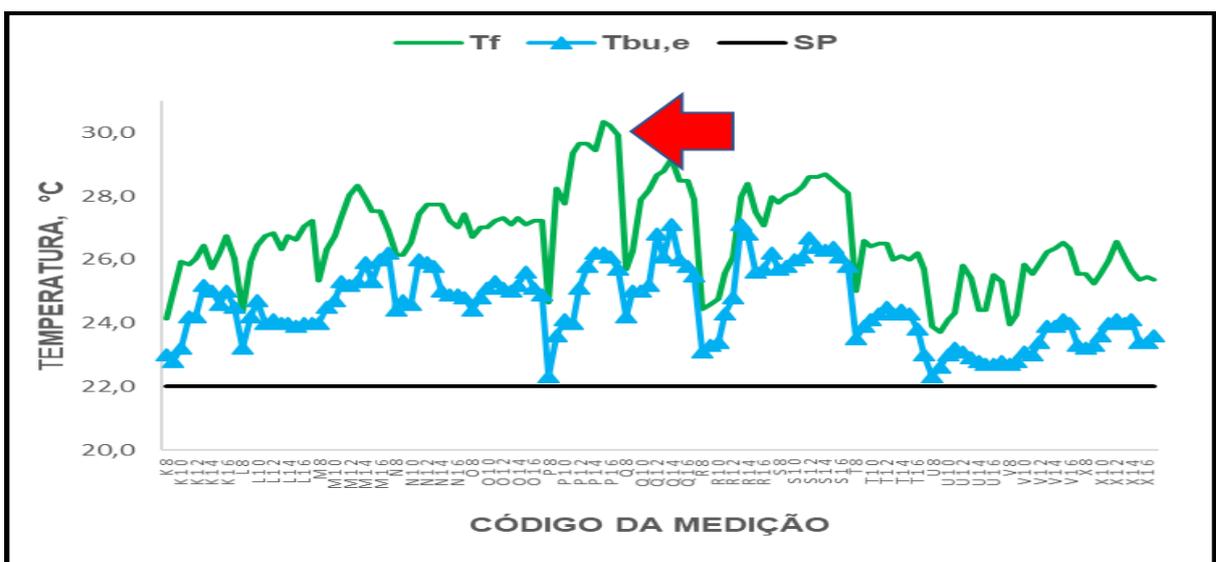
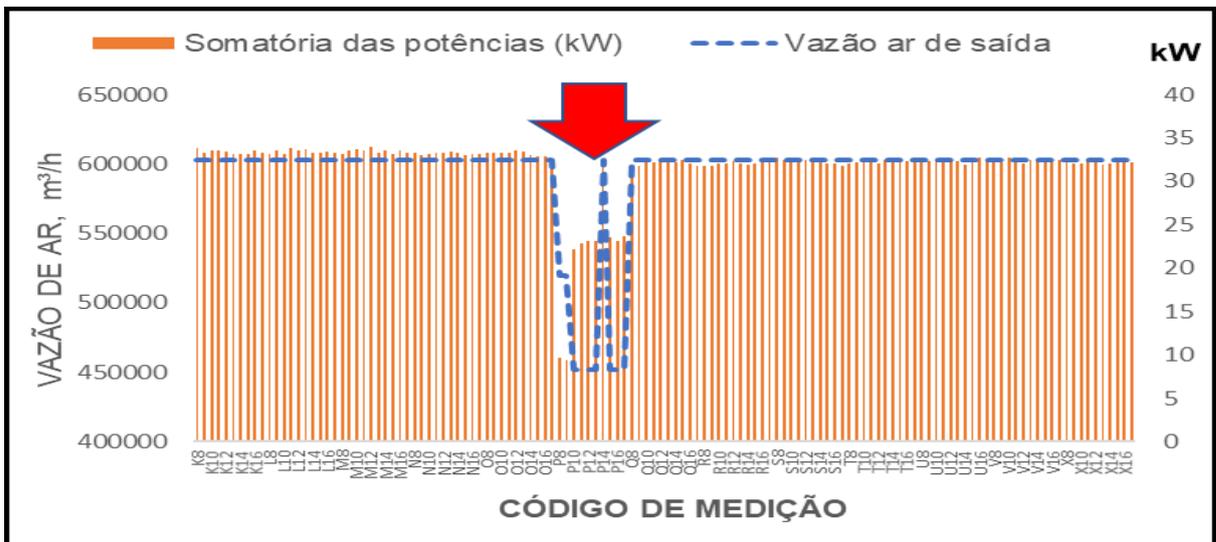


Figura 60 - Valores de Tf, Tbu,e, e SP no período de K8 a X17. Dia P ocorreu as maiores temperaturas de Tf.

Como pode ser observado em nenhuma medição a T_{bu} , e esteve abaixo do valor da linha do SP, indicando que o valor fixo de 22°C não prejudicou em nenhum momento o rendimento térmico das torres, fato ocorrido e demonstrado no dia B. É possível verificar também que as temperaturas mais quentes de T_f ocorreram no dia P, entre $24,7^{\circ}\text{C}$ a $30,3^{\circ}\text{C}$ e os maiores distanciamento das T_{bu} , e significa que o sistema neste dia não conseguiu esfriar eficazmente a água de saída das torres e não foi devido ao SP estar a 22°C .

Em busca da causa do baixo desempenho do dia P, a Figura 61 mostra a vazão de ar de saída das torres conforme Equação 5, bem como a somatória das potências dos ventiladores dessas torres, em (kW), no período dos códigos de K8 a X17.



Na figura 62 é apresentado a relação vazão de ar de saída das torres com o seu principal indicador de desempenho, o *approach* no período do código K8 até X17.

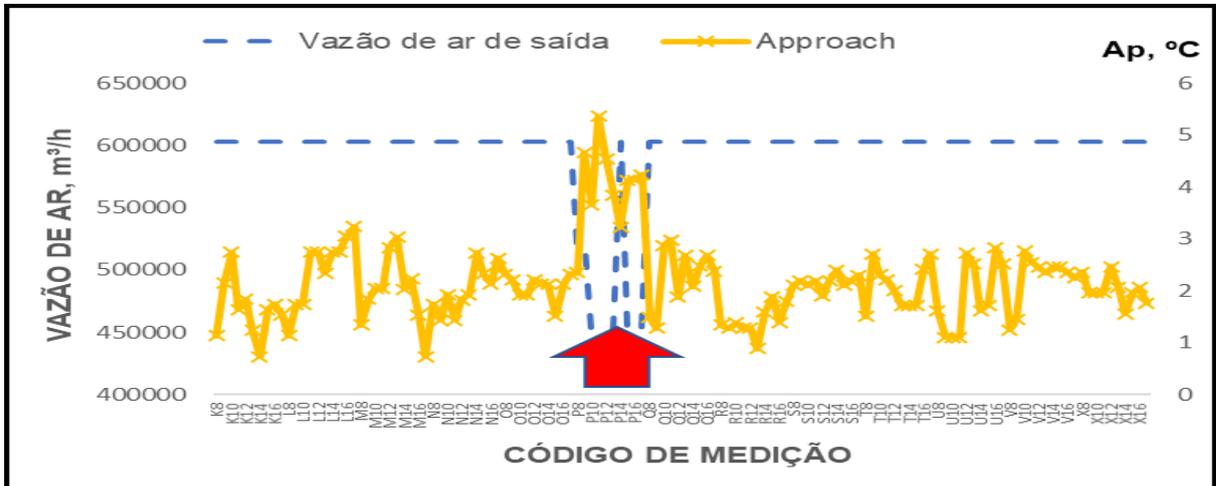


Figura 62 - Valores de vazão de ar de saída das torres e valores de *approach* no período dos códigos K8 a X17.

É possível comprovar a relação entre a vazão de ar com o *approach* no dia P. Esse dia apresenta 25% menor vazão de ar de saída das torres e o pior *approach* de todo o período, variando de 3,2 a 5,4°C, acima do valor de projeto que 2,7°C.

Na Figura 63 mostra o número de torres em funcionamento durante todo o dia P e o comportamento do rendimento térmico comparado com o do projeto.

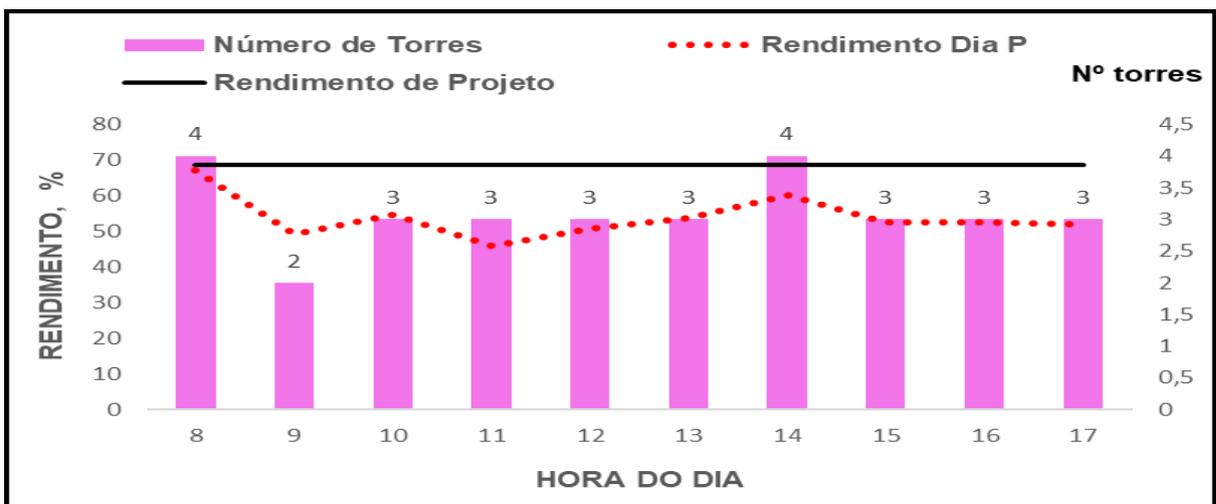


Figura 63 - Número de torres em funcionamento comparado com o rendimento térmico real e de projeto do dia P.

Nenhum dos horários o rendimento térmico alcançou a linha do rendimento de projeto. Apenas às 8:00 horas e às 14:00 horas quando estavam as quatro torres em funcionamento o desempenho do indicador rendimento foi um pouco melhor, P8 com 67,0% e P14 com 60,1%. Nos demais horários onde estava em operação menos do que quatro torres o rendimento ficou bem abaixo do valor de projeto que é 68,7%, oscilaram entre 45,9 a 67,0%. Observa-se que a linha de rendimento térmico acompanha o número de torres em funcionamento.

Após a verificação sobre o motivo de haver torres desligadas foi constatado a paralização devido a realização de manutenção preventiva neste dia P, fazendo com que as torres fossem desligadas para que a equipe de manutenção executasse a preventiva e preditiva no seu interior e não pelo valor de SP.

A vazão de água neste circuito de condensação entre torres e trocadores de calor casco tubo de condensação dos dois *chillers* tem um total de 531,8 m³/h. As duas bombas centrifugas puxam a água fria das bacias das torres e a envia para os trocadores de calor dos *chillers*, após a saída desses trocadores elas retornam para a parte de cima das torres onde serão esfriadas novamente.

A Figura 64 mostra o comportamento do calor cedido pela água ($q_{\text{água}}$) conforme Equação 4, comparado com o de projeto para duas bombas e duas torres em funcionamento de todo o experimento, de A8 a X17.

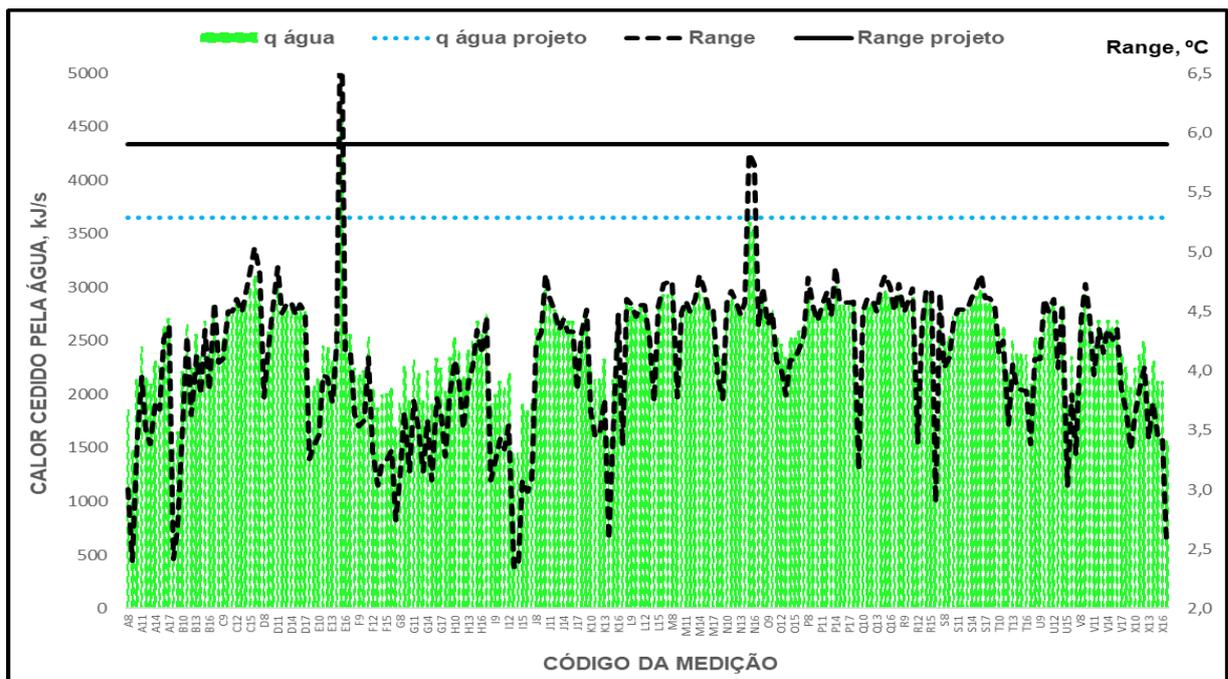


Figura 64 - Calor cedido pela água do experimento comparada com a de projeto e o range do experimento comparado com o de projeto.

A Figura 64 mostra também a comparação do range de projeto com o range do experimento conforme Equação 2 durante o período do experimento, isto é, dos 23 dias, do código A8 a X17.

Pode se observar que em nenhum momento o q água do experimento foi igual ou maior do que a de projeto no período do experimento, que é de 3.649 kJ/s. Quanto ao range de projeto que é de 5,9°C, apenas na medição de código E15 ela foi superada e chegou a 7,4°C e em outros dois casos, que chegou próximo do range de projeto, foi nos códigos N15 e N16, 5,8°C e 5,7 °C.

Finalizando os resultados, na Figura 65 apresenta o comportamento do indicador de desempenho *approach* comparada com o de projeto e a $T_{bu,e}$ com SP do sistema de resfriamento das torres por todo o período do experimento, isto é, os 23 dias, do código A8 a X17.

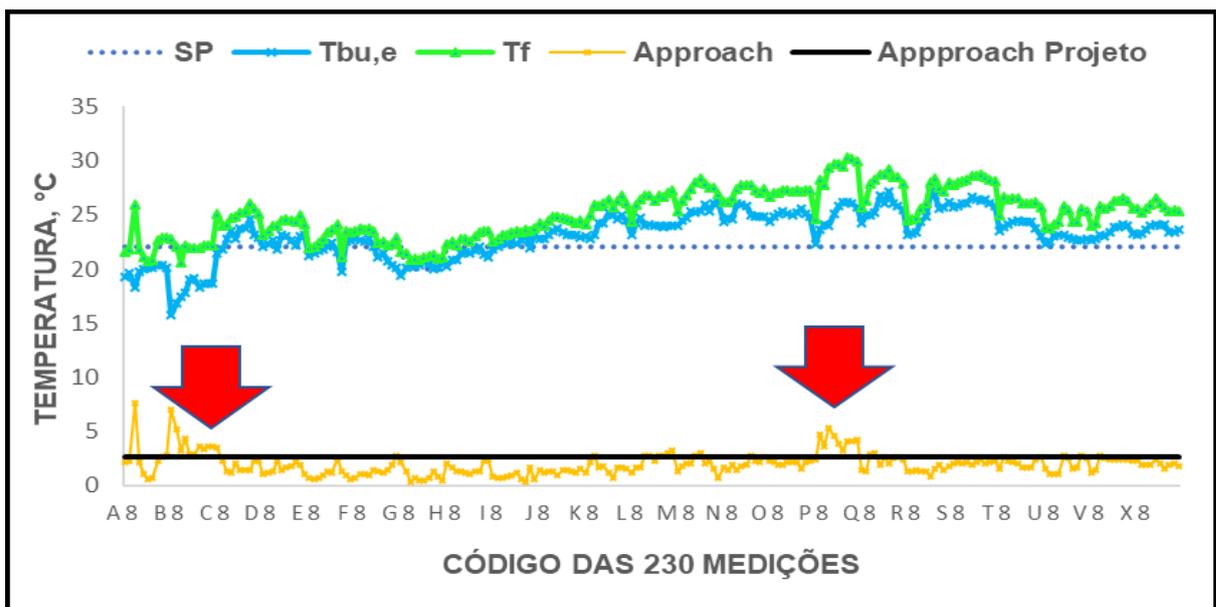


Figura 65 - *Approach* de todo o experimento comparado com o de projeto e a T_f , $T_{bu,e}$ comparadas com o SP dos códigos A8 a X17.

Pode-se observar que apenas os dias em que o *approach* ficou e permaneceu acima da linha de projeto foi nos dias dos códigos B e P. No código B foi devido a não redução do valor do SP pela operação e no dia do código P foi quando houve manutenção preventiva nas torres em um dia de demanda alta de carga térmica nos ambientes do complexo administrativo, isto é, ocupação das 2000 pessoas em dias de semana.

Foi orientado a operação de qual valor de SP deve ser colocado no

supervisório, deve ser 1°C acima da temperatura T_{bu} , e medida na área aonde as torres estão instaladas e não mais deixar fixo em 22°C como vinha ocorrendo até o final deste experimento.

Outro ponto alertado a equipe de operação é de confirmar se a frequência do motor do ventilador está sendo transmitida para as pás. Para isso deve comparar o valor mostrado na tela do supervisório com a velocidade do ar de entrada pelas venezianas das torres. Com o instrumento Anemômetro TAD500 é possível verificar a velocidade.

Também é possível detectar falha no sistema de transmissão por correias do ventilador comparando a frequência do motor com a sua corrente elétrica. Corrente baixa significa que as correias estão frouxas ou partidas.

No período analisado houve quebra e afrouxamento das correias impedindo com isso a rotação correta dos ventiladores das torres, nesses dias não houve coleta de dados para este experimento.

A equipe de manutenção foi orientada sobre a importância de manter a correta aplicação dos produtos químicos e das purgas das bacias das torres para evitar a incrustação nas colmeias das torres, nos tubos de cobre do trocador de calor casco tubo dos *chillers* e em todas as tubulações e acessórios de passagem da água para evitar a diminuição da troca térmica e afetar o desempenho do sistema.

Foi observado também durante o experimento que não há nenhuma incrustação nas tubulações e no enchimento das torres devido a correta aplicação de produtos químicos e a correta drenagem de purga das bacias das torres.

A Figura 66 mostra o diagrama temperatura-entropia com as variações típicas de temperaturas reais num certo momento do experimento.

A Figura 67 mostra as causas do alto *approach*.

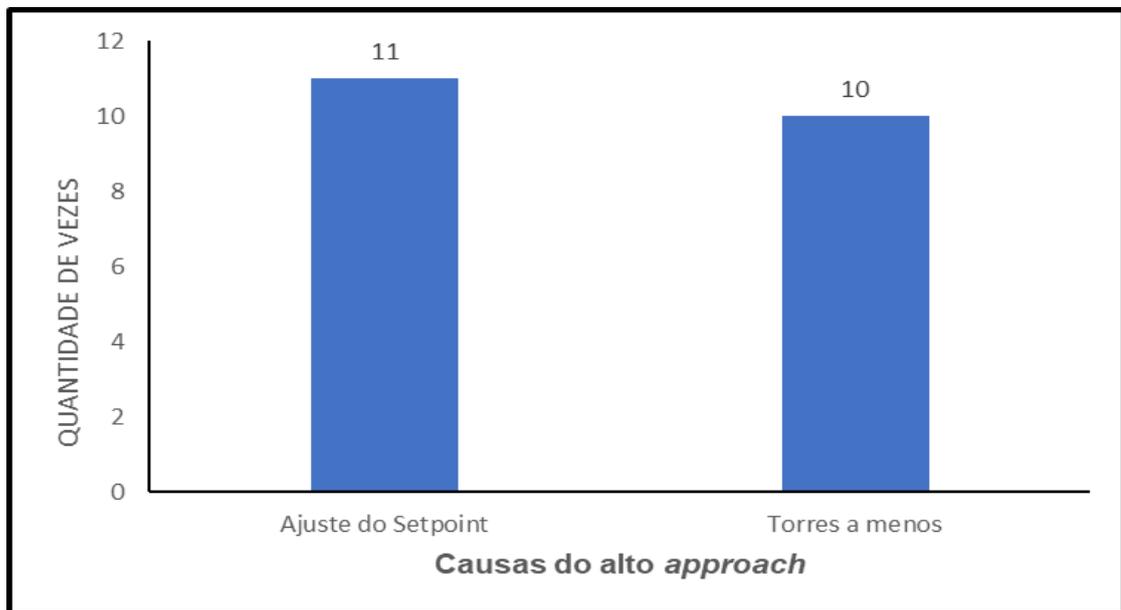


Figura 6 - Causas do alto *approach*.

Dos 30 (trinta) conjunto de medições experimentais que tanto o *approach* como o rendimento térmico estiveram fora dos parâmetros de projeto; 11 conjuntos de medições, a causa foi o ajuste do SP que não acompanhou a variação da temperatura T_{bu} ; 10 conjuntos de medição foi devido ao desligamento inesperado ou necessário de alguma torre para manutenção preventiva, limpeza ou preditiva. No dia P e em outras nove vezes não foi possível precisar a causa.

5. CONCLUSÕES

Os testes experimentais ocorreram em condições normais de funcionamento das torres de resfriamento e com baixa variação no fluxo de ar para observar principalmente a influência das condições ambientais e operacionais.

Os parâmetros operacionais monitorados simultaneamente como a $T_{bu,e}$ e a UR disponível no ambiente das torres são itens importantes para melhorar o desempenho do sistema de refrigeração da água de condensação.

As torres de resfriamento existentes operam em regime contínuo, e os operadores não estão considerando a força térmica motriz da $T_{bu,e}$, bem como o desempenho das torres na Central de água gelada.

Devido ao mau ajuste do SP para as condições climáticas do dia B, os indicadores de desempenho foram ruins, com o *approach* variando de 2,8 a 7,0 °C e o rendimento térmico de 25,8 a 55,8%. Esses indicadores de desempenho foram os piores quando comparados aos indicadores de desempenho dos primeiros quatro dias dos testes experimentais.

Para o dia B dos testes experimentais, foi calculado teoricamente que, se o SP fosse colocado em 20°C, melhoraria muito o desempenho do sistema. Isso pode ser possível de ser alcançado devido ao $T_{bu,e}$ estar abaixo de 20 °C, oscilando entre 15,8 e 19,0 °C.

Devido as condições climáticas favoráveis no dia G, a redução real do SP de 22 para 20 °C foi testada e foi obtido um bom desempenho das torres de resfriamento. O *approach* variou de 0,4 a 2,1 °C e o rendimento térmico variou de 70,2 a 88,7%.

Além disso, os parâmetros de desempenho das torres de resfriamento *approach*, range e rendimento térmico no dia G foram melhores quando comparados com os parâmetros teoricamente simulados de desempenho térmico do dia G para uma simulação configurando SP igual a 22 °C.

O desempenho térmico das torres de resfriamento no dia P detectou uma forte diminuição. Após verificar os parâmetros de monitoramento, foram encontrados alguns ventiladores desligados. Isto foi devido ao desligamento inesperado para a execução de manutenção preventiva e corretiva.

O estudo permitiu comprovar a necessidade da instalação de um sensor de bulbo úmido para monitoramento em torres de resfriamento.

Foi constatado que a operação das torres com controle fixo do SP da T_f ,

produz valores de approach maiores quando se afasta para cima do valor de $T_{bu,e}$.

O monitoramento das torres permitirá detectar a execução de manutenções preventivas não informadas no controle operacional, realizadas em horários de alta demanda de carga térmica do complexo. Isso pode servir como subsídio para uma programação e planejamento mais eficaz.

Esse monitoramento dará subsídios para implementar um sistema de controle automático por meio de ajustes do SP que relacione com a $T_{bu,e}$ disponível. Com isso, conforme variar a $T_{bu,e}$ na área das torres o valor de SP também irá variar para que o controle de funcionamento do número de torres e da frequência dos ventiladores seja automático e com isso tirando o máximo proveito da $T_{bu,e}$.

Apesar da alta taxa de automação dessa Central de Água Gelada e, especificamente dos sistemas de refrigeração de água de condensação, o controle SP relacionado ao valor da $T_{bu,e}$ ainda não está automatizado.

5.1. Trabalhos futuros

- 5.1.1. Analisar o desempenho das quatro torres no período noturno;
- 5.1.2. Analisar o desempenho individual de cada uma das quatro torres;
- 5.1.3. Estudar as potências elétricas das quatro torres e verificar a amplitude da diferença entre elas e a suas causas;
- 5.1.4. Comparação do consumo elétrico dos *chillers* com respeito a variação de temperatura de entrada da água (T_f) no trocador de calor casco tubo de condensação;
- 5.1.5. Verificar a perda de água por evaporação e por purga nas quatro torres de resfriamento e comparar com o projetado;
- 5.1.6. Procurar o valor ideal de SP para esta instalação levando em consideração a eficiência energética de todos os aspectos da CAG.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alahmer,A.; Alsaqoor,S. **Simulation and optimization of multi-split variable**. Ain Shams Engineering Journal. v.9. December. pp. 1705-1715. 2018;
- Alpina Equipamentos. Disponível em:<<http://www.alpinaequipamentos.com.br/en/pdf/catalogo/catalogo-torre-de-resfriamento-ppu-rs-ga-vercol.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2019;
- API. Disponível em:< <http://www.apiheattransfer.com/Product Search> >. Acesso em: 14 ago. 2019;
- Bertini. F. **Psicrometria**. Disponível em:< <https://pt.slideshare.net/francisco50/psicrometria-14911334>. Acesso em: 30 ago. 2019;
- Borgnakke,C.; Sonntag,R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8.ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo.SP. pp.479. 2016;
- Cengel,Y.A.; Boles, M.A. **Thermodynamics: An engineering approach**. 8.ed. MacGraw-Hill Education. 2015;
- Cheng, Y.; Niu, J.; Gao, N. **Stratified air distribution systems in a large lecture theatre: A numerical method to optimize thermal comfort and maximize energy saving**. Energy and Buildings. v. 55. p. 515–525. dez. 2012;
- CPEA. **Diagnóstico ambiental - Capítulo 5**. Disponível em: <<http://www.santos.sp.gov.br/static/fileswww/conteudo/1410_cap_05_1_e_2_diagnostico_mf_30jun14.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2019.
- Cristovão,E.A.B. **Bomba hidráulica**. Disponível em:<<https://pt.slideshare.net/evanildaebocristovao/bomba-hidraulica-70940750>. Acesso em: 27 set. 2019;
- Daikin McQuay International. **Manual de Instalação e Manutenção - Resfriador de Líquido com Mancal Magnético Magnitude Modelo WME**. p.12. 2012. Disponível em:<<https://www.daikin.com.br/static/uploads/conteudos/downloads/170509070612000000.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2019;
- Dunaiski,R. **Simulação numérica do escoamento monofásico em uma bomba centrífuga radial**. 100f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba:PR. 2015;
- El-Wakil, M.M. **Power Plant Technology**. McGraw-Hill, New York .1988;
- Embrapa. **Banco de dados climáticos do Brasil**. Disponível em:<<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/bdclima/balanco/resultados/sp/450/balanco.html>>. Acesso em: 14 jul.2019.
- Evans Jr., F. L. **Equipament desing handbook for refineries and chemical plants**. vol.2, Houston: Gulf Publishing. 1980;

Ferreira, A.B.H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Nova Fronteira, 2007;

Gomes Medeiros, PS & Formiga Barbosa, CR. **Análise do Coeficiente de Desempenho em um Refrigerante Doméstico Operando com o R-410A em Regime Transiente**. HOLOS , 25 (4), 62-74. 2009;

Hamongroup. Disponível em:<<https://www.hamon.com/>>. Acesso em: 14 ago. 2019;

Huang, S., Zuo, W., & Sohn, M. D. **Improved cooling tower control of legacy chiller plants by optimizing the condenser water set point**. Building and Environment, 111, 33-46. 2017;

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

Jadhav.S.S.; Mali,K.V. **Evaluation of a refrigerant R410A as substitute for R22 in window air-conditioner**. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). Sep. pp. 23. 2015. Disponível em: <www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/RDME.../RDME-34.pdf>. Acesso em: 11.ago. 2018;

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: 22 dez. 2018;

KSA Aktiengesellschaft. **Manual técnico**. 2012. Disponível em<www.ksb.com.br > php > produtos > download>. Acesso em: 18 fev. 2019.

Kumar, M.V.H.S. **Performance analysis of cooling tower**. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). v. 38. n. 9. August. ISSN: 2231-5381. 2016;

Lemouari, M., & Boumaza, M. **Experimental investigation of the performance characteristics of a counterflow wet cooling tower**. International Journal of Thermal Sciences, 49(10), 2049-2056. 2010;

Lucas,M.; Martínez,P.J.; Ruiz,J.; Kaiser,A.S.; Viedma,A. **On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition**. International Journal of Heat and Mass Transfer. pp.594-604. 2009;

Medeiros,P.S.G.; Barbosa,C.R.F. **Análise do coeficiente de performance de um chiller doméstico operando com o R-401A em regime transiente**. Revista Holos, ano 25. v. 4. pp.63. 2009;

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

Ng, E.; Cheng, V. **Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong**.

Energy and Buildings. v. 55. p. 51–65. dez. 2012;

Ning, T., Chong, D., Jia, M., Wang, J., & Yan, J. **Experimental investigation on the performance of wet cooling towers with defects in power plants.** Applied Thermal Engineering, 78, 228-235. 2015;

Oliveira, V.F. **Diagnóstico de eficiência energética de uma torre de resfriamento de água da Arcelormittal Inox Brasil.** 110f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte:MG. 2010;

Rangel, K. M., Delclos, G., Emery, R., & Symanski, E. **Assessing maintenance of evaporative cooling systems in legionellosis outbreaks.** Journal of occupational and environmental hygiene, 8(4), 249-265. 2011;

Rahmati, M., Alavi, S. R., & Tavakoli, M. R. **Investigation of heat transfer in mechanical draft wet cooling towers using infrared thermal images: an experimental study.** International Journal of Refrigeration, 88, 229-238. 2018;

Revel, G. M.; Arnesano, M. **Perception of the thermal environment in sports facilities through subjective approach.** Building and Environment. v. 77. p. 12–19. jul. 2014;

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 Termoelétricas: 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;

Sharqawy, M.H.; Zubair, S.M.; Husain, I.S.; Lienhard V, J.H. **Thermal performance evaluation of seawater cooling towers.** Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. November 11-17. Denver. Colorado. USA. 2011;

Silveira, Paulo Rogério da; Santos, Winderson Eugenio dos. **Automação e controle discreto.** 8 ed. Editora Erica. São Paulo:SP. 2002;

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

Termoparts Equipamentos Industriais. **Torre de resfriamento de água - Noções gerais.** p.13. 2019. Disponível em:<<https://termoparts.com.br/manuais/manualtorre.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2019;

Varrasi, J. **Global Cooling: The history of air conditioning.** ASME- American Society of Mechanical Engineers. New York: NY. 2014. Disponível em:< <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/technology-and-society/globalcooling-the-history-of-air-conditioning>>. Acesso em: 07. set. 2018;

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% 20 En%20em%20Sist%20de%20Refrig%20Ind%20e%20Com-Eletobras-05.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Efic%20En%20em%20Sist%20de%20Refrig%20Ind%20e%20Com-Eletobras-05.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2019;

Wang, L. **Modeling and simulation of HVAC faulty operations and performance degradation due to maintenance issues**. ASim 2012 - 1st Asia conference of International Building Performance Simulation Association. Conference Paper. LBNL-6129E. 2013;

Wang, S.K. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. 2.ed. pp.1.2;4.15. McGraw-Hill. New York, NY. ISBN 0-07-068167-8. 2001;

Wang, S., & Ma, Z. **Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review**. HVAC&R Research, 14(1), 3-32. 2008

APÉNDICE A - *Approach*

CÓDIGO MEDIÇÃO	Temperatura da água de saída das Torres, Tf (°C)	Temperatura de Bulbo úmido na entrada das Torres, Tbu,e (°C)	Approach (°C)
A8	21,5	19,3	2,2
A9	21,9	19,6	2,3
A10	25,9	18,3	7,6
A11	21,8	19,7	2,1
A12	21,1	20,0	1,1
A13	20,7	20,1	0,6
A14	20,8	20,1	0,7
A15	22,7	20,4	2,3
A16	22,9	20,3	2,6
A17	22,9	20,1	2,8
B8	22,8	15,8	7,0
B9	22,1	16,8	5,3
B10	20,6	17,4	3,2
B11	22,2	17,8	4,4
B12	21,9	19,0	2,9
B13	22,0	19,1	2,9
B14	21,9	18,3	3,6
B15	22,1	18,7	3,4
B16	22,2	18,6	3,6
B17	22,2	18,6	3,6
C8	25,1	21,5	3,6
C9	24,0	21,8	2,2
C10	24,1	22,8	1,3
C11	24,7	23,5	1,2
C12	24,8	22,8	2,0
C13	25,2	23,7	1,5
C14	25,3	23,8	1,5
C15	26,1	24,6	1,5
C16	25,5	23,2	2,3
C17	25,1	22,9	2,2
D8	23,1	22,1	1,0
D9	23,5	22,3	1,2
D10	24,0	22,7	1,3
D11	24,0	21,8	2,2
D12	24,5	23,1	1,4
D13	24,6	23,0	1,6
D14	24,5	22,7	1,8
D15	24,3	22,2	2,1
D16	24,9	23,0	1,9
D17	24,1	23,1	1,0
E8	21,9	21,2	0,7
E9	22,0	21,5	0,5
E10	22,4	21,7	0,7
E11	22,7	21,8	0,9
E12	23,3	22,0	1,3
E13	23,6	22,4	1,2
E14	24,2	21,6	2,6
E15	21,1	19,8	1,3
E16	23,5	22,6	0,9
E17	23,3	22,7	0,6

Continua

Continuação

F8	23,6	22,8	0,8
F9	23,8	22,7	1,1
F10	23,6	22,5	1,1
F11	23,8	22,8	1,0
F12	23,5	22,0	1,5
F13	22,5	21,1	1,4
F14	22,6	21,4	1,2
F15	22,1	20,7	1,4
F16	22,3	20,4	1,9
F17	22,9	20,1	2,8
G8	21,5	19,4	2,1
G9	21,4	20,1	1,3
G10	20,8	20,4	0,4
G11	20,9	20,2	0,7
G12	20,8	20,3	0,5
G13	21,1	20,6	0,5
G14	21,2	20,5	0,7
G15	21,3	20,0	1,3
G16	20,9	20,1	0,8
G17	21,1	20,6	0,5
H8	22,3	20,2	2,1
H9	22,5	20,8	1,7
H10	22,2	20,9	1,3
H11	22,8	21,5	1,3
H12	22,8	21,6	1,2
H13	22,6	21,5	1,1
H14	23,0	21,7	1,3
H15	23,4	22,1	1,3
H16	23,6	21,3	2,3
H17	23,6	21,1	2,5
I8	22,6	21,8	0,8
I9	22,7	22,0	0,7
I10	23,1	22,4	0,7
I11	23,1	22,3	0,8
I12	23,4	22,5	0,9
I13	23,5	22,3	1,2
I14	23,3	22,7	0,6
I15	23,6	23,3	0,3
I16	23,5	21,9	1,6
I17	23,7	23,1	0,6
J8	24,2	22,8	1,4
J9	24,0	22,8	1,2
J10	24,5	23,2	1,3
J11	24,8	23,5	1,3
J12	24,8	23,8	1,0
J13	24,8	23,4	1,4
J14	24,6	23,2	1,4
J15	24,5	23,2	1,3
J16	24,3	23,1	1,2
J17	24,5	22,9	1,6

Continua

Continuação

K8	24,1	23,0	1,1
K9	24,9	22,8	2,1
K10	25,9	23,2	2,7
K11	25,8	24,2	1,6
K12	26,0	24,2	1,8
K13	26,4	25,2	1,2
K14	25,7	25,0	0,7
K15	26,2	24,6	1,6
K16	26,7	25,0	1,7
K17	26,0	24,5	1,5
L8	24,3	23,2	1,1
L9	25,9	24,2	1,7
L10	26,4	24,7	1,7
L11	26,7	24,0	2,7
L12	26,8	24,1	2,7
L13	26,3	24,0	2,3
L14	26,7	24,0	2,7
L15	26,6	23,9	2,7
L16	27,1	24,0	3,1
L17	27,2	24,0	3,2
M8	25,3	24,0	1,3
M9	26,3	24,5	1,8
M10	26,7	24,7	2,0
M11	27,3	25,3	2,0
M12	28,0	25,2	2,8
M13	28,3	25,3	3,0
M14	27,9	25,9	2,0
M15	27,5	25,3	2,2
M16	27,5	26,0	1,5
M17	26,9	26,2	0,7
N8	26,1	24,4	1,7
N9	26,1	24,7	1,4
N10	26,5	24,6	1,9
N11	27,4	26,0	1,4
N12	27,7	25,9	1,8
N13	27,7	25,8	1,9
N14	27,7	25,0	2,7
N15	27,2	24,9	2,3
N16	27,0	24,9	2,1
N17	27,4	24,8	2,6
O8	26,7	24,4	2,3
O9	27,0	24,8	2,2
O10	27,0	25,1	1,9
O11	27,2	25,3	1,9
O12	27,3	25,1	2,2
O13	27,1	25,0	2,1
O14	27,3	25,2	2,1
O15	27,1	25,6	1,5
O16	27,2	25,1	2,1
O17	27,2	24,9	2,3

Continua

Continuação

P8	24,7	22,3	2,4
P9	28,3	23,6	4,7
P10	27,8	24,1	3,7
P11	29,4	24,0	5,4
P12	29,6	25,1	4,5
P13	29,6	25,8	3,8
P14	29,4	26,2	3,2
P15	30,3	26,2	4,1
P16	30,2	26,1	4,1
P17	29,9	25,7	4,2
Q8	25,7	24,2	1,5
Q9	26,3	25,0	1,3
Q10	27,9	25,0	2,9
Q11	28,2	25,2	3,0
Q12	28,7	26,8	1,9
Q13	28,8	26,1	2,7
Q14	29,2	27,1	2,1
Q15	28,5	26,0	2,5
Q16	28,5	25,8	2,7
Q17	27,9	25,5	2,4
R8	24,4	23,1	1,3
R9	24,6	23,3	1,3
R10	24,8	23,4	1,4
R11	25,6	24,3	1,3
R12	26,1	24,8	1,3
R13	28,0	27,1	0,9
R14	28,4	26,8	1,6
R15	27,5	25,6	1,9
R16	27,1	25,7	1,4
R17	28,0	26,2	1,8
S8	27,8	25,7	2,1
S9	28,0	25,8	2,2
S10	28,1	26,0	2,1
S11	28,3	26,1	2,2
S12	28,6	26,7	1,9
S13	28,6	26,4	2,2
S14	28,7	26,3	2,4
S15	28,5	26,4	2,1
S16	28,3	26,1	2,2
S17	28,1	25,8	2,3
T8	25,0	23,5	1,5
T9	26,6	23,9	2,7
T10	26,4	24,1	2,3
T11	26,5	24,3	2,2
T12	26,5	24,5	2,0
T13	26,0	24,3	1,7
T14	26,1	24,4	1,7
T15	26,0	24,3	1,7
T16	26,2	23,8	2,4
T17	25,7	23,0	2,7

Continua

Continuação

U8	23,9	22,3	1,6
U9	23,7	22,6	1,1
U10	24,1	23,0	1,1
U11	24,3	23,2	1,1
U12	25,8	23,1	2,7
U13	25,4	22,9	2,5
U14	24,4	22,8	1,6
U15	24,4	22,7	1,7
U16	25,5	22,7	2,8
U17	25,3	22,8	2,5
V8	24,0	22,7	1,3
V9	24,3	22,8	1,5
V10	25,9	23,1	2,8
V11	25,6	23,0	2,6
V12	25,9	23,4	2,5
V13	26,3	23,9	2,4
V14	26,4	23,9	2,5
V15	26,6	24,1	2,5
V16	26,4	24,0	2,4
V17	25,6	23,3	2,3
X8	25,6	23,2	2,4
X9	25,3	23,3	2,0
X10	25,6	23,6	2,0
X11	26,0	24,0	2,0
X12	26,6	24,1	2,5
X13	26,1	24,0	2,1
X14	25,7	24,1	1,6
X15	25,4	23,4	2,0
X16	25,5	23,4	2,1
X17	25,4	23,6	1,8

APÉNDICE B – Range

CÓDIGO MEDIÇÃO	Temperatura da água de saída das Torres, Tf (°C)	Temperatura da água de entrada das Torres, Tq (°C)	Range, (°C)
A8	21,5	24,5	3,0
A9	21,9	24,3	2,4
A10	25,9	29,3	3,5
A11	21,8	25,8	4,0
A12	21,1	24,6	3,5
A13	20,7	24,1	3,4
A14	20,8	24,6	3,7
A15	22,7	26,4	3,7
A16	22,9	27,2	4,3
A17	22,9	27,3	4,4
B8	22,8	25,2	2,4
B9	22,1	24,7	2,7
B10	20,6	24,2	3,6
B11	22,2	26,5	4,3
B12	21,9	25,5	3,6
B13	22,0	26,1	4,1
B14	21,9	25,7	3,8
B15	22,1	26,5	4,3
B16	22,2	26,1	3,8
B17	22,2	26,8	4,6
C8	25,1	29,1	4,1
C9	24,0	28,1	4,1
C10	24,1	28,6	4,5
C11	24,7	29,2	4,5
C12	24,8	29,4	4,6
C13	25,2	29,6	4,5
C14	25,3	29,9	4,7
C15	26,1	30,9	4,8
C16	25,5	30,6	5,0
C17	25,1	30,0	4,8
D8	23,1	26,9	3,8
D9	23,5	27,7	4,2
D10	24,0	28,6	4,6
D11	24,0	28,9	4,9
D12	24,5	29,0	4,5
D13	24,6	29,2	4,6
D14	24,5	29,1	4,6
D15	24,3	28,8	4,5
D16	24,9	29,5	4,6
D17	24,1	28,6	4,5
E8	21,9	25,2	3,3
E9	22,0	25,4	3,4
E10	22,4	25,9	3,5
E11	22,7	26,7	4,0
E12	23,3	27,3	3,9
E13	23,6	27,4	3,7
E14	24,2	28,4	4,2
E15	21,1	28,6	7,4
E16	23,5	27,7	4,1
E17	23,3	27,5	4,1

Continua

Continuação

F8	23,6	27,2	3,6
F9	23,8	27,3	3,5
F10	23,6	27,2	3,6
F11	23,8	27,9	4,1
F12	23,5	26,8	3,3
F13	22,5	25,5	3,0
F14	22,6	25,8	3,2
F15	22,1	25,4	3,2
F16	22,3	25,7	3,3
F17	22,9	25,7	2,7
G8	21,5	24,6	3,1
G9	21,4	25,1	3,7
G10	20,8	24,0	3,2
G11	20,9	24,7	3,8
G12	20,8	24,4	3,6
G13	21,1	24,3	3,2
G14	21,2	24,8	3,6
G15	21,3	24,4	3,1
G16	20,9	24,7	3,8
G17	21,1	24,7	3,6
H8	22,3	25,6	3,3
H9	22,5	26,3	3,8
H10	22,2	26,3	4,1
H11	22,8	26,7	3,9
H12	22,8	26,3	3,5
H13	22,6	26,5	3,9
H14	23,0	27,0	4,0
H15	23,4	27,7	4,3
H16	23,6	27,7	4,1
H17	23,6	28,0	4,5
I8	22,6	25,7	3,1
I9	22,7	26,0	3,2
I10	23,1	26,6	3,4
I11	23,1	26,5	3,3
I12	23,4	27,0	3,5
I13	23,5	25,9	2,4
I14	23,3	25,7	2,4
I15	23,6	26,7	3,1
I16	23,5	26,5	3,0
I17	23,7	26,8	3,1
J8	24,2	28,4	4,2
J9	24,0	28,3	4,3
J10	24,5	29,3	4,8
J11	24,8	29,4	4,6
J12	24,8	29,3	4,5
J13	24,8	29,1	4,3
J14	24,6	29,0	4,4
J15	24,5	28,8	4,3
J16	24,3	28,6	4,3
J17	24,5	28,3	3,8

Continua

Continuação

K8	24,1	28,5	4,3
K9	24,9	29,5	4,5
K10	25,9	29,6	3,7
K11	25,8	29,3	3,5
K12	26,0	29,5	3,5
K13	26,4	30,2	3,8
K14	25,7	28,3	2,6
K15	26,2	29,7	3,5
K16	26,7	31,2	4,5
K17	26,0	29,4	3,4
L8	24,3	28,9	4,6
L9	25,9	30,5	4,6
L10	26,4	30,9	4,5
L11	26,7	31,3	4,6
L12	26,8	31,4	4,6
L13	26,3	30,6	4,2
L14	26,7	30,5	3,7
L15	26,6	31,2	4,5
L16	27,1	31,8	4,7
L17	27,2	32,0	4,7
M8	25,3	30,1	4,8
M9	26,3	30,1	3,8
M10	26,7	31,2	4,5
M11	27,3	31,9	4,6
M12	28,0	32,5	4,5
M13	28,3	32,9	4,6
M14	27,9	32,7	4,8
M15	27,5	32,2	4,7
M16	27,5	32,0	4,5
M17	26,9	31,5	4,5
N8	26,1	30,1	4,0
N9	26,1	29,9	3,8
N10	26,5	31,1	4,6
N11	27,4	32,1	4,7
N12	27,7	32,3	4,6
N13	27,7	32,2	4,5
N14	27,7	32,3	4,6
N15	27,2	33,1	5,8
N16	27,0	32,8	5,7
N17	27,4	31,8	4,4
O8	26,7	31,4	4,7
O9	27,0	31,4	4,4
O10	27,0	31,5	4,5
O11	27,2	31,3	4,1
O12	27,3	31,3	4,0
O13	27,1	30,9	3,8
O14	27,3	31,4	4,1
O15	27,1	31,2	4,1
O16	27,2	31,4	4,2
O17	27,2	31,5	4,3

Continua

Continuação

P8	24,7	29,4	4,8
P9	28,3	32,8	4,5
P10	27,8	32,2	4,4
P11	29,4	33,9	4,5
P12	29,6	34,3	4,7
P13	29,6	34,1	4,5
P14	29,4	34,3	4,9
P15	30,3	34,9	4,6
P16	30,2	34,8	4,6
P17	29,9	34,5	4,6
Q8	25,7	30,3	4,6
Q9	26,3	29,5	3,2
Q10	27,9	32,4	4,5
Q11	28,2	32,8	4,6
Q12	28,7	33,3	4,6
Q13	28,8	33,3	4,5
Q14	29,2	33,9	4,7
Q15	28,5	33,3	4,8
Q16	28,5	33,2	4,7
Q17	27,9	32,4	4,5
R8	24,4	29,2	4,7
R9	24,6	29,1	4,5
R10	24,8	29,4	4,6
R11	25,6	30,3	4,7
R12	26,1	29,5	3,4
R13	28,0	32,4	4,4
R14	28,4	33,1	4,7
R15	27,5	32,2	4,7
R16	27,1	30,0	2,9
R17	28,0	32,6	4,7
S8	27,8	31,8	4,0
S9	28,0	32,1	4,1
S10	28,1	32,5	4,4
S11	28,3	32,8	4,5
S12	28,6	33,1	4,5
S13	28,6	33,1	4,5
S14	28,7	33,3	4,6
S15	28,5	33,2	4,7
S16	28,3	33,1	4,8
S17	28,1	32,7	4,6
T8	25,0	29,6	4,6
T9	26,6	31,2	4,6
T10	26,4	30,6	4,2
T11	26,5	30,8	4,3
T12	26,5	30,1	3,6
T13	26,0	30,1	4,1
T14	26,1	30,0	3,9
T15	26,0	29,9	3,8
T16	26,2	30,0	3,8
T17	25,7	29,1	3,4

Continua

Continuação

U8	23,9	28,0	4,1
U9	23,7	27,8	4,1
U10	24,1	28,7	4,6
U11	24,3	28,8	4,5
U12	25,8	30,4	4,6
U13	25,4	29,4	4,0
U14	24,4	29,0	4,6
U15	24,4	27,5	3,0
U16	25,5	29,3	3,8
U17	25,3	28,6	3,3
V8	24,0	28,4	4,4
V9	24,3	29,0	4,7
V10	25,9	30,3	4,5
V11	25,6	29,5	4,0
V12	25,9	30,2	4,4
V13	26,3	30,4	4,2
V14	26,4	30,7	4,4
V15	26,6	30,8	4,3
V16	26,4	30,7	4,4
V17	25,6	29,4	3,9
X8	25,6	29,2	3,6
X9	25,3	28,6	3,3
X10	25,6	29,2	3,6
X11	26,0	29,8	3,8
X12	26,6	30,6	4,0
X13	26,1	29,5	3,4
X14	25,7	29,4	3,7
X15	25,4	28,8	3,4
X16	25,5	28,9	3,4
X17	25,4	27,9	2,5

APÊNDICE C – Rendimento térmico

CÓDIGO MEDIÇÃO	Temperatura da água de saída das Torres, Tf (°C)	Temperatura de Bulbo úmido na entrada das Torres, Tbu,e (°C)	Temperatura da água de entrada das Torres, Tq (°C)	Rendimento Térmico (%)
A8	21,5	19,3	24,5	57,6
A9	21,9	19,6	24,3	51,6
A10	25,9	18,3	29,3	31,3
A11	21,8	19,7	25,8	65,1
A12	21,1	20,0	24,6	76,2
A13	20,7	20,1	24,1	84,5
A14	20,8	20,1	24,6	83,9
A15	22,7	20,4	26,4	61,3
A16	22,9	20,3	27,2	62,0
A17	22,9	20,1	27,3	60,8
B8	22,8	15,8	25,2	25,8
B9	22,1	16,8	24,7	33,7
B10	20,6	17,4	24,2	52,4
B11	22,2	17,8	26,5	49,5
B12	21,9	19,0	25,5	55,8
B13	22,0	19,1	26,1	58,8
B14	21,9	18,3	25,7	51,3
B15	22,1	18,7	26,5	55,9
B16	22,2	18,6	26,1	51,5
B17	22,2	18,6	26,8	55,8
C8	25,1	21,5	29,1	53,3
C9	24,0	21,8	28,1	64,7
C10	24,1	22,8	28,6	77,1
C11	24,7	23,5	29,2	78,4
C12	24,8	22,8	29,4	69,3
C13	25,2	23,7	29,6	75,6
C14	25,3	23,8	29,9	75,9
C15	26,1	24,6	30,9	76,3
C16	25,5	23,2	30,6	68,3
C17	25,1	22,9	30,0	68,3
D8	23,1	22,1	26,9	78,6
D9	23,5	22,3	27,7	77,3
D10	24,0	22,7	28,6	77,5
D11	24,0	21,8	28,9	68,6
D12	24,5	23,1	29,0	75,8
D13	24,6	23,0	29,2	73,7
D14	24,5	22,7	29,1	71,4
D15	24,3	22,2	28,8	67,7
D16	24,9	23,0	29,5	70,2
D17	24,1	23,1	28,6	81,3
E8	21,9	21,2	25,2	81,5
E9	22,0	21,5	25,4	86,2
E10	22,4	21,7	25,9	82,4
E11	22,7	21,8	26,7	80,8
E12	23,3	22,0	27,3	74,6
E13	23,6	22,4	27,4	75,1
E14	24,2	21,6	28,4	62,4
E15	21,1	19,8	28,6	84,7
E16	23,5	22,6	27,7	81,5
E17	23,3	22,7	27,5	86,6

Continua

Continuação

F8	23,6	22,8	27,2	82,5
F9	23,8	22,7	27,3	76,9
F10	23,6	22,5	27,2	76,3
F11	23,8	22,8	27,9	80,6
F12	23,5	22,0	26,8	69,5
F13	22,5	21,1	25,5	69,2
F14	22,6	21,4	25,8	73,7
F15	22,1	20,7	25,4	69,4
F16	22,3	20,4	25,7	63,3
F17	22,9	20,1	25,7	49,3
G8	21,5	19,4	24,6	59,2
G9	21,4	20,1	25,1	73,7
G10	20,8	20,4	24,0	88,7
G11	20,9	20,2	24,7	84,1
G12	20,8	20,3	24,4	87,4
G13	21,1	20,6	24,3	86,3
G14	21,2	20,5	24,8	83,6
G15	21,3	20,0	24,4	70,2
G16	20,9	20,1	24,7	82,0
G17	21,1	20,6	24,7	88,3
H8	22,3	20,2	25,6	61,0
H9	22,5	20,8	26,3	69,2
H10	22,2	20,9	26,3	76,0
H11	22,8	21,5	26,7	75,0
H12	22,8	21,6	26,3	74,7
H13	22,6	21,5	26,5	78,4
H14	23,0	21,7	27,0	76,1
H15	23,4	22,1	27,7	77,4
H16	23,6	21,3	27,7	64,6
H17	23,6	21,1	28,0	64,4
I8	22,6	21,8	25,7	79,8
I9	22,7	22,0	26,0	81,4
I10	23,1	22,4	26,6	82,3
I11	23,1	22,3	26,5	80,1
I12	23,4	22,5	27,0	79,2
I13	23,5	22,3	25,9	65,6
I14	23,3	22,7	25,7	78,9
I15	23,6	23,3	26,7	90,1
I16	23,5	21,9	26,5	64,5
I17	23,7	23,1	26,8	83,1
J8	24,2	22,8	28,4	75,1
J9	24,0	22,8	28,3	78,3
J10	24,5	23,2	29,3	78,7
J11	24,8	23,5	29,4	78,0
J12	24,8	23,8	29,3	81,9
J13	24,8	23,4	29,1	75,9
J14	24,6	23,2	29,0	76,2
J15	24,5	23,2	28,8	77,2
J16	24,3	23,1	28,6	78,6
J17	24,5	22,9	28,3	70,8

Continua

Continuação

K8	24,1	23,0	28,5	79,1
K9	24,9	22,8	29,5	67,8
K10	25,9	23,2	29,6	57,1
K11	25,8	24,2	29,3	67,8
K12	26,0	24,2	29,5	65,3
K13	26,4	25,2	30,2	75,2
K14	25,7	25,0	28,3	77,7
K15	26,2	24,6	29,7	67,8
K16	26,7	25,0	31,2	72,0
K17	26,0	24,5	29,4	68,6
L8	24,3	23,2	28,9	80,1
L9	25,9	24,2	30,5	72,3
L10	26,4	24,7	30,9	71,9
L11	26,7	24,0	31,3	62,4
L12	26,8	24,1	31,4	62,4
L13	26,3	24,0	30,6	64,4
L14	26,7	24,0	30,5	57,7
L15	26,6	23,9	31,2	62,4
L16	27,1	24,0	31,8	60,8
L17	27,2	24,0	32,0	59,4
M8	25,3	24,0	30,1	78,0
M9	26,3	24,5	30,1	67,3
M10	26,7	24,7	31,2	68,8
M11	27,3	25,3	31,9	69,2
M12	28,0	25,2	32,5	61,4
M13	28,3	25,3	32,9	60,3
M14	27,9	25,9	32,7	70,3
M15	27,5	25,3	32,2	67,8
M16	27,5	26,0	32,0	74,6
M17	26,9	26,2	31,5	85,9
N8	26,1	24,4	30,1	69,5
N9	26,1	24,7	29,9	72,3
N10	26,5	24,6	31,1	70,3
N11	27,4	26,0	32,1	76,6
N12	27,7	25,9	32,3	71,4
N13	27,7	25,8	32,2	69,8
N14	27,7	25,0	32,3	62,6
N15	27,2	24,9	33,1	71,4
N16	27,0	24,9	32,8	72,9
N17	27,4	24,8	31,8	62,4
O8	26,7	24,4	31,4	67,0
O9	27,0	24,8	31,4	66,4
O10	27,0	25,1	31,5	70,0
O11	27,2	25,3	31,3	68,1
O12	27,3	25,1	31,3	64,3
O13	27,1	25,0	30,9	64,1
O14	27,3	25,2	31,4	65,9
O15	27,1	25,6	31,2	72,9
O16	27,2	25,1	31,4	66,4
O17	27,2	24,9	31,5	65,0

Continua

Continuação

P8	24,7	22,3	29,4	67,0
P9	28,3	23,6	32,8	49,3
P10	27,8	24,1	32,2	54,7
P11	29,4	24,0	33,9	45,9
P12	29,6	25,1	34,3	50,7
P13	29,6	25,8	34,1	53,7
P14	29,4	26,2	34,3	60,1
P15	30,3	26,2	34,9	52,5
P16	30,2	26,1	34,8	52,5
P17	29,9	25,7	34,5	51,9
Q8	25,7	24,2	30,3	75,5
Q9	26,3	25,0	29,5	71,2
Q10	27,9	25,0	32,4	61,0
Q11	28,2	25,2	32,8	60,7
Q12	28,7	26,8	33,3	71,0
Q13	28,8	26,1	33,3	62,7
Q14	29,2	27,1	33,9	69,3
Q15	28,5	26,0	33,3	65,9
Q16	28,5	25,8	33,2	63,7
Q17	27,9	25,5	32,4	65,4
R8	24,4	23,1	29,2	77,9
R9	24,6	23,3	29,1	77,8
R10	24,8	23,4	29,4	76,9
R11	25,6	24,3	30,3	78,6
R12	26,1	24,8	29,5	72,6
R13	28,0	27,1	32,4	83,1
R14	28,4	26,8	33,1	74,6
R15	27,5	25,6	32,2	71,2
R16	27,1	25,7	30,0	67,5
R17	28,0	26,2	32,6	72,2
S8	27,8	25,7	31,8	65,7
S9	28,0	25,8	32,1	65,1
S10	28,1	26,0	32,5	67,7
S11	28,3	26,1	32,8	67,2
S12	28,6	26,7	33,1	70,4
S13	28,6	26,4	33,1	67,2
S14	28,7	26,3	33,3	65,8
S15	28,5	26,4	33,2	69,2
S16	28,3	26,1	33,1	68,6
S17	28,1	25,8	32,7	66,7
T8	25,0	23,5	29,6	75,3
T9	26,6	23,9	31,2	62,7
T10	26,4	24,1	30,6	64,2
T11	26,5	24,3	30,8	65,8
T12	26,5	24,5	30,1	63,8
T13	26,0	24,3	30,1	70,3
T14	26,1	24,4	30,0	69,2
T15	26,0	24,3	29,9	69,2
T16	26,2	23,8	30,0	61,4
T17	25,7	23,0	29,1	55,5

Continua

Continuação

U8	23,9	22,3	28,0	71,8
U9	23,7	22,6	27,8	78,7
U10	24,1	23,0	28,7	80,6
U11	24,3	23,2	28,8	80,2
U12	25,8	23,1	30,4	62,8
U13	25,4	22,9	29,4	61,5
U14	24,4	22,8	29,0	73,8
U15	24,4	22,7	27,5	63,8
U16	25,5	22,7	29,3	57,4
U17	25,3	22,8	28,6	56,6
V8	24,0	22,7	28,4	78,0
V9	24,3	22,8	29,0	76,4
V10	25,9	23,1	30,3	61,7
V11	25,6	23,0	29,5	60,8
V12	25,9	23,4	30,2	64,0
V13	26,3	23,9	30,4	63,8
V14	26,4	23,9	30,7	64,0
V15	26,6	24,1	30,8	63,5
V16	26,4	24,0	30,7	64,9
V17	25,6	23,3	29,4	63,1
X8	25,6	23,2	29,2	60,7
X9	25,3	23,3	28,6	63,0
X10	25,6	23,6	29,2	64,9
X11	26,0	24,0	29,8	66,1
X12	26,6	24,1	30,6	62,1
X13	26,1	24,0	29,5	62,5
X14	25,7	24,1	29,4	70,5
X15	25,4	23,4	28,8	63,6
X16	25,5	23,4	28,9	62,5
X17	25,4	23,6	27,9	59,0

APÊNDICE D – Calor cedido pela água

CÓDIGO MEDIÇÃO	Calor específico da água (kcal/g°C)	Vazão mássica da água, W (kg/h)	Temperatura da água de saída das Torres, Tf (°C)	Temperatura da água de entrada das Torres, Tq (°C)	Calor cedido pela água, Q (J/s)
A8	1,0	531800,0	21,5	24,5	1855450,2
A9	1,0	531800,0	21,9	24,3	1484360,2
A10	1,0	531800,0	25,9	29,3	2133767,7
A11	1,0	531800,0	21,8	25,8	2443009,4
A12	1,0	531800,0	21,1	24,6	2163454,9
A13	1,0	531800,0	20,7	24,1	2090473,9
A14	1,0	531800,0	20,8	24,6	2313127,9
A15	1,0	531800,0	22,7	26,4	2269834,1
A16	1,0	531800,0	22,9	27,2	2640924,1
A17	1,0	531800,0	22,9	27,3	2702772,5
B8	1,0	531800,0	22,8	25,2	1496729,8
B9	1,0	531800,0	22,1	24,7	1651350,7
B10	1,0	531800,0	20,6	24,2	2207985,7
B11	1,0	531800,0	22,2	26,5	2653293,8
B12	1,0	531800,0	21,9	25,5	2245094,7
B13	1,0	531800,0	22,0	26,1	2554336,4
B14	1,0	531800,0	21,9	25,7	2350236,9
B15	1,0	531800,0	22,1	26,5	2684218,0
B16	1,0	531800,0	22,2	26,1	2374976,3
B17	1,0	531800,0	22,2	26,8	2826469,1
C8	1,0	531800,0	25,1	29,1	2517227,4
C9	1,0	531800,0	24,0	28,1	2535781,9
C10	1,0	531800,0	24,1	28,6	2783175,3
C11	1,0	531800,0	24,7	29,2	2783175,3
C12	1,0	531800,0	24,8	29,4	2845023,6
C13	1,0	531800,0	25,2	29,6	2776990,5
C14	1,0	531800,0	25,3	29,9	2882132,6
C15	1,0	531800,0	26,1	30,9	2993459,7
C16	1,0	531800,0	25,5	30,6	3110971,5
C17	1,0	531800,0	25,1	30,0	2981090,0
D8	1,0	531800,0	23,1	26,9	2337867,3
D9	1,0	531800,0	23,5	27,7	2585260,6
D10	1,0	531800,0	24,0	28,6	2826469,1
D11	1,0	531800,0	24,0	28,9	3012014,2
D12	1,0	531800,0	24,5	29,0	2770805,6
D13	1,0	531800,0	24,6	29,2	2826469,1
D14	1,0	531800,0	24,5	29,1	2826469,1
D15	1,0	531800,0	24,3	28,8	2764620,8
D16	1,0	531800,0	24,9	29,5	2820284,3
D17	1,0	531800,0	24,1	28,6	2770805,6
E8	1,0	531800,0	21,9	25,2	2016255,9
E9	1,0	531800,0	22,0	25,4	2078104,2
E10	1,0	531800,0	22,4	25,9	2139952,6
E11	1,0	531800,0	22,7	26,7	2449194,3
E12	1,0	531800,0	23,3	27,3	2436824,6
E13	1,0	531800,0	23,6	27,4	2306943,1
E14	1,0	531800,0	24,2	28,4	2616184,8
E15	1,0	531800,0	21,1	28,6	4601516,5
E16	1,0	531800,0	23,5	27,7	2560521,3
E17	1,0	531800,0	23,3	27,5	2560521,3

Continua

Continuação

F8	1,0	531800,0	23,6	27,2	2245094,7
F9	1,0	531800,0	23,8	27,3	2183246,4
F10	1,0	531800,0	23,6	27,2	2214170,6
F11	1,0	531800,0	23,8	27,9	2541966,8
F12	1,0	531800,0	23,5	26,8	2053364,9
F13	1,0	531800,0	22,5	25,5	1874004,7
F14	1,0	531800,0	22,6	25,8	1997701,4
F15	1,0	531800,0	22,1	25,4	2003886,2
F16	1,0	531800,0	22,3	25,7	2059549,7
F17	1,0	531800,0	22,9	25,7	1694644,5
G8	1,0	531800,0	21,5	24,6	1917298,5
G9	1,0	531800,0	21,4	25,1	2257464,4
G10	1,0	531800,0	20,8	24,0	1948222,7
G11	1,0	531800,0	20,9	24,7	2319312,8
G12	1,0	531800,0	20,8	24,4	2195616,1
G13	1,0	531800,0	21,1	24,3	1948222,7
G14	1,0	531800,0	21,2	24,8	2214170,6
G15	1,0	531800,0	21,3	24,4	1904928,9
G16	1,0	531800,0	20,9	24,7	2331682,4
G17	1,0	531800,0	21,1	24,7	2245094,7
H8	1,0	531800,0	22,3	25,6	2028625,6
H9	1,0	531800,0	22,5	26,3	2344052,1
H10	1,0	531800,0	22,2	26,3	2529597,1
H11	1,0	531800,0	22,8	26,7	2412085,3
H12	1,0	531800,0	22,8	26,3	2170876,7
H13	1,0	531800,0	22,6	26,5	2418270,1
H14	1,0	531800,0	23,0	27,0	2498672,9
H15	1,0	531800,0	23,4	27,7	2684218,0
H16	1,0	531800,0	23,6	27,7	2560521,3
H17	1,0	531800,0	23,6	28,0	2752251,1
I8	1,0	531800,0	22,6	25,7	1904928,9
I9	1,0	531800,0	22,7	26,0	1997701,4
I10	1,0	531800,0	23,1	26,6	2121398,1
I11	1,0	531800,0	23,1	26,5	2065734,6
I12	1,0	531800,0	23,4	27,0	2189431,2
I13	1,0	531800,0	23,5	25,9	1453436,0
I14	1,0	531800,0	23,3	25,7	1453436,0
I15	1,0	531800,0	23,6	26,7	1904928,9
I16	1,0	531800,0	23,5	26,5	1843080,5
I17	1,0	531800,0	23,7	26,8	1911113,7
J8	1,0	531800,0	24,2	28,4	2616184,8
J9	1,0	531800,0	24,0	28,3	2678033,1
J10	1,0	531800,0	24,5	29,3	2974905,2
J11	1,0	531800,0	24,8	29,4	2851208,5
J12	1,0	531800,0	24,8	29,3	2789360,1
J13	1,0	531800,0	24,8	29,1	2684218,0
J14	1,0	531800,0	24,6	29,0	2739881,5
J15	1,0	531800,0	24,5	28,8	2678033,1
J16	1,0	531800,0	24,3	28,6	2678033,1
J17	1,0	531800,0	24,5	28,3	2374976,3

Continua

Continuação

K8	1,0	531800,0	24,1	28,5	2665663,5
K9	1,0	531800,0	24,9	29,5	2789360,1
K10	1,0	531800,0	25,9	29,6	2257464,4
K11	1,0	531800,0	25,8	29,3	2133767,7
K12	1,0	531800,0	26,0	29,5	2139952,6
K13	1,0	531800,0	26,4	30,2	2325497,6
K14	1,0	531800,0	25,7	28,3	1595687,2
K15	1,0	531800,0	26,2	29,7	2133767,7
K16	1,0	531800,0	26,7	31,2	2764620,8
K17	1,0	531800,0	26,0	29,4	2084289,1
L8	1,0	531800,0	24,3	28,9	2845023,6
L9	1,0	531800,0	25,9	30,5	2814099,5
L10	1,0	531800,0	26,4	30,9	2752251,1
L11	1,0	531800,0	26,7	31,3	2814099,5
L12	1,0	531800,0	26,8	31,4	2814099,5
L13	1,0	531800,0	26,3	30,6	2622369,6
L14	1,0	531800,0	26,7	30,5	2313127,9
L15	1,0	531800,0	26,6	31,2	2807914,6
L16	1,0	531800,0	27,1	31,8	2925426,5
L17	1,0	531800,0	27,2	32,0	2931611,3
M8	1,0	531800,0	25,3	30,1	2943981,0
M9	1,0	531800,0	26,3	30,1	2337867,3
M10	1,0	531800,0	26,7	31,2	2776990,5
M11	1,0	531800,0	27,3	31,9	2838838,8
M12	1,0	531800,0	28,0	32,5	2783175,3
M13	1,0	531800,0	28,3	32,9	2845023,6
M14	1,0	531800,0	27,9	32,7	2968720,3
M15	1,0	531800,0	27,5	32,2	2906872,0
M16	1,0	531800,0	27,5	32,0	2783175,3
M17	1,0	531800,0	26,9	31,5	2789360,1
N8	1,0	531800,0	26,1	30,1	2449194,3
N9	1,0	531800,0	26,1	29,9	2325497,6
N10	1,0	531800,0	26,5	31,1	2826469,1
N11	1,0	531800,0	27,4	32,1	2888317,5
N12	1,0	531800,0	27,7	32,3	2826469,1
N13	1,0	531800,0	27,7	32,2	2764620,8
N14	1,0	531800,0	27,7	32,3	2826469,1
N15	1,0	531800,0	27,2	33,1	3605758,2
N16	1,0	531800,0	27,0	32,8	3543909,9
N17	1,0	531800,0	27,4	31,8	2702772,5
O8	1,0	531800,0	26,7	31,4	2906872,0
O9	1,0	531800,0	27,0	31,4	2715142,1
O10	1,0	531800,0	27,0	31,5	2776990,5
O11	1,0	531800,0	27,2	31,3	2529597,1
O12	1,0	531800,0	27,3	31,3	2467748,8
O13	1,0	531800,0	27,1	30,9	2344052,1
O14	1,0	531800,0	27,3	31,4	2529597,1
O15	1,0	531800,0	27,1	31,2	2529597,1
O16	1,0	531800,0	27,2	31,4	2591445,4
O17	1,0	531800,0	27,2	31,5	2659478,6

Continua

Continuação

P8	1,0	531800,0	24,7	29,4	2956350,7
P9	1,0	531800,0	28,3	32,8	2801729,8
P10	1,0	531800,0	27,8	32,2	2733696,6
P11	1,0	531800,0	29,4	33,9	2807914,6
P12	1,0	531800,0	29,6	34,3	2882132,6
P13	1,0	531800,0	29,6	34,1	2758436,0
P14	1,0	531800,0	29,4	34,3	3012014,2
P15	1,0	531800,0	30,3	34,9	2826469,1
P16	1,0	531800,0	30,2	34,8	2826469,1
P17	1,0	531800,0	29,9	34,5	2826469,1
Q8	1,0	531800,0	25,7	30,3	2832654,0
Q9	1,0	531800,0	26,3	29,5	1960592,4
Q10	1,0	531800,0	27,9	32,4	2783175,3
Q11	1,0	531800,0	28,2	32,8	2845023,6
Q12	1,0	531800,0	28,7	33,3	2845023,6
Q13	1,0	531800,0	28,8	33,3	2783175,3
Q14	1,0	531800,0	29,2	33,9	2906872,0
Q15	1,0	531800,0	28,5	33,3	2968720,3
Q16	1,0	531800,0	28,5	33,2	2906872,0
Q17	1,0	531800,0	27,9	32,4	2783175,3
R8	1,0	531800,0	24,4	29,2	2925426,5
R9	1,0	531800,0	24,6	29,1	2776990,5
R10	1,0	531800,0	24,8	29,4	2838838,8
R11	1,0	531800,0	25,6	30,3	2900687,1
R12	1,0	531800,0	26,1	29,5	2102843,6
R13	1,0	531800,0	28,0	32,4	2708957,3
R14	1,0	531800,0	28,4	33,1	2894502,3
R15	1,0	531800,0	27,5	32,2	2894502,3
R16	1,0	531800,0	27,1	30,0	1787417,0
R17	1,0	531800,0	28,0	32,6	2875947,8
S8	1,0	531800,0	27,8	31,8	2486303,3
S9	1,0	531800,0	28,0	32,1	2541966,8
S10	1,0	531800,0	28,1	32,5	2727511,8
S11	1,0	531800,0	28,3	32,8	2789360,1
S12	1,0	531800,0	28,6	33,1	2789360,1
S13	1,0	531800,0	28,6	33,1	2789360,1
S14	1,0	531800,0	28,7	33,3	2851208,5
S15	1,0	531800,0	28,5	33,2	2913056,8
S16	1,0	531800,0	28,3	33,1	2974905,2
S17	1,0	531800,0	28,1	32,7	2851208,5
T8	1,0	531800,0	25,0	29,6	2851208,5
T9	1,0	531800,0	26,6	31,2	2814099,5
T10	1,0	531800,0	26,4	30,6	2566706,1
T11	1,0	531800,0	26,5	30,8	2628554,5
T12	1,0	531800,0	26,5	30,1	2195616,1
T13	1,0	531800,0	26,0	30,1	2504857,8
T14	1,0	531800,0	26,1	30,0	2381161,1
T15	1,0	531800,0	26,0	29,9	2374976,3
T16	1,0	531800,0	26,2	30,0	2368791,4
T17	1,0	531800,0	25,7	29,1	2090473,9

Continua

Continuação

U8	1,0	531800,0	23,9	28,0	2535781,9
U9	1,0	531800,0	23,7	27,8	2535781,9
U10	1,0	531800,0	24,1	28,7	2845023,6
U11	1,0	531800,0	24,3	28,8	2783175,3
U12	1,0	531800,0	25,8	30,4	2845023,6
U13	1,0	531800,0	25,4	29,4	2486303,3
U14	1,0	531800,0	24,4	29,0	2820284,3
U15	1,0	531800,0	24,4	27,5	1874004,7
U16	1,0	531800,0	25,5	29,3	2350236,9
U17	1,0	531800,0	25,3	28,6	2034810,4
V8	1,0	531800,0	24,0	28,4	2739881,5
V9	1,0	531800,0	24,3	29,0	2925426,5
V10	1,0	531800,0	25,9	30,3	2752251,1
V11	1,0	531800,0	25,6	29,5	2449194,3
V12	1,0	531800,0	25,9	30,2	2690402,8
V13	1,0	531800,0	26,3	30,4	2566706,1
V14	1,0	531800,0	26,4	30,7	2690402,8
V15	1,0	531800,0	26,6	30,8	2634739,3
V16	1,0	531800,0	26,4	30,7	2690402,8
V17	1,0	531800,0	25,6	29,4	2381161,1
X8	1,0	531800,0	25,6	29,2	2251279,6
X9	1,0	531800,0	25,3	28,6	2065734,6
X10	1,0	531800,0	25,6	29,2	2245094,7
X11	1,0	531800,0	26,0	29,8	2368791,4
X12	1,0	531800,0	26,6	30,6	2492488,1
X13	1,0	531800,0	26,1	29,5	2121398,1
X14	1,0	531800,0	25,7	29,4	2306943,1
X15	1,0	531800,0	25,4	28,8	2121398,1
X16	1,0	531800,0	25,5	28,9	2121398,1
X17	1,0	531800,0	25,4	27,9	1564763,0

APÊNDICE E – Vazão volumétrica do ar pela saída

CÓDIGO MEDIÇÃO	Área de saída (m²)	Frequência das hélices (Hz)	Vazão volumétrica de ar pela saída, Qs (m³/h)
A8	22,0	216,0	565324
A9	22,0	126,4	368948
A10	22,0	36,0	218195
A11	22,0	240,0	603012
A12	22,0	240,0	603012
A13	22,0	240,0	603012
A14	22,0	240,0	603012
A15	22,0	240,0	603012
A16	22,0	240,0	603012
A17	22,0	240,0	603012
B8	22,0	36,0	113065
B9	22,0	36,0	113065
B10	22,0	192,1	527636
B11	22,0	180,0	517717
B12	22,0	146,0	405314
B13	22,0	216,0	565324
B14	22,0	156,0	414571
B15	22,0	216,0	565324
B16	22,0	141,0	400686
B17	22,0	180,0	452259
C8	22,0	162,2	482013
C9	22,0	240,0	603012
C10	22,0	240,0	603012
C11	22,0	240,0	603012
C12	22,0	240,0	603012
C13	22,0	240,0	603012
C14	22,0	240,0	603012
C15	22,0	240,0	603012
C16	22,0	240,0	603012
C17	22,0	240,0	603012
D8	22,0	240,0	603012
D9	22,0	240,0	603012
D10	22,0	240,0	603012
D11	22,0	240,0	603012
D12	22,0	240,0	603012
D13	22,0	240,0	603012
D14	22,0	240,0	603012
D15	22,0	180,0	452259
D16	22,0	240,0	603012
D17	22,0	240,0	603012
E8	22,0	240,0	603012
E9	22,0	240,0	603012
E10	22,0	240,0	603012
E11	22,0	240,0	603012
E12	22,0	240,0	603012
E13	22,0	240,0	603012
E14	22,0	240,0	603012
E15	22,0	240,0	603012
E16	22,0	240,0	603012
E17	22,0	240,0	603012

Continua

Continuação

F8	22,0	240,0	603012
F9	22,0	240,0	603012
F10	22,0	240,0	603012
F11	22,0	240,0	603012
F12	22,0	240,0	603012
F13	22,0	240,0	603012
F14	22,0	240,0	603012
F15	22,0	240,0	603012
F16	22,0	240,0	603012
F17	22,0	96,0	263818
G8	22,0	216,0	565324
G9	22,0	240,0	603012
G10	22,0	240,0	603012
G11	22,0	240,0	603012
G12	22,0	240,0	603012
G13	22,0	240,0	603012
G14	22,0	240,0	603012
G15	22,0	240,0	603012
G16	22,0	240,0	603012
G17	22,0	240,0	603012
H8	22,0	66,0	218195
H9	22,0	240,0	603012
H10	22,0	240,0	603012
H11	22,0	240,0	603012
H12	22,0	240,0	603012
H13	22,0	240,0	603012
H14	22,0	240,0	603012
H15	22,0	240,0	603012
H16	22,0	240,0	603012
H17	22,0	240,0	603012
I8	22,0	240,0	603012
I9	22,0	240,0	603012
I10	22,0	240,0	603012
I11	22,0	240,0	603012
I12	22,0	240,0	603012
I13	22,0	240,0	603012
I14	22,0	240,0	603012
I15	22,0	240,0	603012
I16	22,0	240,0	603012
I17	22,0	240,0	603012
J8	22,0	240,0	603012
J9	22,0	240,0	603012
J10	22,0	240,0	603012
J11	22,0	240,0	603012
J12	22,0	240,0	603012
J13	22,0	240,0	603012
J14	22,0	240,0	603012
J15	22,0	240,0	603012
J16	22,0	240,0	603012
J17	22,0	240,0	603012

Continua

Continuação

K8	22,0	240,0	603012
K9	22,0	240,0	603012
K10	22,0	240,0	603012
K11	22,0	240,0	603012
K12	22,0	240,0	603012
K13	22,0	240,0	603012
K14	22,0	240,0	603012
K15	22,0	240,0	603012
K16	22,0	240,0	603012
K17	22,0	240,0	603012
L8	22,0	240,0	603012
L9	22,0	240,0	603012
L10	22,0	240,0	603012
L11	22,0	240,0	603012
L12	22,0	240,0	603012
L13	22,0	240,0	603012
L14	22,0	240,0	603012
L15	22,0	240,0	603012
L16	22,0	240,0	603012
L17	22,0	240,0	603012
M8	22,0	240,0	603012
M9	22,0	240,0	603012
M10	22,0	240,0	603012
M11	22,0	240,0	603012
M12	22,0	240,0	603012
M13	22,0	240,0	603012
M14	22,0	240,0	603012
M15	22,0	240,0	603012
M16	22,0	240,0	603012
M17	22,0	240,0	603012
N8	22,0	240,0	603012
N9	22,0	240,0	603012
N10	22,0	240,0	603012
N11	22,0	240,0	603012
N12	22,0	240,0	603012
N13	22,0	240,0	603012
N14	22,0	240,0	603012
N15	22,0	240,0	603012
N16	22,0	240,0	603012
N17	22,0	240,0	603012
O8	22,0	240,0	603012
O9	22,0	240,0	603012
O10	22,0	240,0	603012
O11	22,0	240,0	603012
O12	22,0	240,0	603012
O13	22,0	240,0	603012
O14	22,0	240,0	603012
O15	22,0	240,0	603012
O16	22,0	240,0	603012
O17	22,0	240,0	603012

Continua

Continuação

P8	22,0	138,2	519701
P9	22,0	138,3	519701
P10	22,0	180,0	452259
P11	22,0	180,0	452259
P12	22,0	180,0	452259
P13	22,0	180,0	452259
P14	22,0	240,0	603012
P15	22,0	180,0	452259
P16	22,0	180,0	452259
P17	22,0	180,0	452259
Q8	22,0	240,0	603012
Q9	22,0	240,0	603012
Q10	22,0	240,0	603012
Q11	22,0	240,0	603012
Q12	22,0	240,0	603012
Q13	22,0	240,0	603012
Q14	22,0	240,0	603012
Q15	22,0	240,0	603012
Q16	22,0	240,0	603012
Q17	22,0	240,0	603012
R8	22,0	240,0	603012
R9	22,0	240,0	603012
R10	22,0	240,0	603012
R11	22,0	240,0	603012
R12	22,0	240,0	603012
R13	22,0	240,0	603012
R14	22,0	240,0	603012
R15	22,0	240,0	603012
R16	22,0	240,0	603012
R17	22,0	240,0	603012
S8	22,0	240,0	603012
S9	22,0	240,0	603012
S10	22,0	240,0	603012
S11	22,0	240,0	603012
S12	22,0	240,0	603012
S13	22,0	240,0	603012
S14	22,0	240,0	603012
S15	22,0	240,0	603012
S16	22,0	240,0	603012
S17	22,0	240,0	603012
T8	22,0	240,0	603012
T9	22,0	240,0	603012
T10	22,0	240,0	603012
T11	22,0	240,0	603012
T12	22,0	240,0	603012
T13	22,0	240,0	603012
T14	22,0	240,0	603012
T15	22,0	240,0	603012
T16	22,0	240,0	603012
T17	22,0	240,0	603012

Continua

Continuação

U8	22,0	240,0	603012
U9	22,0	240,0	603012
U10	22,0	240,0	603012
U11	22,0	240,0	603012
U12	22,0	240,0	603012
U13	22,0	240,0	603012
U14	22,0	240,0	603012
U15	22,0	240,0	603012
U16	22,0	240,0	603012
U17	22,0	240,0	603012
V8	22,0	240,0	603012
V9	22,0	240,0	603012
V10	22,0	240,0	603012
V11	22,0	240,0	603012
V12	22,0	240,0	603012
V13	22,0	240,0	603012
V14	22,0	240,0	603012
V15	22,0	240,0	603012
V16	22,0	240,0	603012
V17	22,0	240,0	603012
X8	22,0	240,0	603012
X9	22,0	240,0	603012
X10	22,0	240,0	603012
X11	22,0	240,0	603012
X12	22,0	240,0	603012
X13	22,0	240,0	603012
X14	22,0	240,0	603012
X15	22,0	240,0	603012
X16	22,0	240,0	603012
X17	22,0	240,0	603012

APÊNDICE F – Calor recebido pelo ar

CÓDIGO MEDIÇÃO	Calor cedido pela água, Q _{água} (J/s)	Rendimento Térmico (%)	Calor recebido pelo ar, Q _{ar} (J/s)
A8	1855450,2	57,6	3222298,5
A9	1484360,2	51,6	2875947,8
A10	2133767,7	31,3	6821871,9
A11	2443009,4	65,1	3754194,2
A12	2163454,9	76,2	2838838,8
A13	2090473,9	84,5	2473933,6
A14	2313127,9	83,9	2758436,0
A15	2269834,1	61,3	3704715,6
A16	2640924,1	62,0	4261350,6
A17	2702772,5	60,8	4446895,6
B8	1496729,8	25,8	5801374,3
B9	1651350,7	33,7	4898388,5
B10	2207985,7	52,4	4211872,0
B11	2653293,8	49,5	5356066,2
B12	2245094,7	55,8	4026326,9
B13	2554336,4	58,8	4341753,5
B14	2350236,9	51,3	4582962,0
B15	2684218,0	55,9	4799431,2
B16	2374976,3	51,5	4613886,2
B17	2826469,1	55,8	5065379,0
C8	2517227,4	53,3	4719028,3
C9	2535781,9	64,7	3921184,8
C10	2783175,3	77,1	3611943,1
C11	2783175,3	78,4	3550094,7
C12	2845023,6	69,3	4106729,8
C13	2776990,5	75,6	3673791,4
C14	2882132,6	75,9	3797488,1
C15	2993459,7	76,3	3921184,8
C16	3110971,5	68,3	4552037,8
C17	2981090,0	68,3	4366492,8
D8	2337867,3	78,6	2974905,2
D9	2585260,6	77,3	3345995,2
D10	2826469,1	77,5	3649052,1
D11	3012014,2	68,6	4391232,1
D12	2770805,6	75,8	3655236,9
D13	2826469,1	73,7	3834597,1
D14	2826469,1	71,4	3958293,8
D15	2764620,8	67,7	4081990,4
D16	2820284,3	70,2	4020142,1
D17	2770805,6	81,3	3407843,5
E8	2016255,9	81,5	2473933,6
E9	2078104,2	86,2	2412085,3
E10	2139952,6	82,4	2597630,3
E11	2449194,3	80,8	3030568,7
E12	2436824,6	74,6	3265592,4
E13	2306943,1	75,1	3073862,5
E14	2616184,8	62,4	4193317,5
E15	4601516,5	84,7	5430284,3
E16	2560521,3	81,5	3141895,7
E17	2560521,3	86,6	2956350,7

Continua

Continuação

F8	2245094,7	82,5	2721327,0
F9	2183246,4	76,9	2838838,8
F10	2214170,6	76,3	2900687,1
F11	2541966,8	80,6	3154265,3
F12	2053364,9	69,5	2956350,7
F13	1874004,7	69,2	2708957,3
F14	1997701,4	73,7	2708957,3
F15	2003886,2	69,4	2888317,5
F16	2059549,7	63,3	3253222,7
F17	1694644,5	49,3	3438767,7
G8	1917298,5	59,2	3240853,0
G9	2257464,4	73,7	3061492,8
G10	1948222,7	88,7	2195616,1
G11	2319312,8	84,1	2758436,0
G12	2195616,1	87,4	2511042,6
G13	1948222,7	86,3	2257464,4
G14	2214170,6	83,6	2647109,0
G15	1904928,9	70,2	2715142,1
G16	2331682,4	82,0	2845023,6
G17	2245094,7	88,3	2541966,8
H8	2028625,6	61,0	3327440,7
H9	2344052,1	69,2	3389289,0
H10	2529597,1	76,0	3327440,7
H11	2412085,3	75,0	3216113,7
H12	2170876,7	74,7	2906872,0
H13	2418270,1	78,4	3086232,2
H14	2498672,9	76,1	3284146,9
H15	2684218,0	77,4	3469691,9
H16	2560521,3	64,6	3964478,6
H17	2752251,1	64,4	4273720,3
I8	1904928,9	79,8	2387345,9
I9	1997701,4	81,4	2455379,1
I10	2121398,1	82,3	2579075,8
I11	2065734,6	80,1	2579075,8
I12	2189431,2	79,2	2764620,8
I13	1453436,0	65,6	2214170,6
I14	1453436,0	78,9	1843080,5
I15	1904928,9	90,1	2115213,2
I16	1843080,5	64,5	2857393,3
I17	1911113,7	83,1	2300758,2
J8	2616184,8	75,1	3482061,5
J9	2678033,1	78,3	3420213,2
J10	2974905,2	78,7	3778933,6
J11	2851208,5	78,0	3655236,9
J12	2789360,1	81,9	3407843,5
J13	2684218,0	75,9	3537725,0
J14	2739881,5	76,2	3593388,6
J15	2678033,1	77,2	3469691,9
J16	2678033,1	78,6	3407843,5
J17	2374976,3	70,8	3352180,0

Continua

Continuação

K8	2665663,5	79,1	3.370.734,5
K9	2789360,1	67,8	4.112.914,6
K10	2257464,4	57,1	3.952.108,9
K11	2133767,7	67,8	3.148.080,5
K12	2139952,6	65,3	3.277.962,0
K13	2325497,6	75,2	3.092.417,0
K14	1595687,2	77,7	2.053.364,9
K15	2133767,7	67,8	3.148.080,5
K16	2764620,8	72,0	3.840.781,9
K17	2084289,1	68,6	3.036.753,5
L8	2845023,6	80,1	3.550.094,7
L9	2814099,5	72,3	3.890.260,6
L10	2752251,1	71,9	3.828.412,2
L11	2814099,5	62,4	4.508.744,0
L12	2814099,5	62,4	4.508.744,0
L13	2622369,6	64,4	4.069.620,8
L14	2313127,9	57,7	4.007.772,4
L15	2807914,6	62,4	4.502.559,2
L16	2925426,5	60,8	4.811.800,9
L17	2931611,3	59,4	4.935.497,5
M8	2943981,0	78,0	3.772.748,7
M9	2337867,3	67,3	3.475.876,7
M10	2776990,5	68,8	4.038.696,6
M11	2838838,8	69,2	4.100.544,9
M12	2783175,3	61,4	4.533.483,3
M13	2845023,6	60,3	4.719.028,3
M14	2968720,3	70,3	4.224.241,6
M15	2906872,0	67,8	4.286.090,0
M16	2783175,3	74,6	3.729.454,9
M17	2789360,1	85,9	3.247.037,9
N8	2449194,3	69,5	3.525.355,4
N9	2325497,6	72,3	3.216.113,7
N10	2826469,1	70,3	4.020.142,1
N11	2888317,5	76,6	3.772.748,7
N12	2826469,1	71,4	3.958.293,8
N13	2764620,8	69,8	3.958.293,8
N14	2826469,1	62,6	4.514.928,8
N15	3605758,2	71,4	5.046.824,5
N16	3543909,9	72,9	4.861.279,5
N17	2702772,5	62,4	4.329.383,8
O8	2906872,0	67,0	4.341.753,5
O9	2715142,1	66,4	4.088.175,3
O10	2776990,5	70,0	3.964.478,6
O11	2529597,1	68,1	3.717.085,2
O12	2467748,8	64,3	3.840.781,9
O13	2344052,1	64,1	3.655.236,9
O14	2529597,1	65,9	3.840.781,9
O15	2529597,1	72,9	3.469.691,9
O16	2591445,4	66,4	3.902.630,3
O17	2659478,6	65,0	4.094.360,1

Continua

Continuação

P8	2956350,7	67,0	4.409.786,6
P9	2801729,8	49,3	5.683.862,4
P10	2733696,6	54,7	4.997.345,9
P11	2807914,6	45,9	6.122.985,7
P12	2882132,6	50,7	5.690.047,3
P13	2758436,0	53,7	5.133.412,2
P14	3012014,2	60,1	5.009.715,5
P15	2826469,1	52,5	5.380.805,6
P16	2826469,1	52,5	5.380.805,6
P17	2826469,1	51,9	5.442.653,9
Q8	2832654,0	75,5	3.754.194,2
Q9	1960592,4	71,2	2.752.251,1
Q10	2783175,3	61,0	4.564.407,5
Q11	2845023,6	60,7	4.688.104,2
Q12	2845023,6	71,0	4.007.772,4
Q13	2783175,3	62,7	4.440.710,8
Q14	2906872,0	69,3	4.193.317,5
Q15	2968720,3	65,9	4.502.559,2
Q16	2906872,0	63,7	4.564.407,5
Q17	2783175,3	65,4	4.255.165,8
R8	2925426,5	77,9	3.754.194,2
R9	2776990,5	77,8	3.568.649,2
R10	2838838,8	76,9	3.692.345,9
R11	2900687,1	78,6	3.692.345,9
R12	2102843,6	72,6	2.894.502,3
R13	2708957,3	83,1	3.259.407,5
R14	2894502,3	74,6	3.877.890,9
R15	2894502,3	71,2	4.063.435,9
R16	1787417,0	67,5	2.647.109,0
R17	2875947,8	72,2	3.983.033,1
S8	2486303,3	65,7	3.785.118,4
S9	2541966,8	65,1	3.902.630,3
S10	2727511,8	67,7	4.026.326,9
S11	2789360,1	67,2	4.150.023,6
S12	2789360,1	70,4	3.964.478,6
S13	2789360,1	67,2	4.150.023,6
S14	2851208,5	65,8	4.335.568,6
S15	2913056,8	69,2	4.211.872,0
S16	2974905,2	68,6	4.335.568,6
S17	2851208,5	66,7	4.273.720,3
T8	2851208,5	75,3	3.785.118,4
T9	2814099,5	62,7	4.490.189,5
T10	2566706,1	64,2	3.995.402,8
T11	2628554,5	65,8	3.995.402,8
T12	2195616,1	63,8	3.438.767,7
T13	2504857,8	70,3	3.562.464,4
T14	2381161,1	69,2	3.438.767,7
T15	2374976,3	69,2	3.432.582,9
T16	2368791,4	61,4	3.859.336,4
T17	2090473,9	55,5	3.766.563,9

Continua

Continuação

U8	2535781,9	71,8	3.531.540,2
U9	2535781,9	78,7	3.222.298,5
U10	2845023,6	80,6	3.531.540,2
U11	2783175,3	80,2	3.469.691,9
U12	2845023,6	62,8	4.527.298,5
U13	2486303,3	61,5	4.044.881,4
U14	2820284,3	73,8	3.822.227,4
U15	1874004,7	63,8	2.937.796,2
U16	2350236,9	57,4	4.094.360,1
U17	2034810,4	56,6	3.593.388,6
V8	2739881,5	78,0	3.512.985,7
V9	2925426,5	76,4	3.828.412,2
V10	2752251,1	61,7	4.459.265,3
V11	2449194,3	60,8	4.026.326,9
V12	2690402,8	64,0	4.205.687,1
V13	2566706,1	63,8	4.020.142,1
V14	2690402,8	64,0	4.205.687,1
V15	2634739,3	63,5	4.150.023,6
V16	2690402,8	64,9	4.143.838,8
V17	2381161,1	63,1	3.772.748,7
X8	2251279,6	60,7	3.710.900,4
X9	2065734,6	63,0	3.277.962,0
X10	2245094,7	64,9	3.457.322,2
X11	2368791,4	66,1	3.581.018,9
X12	2492488,1	62,1	4.013.957,3
X13	2121398,1	62,5	3.395.473,9
X14	2306943,1	70,5	3.271.777,2
X15	2121398,1	63,6	3.333.625,5
X16	2121398,1	62,5	3.395.473,9
X17	1564763,0	59,0	2.653.293,8