



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JEAN MARCEL PRAZERES SILVA

ESTUDO DO IMPACTO DAS NÃO
CONFORMIDADES DE UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO NO SEU CUSTO TOTAL



SALVADOR

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA – UFBA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL – PEI

JEAN MARCEL PRAZERES SILVA

ESTUDO DO IMPACTO DAS NÃO CONFORMIDADES DE UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO NO SEU CUSTO TOTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador

2021

JEAN MARCEL PRAZERES SILVA

ESTUDO DO IMPACTO DAS NÃO CONFORMIDADES DE UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO NO SEU CUSTO TOTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientadores: Prof^ª. Dr^ª. Rosana Lopes Fialho

Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini
Pessoa

Prof. Dr. Salvador Ávila Filho

Salvador

2021

S586 Silva, Jean Marcel Prazeres.

Estudo do impacto das não conformidades de uma torre de resfriamento no seu custo total / Jean Marcel Prazeres Silva. – Salvador, 2021.

140 f.: il. color.

Orientadores: Profa. Dra. Rosana Lopes Fialho.

Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

Prof. Dr. Salvador Ávila Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2021.

1. Torres de resfriamento. 2. Não conformidades. 3. Custo. I. Fialho, Rosana Lopes. II. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini. III. Ávila Filho, Salvador. IV. Universidade Federal da Bahia. V. Título.


CDD: 660

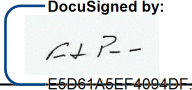
ESTUDO DO IMPACTO DAS NÃO-CONFORMIDADES DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO NO SEU CUSTO TOTAL


JEAN MARCEL PRAZERES SILVA

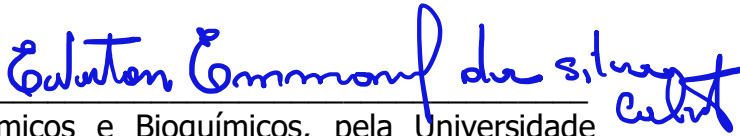
Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dra. Rosana Lopes Lima Fialho 
Doutora em Engenharia Química, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe), UFRJ, Brasil, 1998.

Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa 
Doutor em Engenharia de Processos, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 1992.

Prof. Dr. Reinaldo Coelho Mirre 
Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (Escola de Química), UFRJ, Brasil, 2012.

Prof. Dr. Ewerton Emmanuel da Silva Calixto 
Doutor em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2016.

Salvador, BA - BRASIL
Março/2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos os irmãos de luzes por estarem sempre me guiando, me protegendo e me dando forças para alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais por todo o amor, pelo incentivo e contribuição com toda a minha jornada educacional e da vida. Ao meu irmão e namorada pelo amor, apoio e companheirismo.

Aos meus orientadores Rosana Lopes Fialho, Salvador Ávila Filho e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa pelos ensinamentos, disposição, paciência, confiança, apoio, “puxões de orelha”, entre outras contribuições acadêmicas.

Aos professores do Programa de Engenharia Industrial da UFBA pelos ensinamentos.

Aos colegas do Grupo de Eficiência Energética (GREEN) da UFBA e aos colegas de curso.

Ao CNPq pelo apoio à pesquisa e ao financiamento para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários da refinaria de petróleo que nos deram todo o apoio e suporte necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

RESUMO

SILVA, J. M. P. Estudo do impacto das não conformidades de uma torre de resfriamento no seu custo total. 2020. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2020.

As torres de resfriamento são equipamentos bastante utilizados e de grande importância para o setor industrial. São responsáveis pela remoção de calor das correntes quentes de um processo produtivo, além de serem consideradas como as maiores consumidoras de água em uma planta industrial. Por esta razão, o seu desempenho reflete diretamente no consumo sustentável da água presente no meio ambiente. Devido a sua importância em todo o contexto industrial e ambiental, o mapeamento das não conformidades identificadas com frequência em operações de torres de resfriamento, torna-se uma metodologia favorável no combate aos problemas operacionais, na redução de desempenho do equipamento e nos problemas econômicos e ambientais que são gerados. No presente trabalho são discutidas quatro não conformidades comumente identificadas em operações, como: (1) variações da corrente de água de circulação - $\Delta\dot{Q}_w$; (2) variações do ciclo de concentração da água de circulação - ΔCC ; (3) variações da corrente de ar - $\Delta\dot{Q}_a$; (4) variações do coeficiente de transferência térmica por área de superfície do enchimento - $\Delta K.a$. Dados operacionais foram obtidos de uma torre de resfriamento localizada em uma refinaria de petróleo brasileira, para o desenvolvimento de um estudo de caso. O modelo de Merkel foi selecionado como base para simular as influências das variáveis relacionadas a cada irregularidade ($\Delta\dot{Q}_w$, ΔCC , $\Delta\dot{Q}_a$ e $\Delta K.a$) no custo total do equipamento. Os resultados mostram que dos quatro problemas abordados, três impactam significativamente no custo total, sendo estes ΔCC , $\Delta\dot{Q}_w$ e $\Delta K.a$, e dentro dos limites operacionais aceitáveis estes impactos são de até R\$ 81.402.803,56/ano, R\$ 80.135.446,64/ano e R\$ 68.299.429,50/ano, respectivamente. Nota-se então que as presenças de tais irregularidades podem resultar em gastos desnecessários, principalmente, com água de reposição e aditivos químicos, sendo a principal causa-raiz, trazida pelo diagrama de árvore, a própria negligência humana.

Palavras-chave: Torres de resfriamento, Não conformidades, Custo.

ABSTRACT

SILVA, J. M. P. Study of the impact of a cooling tower's nonconformities on your total cost. 2020. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2020.

Cooling towers are widely used equipment of great importance for the industrial sector. They are responsible for removing heat from hot currents in a production process, in addition to being considered the largest consumers of water in an industrial plant. For this reason, its performance directly reflects the sustainable consumption of water present in the environment. Due to its importance in the entire industrial and environmental context, the mapping of non-conformities frequently identified in cooling tower operations, becomes a favorable methodology in combating operational problems, in the reducing equipment performance and economic problems and environmental factors that are generated. In the present work, four nonconformities commonly identified in operations are discussed, such as: (1) variations in the circulating water stream - $\Delta\dot{Q}_w$; (2) variations in the circulation water concentration cycle - ΔCC ; (3) variations in airflow - $\Delta\dot{Q}_a$; (4) variations in the heat transfer coefficient per surface area of the filler - $\Delta K.a$. Operational data was obtained from a cooling tower located at a Brazilian oil refinery, for the development of a case study. The Merkel model was selected as a basis to simulate the influences of the variables related to each irregularity ($\Delta\dot{Q}_w$, ΔCC , $\Delta\dot{Q}_a$ e $\Delta K.a$) in the total cost of the equipment. The results show that of the four problems addressed, three significantly impact the total cost, these being ΔCC , $\Delta\dot{Q}_w$ and $\Delta K.a$ and within acceptable operating limits these impacts are up to R\$ 81.402.803,56/year, R\$ 80.135.446,64/year and R\$ 68.299.429,50/year, respectively. It is noted, then, that the presence of such irregularities can result in unnecessary expenses, mainly with make-up water and chemical additives, being the main root cause, brought by the tree diagram, human negligence itself.

Keywords: Cooling tower, Nonconformities, Cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disponibilidade de água atual e futura em relação à capacidade de refino nos continentes do mundo (HWANG & MOORE, 2011).....	23
Figura 2.2 – Consumo típico de água em uma refinaria de petróleo (HWANG & MOORE, 2011).....	24
Figura 2.3 – Esquema simplificado de uma Torre de Resfriamento (OLIVEIRA, 2011).....	28
Figura 2.4 – Classificações das Torres de Resfriamento (Fonte: Própria).....	30
Figura 2.5 – Esquema mostrando a evaporação da água e transferência de calor em um sistema de resfriamento. No exemplo $T_1 > T_2$ e umidade relativa do ar $(\Phi_R) < 100\%$. (TROVATI, 2004).....	31
Figura 2.6 – Torre de Resfriamento não- evaporativa com o detalhe das serpentinas (COOLING TOWER DESIGN, 2011).....	31
Figura 2.7 – Torre de tiragem natural ou hiperbólica (ASHRAE, 2000).....	32
Figura 2.8 – Torre de Resfriamento com tiragem mecânica forçada (STAFF, 2006).....	33
Figura 2.9 – Torres de Resfriamento com tiragem mecânica induzida. a) Fluxo em contracorrente, b) Fluxo em corrente cruzada (CASSETTA, 2003).....	34
Figura 2.10 – Sistema de distribuição de água por gravidade (CASSETTA; MANSUR, 2009).....	35
Figura 2.11 – Sistema de distribuição de água por pressão – spray (MANSUR, 2009).....	36
Figura 2.12 – Balanço de massa e energia do volume de controle de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente (MCCABE <i>et al.</i> , 2005).....	40
Figura 2.13 – Linhas de equilíbrio do ar saturado e de operação para uma torre de resfriamento em contracorrente (Adaptado de PERRY, 2008).....	42
Figura 2.14 – Interface água-ar de uma gota de água pela teoria de Merkel (Adaptada de CASSETTA, 2003).....	45
Figura 2.15 – Esquema representativo da Teoria de Merkel no interior de uma torre de resfriamento (MCCABE <i>et al.</i> , 2005).....	46
Figura 3.1 – Fluxograma do algoritmo para o cálculo do custo total de operação de uma torre	

de resfriamento de contracorrente (Fonte: Própria).....	60
Figura 3.2 – Representação esquematizada da torre de resfriamento do tipo contracorrente e tiragem mecânica induzida (Fonte: Própria).....	68
Figura 3.3 – Torre de resfriamento selecionada de uma refinaria do nordeste brasileiro (Fonte: Própria).....	73
Figura 3.4 – Representações das não conformidades selecionadas no estudo da torre de resfriamento (Fonte: Própria).....	78
Figura 3.5 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações da corrente de circulação (Fonte: Própria).....	79
Figura 3.6 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações do ciclo de concentração (Fonte: Própria).....	81
Figura 3.7 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações da corrente de ar (Fonte: Própria).....	83
Figura 3.8 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações do coeficiente de transferência térmica por área de superfície do enchimento (Fonte: Própria).....	85
Figura 4.1 – Irregularidades identificadas em operação da torre de resfriamento da refinaria (Imagem alterada de ASME PTC 23, 2003).....	90
Figura 4.2 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações da corrente de água de circulação: a) Gráfico das variações da Temperatura da água fria na saída da torre x Vazão da água de circulação da torre; b) Gráfico das variações do Ciclo de concentração x Índice de Puckorius x Vazão da água de circulação; c) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Vazão de água de circulação. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para $\Delta\dot{Q}_w$ (Fonte: Própria).....	93
Figura 4.3 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais totais mensais e anuais relacionadas com as variações da corrente de água de circulação (Fonte: Própria).....	95
Figura 4.4 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações do ciclo de concentração da água de circulação: a) Gráfico das variações dos Índices de Puckorius e de Saturação de Langelier x Ciclo de concentração; b) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Ciclo de concentração. As linhas tracejadas verdes	

representam os limites aceitáveis para ΔCC (Fonte: Própria).....	99
Figura 4.5 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais totais mensais e anuais relacionadas com as variações do ciclo de concentração da água de circulação (Fonte: Própria).....	101
Figura 4.6 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações da vazão de ar: a) Gráfico das variações da Temperatura da água fria na saída da torre x Potências dos motores dos ventiladores da torre; b) Gráfico das variações do Ciclo de concentração x Índice de Puckorius x Vazão de ar; c) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Vazão de ar. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para $\Delta \dot{Q}_a$ (Fonte: Própria).....	104
Figura 4.7 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais totais mensais e anuais relacionadas com as variações da vazão de ar (Fonte: Própria).....	106
Figura 4.8 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações da constante $K.a$: a) Gráfico das variações da Temperatura da água fria na saída da torre x NUT; b) Gráfico das variações da vazão de água de circulação x Constante $K.a$; c) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Constante $K.a$. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para $K.a$ (Fonte: Própria).....	109
Figura 4.9 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais mensais e anuais relacionadas com as variações da Constante $K.a$ (Fonte: Própria).....	111
Figura 4.10 – Diagramas de Pareto do Custo operacional total x Não conformidades para as condições operacionais limites: a) Gráfico para os gastos mensal; b) Gráfico para os gastos anual; c) Gráfico para as economias mensal; d) Gráfico para as economias anual (Fonte: Própria).....	116
Figura 4.11 – Diagramas de Pareto do Custo operacional total x Não conformidades para as condições operacionais extrapoladas: a) Gráfico para os gastos mensal; b) Gráfico para os gastos anual; c) Gráfico para as economias mensal; d) Gráfico para as economias anual (Fonte: Própria).....	117
Figura 4.12 – Diagrama de árvore relacionada à variação da corrente de água de circulação da torre de resfriamento (Fonte: Própria).....	119
Figura 4.13 – Diagrama de árvore relacionada à variação do ciclo de concentração da água de circulação da torre de resfriamento (Fonte: Própria).....	122

Figura 4.14 – Diagrama de árvore relacionada à variação da corrente de ar da torre de resfriamento (Fonte: Própria).....	124
Figura 4.15 – Diagrama de árvore relacionada à variação do coeficiente global de transferência térmica e de massa da torre de resfriamento (Fonte: Própria).....	127
Figura B.1 – Cálculo para determinação da função NUT (f_{NUT}) (Fonte: Própria).....	139
Figura B.2 – Cálculo do balanço de massa e custo total operacional (Fonte: Própria).....	139
Figura B.3 – Cálculo da potência dos motores dos ventiladores, do ciclo de concentração e índice de estabilidade (Fonte: Própria).....	139
Figura B.4 – Cálculo do fator de mensuração e anualização, cálculo da variação do $K.a$ e dados das propriedades físico-químicas da AGR e da torre de resfriamento (Fonte: Própria).....	140
Figura B.5 – Cálculo das vazões mássicas dos aditivos químicos (Fonte: Própria).....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Controle de pH da AGR da torre de resfriamento (Adaptado de SILVA, 2013).....	49
Tabela 2.2 – Conversão da condutividade para TDS (Adaptado de GONDIM, 2014).....	51
Tabela 2.3 – Faixa de controle físico-químico do tratamento da água de resfriamento (Adaptado de TROVATI, 2004).....	52
Tabela 2.4 – Fatores que afetam a corrosão de acordo com Drew (1979) (Adaptado de DREW, 1979).....	54
Tabela 2.5 – Tendências de corrosão e incrustação da água de acordo com IP (GONDIM, 2014).....	56
Tabela 2.6 – Tendências de corrosão e incrustação da água de acordo com LSI (CARRIER, 1965 apud MIRRE, 2012).....	57
Tabela 3.1 – Dados de projeto da torre de resfriamento da unidade de refino de petróleo.....	74
Tabela 3.2 – Preços das utilidades e volume de recheio.....	74
Tabela 3.3 – Dados das propriedades físico-químicas da AGR utilizada na torre.....	75
Tabela 3.4 – Dados das características dos aditivos químicos utilizados na AGR da torre.....	75
Tabela 3.5 – Densidades da água e do ar.....	75
Tabela 4.1 – Resultados operacionais das simulações variando a corrente de água de circulação.....	91
Tabela 4.2 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação da corrente de água de circulação.....	94
Tabela 4.3 – Resultados operacionais das simulações variando o ciclo de concentração.....	98
Tabela 4.4 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação do CC.....	100
Tabela 4.5 – Resultados operacionais das simulações para limites aceitáveis do ciclo de concentração.....	101
Tabela 4.6 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento para limites aceitáveis de CC.....	102

Tabela 4.7 – Resultados operacionais das simulações variando a corrente de ar de circulação.....	103
Tabela 4.8 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação da corrente de ar.....	105
Tabela 4.9 – Resultados operacionais das simulações variando o coeficiente $K.a$	108
Tabela 4.10 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação do coeficiente $K.a$	110
Tabela 4.11 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações da corrente de água de circulação.....	112
Tabela 4.12 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações do ciclo de concentração.....	113
Tabela 4.13 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações da vazão de ar.....	114
Tabela 4.14 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações do coeficiente $K.a$	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Descrição
a	Área de contato por unidade de volume do enchimento ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)
AGR	Água de resfriamento
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AT	Distância percorrida pelo ar na direção horizontal (m)
BSI	<i>British Standards Institution</i>
$C_{\text{adt.n}}$	Concentração desejada do aditivo químico n (ppm)
CAPEX	Custo de capital ($\text{R}\$. \text{mês}^{-1}$ e $\text{R}\$. \text{ano}^{-1}$)
$C_{\text{AT.circ}}$	Concentração da alcalinidade total da água de circulação (ppm CaCO_3)
$C_{\text{AT.rep}}$	Concentração da alcalinidade total da água de reposição (ppm CaCO_3)
CC	Ciclo de concentração da água de resfriamento da torre (adimensional)
CC_{projeto}	Ciclo de concentração da água de resfriamento da torre de projeto (adimensional)
$C_{\text{Ca}^{2+}_{\text{circ}}}$	Concentração de dureza cálcica da água de circulação (ppm CaCO_3)
$C_{\text{Ca}^{2+}_{\text{rep}}}$	Concentração de dureza cálcica da água de reposição (ppm CaCO_3)
$C_{\text{L.vap.Tpo}}$	Calor latente de vaporização na temperatura de orvalho ($\text{J}.\text{kg}^{-1}$)
$C_{\text{SDT.circ}}$	Concentração dos sólidos dissolvidos totais da água de circulação (ppm)
$C_{\text{SDT.rep}}$	Concentração de sólidos dissolvidos totais da água de reposição (ppm)
CTI	<i>Cooling Tower Institute</i>
$\text{Custo}_{\text{adt}}$	Custo com aditivos químicos ($\text{R}\$. \text{mês}^{-1}$ e $\text{R}\$. \text{ano}^{-1}$)
Custo_{EE}	Custo com energia elétrica ($\text{R}\$. \text{mês}^{-1}$ e $\text{R}\$. \text{ano}^{-1}$)
$\text{Custo}_{\text{rep}}$	Custo de água de reposição ($\text{R}\$. \text{mês}^{-1}$ e $\text{R}\$. \text{ano}^{-1}$)
Custo_{T}	Custo total de operação ($\text{R}\$. \text{mês}^{-1}$ e $\text{R}\$. \text{ano}^{-1}$)

$Custo_{vol. enc}$	Custo do enchimento da torre de resfriamento ($R\$. m_{enc}^{-3}$)
c_w	Calor específico da água ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
EE	Energia elétrica (kWh)
F	Fator o fator de anualização ($1.an^{-1}$)
FP(n)	Fator de potência do motor (adimensional)
H_A	Entalpia específica do ar úmido no interior da torre ($J.kg^{-1}$)
H_{An}	Entalpias específicas do ar úmido no interior da torre ($J.kg^{-1}$)
H_U	Entalpia específica do ar saturado na temperatura da água ($J.kg^{-1}$)
H_{Un}	Entalpia específica do ar saturado na temperatura da água ($J.kg^{-1}$)
I_n	Corrente nominal do motor do ventilador (A)
IP	Índice de Estabilidade de Puckorius (adimensional)
K	Coefficiente de transferência de massa ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)
l_{enc}	Largura do enchimento (m)
LSI	Índice de Saturação de Langelier (adimensional)
\dot{m}_a	Vazão mássica de ar induzida pelo ventilador ($kg.h^{-1}$)
\dot{m}_{an}	Vazão mássica de ar nominal ($kg.h^{-1}$)
$\dot{m}_{arraste}$	Vazão de perdas da água por arraste ($kg.s^{-1}$)
Me	Número de Merkel
\dot{m}_{evap}	Vazão de perdas da água por evaporação ($kg.s^{-1}$)
\dot{m}_{purga}	Vazão da água de purga (<i>blowdown</i>) ($kg.s^{-1}$)
\dot{m}_{rep}	Vazão da água de reposição (<i>make-up</i>) ($kg.s^{-1}$)
\dot{m}_{vaz}	Vazão de perdas da água por vazamentos ($kg.s^{-1}$)
\dot{m}_w	Vazão mássica da corrente de água ($kg.s^{-1}$)
NUT	Número de Unidades de Transferência (adimensional)
$NUT_{calculado}$	Número de Unidades de Transferência calculado (adimensional)
$NUT_{projeto}$	Número de Unidades de Transferência de projeto (adimensional)

OPEX	Custo operacional (R\$.mês ⁻¹ e R\$.ano ⁻¹)
P _{atm}	Pressão atmosférica (Pa)
pHeq	pH equivalente (adimensional)
pH _s	pH de saturação (adimensional)
Pot _{bomb}	Potência do motor da bomba (kW)
Pot _{vent}	Potência do motor do ventilador (kW)
P _{SBU}	Pressão de vapor da água em determinada temperatura (Pa)
P _v	Pressão parcial de vapor da água (Pa)
Q̇ _{arraste}	Vazão volumétrica de perdas da água por arraste (m ³ .h ⁻¹)
Q̇ _{purga}	Vazão volumétrica da água de purga (<i>blowdown</i>) (m ³ .h ⁻¹)
Q̇ _{vaz}	Vazão volumétrica de perdas da água por vazamento (m ³ .h ⁻¹)
SI	Sistema Internacional de Unidades
T _{BU}	Temperatura de bulbo úmido (K)
T _F	Temperatura da corrente de água na saída da torre (K)
T _n	Temperatura intermediária correspondente (K)
t _{op}	Tempo de operação (h.ano ⁻¹ e h.mês ⁻¹)
T _{PO}	Temperatura de orvalho (K)
T _Q	Temperatura da corrente de água quente na entrada da torre (K)
T _{rep}	Temperatura da água de reposição (°C)
U _A	Umidade absoluta (kg _{água} .kg _{ar seco} ⁻¹)
V	Volume específico do enchimento (m ³)
V _n	Tensão nominal do motor do ventilador (V)
W _n	Vazão mássica do aditivo químico n (kg.h ⁻¹)
Z _{enc}	Altura do enchimento (m)

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
η_m	Eficiência do motor do ventilador (%)
ρ_a	Densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)
ρ_w	Densidade da água ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)
$\$_{\text{adt.n}}$	Preço do aditivo químico n ($\text{R}\$. \text{kg}_{\text{adt.n}}^{-1}$)
$\$_{\text{EE}}$	Preço da energia elétrica ($\text{R}\$. \text{kWh}^{-1}$)
$\$_{\text{rep}}$	Preço da água de reposição ($\text{R}\$. \text{m}^{-3}$)
$\$_{\text{vol.enc}}$	Preço do volume de enchimento ($\text{R}\$. \text{m}^{-3}$)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo geral.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 DEMANDA DE ÁGUA EM UMA REFINARIA DE PETRÓLEO.....	22
2.2 PRINCIPAIS CONSUMIDORES DE ÁGUA NA REFINARIA.....	23
2.3 TORRE DE RESFRIAMENTO E SUA IMPORTÂNCIA NA INDÚSTRIA.....	28
2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO.....	30
2.4.1 Transferência de calor da água.....	30
2.4.2 Tiragem do ar.....	32
2.4.3 Escoamento do ar em relação à água.....	34
2.4.4 Alimentação de água.....	35
2.5 CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	36
2.6 VARIÁVEIS PSICROMÉTRICAS.....	38
2.7 DESEMPENHO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO.....	39
2.7.1 Balanço de massa e energia da torre de resfriamento.....	39
2.7.2 Modelos matemáticos de torre de resfriamento.....	42
2.7.3 Teoria de Merkel.....	44
2.8 ÁGUA DE RESFRIAMENTO.....	49
2.8.1 Principais parâmetros da água analisados em um sistema de resfriamento.....	49
2.8.2 Principais problemas em um sistema de resfriamento.....	52
2.8.3 Índices de estabilidade da água de resfriamento.....	55
2.9 CONTRIBUIÇÕES DA LITERATURA.....	57
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	59
3.1 MODELO MATEMÁTICO.....	61
3.1.1 Cálculo das entalpias específicas do ar saturado na temperatura da água (H_{Un}).....	62
3.1.2 Cálculo das entalpias específicas do ar úmido no interior da torre (H_{An}).....	66
3.1.3 Cálculo do NUT requerido pelo sistema.....	67
3.1.4 Balanço de massa para a água da torre de resfriamento.....	67

3.1.5	Ciclo de concentração da torre de resfriamento.....	69
3.1.6	Tratamento da água de resfriamento com aditivos químicos e qualidade do meio aquoso.....	69
3.1.7	Custo total de operação.....	71
3.2	ESTUDO DE CASO.....	72
3.2.1	Considerações teóricas.....	76
3.3	NÃO CONFORMIDADES.....	77
3.3.1	Variações da corrente de água de circulação.....	78
3.3.2	Variações do ciclo de concentração da água de circulação.....	79
3.3.3	Variações da corrente de ar.....	81
3.3.4	Variações do coeficiente global de transferência de calor e massa por área de superfície do enchimento.....	83
3.4	FERRAMENTAS PARA A ANÁLISE DE NÃO CONFORMIDADES.....	85
3.4.1	Diagrama de Pareto.....	86
3.4.2	Diagrama de árvore.....	87
	CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	88
4.1	NÃO CONFORMIDADES.....	89
4.1.1	Variações da corrente de água de circulação.....	89
4.1.2	Variações do ciclo de concentração da água de circulação.....	95
4.1.3	Variações da corrente de ar.....	102
4.1.4	Variações do coeficiente global de transferência de calor e massa por área de superfície do enchimento.....	106
4.2	FERRAMENTAS PARA A ANÁLISE DE NÃO CONFORMIDADES.....	111
4.2.1	Diagrama de Pareto.....	111
4.2.2	Diagrama de árvore.....	118
	CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
	ANEXOS.....	138

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (2016) demonstra que as mudanças climáticas têm como a principal causa influenciadora, as emissões antropogênicas dos gases de efeito estufa (GEEs). De acordo com o IPCC (2014), entre o período de 1970 e 2010, a queima de combustíveis fósseis em processos industriais tem contribuído com, aproximadamente, 78% do aumento de GEEs, em especial o CO₂. Diante deste cenário, tais mudanças vêm criando um alerta para toda a sociedade e o setor industrial. Os efeitos climáticos têm acarretado inúmeras modificações na crosta terrestre, em especial, na redução da disponibilidade hídrica.

Com o aumento dos níveis de GEEs, o efeito na temperatura terrestre tem preocupado as nações mundiais, pois tem sido considerado um fator crítico na previsão e avaliação do futuro dos recursos hídricos (KIM *et al.*, 2014; KUNDU *et al.*, 2017). No entanto, a água continua sendo o insumo básico de fundamental importância na maioria dos processos produtivos, com destaque nas indústrias de refino de petróleo, consideradas grandes intensificadoras de energia. A água é utilizada para geração da energia elétrica e térmica, além do próprio refino do petróleo bruto. O setor energético se tornou o responsável por, aproximadamente, 10% das retiradas globais de água, entre operações de usinas, produção de combustíveis fósseis e biocombustíveis (IEA, 2016).

Em refinarias de petróleo, onde o consumo de água está diretamente relacionado com o petróleo processado, a sua principal aplicabilidade se destina às torres de resfriamento, correspondendo a 60% – 70% de toda a água consumida pelo setor (PERES, 2010). As torres de resfriamento são equipamentos encontrados, principalmente, no setor industrial, podendo também, ser vistas em grandes estabelecimentos, como shoppings, hospitais, hotéis, aeroportos entre outros (FEMP, 2011). A sua principal função se baseia no princípio simultâneo da troca térmica e transferência de massa entre uma corrente de água quente, oriunda de um processo, e uma corrente de ar ambiente. Os sistemas de resfriamento, os quais se utilizam as torres de resfriamento, são os mais encontrados no setor industrial, por serem

sistemas que trabalham com altas vazões de água e restrições de temperaturas para consumidores da água de resfriamento (ÁVILA *et al.*, 2013).

Para uma melhor compreensão sobre o funcionamento de torres de resfriamento é necessário determinar as propriedades do sistema ar-água por meio da psicrometria. Alguns conceitos dentro da psicrometria são importantes serem entendidos, pois são frequentemente utilizados em situações como o dimensionamento ou o cálculo de desempenho desses equipamentos, como por exemplo, a temperatura de bulbo úmido, definida como sendo a temperatura atingida pela água quando uma pequena quantidade desta água é evaporada em uma corrente de ar úmido não saturado, sendo teoricamente a menor temperatura alcançada pela água resfriada (CSETTA, 2010).

Nem sempre as torres de resfriamento são gerenciadas da forma que deveriam, sendo alvos de negligências administrativas, por não estarem ligados diretamente ao setor produtivo, reduzindo, conseqüentemente, a sua confiabilidade operacional. Por motivos como este, ainda são encontradas com frequência, torres de resfriamento em más condições operacionais, apresentando grandes perdas (purgas, arrastes, transbordos e evaporações) e tornando frequente a reposição destas águas perdidas. A frequência destas reposições é um indicativo do mau funcionamento do equipamento, surgindo assim, uma grande oportunidade para estudos de melhorias (SILVA *et al.*, 2016).

Dentro deste contexto, o elevado consumo de água pela indústria de refino de petróleo e a sua carência por cuidados adequados ao principal consumidor de água no setor, a torre de resfriamento vem ganhando importância para área de pesquisa e desenvolvimento em centros universitários e de pesquisas, além do próprio setor industrial, buscando por alternativas técnicas ou tecnológicas para tornar os processos mais eficientes em relação ao consumo hídrico, preservando a sua qualidade e disponibilidade no meio (ÁVILA *et al.*, 2017).

A realização de trabalhos que visem o desenvolvimento e a melhoria operacional de torres de resfriamento é de extrema importância para a viabilidade econômica do setor industrial de refino de petróleo. O combate aos problemas que acarretam um baixo desempenho operacional deste equipamento, pelo simples fato de uma atenção redobrada por meio de auditorias/vistorias periódicas pode ser uma maneira eficaz e de baixo custo para minimizar ou eliminar as não conformidades responsáveis por prejuízos operacionais, econômicos e ambientais.

Na literatura são encontrados muitos trabalhos abordando torres de resfriamento.

Contudo, é notado uma carência de estudos tratando das não conformidades encontradas em operação, e seus respectivos impactos no desempenho do equipamento e no custo operacional.

O trabalho apresentado nesta dissertação demonstra a partir de análises feitas em campo, com o auxílio de especialistas, e informações adquiridas a partir da literatura e de profissionais com expertise no assunto, quatro não conformidades encontradas com frequência em torres de resfriamento. O efeito de cada não conformidade no custo total (CAPEX e OPEX) é apresentado, sendo mostrados pelas suas relevâncias, através do Diagrama de Pareto, e relacionados as possíveis causas existentes em operação pelo Diagrama de Árvore.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Identificar e analisar os impactos das não conformidades encontradas em uma torre de resfriamento do tipo contracorrente sobre o seu custo total (OPEX e CAPEX).

1.2.2 Objetivo específico

- Elaborar um modelo matemático que relacione os principais parâmetros com as não conformidades e a função custo total;
- Simular diferentes situações operacionais, analisar e comparar os resultados obtidos;
- Demonstrar a partir de ferramentas de gestão, as relevâncias de cada impacto gerado pelas não conformidades no custo total e causas secundárias que podem acarretar tais problemas;
- Propor soluções para melhorias operacionais e redução de custo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e um anexo.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema do trabalho, demonstrando as considerações gerais e justificativas, o objetivo geral e os específicos da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica trazendo abordagens da literatura sobre conceitos gerais de torres de resfriamento e trabalhos desenvolvidos e relacionados ao tema proposto desta dissertação.

O terceiro capítulo traz a metodologia aplicada para alcançar os objetivos do trabalho, descrevendo o modelo matemático, trazendo as equações utilizadas e as considerações teóricas.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Por fim, o quinto capítulo traz as possíveis conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

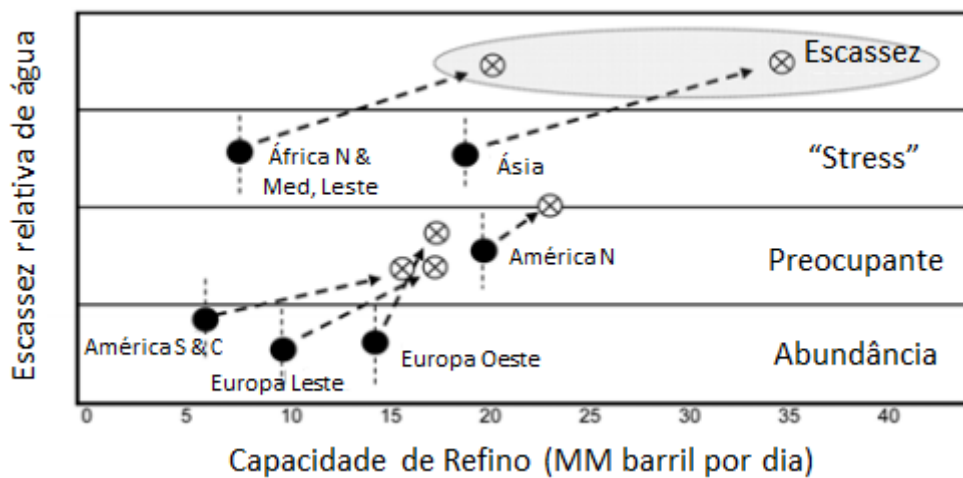
Este capítulo apresenta uma visão geral da demanda de água e descrição dos principais pontos de consumo em sistemas de resfriamento de uma unidade de refino localizada na região do nordeste brasileiro. Além de conceitos, definições, classificações, balanços de massa e energia que dão suporte ao desenvolvimento deste trabalho, bem como os principais problemas ocasionados nesses sistemas, que influenciam na oferta e demanda de utilidades no cenário ambiental.

2.1 DEMANDA DE ÁGUA EM UMA REFINARIA DE PETRÓLEO

As refinarias constituem um dos setores da indústria que mais utilizam a água no seu processo produtivo, sendo na faixa de 0,5 a 1,5 m³ de água captada por m³ de petróleo processado (HWANG *et al.*, 2011). No Brasil, atualmente as refinarias encontram-se em média na ordem de 0,83 m³ de água captada por m³ de petróleo processado (GONDIM, 2013a).

Diante do aumento da capacidade do parque de refino de petróleo prevista pela política energética e do cenário de escassez de recursos hídricos, a demanda de água prevista para 2025 apresenta tendência de elevação acima de 40% da capacidade de refino, considerando uma escassez de suprimento de água para o setor em alguns continentes do mundo, como mostra na Figura 2.1. Atualmente, o Norte da África, o Oriente Médio e a Ásia fazem parte de uma área estressante de disponibilidade hídrica, enquanto que a América do Sul, América Central e Europa possuem um abastecimento de água, relativamente, abundante, tendendo a uma situação mais preocupante ao longo dos próximos anos.

Figura 2.1 – Disponibilidade de água atual e futura em relação à capacidade de refino nos continentes do mundo.



Fonte: Hwang & Moore (2011).

2.2 PRINCIPAIS CONSUMIDORES DE ÁGUA NA REFINARIA

As plantas de refino de petróleo são grandes usuárias de água, que é usada nas unidades de processo como, em sistemas de geração de vapor (gerando vapor d'água), em torres de resfriamento (como água de resfriamento), no combate a incêndio (água de incêndio) e com fins potáveis (água para consumo humano e usada em processos como matéria-prima). A sua utilização tem se tornado um fator crítico em diversos procedimentos da produção, tornando-a um fator importante para a área da pesquisa e desenvolvimento, objetivando a otimização do seu uso e preservando a sua qualidade e quantidade disponível.

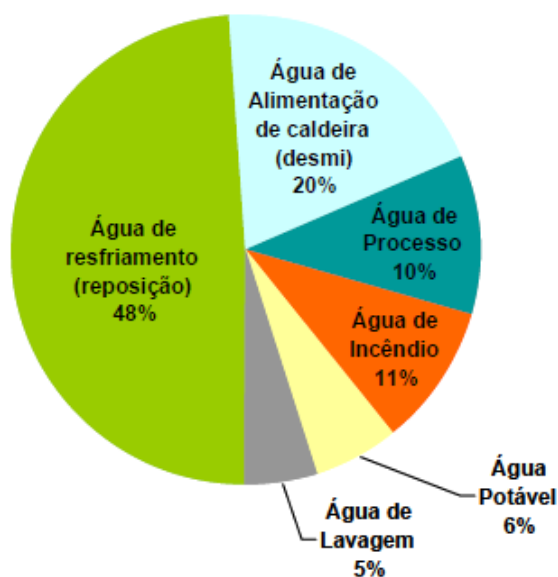
Em geral, além do seu alto consumo, perdas são comumente observadas. Vazamentos em equipamentos e tubulações, lançamentos inadequados em canaletas, procedimentos operacionais como paradas e partidas de planta, confiabilidade na operação, falta de manutenções ou testes hidrostáticos, outras práticas como lavagem do piso da planta, paisagismo, diluição de efluentes para redução de contaminantes em excesso são algumas práticas responsáveis pela geração de efluentes e consequentemente, potenciais para reduções dos desperdícios.

De acordo com Peres (2010), a água em refinarias de petróleo a nível mundial é utilizada em duas aplicações principais: em torres de resfriamento e em caldeiras para geração

de vapor, correspondendo em 60-70% e 20-30%, respectivamente. Os demais consumidores, correspondendo a aproximadamente 9%, estariam ligados à água de processo, de incêndio, de fins potáveis e de lavagem. Já segundo Amorim (2005), o consumo de água de resfriamento é responsável por 46%, água para geração de vapor, 26%, e os demais com 28%, nas refinarias da Petrobras.

De acordo com Hwang (2011), o consumo típico de água em uma refinaria de petróleo está dividido em 48% para torres de resfriamento, 20% para geração de vapor (caldeiras) e 32% para os demais, como demonstrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Consumo típico de água em uma refinaria de petróleo.



Fonte: Hwang & Moore (2011).

Muitos processos que fazem parte de uma refinaria de petróleo utilizam-se da água em sua forma líquida ou em vapor para exercer uma respectiva função, sendo as principais como, forma de resfriamento ou de aquecimento. A seguir, uma breve descrição destes processos é apresentada:

- Destilação atmosférica – É um processo usado para o fracionamento do petróleo em seus derivados. Nesta operação o petróleo é fracionado em correntes de GLP (gás liquefeito do petróleo), naftas, querosene, gasóleo e resíduos atmosféricos (RAT). A destilação atmosférica é realizada em um equipamento denominado de coluna ou torre de destilação, com o envolvimento de outros conjuntamente, como os fornos, trocadores de calor, entre

outros (BRASIL, 2011). A coluna é composta por uma sequência de bandejas ou pratos distribuídos ao longo de sua altura, permitindo a separação do petróleo nas suas diversas frações, a partir da diferença de volatilidade dos compostos. Devido à sua variação de temperatura, onde nos patamares mais elevados são encontradas temperaturas mais baixas e produtos mais voláteis são recuperados, e nos patamares mais baixos com temperaturas mais elevadas, produtos menos voláteis, as frações são obtidas de acordo com a diferença das temperaturas de ebulição de cada componente. Para isto, são necessárias grandes quantidades de energia térmica para promover a separação do petróleo. Neste processo, a água é utilizada, praticamente, como fonte de energia térmica (vapor) e como água de resfriamento (AGR), ambas utilizadas em trocadores de calor (refervedores, condensadores) presentes no processo de destilação atmosférica.

- Destilação a vácuo – A unidade de destilação a vácuo é a última etapa da destilação no processo de fracionamento do petróleo e, portanto, a sua carga é constituída pelas frações mais pesadas, cujas frações não podem ser obtidas nas etapas anteriores. Neste tipo de operação, o produto fracionado é o RAT (corrente de menor volatilidade da destilação atmosférica). Operado com pressões muito baixas para minimizar a quantidade de calor fornecida à carga e operar a temperaturas mais baixas. É possível, então, a separação do RAT em óleos pesados como gasóleo pesado, gasóleo leve e resíduos de vácuo (SKZLO, 2008). Os resíduos de vácuo após acerto de viscosidade pode ser enviado para tanque de armazenamento de óleo combustível (BRASIL, 2011). Neste processo, a água é utilizada como fonte de energia térmica (vapor) em fervedores, em ejetores e bombas de vácuo de anel líquido (vapor e água na forma líquida) e como água de resfriamento (AGR) em condensadores (GEA, 2021).
- Craqueamento térmico – É um processo de conversão de moléculas grandes em moléculas menores através da aplicação do calor sobre a carga. Atualmente, o processo de craqueamento catalítico substitui o craqueamento térmico, devido a sua maior eficiência. No entanto, ainda se aplicam dois tipos de craqueamento catalítico: o coqueamento retardado e a viscorredução. No coqueamento retardado, forma mais severa do craqueamento térmico, a carga principal (resíduo de vácuo), com temperatura em torno de 485°C, sofre uma intensa quebra de moléculas grandes em menores, obtendo produtos mais leves e de maior valor comercial (GONDIM, 2014). Já no processo de viscorredução, craqueamento térmico em temperaturas mais baixas, ocorre a partir da

diminuição da viscosidade de um resíduo que será usado como óleo combustível. Neste processo, a água é utilizada, como fonte de energia térmica (vapor), no processo de *stripping* (vapor) e como água de resfriamento (AGR) presentes em etapas do processo de craqueamento (SILVEIRA, 2019).

- Craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC) – É um processo de conversão (com reações químicas) na qual ocorre a quebra de moléculas com cadeias carbônicas maiores para menores, tendo como a principal carga os gasóleos produzidos na unidade de destilação a vácuo. Esta operação é realizada em elevadas temperaturas e na presença de catalisador, gerando compostos como o gás combustível, GLP (gás liquefeito do petróleo), nafta, gasolina, gásóleo leve e óleo decantado. No processo FCC também são gerados coque, que acabam sendo depositados no catalisador e queimado na etapa de regeneração do mesmo (BRASIL, 2011). Neste processo, a água é utilizada, como fonte de energia térmica (vapor), no processo de *stripping* (vapor), processo de regeneração do catalisador (processo de extração com água quente) e como água de resfriamento (AGR) presentes em etapas do processo de FCC (SILVEIRA, 2019).
- Reforma catalítica – Processo catalítico usado para converter a carga de nafta rica em hidrocarbonetos parafínicos ou naftênicos em outra, rica em hidrocarbonetos aromáticos. Tem como objetivo obter um produto de elevado índice de octanagem, e formar um produto rico em hidrocarbonetos ramificados, cíclicos ou aromáticos. São operados a elevadas temperaturas (próximo a 500 °C) e pressões na faixa de 0,2 MPa a 4 MPa, dependendo da tecnologia empregada, na presença de catalisador a base de metais nobres (BRASIL, 2011). Neste processo, a água é utilizada como fonte de energia térmica (vapor) em revedores e como água de resfriamento (AGR) em condensadores e em reatores encamisados, presentes em etapas da unidade de reforma catalítica (DANTAS NETO, 2008).
- MEA (monoetanolamina) / DEA (dietanolamina) – São solventes de tratamento dos derivados a base de aminas para remoção de H₂S e CO₂ de frações leves do petróleo, como gás combustível e GLP. Em uma torre de absorção, as aminas líquidas em contracorrente com o gás contaminado, absorvem os contaminantes presentes no gás, sendo logo em seguida regenerada a temperatura relativamente alta, e resfriada posteriormente para retornar ao processo, reiniciando o ciclo (GONDIM, 2014). No

processo de recuperação de H_2 , onde o MEA é aplicado (absorvendo o CO_2), e no processo de remoção do H_2S e CO_2 , onde o DEA é aplicado, podem ser encontrada a água como fonte de energia térmica (vapor) em refeedores e, também, como água de resfriamento em condensadores ao longo do processo (ABADIE, 2002).

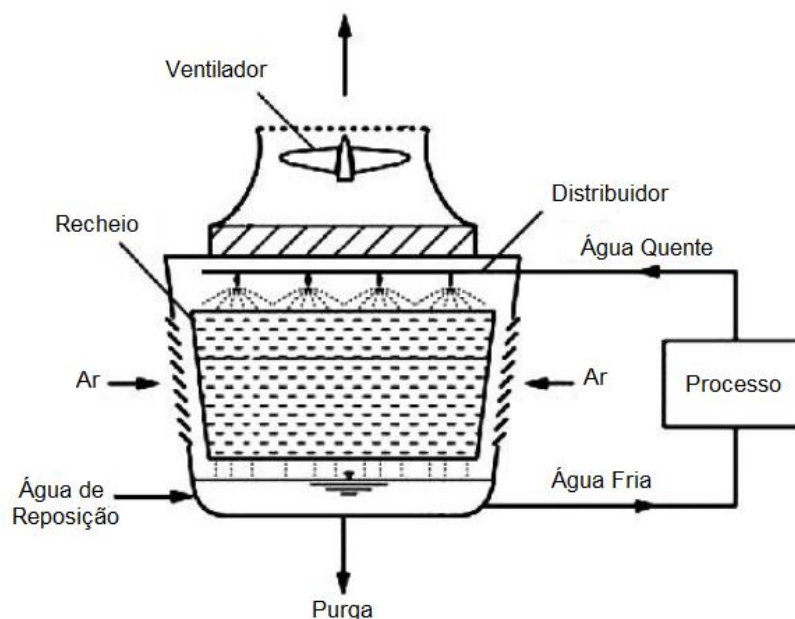
- HDT/HDS – HDT são processos de tratamento (hidrotratamento) empregados para melhorar a qualidade dos derivados. São responsáveis pela eliminação dos contaminantes (nitrogênio, oxigênio, enxofre e metais) presentes e pela estabilização química do produto acabado. A operação consiste no tratamento de frações de petróleo com hidrogênio, em meio catalítico com convenções químicas como: olefinas em alcanos, aromáticos em cicloalcanos e alcanos. Este processo pode ser aplicado a todos os cortes do petróleo (gases, NAFTA, querosene, diesel, parafinas, lubrificantes, etc) (SPEIGHT, 2011). Já o processo de HDS (hidrodessulfurização) é utilizado para remoção de enxofre da carga na forma de H_2S , como no caso da gasolina produzida que passa por um processo HDS para limitar as emissões de óxidos de enxofre pelos motores do ciclo Otto (BRASIL, 2011). Nestes processos, a água é utilizada como fonte de energia térmica (vapor) em refeedores e como água de resfriamento (AGR) em condensadores e em reatores encamisados, presentes em etapas de HDT/HDS (ABADIE, 2002).
- Unidade de Recuperação de Enxofre (URE) – Processo auxiliar que trata correntes gasosas ricas em enxofre e produz o enxofre elementar (S) oriundos de gás ácido e rico em H_2S (gás sulfídrico) (BRASIL, 2011). Neste processo, a água é utilizada como fonte de energia térmica (vapor) e como água de resfriamento (AGR) presentes em etapas do processo de CLAUS (SILVA, 2012).
- Unidade de tratamento de águas ácidas (UTAA) – Unidade que trata a água ácida proveniente de outras unidades como: destilação, FCC, HDT e coqueamento retardado. A sua acidez é causada por contaminantes como H_2S , HCl, amônia, fenol, cianeto, etc. Neste processo estão presentes duas torres de retificação alinhadas em série, uma responsável pelo tratamento do H_2S na forma de vapor e a outra do NH_3 gasoso (BRASIL, 2011). Na UTAA a água é utilizada na forma de vapor no processo de retificação a vapor (refevedor) como solvente gasoso para a remoção de NH_3 e H_2S , presentes na água ácida, e como água de resfriamento em condensadores (KNUST, 2013).

2.3 TORRE DE RESFRIAMENTO E SUA IMPORTÂNCIA NA INDÚSTRIA

As refinarias de petróleo possuem altas demandas por água ao longo dos seus processos. Grande parte dessa água é utilizada como meio de resfriamento de correntes quentes, presentes em unidades como as abordadas no item 2.2. Essas correntes quentes, normalmente, são resfriadas por água de resfriamento (AGR) dentro de trocadores de calor. Após o resfriamento dessas correntes, a água, agora com temperaturas mais elevadas devido a troca térmica, precisa ser resfriada de alguma maneira para que possa ser reaproveitada novamente no processo de resfriamento. Este resfriamento é feito por um equipamento denominado como torre de resfriamento.

As torres de resfriamento são equipamentos normalmente utilizados no controle da temperatura em processos industriais. Seu princípio de operação está baseado na troca simultânea de calor e massa entre a corrente de água quente, proveniente do processo, e a corrente de ar ambiente. É um dos equipamentos mais importantes na indústria, pois é o sistema de resfriamento mais utilizado, principalmente por trabalharem com altas vazões de água e restrições de temperaturas para usuários de água de resfriamento (COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE, 2016). A Figura 2.3 traz um exemplo simplificado de uma torre de resfriamento com as suas principais correntes (água e ar).

Figura 2.3 – Esquema simplificado de uma Torre de Resfriamento.



Fonte: Oliveira (2011).

Em uma torre de resfriamento, a água quente em contato direto com o ar mais frio é resfriada devido ao mecanismo de transferência de calor e massa. Neste processo, 80% da transferência de calor se dá pela transferência de calor latente por evaporação de certa quantidade de água e 20% pela transferência de calor sensível (CASSETTA, 2010). Assim, a transferência simultânea de calor e massa ocorre devido à diferença de temperatura e de concentração de água entre ambas as correntes (TROVATI, 2004).

Apesar da sua grande importância, as torres de resfriamento não têm tido a devida atenção, exceto nas fases de projeto de fábrica e especificação da torre. Alguns problemas operacionais de processo podem estar inseridos no mau funcionamento das torres, como no comprometimento de um condensador de uma coluna de destilação, influenciando no seu desempenho térmico, no consumo de combustíveis e nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs) para a atmosfera. Nota-se muitas vezes, carências de manutenção, fiscalização, no estudo das variáveis de operação (carga térmica removida, vazão de água circulante, *range*, *approach*) e nos dados experimentais de desempenho (ÁVILA FILHO, 2013).

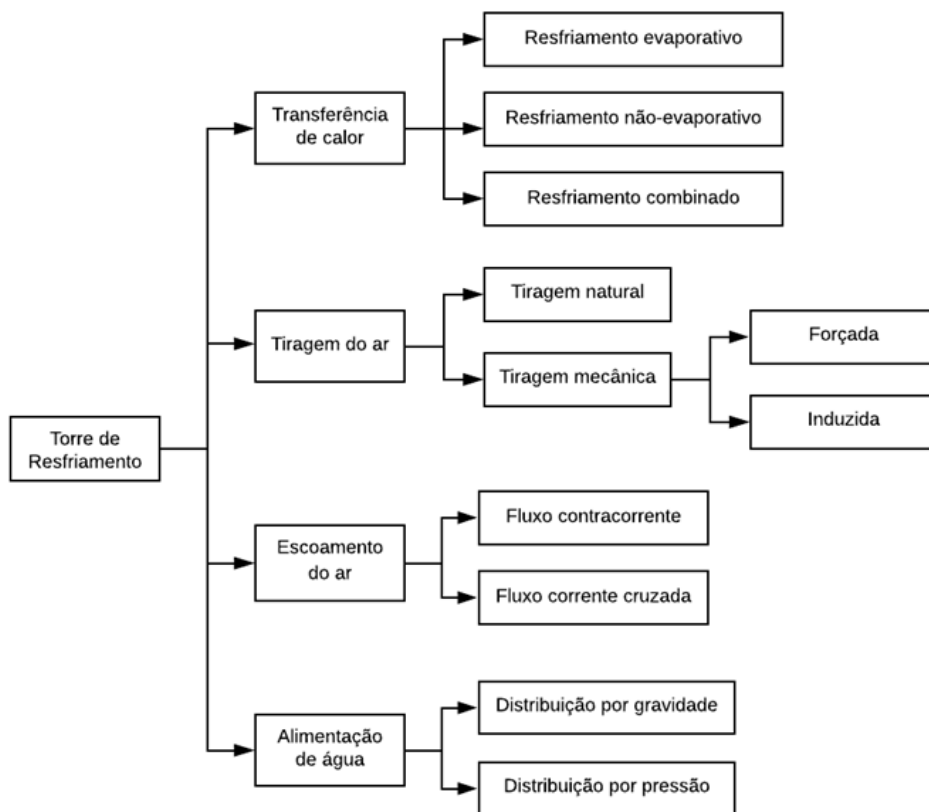
Este equipamento tem um significado muito importante no combate ao desperdício de água, pois é considerado o maior consumidor de água na indústria, com um consumo representativo de 60 a 75% de toda água bruta utilizada pelo setor (FURTADO, 2009). Geralmente as torres operam em circuito fechado em relação à água, devido a fatores econômicos e ambientais. Contudo, este consumo elevado também é influenciado pelas perdas no próprio equipamento. Purgas, arrastes e evaporações são exemplos de perdas existentes que tornam a reposição de água necessária. Porém, quando essa reposição ocorre com frequência, significando um mau funcionamento das torres, as condições operacionais do processo também são diretamente afetadas (ÁVILA FILHO, 2015).

As torres de resfriamento estão situadas na área de utilidades da indústria, uma instalação não integrante do processo e que em geral fica topograficamente afastada das unidades produtivas da fábrica, por esse motivo, muitas vezes, o sistema de resfriamento tem se tornado negligenciado pela própria indústria. Devido a este fator, são encontrados grandes números de torres em más condições e funcionamento, criando um grande potencial para estudos de melhorias (ÁVILA, 2015; OLIVEIRA, 2011).

2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO

As torres de resfriamento podem ser classificadas por diversas maneiras sendo as principais classificações conforme o processo de transferência de calor da água, o tipo de tiragem do ar, o escoamento do ar em relação à água e a alimentação de água, ilustradas na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Classificações das Torres de Resfriamento.



Fonte: Própria.

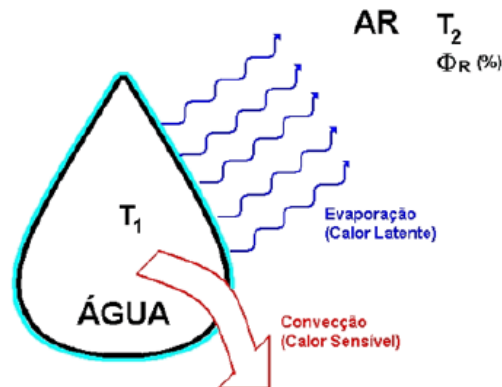
2.4.1 Transferência de calor da água

Uma das formas de classificar as torres de resfriamento é levar em conta a transferência de calor da água que é realizada e o resfriamento obtido. Este procedimento é realizado por:

- Resfriamento evaporativo – Classifica-se quando ocorre o processo de evaporação de uma parte da corrente de água em uma corrente de ar circulante, reduzindo a temperatura da

água. Como o contato entre ambas as correntes ocorrem de maneira direta, tem-se o auxílio simultâneo das transferências de calor e massa entre a água e o ar, tornando assim, a corrente de ar de saída mais úmida e quente (BURGER, 1993). A Figura 2.5 mostra como o resfriamento evaporativo ocorre a partir das gotículas de água.

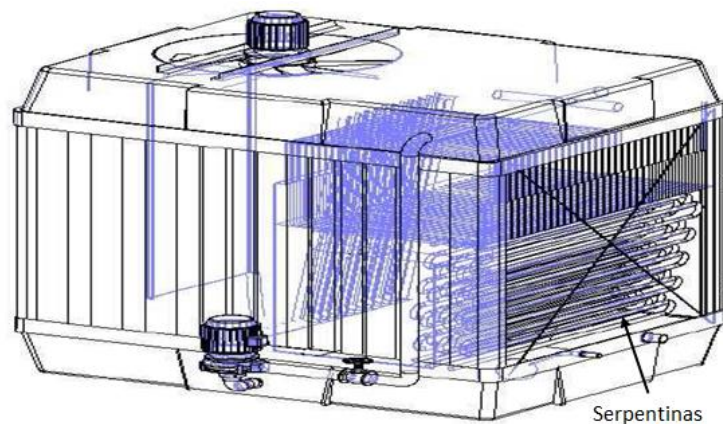
Figura 2.5 – Esquema mostrando a evaporação da água e transferência de calor em um sistema de resfriamento. No exemplo $T_1 > T_2$ e umidade relativa do ar (Φ_R) < 100%.



Fonte: Trovati (2004).

- Resfriamento não-evaporativo – Classifica-se pela forma indireta de troca térmica, ou seja, o calor sensível é transferido através de uma superfície que separa os fluidos. Nesses tipos de torres o fluido quente (água ou vapor) passa por serpentinas que em contato com o ar atmosférico absorve o calor sensível (COOLING TOWER DESIGN, 2016). O equipamento responsável por tal procedimento pode ser visualizado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Torre de Resfriamento não-evaporativa com o detalhe das serpentinas.



Fonte: Cooling Tower Design (2011).

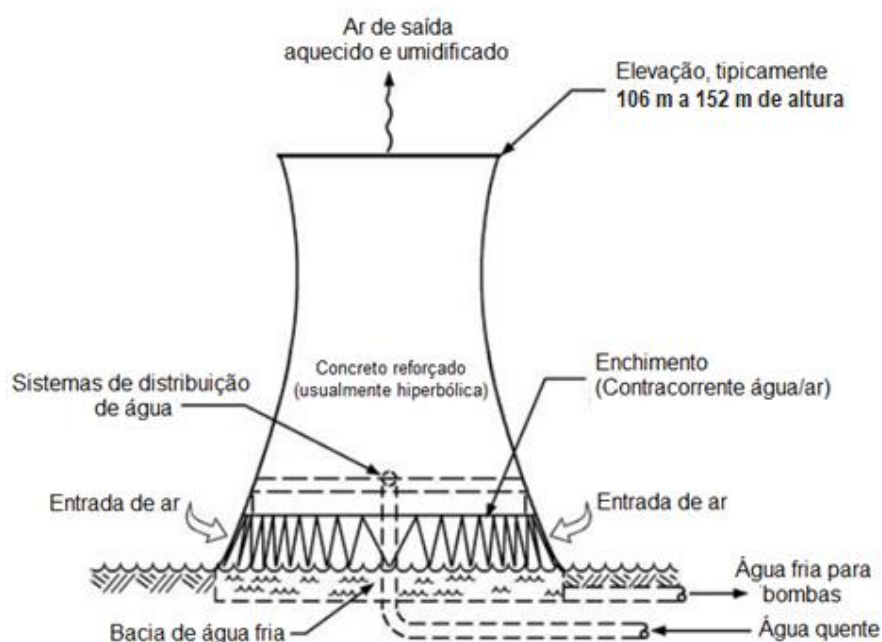
- Resfriamento combinado – Neste tipo de torre de resfriamento ocorre uma junção dos dois tipos já discutidos anteriormente, no mesmo equipamento.

2.4.2 Tiragem do ar

Outra maneira de classificar uma torre de resfriamento está relacionada com a forma em que o fluxo de ar penetra e sai do interior da torre. Desta forma podem ser classificados como:

- Tiragem natural – Caracterizam-se pela circulação de correntes de ar devido aos ventos (torres atmosféricas) ou pela diferença de densidade do ar (torres hiperbólicas). Para ambas as torres com circulação natural, o funcionamento depende muito das condições ambientais do ar atmosférico, pois com o aumento da temperatura ou umidade relativa do ar, o funcionamento da torre poderá ser comprometido. Outro fator de influência está relacionado com a escolha do local para a implantação da torre, pois em cada localização existe uma predominância de clima e circulação de vento. São usadas geralmente em plantas de alto porte, como usinas termelétricas ou nucleares (FOUST, 1982). A Figura 2.7 mostra uma torre hiperbólica com os principais componentes e correntes presentes.

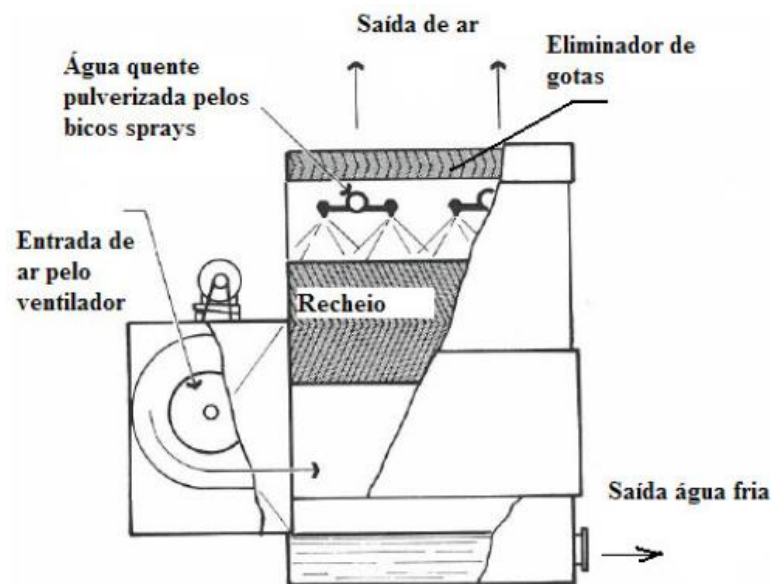
Figura 2.7 – Torre de tiragem natural ou hiperbólica



Fonte: ASHRAE (2000).

- Tiragem mecânica – São torres que utilizam ventiladores para auxiliar a passagem da corrente de ar pelo seu interior. Podem ser classificadas em:
 - Tiragem mecânica forçada – Torre na qual o ventilador é acoplado na parte inferior (entrada do ar), forçando a corrente de ar através do seu interior e, conseqüentemente, pelo recheio da torre. Gera uma maior velocidade de penetração, porém uma baixa velocidade de saída, criando possibilidades de recirculação do ar, podendo interferir no seu desempenho. Exigem maior potência de motor devido à grande perda de carga do ar (KERN, 1950). A Figura 2.8 traz um exemplo de torre de resfriamento de tiragem mecânica forçada.

Figura 2.8 – Torre de Resfriamento com tiragem mecânica forçada.



Fonte: Staff (2006).

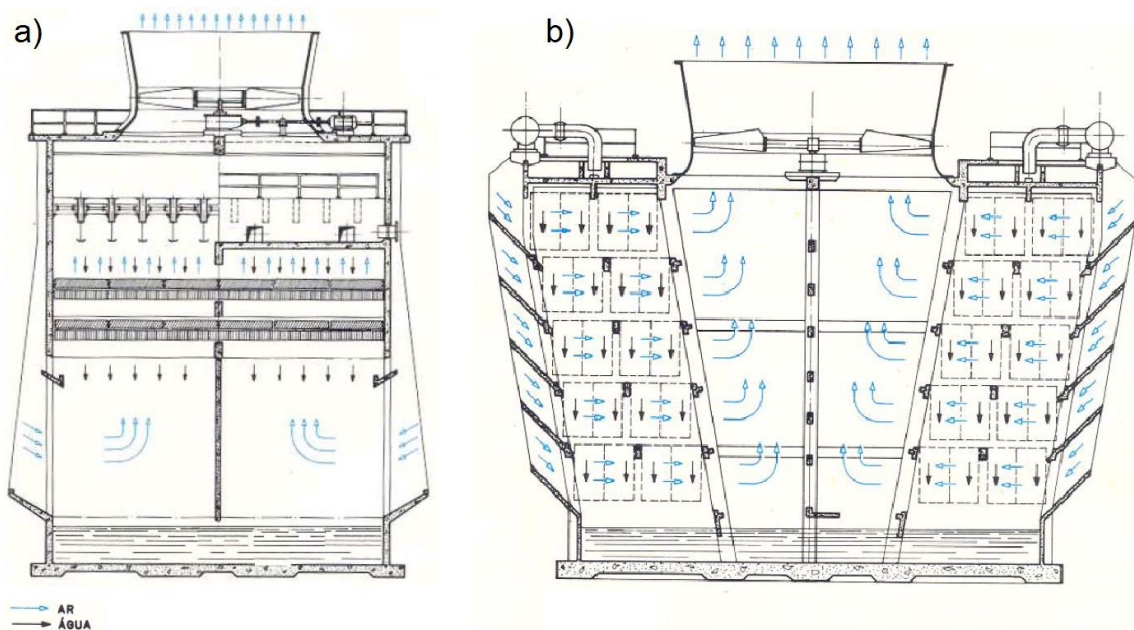
- Tiragem mecânica induzida – Torre com ventilador acoplado na parte superior (saída de ar), atuando como um exaustor, ou seja, induz a entrada do ar ao seu interior, gerando uma maior velocidade de saída, dispersando com mais facilidade o ar e dificultando os problemas de recirculação. Contudo, quanto maior o recheio da torre, maior a perda de carga do ar, conseqüentemente, maior a potência necessária no motor do ventilador (KERN, 1950).

2.4.3 Escoamento do ar em relação à água

A forma mais empregada para caracterização das torres de resfriamento está relacionada com o sentido dos fluxos de ar e água no interior da torre. Podem ser classificadas como:

- Fluxo em contracorrente – Este escoamento é o mais encontrado nas indústrias de processos (MCCABE, 2005). Nesta configuração a corrente de ar penetra logo abaixo do enchimento e flui paralelamente e em sentido oposto ao escoamento da água (KERN, 1950). É considerada termodinamicamente a configuração mais eficiente, pois a água mais quente entra em contato com o ar mais frio, obtendo-se uma maior diferença de entalpia (PERRY, 2008). A configuração de uma torre com fluxo em contracorrente é mostrada na Figura 2.9a.
- Fluxo em corrente cruzada – Nesta configuração a corrente de ar penetra lateralmente e perpendicular ao enchimento e ao escoamento da água, oferecendo menos resistência ao fluxo de ar o tornando mais rápido, significando menos potência do ventilador. Contudo, sua trajetória mais curta o torna menos eficiente termicamente (MCCABE, 2005). A configuração de uma torre com fluxo corrente cruzada é mostrada na Figura 2.9b.

Figura 2.9 – Torres de Resfriamento com tiragem mecânica induzida. a) Fluxo em contracorrente, b) Fluxo em corrente cruzada.



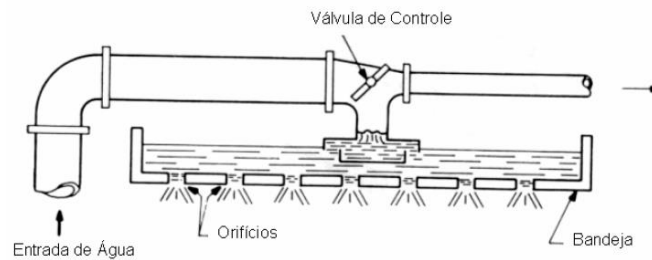
Fonte: Casetta (2003).

2.4.4 Alimentação de água

Outra maneira, porém, pouco empregada, de classificação de torre de resfriamento está relacionada à forma em que a água é distribuída no interior do equipamento. Podem ser classificadas por:

- Distribuição por gravidade – Neste sistema a água quente oriunda do processo é coletada em uma bacia ou bandeja de distribuição na parte superior da torre, aberta para atmosfera, onde conta com a presença de orifícios para espalhar a água sobre o enchimento, como ilustrado na Figura 2.10. São sistemas utilizados quase sempre em torres de fluxo cruzado, pois em torres de fluxo contracorrente causariam dificuldades no ajuste da distribuição da água e interferência com o fluxo de ar.

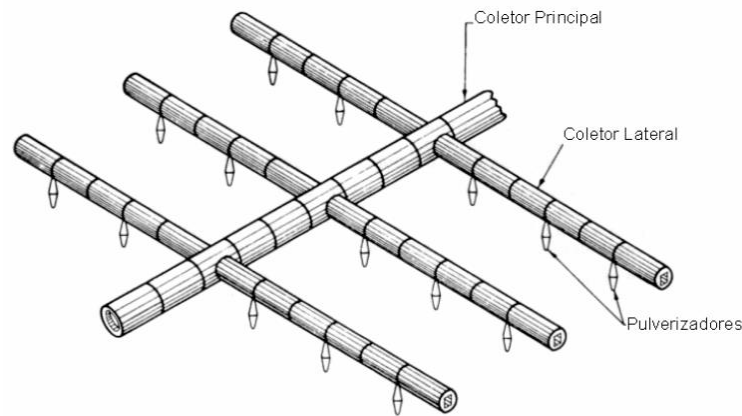
Figura 2.10 – Sistema de distribuição de água por gravidade.



Fonte: Casetta e Mansur (2009).

- Distribuição por pressão – Neste sistema a água quente é distribuída em um sistema de pulverização por pressão com bicos sprays dimensionados e arranjados para distribuir uniformemente a água sobre o enchimento, como ilustrado na Figura 2.11. São sistemas geralmente utilizados em torres de fluxo contracorrente.

Figura 2.11 – Sistema de distribuição de água por pressão – spray.



Fonte: Mansur (2009).

2.5 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

No estudo de torres de resfriamento são empregados diversos termos, parâmetros de projeto e de desempenho referentes a este equipamento. Seguem algumas definições:

- Aproximação (Approach) – Diferença entre a temperatura de saída (fria) da corrente de água e a temperatura de bulbo úmido na entrada da torre (MULYANDASART, 2011). Segundo Oliveira (2011), pode ser usado para avaliar a eficiência de um sistema de resfriamento. Quanto mais próximo do bulbo úmido estiver a temperatura da água fria, maior será a eficiência da instalação. No geral, valores de approach maiores que 10 °C demonstram operação deficiente no sistema de resfriamento, podendo ser causados por: subdimensionamento, obstruções ou canais preferenciais no recheio, distribuidores entupidos ou danificados, baixa velocidade do ar, etc. Geralmente o *approach* de uma torre compreende entre 3 °C e 11 °C e conforme o valor é reduzido, o tamanho da torre aumenta exponencialmente (PANNKOKE, 1996). Alguns limites de *approach* são adotados em 6 °C.
- Arraste (drift) – Perda de água de circulação por gotículas arrastadas na exaustão do ar.
- Carga térmica – Quantidade de calor por unidade de tempo removida da água e dissipada pela torre de resfriamento. A carga térmica é definida pelo processo e influencia

diretamente no dimensionamento da torre.

- Eliminador de gotículas (*drift eliminator*) – São obstáculos implantados entre o sistema de distribuição de água e o ventilador no intuito de minimizar a perda de água por arraste na corrente de ar que sai da torre, promovendo uma melhor eficiência do processo de resfriamento (MULYANDASART, 2011).
- Enchimento (*fill*) – Também conhecido como recheio, é utilizado para aumentar a área de contato da água com o ar, facilitando a troca térmica. É constituída por uma estrutura de alumínio, plástico ou madeira.
- Água de reposição (*make up*) – Reposição de água que foi perdida por evaporação, arraste, purga ou outro tipo de perda (MULYANDASART, 2011). É expressa normalmente como porcentagem da vazão mássica da água de circulação.
- Pluma – Fluxo de ar saturado que sai da torre. São visíveis devido à formação de condensados em pequenas gotas, devido ao contato dos vapores de água quente que saem das torres com o ar ambiente frio (MULYANDASART, 2011). A formação da pluma ocorre com mais frequência no inverno, dificultando dispersão do ar quente que sai da torre.
- Purga (*blow-down*) – Descarte contínuo ou intermitente de parte da água do sistema para o controle da concentração de sais e outras impurezas (EUROVENT, 2011). Este procedimento previne o excesso de concentração de sólidos devido à evaporação de água do sistema e evita também problemas de incrustações, corrosões e obstruções no circuito de resfriamento.
- Varição (*Range*) – Diferença entre a temperatura de entrada (quente) e a de saída (fria) das correntes de água (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981).
- Respingo (*blow-out*) – Perda de água por arraste de gotículas através da exaustão do ar. São instalados dispositivos de proteção para reduzir este tipo de perdas.

2.6 VARIÁVEIS PSICROMÉTRICAS

Para projeção e operação de torres de resfriamento algumas variáveis são empregadas. Essas variáveis são definidas na psicrometria como:

- Temperatura de bulbo seco (T_{BS}) – Temperatura do ar ambiente, medida pelo termômetro com o bulbo em contato direto com o ar (MULYANDASART, 2011).
- Temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) – Temperatura medida quando um bulbo envolto por uma mecha úmida é exposto a uma corrente de ar não saturado em condições adiabáticas (FOUST *et al.*, 1982). Esta temperatura é obtida devido ao calor latente de vaporização retirado da água da mecha, gerando a evaporação da água e reduzindo a temperatura da mecha. A queda de temperatura provoca um fluxo de calor sensível do ar para a mecha, reduzindo a temperatura do ar que a circunda. A temperatura de bulbo úmido é então estabelecida quando se obtêm o regime permanente.
- Temperatura de orvalho (T_O) – Temperatura medida quando uma amostra de ar se torna saturada quando resfriada à pressão e umidade constantes.
- Temperatura de saturação adiabática – Temperatura medida quando a mistura vapor de água e ar torna-se saturada, em um processo adiabático.
- Umidade absoluta (W) – Massa de vapor de água contida em uma massa de ar seco, dependendo apenas da pressão parcial do vapor na mistura quando a pressão total é fixa.

$$W = \frac{M_v \cdot P_a}{M_a(P - P_a)} \quad (2.1)$$

- Umidade relativa (W_R) – Relação entre a pressão parcial do vapor de água na mistura e a pressão de vapor de água da mistura em condição de saturação, expressa em porcentagem:

$$W_R = \frac{P_a}{P_{Va}} \quad (2.2)$$

2.7 DESEMPENHO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO

Para um projeto de torres de resfriamento tem-se considerado o tipo de enchimento na busca por uma maior área de troca térmica e um menor consumo de energia para resfriar uma mesma quantidade de água. Isso acontece porque, com uma maior área de troca térmica por unidade volumétrica, implicará uma demanda menor de ar para resfriamento e, conseqüentemente, menor trabalho executado dos ventiladores para impelir este ar, gerando assim, uma operação com menor custo.

De acordo com Kern (1980), a situação física no interior de uma torre de resfriamento é muito complexa, não existindo um modelo matemático, que seja capaz de simular todos os detalhes do processo de transferência simultânea de calor e massa que ocorrem dentro da mesma. Segundo Casetta (2003), os testes nas torres servem para confrontar os dados de projeto com o desempenho efetivo de uma torre. Como na prática, as variáveis mais importantes de projeto (temperatura de água quente, água fria e bulbo úmido, vazão de água) não coincidem exatamente com os dados de projeto, efetuam-se os testes em condições diferentes de projeto, porém constantes durante o período da execução do teste (GONDIM, 2014).

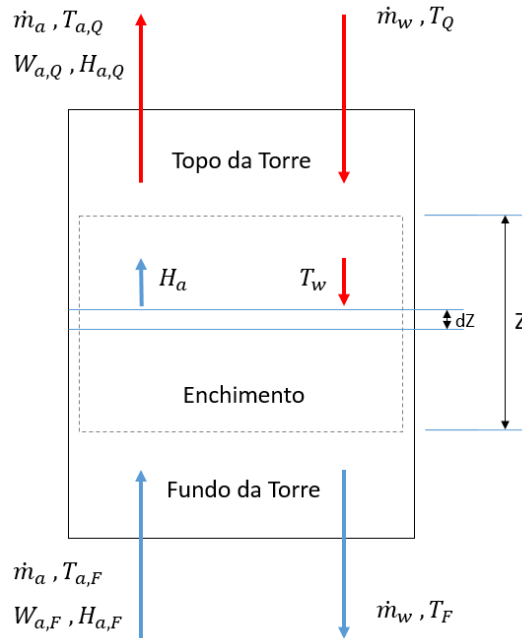
Através do conhecimento do desempenho da torre, pode-se identificar, de fato, se a torre em operação está ou não condizente com a condição de obtenção de carga térmica especificada no projeto. Assim, pode-se alterar alguns parâmetros em busca de um menor consumo de energia e aumento do seu desempenho. Com relação aos cálculos de desempenho das torres, utilizam-se metodologias específicas apresentadas pelo *Cooling Tower Institute* (CTI, 1990), denominada ATC 105.

2.7.1 Balanço de massa e energia da torre de resfriamento

A partir de McCabe *et al.* (2005), levando em consideração uma torre de resfriamento do tipo contracorrente de escoamento água-ar, conforme mostrado na Figura 2.12, a corrente de água (vazão mássica \dot{m}_w e temperatura de entrada T_Q) é alimentada no topo da torre e distribuída uniformemente pelo enchimento e retirada no fundo da mesma (vazão mássica \dot{m}_w e temperatura de saída T_F). Já a corrente de ar ascendente (vazão mássica \dot{m}_a , temperatura de entrada $T_{a,F}$, entalpia específica $H_{a,F}$ e umidade absoluta $W_{a,F}$) penetra pelo fundo da torre e distribui uniformemente ao longo da torre até a sua retirada pelo topo (vazão mássica \dot{m}_a ,

temperatura de saída $T_{a,Q}$, entalpia específica $H_{a,Q}$ e umidade absoluta $W_{a,Q}$).

Figura 2.12 – Balanço de massa e energia do volume de controle de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.



Fonte: McCabe *et al.* (2005).

Admitindo um volume de controle infinitesimal com altura (dZ) em uma dada região da torre e considerando nesta seção a temperatura, entalpia, umidade e vazões de água e ar constantes, aplicando o balanço de energia temos:

$$\dot{m}_a \cdot dH_a = \dot{m}_w \cdot dH_w \quad (2.3)$$

Considerando que a vazão de ar não varie ao longo da torre (Z), sendo esta expressa em base seca, a taxa de água evaporada varie muito pouco, podendo considerar $d\dot{m}_w$ praticamente nulo e a entalpia específica da água expressa em função da variação da sua temperatura, temos a equação:

$$\dot{m}_a \cdot dH_a = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot dT_w \quad (2.4)$$

Realizando a integração da Equação 2.4 para todo o volume de controle temos o balanço de energia para toda a torre:

$$\dot{m}_a \cdot (H_{a,Q} - H_{a,F}) = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (2.5)$$

No entanto, para uma altura específica na parte interna da torre (região do recheio), o balanço de energia pode ser descrito, como:

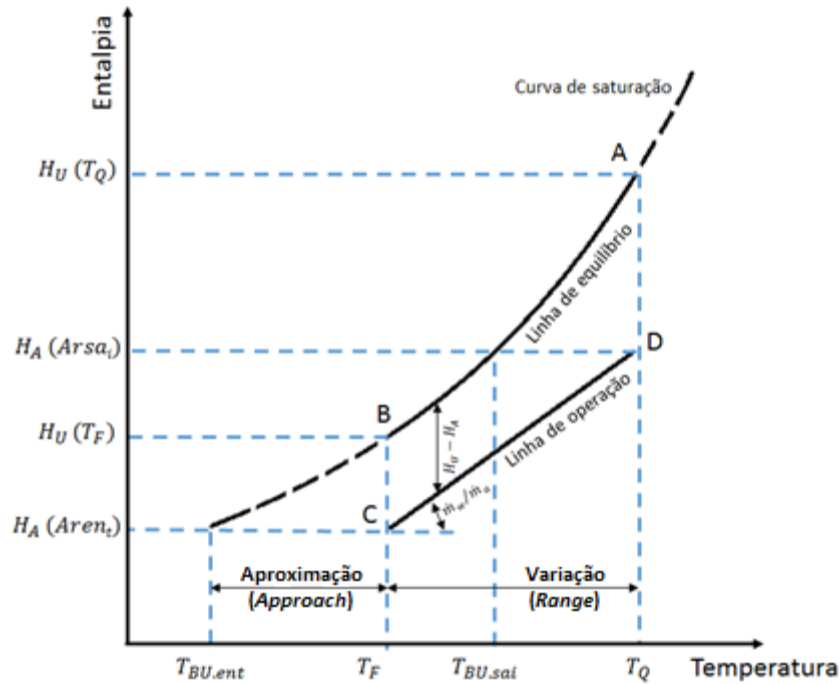
$$\dot{m}_a \cdot (H_{a,Q} - H_a) = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (T_Q - T_w) \quad (2.6)$$

A partir do rearranjo da Equação 2.5, representando o balanço global de energia da torre, pode ser obtida a Equação 2.7, onde está relacionada a variação da entalpia do ar com a variação da temperatura da água, sendo responsável pela construção da linha de operação para a torre de resfriamento em contracorrente.

$$H_{a,Q} = H_{a,F} + \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \right) \cdot c_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (2.7)$$

Na Figura 2.13 estão representadas a linha de saturação, obtida com o auxílio de cartas psicrométricas para identificações das entalpias do ar saturado, a linha de operação da torre CD, sendo o ponto C representado pela entalpia do ar na entrada da torre e na temperatura da água fria e D o ponto correspondente a entalpia do ar na saída da torre e na temperatura da água quente, e a linha de equilíbrio da torre AB sobre a curva de saturação, representando a entalpias do ar saturado em função das temperaturas da água. A área formada entre os pontos ABCD indica o potencial de transferência de calor e massa.

Figura 2.13 – Linhas de equilíbrio do ar saturado e de operação para uma torre de resfriamento em contracorrente.



Fonte: Adaptado de Perry (2008)

Variações da inclinação da linha de operação (\dot{m}_w/\dot{m}_a) ou nas temperaturas da água na entrada e saída da torre podem ocasionar variações no número de unidades de transferência (NUT) e altura da torre (LIMA JÚNIOR, 2011). Com o aumento da inclinação, a linha de operação se aproxima da curva de equilíbrio, diminuindo a área entre as duas curvas e a diferença de entalpias ($H_U - H_A$), reduzindo a força motriz de troca térmica, prejudicando a capacidade de remoção térmica da torre (KERN, 1950).

Com o aumento da razão (\dot{m}_w/\dot{m}_a) o NUT é elevado e, conseqüentemente, aumenta-se a altura da torre. Reduzindo a vazão da corrente de água ou elevando a vazão da corrente de ar, ocorre o inverso, a linha de operação é afastada da curva de saturação, o NUT e a altura da torre são reduzidos.

2.7.2 Modelos matemáticos de torre de resfriamento

No interior de uma torre de resfriamento as situações físicas são bem complexas devido as suas constantes mudanças de configurações. Por esta razão, não existe um modelo

matemático capaz de prever ou simular os detalhes simultâneos dos processos de transferência térmica e de massa, sendo necessárias as implantações de considerações e simplificações das condições operacionais (MOHIUDDIN; KENT, 1996; OLIVEIRA, 2010).

A seguir, são apresentados os principais modelos existentes para determinar o cálculo do desempenho de torres de resfriamento: Modelos de Merkel, Poppe e e-NUT.

- **Modelo de Merkel** – Merkel foi o desenvolvedor da teoria para a avaliação do desempenho de torres de resfriamento em 1925. Inicialmente, o seu trabalho foi amplamente negligenciado, mas a partir de 1941 ganhou força e, desde então, o seu modelo tornou-se amplamente aplicado. O modelo de Merkel é popularmente conhecido e recomendado por padrões internacionais como o *Cooling Tower Institute* (CTI) e *British Standard*. A teoria é baseada em determinadas suposições críticas para reduzir as soluções de transferência de calor e massa em torres de resfriamento à um cálculo mais simplificado. As suas principais simplificações são: (1) o fator de Lewis (Le_f), relacionado aos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, é igual a 1; (2) a variação da vazão de água devido à perda por evaporação não é considerada no balanço de massa e energia; (3) a umidade do ar que sai da torre de resfriamento é considerada como saturada com vapor d'água. Na literatura, a notação comumente utilizada para representar o número de Merkel é o $K.a.V/\dot{m}_w$ igual a Me , onde, K é o coeficiente de transferência de massa, a é a área de contato por unidade de volume do enchimento, V é o volume específico do enchimento e \dot{m}_w é a vazão mássica da corrente de água (KLOPPERS, 2003).
- **Modelo de Poppe** – É o modelo desenvolvido por Poppe e Røgener em 1970, que não faz as mesmas considerações simplificadoras feitas por Merkel no seu, respectivo, modelo. Pelo método de Poppe é possível calcular a quantidade de vapor d'água presente na corrente de ar expelida da torre, além da quantidade evaporada, sendo dados importantes para o projeto de uma torre de resfriamento. Neste modelo, o fator de Lewis (Le_f) é levado em consideração, sendo calculado e não igualado a unidade como feito por Merkel. O método de Poppe acaba sendo mais complexo, pois são levadas considerações a respeito da umidade do ar ao longo de todo o processo de resfriamento e a relação entre os coeficientes de transferência térmica e de massa (KLOPPERS, 2003; FERNANDES, 2012).

- **Modelo do e-NUT** – Modelo desenvolvido por Jaber e Webb, baseado nas suposições feitas por Merkel. Os resultados obtidos utilizando o modelo de e-NUT (e de efetividade) não são tão diferentes dos resultados obtidos pelo modelo de Merkel. A sua principal diferença está relacionada ao procedimento de integração da equação. É um método vantajoso para aplicações de configurações de torres de corrente cruzada (KLOPPERS, 2003).

2.7.3 Teoria de Merkel

De modo geral, as teorias criadas para explicar os fenômenos da transferência de massa e calor em diferentes tipos de dispositivos atmosféricos para o resfriamento da água, são baseadas em princípios já desenvolvidos na engenharia. Contudo, a transferência simultânea entre ambos, contendo os parâmetros específicos que caracterizam o procedimento são obtidos de maneiras empíricas e dentro de condições bem definidas (CASSETTA, 2003).

Apesar da existência de vários modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar e simular o desempenho e comportamento de torres de resfriamento, o modelo de Merkel é ainda considerado um dos modelos mais aceitos do processo de transferência de calor e massa em torres de resfriamento. MERKEL (1925) considera como força motriz no processo de transferência, a diferença potencial de entalpia. Em sua teoria os coeficientes de transferência de calor sensível e massa são combinados em um único coeficiente global. Na sua proposta ainda requer algumas simplificações, universalmente adotadas para o cálculo do desempenho de torre de resfriamento.

Na Figura 2.14, conforme a teoria de Merkel, a gota de água está envolta por uma pequena camada ou película de ar saturado e na mesma temperatura da água. O cálculo proposto para a transferência de calor e massa leva em consideração a interface entre o ar não saturado e esta película saturada e a diferença de entalpia existente entre ambos que são responsáveis pela força motriz no processo de resfriamento (MERKEL, 1925).

Figura 2.14 – Interface água-ar de uma gota de água pela teoria de Merkel.



Fonte: Adaptada de Casetta (2003).

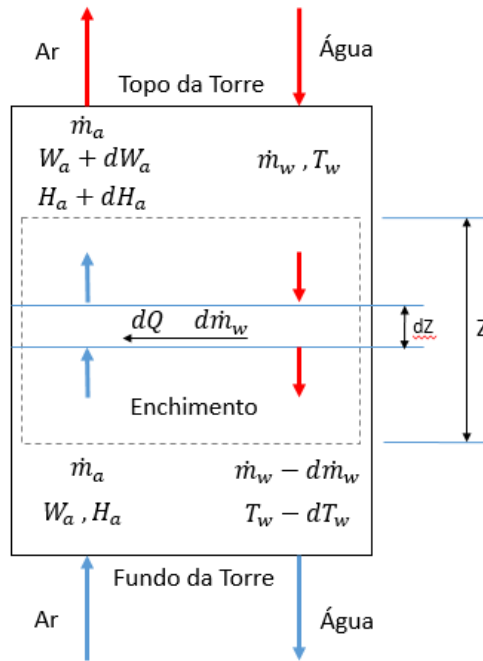
No interior de uma torre de resfriamento os processos de transferência de calor e massa ocorrem simultaneamente. A transferência de calor da água para o ar atmosférico pode ser realizada por dois processos de troca, por convecção (transferência de calor) e por evaporação (transferência de massa), demonstrada pela equação a seguir:

$$dQ_T = Q_{conv} + Q_{evap} \quad (2.8)$$

onde, dQ_T é o calor total trocado na torre, em J; dQ_{conv} é o calor trocado por convecção, em J; dQ_{evap} é o calor trocado por evaporação, em J.

A Figura 2.15 mostra o processo de transferência de calor e massa no interior de uma torre de resfriamento de acordo com as considerações de Merkel. As variáveis indicadas são utilizadas na dedução da sua teoria.

Figura 2.15 – Esquema representativo da Teoria de Merkel no interior de uma torre de resfriamento.



Fonte: McCabe *et al.* (2005).

No processo de troca por convecção, o calor é transferido da água para o ar devido ao gradiente de temperatura existente entre a água e o ar. O calor trocado por convecção pode ser representado pela Equação 2.9. Já o processo de troca térmica por evaporação pode ser representado pela Equação 2.10, onde o processo ocorre devido a transferência de massa entre a água e o ar. Neste processo, a energia necessária pela mudança do estado físico é retirada da água, reduzindo a sua temperatura e sendo a principal responsável pelo calor trocado em uma torre de resfriamento.

$$dQ_{conv} = H_{conv} \cdot (T_w + T_a) dA \quad (2.9)$$

$$dQ_{evap} = H_m \cdot L_c \cdot (U_{E2} + U_{E1}) dA \quad (2.10)$$

onde, H_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; T_w é a temperatura da água, em $^\circ\text{C}$; T_a é a temperatura do ar, em $^\circ\text{C}$; dA é a área de troca térmica, em m^2 ; H_m é o coeficiente de transferência de massa, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; L_c é o calor latente de vaporização da água, em $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; U_{E1} e U_{E2} são as umidades específicas do ar antes do contato com a água e do ar saturado, respectivamente, em $\text{kg}_{vapor} \cdot \text{kg}_{ar}^{-1}$.

O calor recebido pelo ar pode ser definido como:

$$dQ = \dot{m}_a \cdot dH_a \quad (2.11)$$

onde, \dot{m}_a é a vazão mássica da corrente de ar, em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; dH_a é a variação da entalpia do ar, em $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A variação da entalpia expressa na Equação 2.11 ocorre devido ao calor sensível e latente, ambos recebidos pelo ar em virtude da troca de calor com a água. Logo, o valor de H_a pode ser aproximado e definido pela Equação 2.12. Já a Equação 2.13 expressa o calor sensível transferido da água para o ar.

$$H_a = c_p T_a + L_c \cdot U_{Ea} \quad (2.12)$$

$$dQ = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot dT_w \quad (2.13)$$

onde, c_p é o calor específico do ar a pressão constante, em $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; U_{Ea} é a umidade específica do ar, em $\text{kg}_{\text{vapor}} \cdot \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$, \dot{m}_w é a vazão mássica da corrente de água, em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; c_w é o calor específico da água, em $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; dT é a variação da temperatura da água, em K.

Considerando que não existe perda de massa de água por evaporação no interior da torre de resfriamento, ou seja, \dot{m}_w é constante no interior da torre, e rearranjando as Equações 8, 9, 10 e 13, temos:

$$dQ = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot dT_w = H_{conv} \cdot (T_w + T_a) dA + H_m \cdot L_c \cdot (U_{E2} + U_{E1}) dA \quad (2.14)$$

Uma das principais simplificações no modelo de Merkel está relacionado ao fator de Lewis (Lef), na qual correlaciona os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa e é igualado a 1 (CORTINOVIS *et al.*, 2009). O fator de Lewis pode ser definido como:

$$Lef = \frac{H_{conv}}{H_m \cdot c_p} \quad (2.15)$$

Ao assumir $Lef = 1$, demonstrada pela Equação 2.16, leva em consideração que o grau de dificuldade (ou facilidade) no processo de transferência de calor por convecção é o mesmo para o processo de transferência de massa por evaporação. Sendo assim, a variação da

temperatura é igual a variação na umidade específica do ar (LIZARAZU, 2016).

$$H_m \cdot c_p = H_{conv} \quad (2.16)$$

Substituindo a Equação 2.16 na 2.14, temos:

$$dQ = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot dT_w = H_m \cdot c_p \cdot (T_w + T_a) dA + H_m \cdot L_c \cdot (U_{E2} + U_{E1}) dA \quad (2.17)$$

Obtendo em seguida:

$$dQ = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot dT_w = H_m [(c_p \cdot T_w + L_c U_{E2}) - (c_p T_a + L_c U_{E1})] dA \quad (2.18)$$

Substituindo a Equação 2.12 em 2.18, obtém:

$$dQ = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot dT_w = H_m \cdot (H_U - H_A) dA \quad (2.19)$$

onde, H_U é a entalpia específica do ar saturado na temperatura da água, em $J \cdot kg^{-1}$; H_A é a entalpia específica do ar úmido no interior da torre, em $J \cdot kg^{-1}$.

A partir do rearranjo da Equação 19, é obtida a equação de Merkel:

$$\frac{H_m \cdot dA}{\dot{m}_w} = \frac{c_w \cdot dT_w}{H_U - H_A} \quad (2.20)$$

Com a integração da equação de Merkel a equação toma a forma de:

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{\dot{m}_w} = \frac{H_m \cdot a \cdot A_T \cdot Z}{\dot{m}_w} = \int_{T_F}^{T_Q} \frac{c_w \cdot dT_w}{H_U - H_A} \quad (2.21)$$

onde, K é o coeficiente de transferência de massa, em $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; a é a área de contato por unidade de volume do enchimento, em $m^2 \cdot m^{-3}$; V é o volume específico do enchimento, em m^3 ; A_T é a área da seção transversal do enchimento, em m^2 ; Z é a altura do enchimento, em m ; T_Q é a temperatura da corrente de água quente na entrada da torre, em K ; T_F é a temperatura da corrente de água na saída da torre, em K .

Como visto na Equação 2.21, o lado direito da equação só depende apenas das propriedades do ar e da água, sendo independentes das dimensões da torre de resfriamento.

2.8 ÁGUA DE RESFRIAMENTO

2.8.1 Principais parâmetros da água analisados em um sistema de resfriamento

Para uma boa funcionalidade das torres de resfriamento, determinados parâmetros físico-químicos da água de circulação e reposição são levados em consideração. Tais parâmetros devem ser monitorados e acompanhados, pois estão diretamente relacionados aos principais problemas gerados nas torres de resfriamento: incrustações, corrosões e o crescimento microbológico. Os principais parâmetros são:

- **pH** – O pH é um parâmetro relacionado a acidez do meio aquoso. Possui uma escala de 0 a 14, sendo o pH neutro igual a 7, o pH ácido abaixo de 7 e alcalino ou básico acima de 7. O controle do pH da água de resfriamento é muito importante no combate contra corrosões e incrustações geradas no meio. De acordo com Silva (2004), o pH da AGR deve ser mantido na faixa de controle entre 6,5 à 8,5. Alguns problemas gerados devido ao pH fora da faixa citada, anteriormente, podem ser visualizados na Tabela 2.1, se seguir:

Tabela 2.1 – Controle de pH da AGR da torre de resfriamento.

pH > 8,5	pH < 6,5
<ul style="list-style-type: none">• Aumentam os riscos de incrustações e deposições, tornando o sistema mais sensível a falha de dosagens dos anti-incrustantes e dispersantes;• Reduzem a eficiência dos biocidas de maneira geral;• Tornam incompatível o uso do zinco como inibidor catódico, transformando-o em fonte de depósitos, reduzindo o controle da corrosão.	<ul style="list-style-type: none">• Aumentam drasticamente o potencial corrosivo da água da AGR;• Reduzem fortemente a eficiência dos inibidores de corrosão utilizados, dificultando o controle de corrosão.

Fonte: Adaptado de Silva (2013).

- **Alcalinidade total** – A alcalinidade total é determinada pela quantidade de íons hidróxido (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-) na água, significando a capacidade de reação de um meio aquoso, perante adição de um ácido. Desta forma, alcalinidade total é representado pela capacidade que um sistema aquoso tem para neutralizar ácidos até m determinado pH. Este parâmetro é muito importante no

controle da água, influenciando na coagulação, dureza da água e corrosão (PENNA, 2009).

- Dureza total – A dureza de uma água está relacionada, principalmente, com as concentrações de cálcio e magnésio na água. Estes são encontrados na forma de bicarbonatos de cálcio e de magnésio e sulfatos de cálcio e de magnésio. A dureza da água pode ser classificada como permanente (não carbonatada), relacionadas ao teor de sulfatos e cloretos de cálcio e magnésio, e temporária (carbonatada) relacionadas ao teor de carbonatos de cálcio e magnésio (KURITA, 2015).
- Cloretos – Os íons cloretos (Cl⁻) é comumente encontrado na água devido à grande solubilidade da mesma. Potencializam a corrosão de metais, em especial, os aços inoxidáveis, mesmo em condições de baixas concentrações a determinada temperatura (GONDIM, 2014).
- Sílica – A sílica pode ser encontrada na água na forma de óxido de sílica como coloidal, ionizada ou como sílica aluminato de cálcio ou magnésio (VEIGA, 2010). Ela pode ser dividida em dois tipos: sílica reativa e não reativas. As sílicas reativas (íons silicatos SiO₄⁴⁻) reagem com Ca²⁺ e Mg²⁺ formando silicatos complexos em altas temperaturas, podendo ser depositados nas áreas quentes do sistema de resfriamento. E as sílicas não reativas (coloidal, SiO₂) são substância que depositam na forma de depósitos sedimentares (GONDIM, 2014).
- Sólidos totais dissolvidos (TDS) – Os sólidos totais dissolvidos (TDS) são dados pela soma de todos os constituintes dissolvidos na água. As substâncias dissolvidas presentes no meio aquoso podem ser íons inorgânicos e orgânicos. Os íons inorgânicos são mais frequentes e alguns exemplos são os carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, cálcio, magnésio, sódio, outros. Quando o valor de TDS não é disponibilizado, uma das formas para ser estimado é através da conversão da condutividade em sólidos totais dissolvidos, onde o valor da condutividade é multiplicado por um fator de conversão, que depende da composição química do TDS, como exemplificado na Tabela 2.2 (PARRON, 2011; GONDIM, 2014).

Tabela 2.2 – Conversão da condutividade para TDS.

Condutividade ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Sólidos totais dissolvidos – TDS (ppm)
< 1000	0,68 x condutividade
1000 a 4000	0,75 x condutividade
>4000	0,82 x condutividade

Fonte: Adaptado de Gondim (2014).

- Condutividade – É a capacidade de condução da eletricidade devido a presença de sais dissolvidos no meio aquoso. Quanto maior for a concentração de sais dissolvidos na água, maior será a sua condutividade, aumentando a probabilidade por corrosões e/ou incrustações nos sistemas de troca térmica (PENNA, 2009). Soluções compostas de grande parte dos ácidos, bases e sais inorgânicos são relativamente boas condutoras. Já soluções com moléculas de compostos orgânicos que não dissociam na solução aquosa, para a grande maioria, não são boas condutoras (PARRON, 2011).

O controle físico-químico da água de resfriamento é implementado com periodicidade conveniente. São feitas análises dos principais parâmetros para que o sistema de resfriamento não sofra, com frequência, determinados impactos que possam afetar os principais consumidores e, conseqüentemente, o desempenho do processo produtivo. A seguir são mostrados alguns dos principais parâmetros de controle físico-químicos da AGR.

Tabela 2.3 – Faixa de controle físico-químico do tratamento da água de resfriamento.

Parâmetro de controle	Faixa sugerida	Observações
pH	6,5 – 8,5	Água com pH < 6,5 aumentam a corrosão (ácido). pH > 8,5 pode gerar precipitação de sais e prejudicar a ação dos biocidas.
Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Máx. 3000	Valores elevados podem acelerar os processos corrosivos e indicar altas concentrações de TDS.
Alcalinidade total (ppm CaCO_3)	Máx. 400	Valores elevados indicam a presença de carbonatos e bicarbonatos, podendo gerar incrustações.
Sólidos totais dissolvidos (ppm STD)	Máx. 2800	Valores elevados indicam tendências incrustantes da água.
Dureza total (ppm CaCO_3)	Máx. 400	Indica a concentração de sais de cálcio e de magnésio, potenciais formadores de incrustações.
Cloretos (ppm CaCO_3)	Máx. 200	Indica o grau de concentração do meio aquoso e pode caracterizar se o meio é corrosivo.
Sílica (ppm SiO_2)	Máx. 150	A concentração pode controlar incrustações de sílica e silicatos, considerados muito duros e aderentes.
Ferro (ppm Fe)	Máx. 5,0	Indica a intensidade dos processos corrosivos, pois concentrações elevadas podem se incrustar.

Fonte: Adaptado de Trovati (2004).

2.8.2 Principais problemas em um sistema de resfriamento

Os principais problemas encontrados no sistema de resfriamento estão relacionados com a qualidade da água e condições operacionais. A formação de depósitos, processos corrosivos e o desenvolvimento microbiano são os principais problemas encontrados. Tais problemas podem gerar perdas na eficiência de equipamentos e/ou no sistema de resfriamento, e em casos mais graves, paradas da planta. Os depósitos, corrosões e o desenvolvimento microbiano em muitos casos podem estar interligados, sendo um causa para o surgimento do outro.

- Depósitos – São formações que se aderem fracamente ou fortemente às superfícies dos equipamentos, tubulações e conexões. Nas torres de resfriamento os depósitos

reduzem a transferência de calor, reduzindo a eficiência térmica do equipamento, restringem nas vazões de água e aumentam os riscos de deteriorações por corrosões. Os depósitos podem ser divididos em três tipos fundamentais: (1) incrustações verdadeiras – são depósitos que surgem a partir da supersaturação da solução, ou seja, quando o meio aquoso sofre alterações de pH ou da temperatura, a solução pode atingir o seu limite de solubilidade (solução saturada). Os sólidos dissolvidos no meio aquoso podem propiciar a formação de pontos de nucleação cristalina na superfície do material, gerando incrustações aderentes e de difícil remoção. As incrustações verdadeiras comumente encontradas são de carbonato de cálcio e silicatos de cálcio e/ou magnésio (PEREIRA, 2007); (2) depósitos sedimentares – são depósitos oriundos de sólidos em suspensão no meio aquoso, podendo ser de materiais orgânicos, inorgânicos ou microbiológicos. Em situações em que ocorrem reduções de velocidade no meio aquoso, os materiais sofrem sedimentações, depositando sobre as paredes do equipamento. Estes depósitos são menos aderentes do que as incrustações verdadeiras, tornando-o mais fáceis de serem removidos (por varetagem, contra-fluxo de água e/ou drenagem localizada, agentes dispersantes específicos, outras formas) (PEREIRA, 2007); (3) depósitos tipo incrustação – são depósitos que decantam como depósitos sedimentares, por precipitações de sólidos dissolvidos no seio do líquido. São depósitos com aderência intermediária entre os depósitos sedimentares e as incrustações verdadeiras (PEREIRA, 2007).

- Corrosões – De acordo com Gentil (2011), corrosão pode ser definida como sendo a deterioração de um material, geralmente metálico, pela ação química ou eletroquímica do ambiente. É considerado um processo espontâneo e superficial. Como resultado é obtido um óxido, onde age como uma barreira protetora entre o meio corrosivo e o metal, reduzindo a velocidade corrosiva. Existem vários tipos de corrosão em função da origem, mas pode ser dividido, basicamente, de duas maneiras: (1) corrosão localizada – ocorre o processo corrosivo e, conseqüentemente, a perda de massa, em locais pontuais do material. Em sistemas de resfriamento as corrosões localizadas mais frequentes são as galvânica (contatos diretos de diferentes materiais em um meio corrosivo), por aeração diferencial sob depósito (regiões de mesma superfície metálica, submetidas a diferentes concentrações de oxigênio dissolvidos, em presença de um meio corrosivo) e induzidas por microrganismos (PEREIRA, 2007); (2) corrosão generalizada – o processo corrosivo ocorre por toda a extensão da superfície,

tornando-a uma corrosão mais homogênea ao longo da superfície metálica e reduzindo a sua espessura (GENTIL, 2011). De acordo com Drew (1979), existem fatores químicos e físicos que podem afetar a corrosão, como mostrado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Fatores que afetam a corrosão de acordo com Drew (1979).

Químicos	Físicos
<p>A. pH Metais solúveis em ácido – óxidos mais solúveis com a redução do pH, aumentando a corrosão. Metais anfóteros – óxidos solúveis em pH alto ou baixo, sendo a proteção favorecida em pH intermediário. Metais nobres – óxidos insolúveis em qualquer pH e inertes a corrosão.</p> <p>B. Sais dissolvidos Cloreto e sulfato podem penetrar camadas passivas de óxidos e propiciar ataques localizados. O cálcio, magnésio e alcalinidade podem precipitar e gerar depósitos protetores.</p> <p>C. Gases dissolvidos Dióxido de carbono – reduz o pH e promove o ataque ácido. Oxigênio – Despolariza a reação de corrosão no cátodo e as áreas deficientes em oxigênio tornam anódicas (células de aeração diferencial). Nitrogênio – aumenta corrosão por cavitação. Amônia – corrói os metais cuprosos. Sulfeto de hidrogênio – promove ataque ácido e geram depósitos responsáveis por corrosões galvânicas. Cloro – promove ataque ácido e remove os filmes inibidores de corrosão.</p> <p>D. Sólidos suspensos Lama, areia, sujeira, outros, sedimentam-se gerando depósitos, promovendo corrosões por célula de aeração diferencial.</p> <p>E. Microrganismos Promove ataque ácido, corrosão por célula de aeração diferencial, corrosão galvânica, despolarização catódica.</p>	<p>A. Áreas relativas Aumento da corrosão pelo aumento da razão da área catódica e anódica (par galvânico).</p> <p>B. Temperatura O aumento da temperatura, aumenta a despolarização do oxigênio, reduzindo a sobrevoltagem de hidrogênio, aumentando a corrosão. Áreas com temperaturas maiores tornam-se anódicas em relação a outras áreas. O aumento da temperatura muda os potenciais dos metais (p. ex., galvanização inversa).</p> <p>C. Velocidade Velocidades altas promovem corrosões por erosão, removendo produtos de corrosão passivantes. Em baixas velocidades, aumenta a sedimentação e diminui a corrosão por células de aeração diferencial devido à redução de inibidores de corrosão que atinge e passiva as superfícies metálicas.</p> <p>D. Transferência de calor A partir do “efeito de parede quente” ocorre a despolarização por oxigênio. Propicia a formação de células de aeração diferencial, resultando no aumento da precipitação e sedimentação dos sólidos.</p> <p>E. Metalurgia Irregularidades, cortes, arranhões, outros, na superfície metálica favorece o surgimento de pontos anódicos. Tensões – tensões internas propicia o surgimento de pontos anódicos. Microestrutura – inclusões metálicas, precipitações em fronteiras granulares, grão contíguos diferentes, outros, promovem o surgimento de células galvânicas.</p>

Fonte: Adaptado de Drew (1979).

- Desenvolvimento microbiano – O crescimento microbiano pode ser gerado por fatores físico-químicos como: temperatura, pH, luminosidade, materiais orgânicos, sais dissolvidos, velocidade do fluxo, entre outros (HERRO & PORT, 1993). O crescimento descontrolado destes microrganismos podem ser precursores das formações de depósitos (biofilmes), incrustações, contribuindo para um maior potencial corrosivo (pilhas de aeração) e biocorrosão influenciando na performance da torre de resfriamento (MACHADO, 2004). A reação de biocorrosão está relacionada com a formação de microrganismos na superfície metálica. O combate ao desenvolvimento de microrganismos normalmente se dá pelo uso de biocidas oxidantes (combate algas e bactérias aeróbias), biodispersantes (combate bactérias formadoras de limo e anaeróbias) e biocidas não-oxidantes (combate fungos, algas e bactérias) (PEREIRA, 2007).

2.8.3 Índices de estabilidade da água de resfriamento

A água é uma substância que possui uma tendência natural em dissolver outras substâncias. A sua tendência solubilizante está diretamente relacionada com a sua pureza, da temperatura, do pH, das espécies químicas presentes, entre outros fatores. E quanto maior for a concentração de sais dissolvidos, maior será a tendência destes precipitarem (GENTIL, 2007).

O dióxido de carbono (CO_2) presente no ar atmosférico pode ser dissolvido em água e o mesmo reagir com o cálcio dissolvido pela água em contato com as rochas formadas por cálcio e calcário, muito presentes no meio ambiente. Essa reação pode gerar a precipitação de CaCO_3 (carbonato de cálcio). Os índices de estabilidade da água são responsáveis em prever sobre o potencial de incrustação ou corrosão do CaCO_3 na água, sendo os mais utilizados: Índice de Estabilidade de Puckorius (IP), Índice de Saturação de Langelier (LSI) e o Índice de Estabilidade de Ryznar. Neste trabalho, são abordados apenas os dois primeiros índices.

- Índice de Estabilidade de Puckorius (IP) – É o índice utilizado para avaliar as características de estabilidade da água que baseia no cálculo do pH equivalente (pH_{eq}) em substituição do pH do meio. Este método proporciona uma melhor capacidade em prever a tendência à incrustação ou corrosão da água, refletindo a alcalinidade real da água (GONDIM, 2014). As equações utilizadas para o cálculo do IP são as seguintes:

$$IP = (2 \cdot pH_S) - pH_{eq} \quad (2.22)$$

Onde,

$$pH_S = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (2.23)$$

$$pH_{eq} = 1,47 \cdot \log(C_{AT.circ}) + 4,54 \quad (2.24)$$

Sendo,

$$A = \frac{\log(C_{SDT.circ}) - 1}{10} \quad (2.25)$$

$$B = -13,12 \cdot \log(T_{rep} + 273,15) + 34,55 \quad (2.26)$$

$$C = \log(C_{Ca^{2+}.circ}) - 0,4 \quad (2.27)$$

$$D = \log(C_{AT.circ}) \quad (2.28)$$

onde, IP é o Índice de Estabilidade de Puckorius, adimensional; pH_S é o pH de saturação, adimensional; pH_{eq} é o pH equivalente, adimensional; $C_{AT.circ}$ é a concentração da alcalinidade total da água de circulação, em ppm $CaCO_3$; $C_{SDT.circ}$ é a concentração dos sólidos dissolvidos totais da água de circulação, em ppm; T_{rep} é a temperatura da água de reposição, em °C; $C_{Ca^{2+}.circ}$ é a concentração de dureza cálcica da água de circulação, em ppm $CaCO_3$.

As tendências corrosivas e incrustantes da água, segundo o Índice de Estabilidade de Puckorius podem ser visualizadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Tendências de corrosão e incrustação da água de acordo com IP.

Índice de Puckorius (IP)	Tendências da água
$IP \leq 5,5$	Intensa formação de incrustações
$5,6 < IP \leq 6,2$	Formações de incrustações
$6,3 < IP \leq 6,8$	Neutra
$6,9 < IP \leq 8,5$	Água corrosiva
$IP > 8,6$	Água muito corrosiva

Fonte: Gondim (2014).

- Índice de Saturação de Langelier (LSI) – É um dos índices mais empregados para prever a tendência solubilizante (ou corrosiva) e incrustante da água. Para determinação do LSI é realizada a diferença entre o pH do meio e o pH de saturação (pH_s) do carbonato de cálcio na água, onde a água com uma dada concentração de cálcio e alcalinidade está em equilíbrio com o $CaCO_3$ (GE, 2014; TROVATI, 2007). A equação utilizada pra o cálculo do LSI é a seguinte:

$$LSI = pH - pH_s \quad (2.29)$$

onde, LSI é o Índice de Saturação de Langelier, adimensional.

As tendências corrosivas e incrustantes da água, segundo o Índice de Saturação de Langelier podem ser visualizadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Tendências de corrosão e incrustação da água de acordo com LSI.

Índice de Saturação de Langelier (LSI)	Tendências da água
$- 2,0 \leq LSI < - 0,5$	Corrosão severa: condição altamente insegura
$- 0,5 \leq LSI < 0$	Corrosão leve, sem presença de incrustações: condição insegura
$LSI = 0$	Equilibrada: condição segura
$0 < LSI \leq 0,5$	Leve formação de incrustação e corrosiva: condição insegura
$0,5 < IP \leq 2,0$	Formação de incrustação, não corrosiva: condição altamente insegura

Fonte: Carrier (1965) apud Mirre (2012).

2.9 CONTRIBUIÇÕES DA LITERATURA

Muitos estudos têm sido desenvolvidos relacionando temas como o impacto de variáveis de operação no desempenho de torres de resfriamento. Porém, poucos trazem tais impactos relacionados aos custos operacionais do equipamento. Silva (2015) apresenta uma metodologia proposta visando avaliar a otimização de uma torre de resfriamento em termos da redução do custo relacionados com a água de reposição, aditivos químicos (inibidores de corrosão e incrustação), além de trazer outras variáveis importantes como as vazões de purga, o ciclo de concentração (CC) e o dimensionamento do enchimento utilizado. Os cenários

trazidos constituem por diferentes fontes de água de reposição, aplicando-se o Índice de Puckorius (IP) como forma de garantir a qualidade da água. Os resultados demonstram que o custo mínimo foi alcançado com maior CC permitido de acordo com o intervalo aceitável do IP e mostram que com a aplicação de aditivos químicos os custos com reposição reduziram, contribuindo também, com o aumento do CC. No entanto, para que se possa tornar o estudo mais eficiente e aumente a confiabilidade do mesmo, a metodologia requer melhorias na inclusão de outras variáveis importantes que impactam diretamente no aspecto econômico operacional do equipamento.

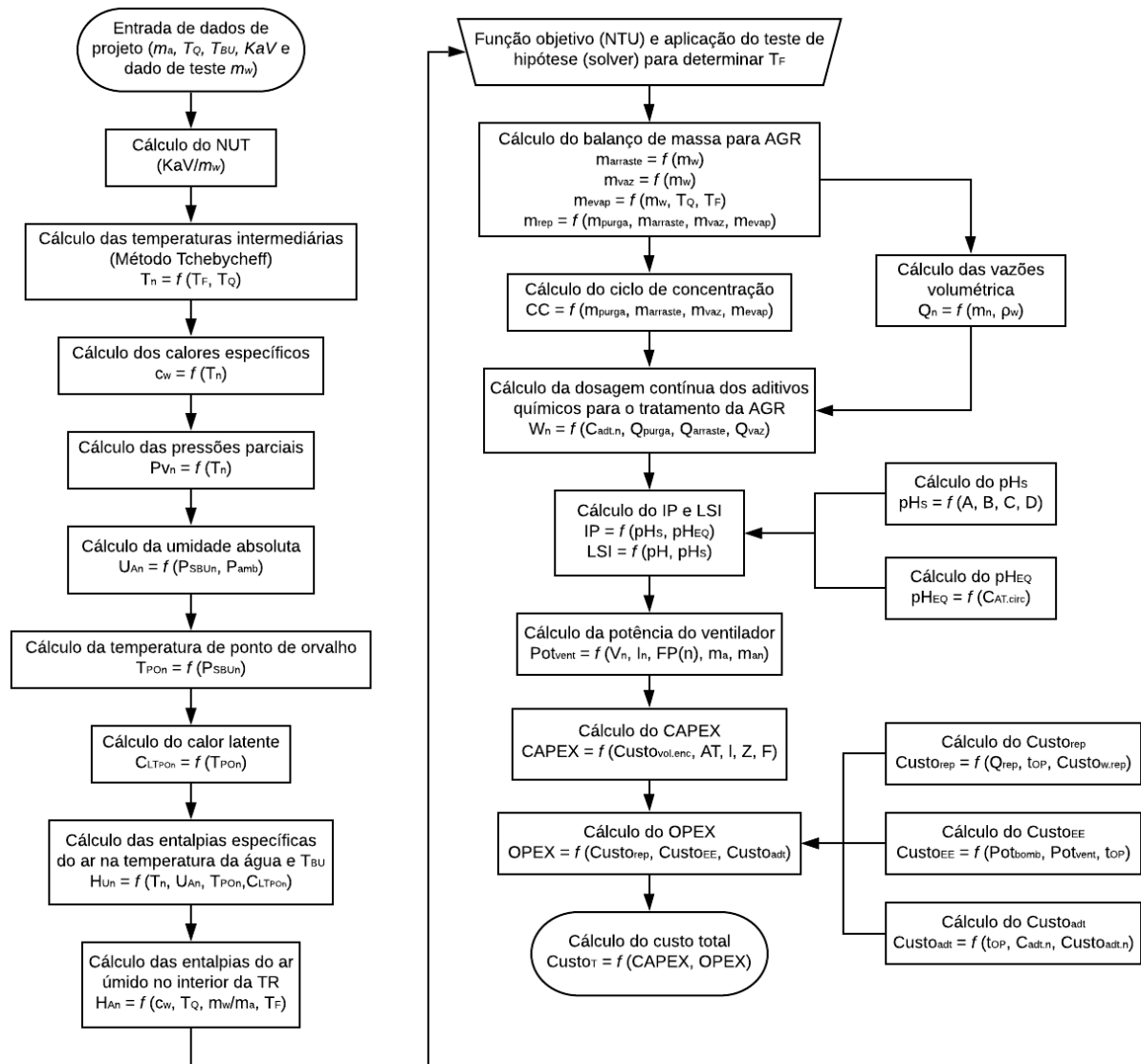
Outro tema pouco visto na literatura envolvendo torres de resfriamento tem sido sobre a importância da auditoria em torres na tentativa de reduzir custos com utilidades. Oliveira (2011) traz alguns estudos de casos abordando algumas das principais não conformidades identificadas em operações. É demonstrada que a auditoria é uma ferramenta eficiente no combate aos problemas que impactam diretamente no desempenho do equipamento e auxilia na sustentabilidade da operação, evitando os desperdícios e problemas ambientais. A auditoria em torres ainda evita problemas ocasionados em outros equipamentos consumidores de AGR do processo, como no caso dos trocadores de calor. Entretanto, o estudo resume a apresentar e analisar, a termo de conhecimento, a importância da ferramenta, como dar seguimento na prática e a abordagem de alguns dos problemas mais identificáveis em torres de resfriamento, trazendo este último, alguns casos reais. Apesar de mostrar uma ferramenta importante e eficiente no combate as não conformidades, a autora não demonstra sua aplicação através de um estudo quantitativo, sem trazer o quanto os impactos afetam no desempenho ou no custo operacional do equipamento.

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para simular os impactos das não conformidades mais relevantes de uma torre de resfriamento, nas condições de processo do equipamento e no seu custo total de operação. Neste trabalho, o modelo matemático apresentado de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente representa o seu comportamento operacional. As variações propostas neste estudo irão representar os cenários impactantes e os efeitos esperados, para cada um deles, no custo operacional. O estudo de caso traz um caso real de uma refinaria de petróleo localizada no nordeste brasileiro, sendo utilizados dados de projeto e processo para o desenvolvimento deste trabalho.

A Figura 3.1 traz a metodologia aplicada para o cálculo do custo total de operação de uma torre de resfriamento de contracorrente. As etapas de cálculo podem ser visualizadas no item 3.1 deste capítulo. Para a partida do estudo são utilizados os dados de projeto do equipamento e os seus resultados são considerados como referência para analisar os efeitos das variações de cada irregularidade simulada.

Figura 3.1 – Fluxograma do algoritmo para o cálculo do custo total de operação de uma torre de resfriamento de contracorrente.



Fonte: Própria.

Para validação do modelo proposto, a temperatura da água na saída da torre de resfriamento (T_F) obtida pela metodologia é comparada ao valor de projeto e determinado o seu erro relativo. Um erro relativo abaixo de 1% pode ser considerado como aceitável. Após a validação do modelo comportamental da torre, as etapas posteriores trazem os cálculos com as principais variáveis relacionadas às não conformidades desenvolvidas no estudo, além de trazer, também, uma forma de mostrar a valoração econômica das situações simuladas.

Todos os cálculos desenvolvidos neste trabalho foram feitos no software Microsoft Office Excel. As planilhas criadas auxiliaram no tempo de resposta e a ferramenta solver pôde

ser usada para encontrar valores ideais, conforme restrições. Como as equações selecionadas e utilizadas no Solver são lineares, o método de resolução de problemas selecionado foi o LP Simplex (*Linear Programming Simplex*) destinado para problemas lineares.

3.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático de uma torre de resfriamento tem a finalidade de representar o comportamento da torre em determinadas condições de operação. A partir de trabalhos vistos na literatura, nota-se que o modelo de Merkel é bastante popular e o seu emprego é recomendado pelos padrões internacionais (KLOPPERS, 2003). A dedução da teoria de Merkel pode ser visualizada no item 2.11.3. A equação de Merkel determina a capacidade de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente e pode ser aplicada pela sua forma integrada, abaixo:

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{\dot{m}_w} = \int_{T_F}^{T_Q} \frac{c_w dT}{H_U - H_A} \quad (3.1)$$

onde, K é o coeficiente de transferência de massa, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; a é a área de contato por unidade de volume do enchimento, em $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$; V é o volume específico do enchimento, em m^3 ; \dot{m}_w é a vazão mássica da corrente de água, em $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; T_Q é a temperatura da corrente de água quente na entrada da torre, em K; T_F é a temperatura da corrente de água na saída da torre, em K; c_w é o calor específico da água, em $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; H_U é a entalpia específica do ar saturado na temperatura da água, em $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; H_A é a entalpia específica do ar úmido no interior da torre, em $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Para a integração da Equação 3.1, o método de integração numérica utilizado é o método de Chebyshev de quatro pontos, recomendados pelo *British Standard* e o *Cooling Tower Institute*. Os quatro intervalos são responsáveis em determinar a mudança de entalpia de água e ar através do enchimento da torre (BRITISH STANDARD, 1988; CTI, 1997).

O valor do primeiro termo da equação obtido é conhecido como Número de Unidades de Transferência (NUT) requerido pelo sistema ou, simplesmente, Número de Merkel (Me), conforme demonstrado na Equação 3.2. O NUT representa a capacidade de transferência de massa requerida da torre, para uma determinada condição de operação (CASSETTA, 2010).

$$NUT = \frac{K \cdot a \cdot V}{\dot{m}_w} = \frac{T_Q - T_F}{4} \cdot c_w \cdot \left[\left(\frac{1}{H_{U1} - H_{A1}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U2} - H_{A2}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U3} - H_{A3}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U4} - H_{A4}} \right) \right] \quad (3.2)$$

Para o cálculo do NUT, são necessários os cálculos das entalpias específicas do ar saturado na temperatura da água (H_{Un}) e das entalpias específica do ar úmido na temperatura de bulbo úmido no interior da torre (H_{An}), mostradas nos itens a seguir:

3.1.1 Cálculo das entalpias específicas do ar saturado na temperatura da água (H_{Un})

A partir da integração numérica de quatro pontos aplicada pelo método de Chebyshev, onde utiliza valores de y a partir de valores de x já predeterminados entre o intervalo de a e b , de maneira a avaliar a integral $\int_a^b y dx$. A soma de tais valores multiplicado pelo intervalo $(b - a)$ fornece o valor da integral. Considerando os quatro pontos, os valores de y são obtidos em função de x correspondentes a 0,102673..., 0,406204..., 0,593796... e 0,897327... do intervalo $(b - a)$, padronizados e arredondados pelo CTI para os valores de 0,1, 0,4, 0,6 e 0,9. A fórmula aproximada fica como:

$$\int_a^b y dx = (b - a) \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{4} \quad (3.3)$$

onde:

$$y_1 \text{ valor de } y \text{ quando } x = a + 0,1 \cdot (b - a) \quad (3.4)$$

$$y_2 \text{ valor de } y \text{ quando } x = a + 0,4 \cdot (b - a) \quad (3.5)$$

$$y_3 \text{ valor de } y \text{ quando } x = a + 0,6 \cdot (b - a) \quad (3.6)$$

$$y_4 \text{ valor de } y \text{ quando } x = a + 0,9 \cdot (b - a) \quad (3.7)$$

Sendo assim, por analogia a Equação 3.1, para os cálculos das entalpias específicas do ar saturado na temperatura da água H_{U1} , H_{U2} , H_{U3} e H_{U4} são necessárias as temperaturas correspondentes a cada ponto (temperaturas intermediárias), representadas pelas equações, a seguir:

$$T_1 = T_F + 0,1 \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.8)$$

$$T_2 = T_F + 0,4 \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.9)$$

$$T_3 = T_F + 0,6 \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.10)$$

$$T_4 = T_F + 0,9 \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.11)$$

Em seguida, são desenvolvidos os cálculos de:

- **Cálculo dos calores específicos nas temperaturas intermediárias (c_w)**

O cálculo dos calores específicos nas temperaturas intermediárias e na temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) podem ser obtidos utilizando a Equação 3.12 e os valores das constantes para a água, obtidos na tabela do ANEXO A (REKLAITIS, 1983).

$$c_w = \frac{a + b \cdot T_n + c \cdot T_n^2 + d \cdot T_n^3}{0,018} \quad (3.12)$$

onde, c_w é o calor específico da água a pressão constante, em $J.K^{-1}$; T_n é a temperatura intermediária correspondente, em K. Constantes: $a = 18,2964$; $b = 0,472118$; $c = 1,33878 \times 10^{-3}$; $d = 1,31424 \times 10^{-6}$.

- **Cálculo das pressões parciais do vapor de água nas temperaturas intermediárias (P_V)**

De acordo com ASAE D271.2 (1983), para os cálculos das pressões parciais do vapor de água nas temperaturas intermediárias são levadas em consideração o ar saturado e a pressão parcial do vapor de água (P_V) equivalente a pressão de vapor da água (P_{SBU}).

Para $273,16 K \leq T_n \leq 533,16 K$:

$$\ln \frac{P_V}{R} = \ln \frac{P_{SBU}}{R} = \frac{A + B \cdot T_n + C \cdot T_n^2 + D \cdot T_n^3 + E \cdot T_n^4}{F \cdot T_n - G \cdot T_n^2} \quad (3.13)$$

onde, P_V é a pressão parcial de vapor da água, em Pa; P_{SBU} é a pressão de vapor da água em

determinada temperatura, em Pa. Constantes: $R = 22105649,25$; $A = -27405,526$; $B = 97,5413$; $C = -0,146244$; $D = 0,12558 \times 10^{-3}$; $E = -0,48502 \times 10^{-7}$; $F = 4,34903$; $G = 0,39381 \times 10^{-2}$.

- **Cálculo das umidades absolutas nas temperaturas intermediárias (U_A)**

De acordo com ASHRAE (2001), a umidade absoluta de uma determinada amostra de ar úmido é definida pela razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco contido na amostra. A umidade absoluta também pode ser definida como a fração molar das respectivas massas multiplicada pela razão das massas moleculares, demonstradas da seguinte forma:

$$U_A = \frac{m_w}{m_{as}} = \frac{18,0153 \cdot x_w}{28,9645 \cdot x_{as}} = 0,6219 \frac{x_w}{x_{as}} \quad (3.14)$$

Quando o ar úmido é considerado como uma mistura de gases ideais independentes, ou seja, ar seco e vapor de água, estes obedecem a equação do gás ideal, da seguinte maneira:

$$PV = nRT = (P_w + P_{as})V = (n_w + n_{as})RT \quad (3.15)$$

A partir da equação do gás ideal, a fração molar do vapor de água e do ar seco pode ser definida em função da pressão, como:

$$x_w = \frac{P_w}{(P_w + P_{as})} = \frac{P_w}{P} \quad e \quad x_{as} = \frac{P_{as}}{(P_w + P_{as})} = \frac{P_{as}}{P} \quad (3.16)$$

Podendo a umidade absoluta, a partir da Equação 3.14, ser reajustada e aplicada para as condições, a seguir:

Para $255,38 \text{ K} \leq T_n \leq 533,16 \text{ K}$ e $P_{SBU} < P_{atm}$:

$$U_A = \frac{0,6219 \cdot P_{SBU}}{P_{atm} - P_{SBU}} \quad (3.17)$$

onde, m_w é a massa de vapor de água, em kg; m_{as} , é a massa de ar seco, em kg de ar seco; x_w , é a fração molar do vapor de água, adimensional; x_{as} , é a fração molar de ar seco, adimensional; P é a pressão total da mistura, em Pa; V é o volume total da mistura, em m^3 ; n_w

é o número de mol do vapor de água, em mol; n_{as} é o número de mol do ar seco, em mol; R é a constante universal dos gases, considerado como 8,31441 J/(mol.K); T é a temperatura absoluta, em K; P_w é a pressão parcial do vapor de água, em Pa; P_{as} é a pressão parcial do ar seco, em Pa; P_{atm} é a pressão atmosférica, em Pa.

- **Cálculo das temperaturas de orvalho (T_{PO})**

A temperatura de orvalho pode ser calculada de acordo com ASHRAE (2001), da seguinte forma:

Para $273,16 \text{ K} \leq T_{PO} \leq 366,48 \text{ K}$:

$$T_{PO} = \{[C_{14} + C_{15} \cdot \ln(P_{SBU} \cdot 1,4503 \times 10^{-4}) + C_{16} \cdot [\ln(P_{SBU} \cdot 1,4503 \times 10^{-4})]^2 + C_{17} \cdot [\ln(P_{SBU} \cdot 1,4503 \times 10^{-4})]^3 + C_{18} \cdot (P_{SBU} \cdot 1,4503 \times 10^{-4})^{0,1984}] + 459,67\} \cdot \frac{5}{9} \quad (3.18)$$

onde, T_{PO} é a temperatura no ponto de orvalho, em K. Constantes: $C_{14} = 100,45$; $C_{15} = 33,193$; $C_{16} = 2,319$; $C_{17} = 0,17074$; $C_{18} = 1,2063$.

- **Cálculo do calor latente na temperatura de orvalho ($C_{L.Tpo}$)**

A partir de Brooker (1967), o cálculo do calor latente na temperatura de orvalho depende da faixa de temperatura onde a temperatura de orvalho está inserida, podendo ser aplicado o cálculo do calor latente de sublimação ($C_{L.sub.Tpo}$) ou calor latente de vaporização ($C_{L.vap.Tpo}$). Para a aplicação neste trabalho, o calor latente de vaporização foi o adequado devido à faixa da temperatura onde a temperatura de orvalho se encontra. As condições são:

Para $273,16 \text{ K} \leq T_{PO} \leq 338,72 \text{ K}$:

$$C_{L.vap.Tpo} = 2502535,259 - 2385,76424 \cdot (T_{PO} - 273,16) \quad (3.19)$$

Para $338,72 \text{ K} < T_{PO} \leq 533,16 \text{ K}$:

$$C_{L.vap.Tpo} = \left(7329155978000 - 15995964,08 \cdot (T_{PO}^2)\right)^{1/2} \quad (3.20)$$

onde, $C_{L.vap.Tpo}$ é o calor latente de vaporização na temperatura de orvalho, em $J.kg^{-1}$.

- **Cálculo das entalpias específicas do ar saturado na temperatura da água (H_{Un})**

De acordo com ASAE D271.2 (1983), a determinação da entalpia específica do ar saturado na temperatura da água pode ser obtida através da psicrometria, considerando que o ar úmido se comporte como um gás ideal, a partir da soma da entalpia do ar, da entalpia da água na temperatura do ponto de orvalho, da entalpia de evaporação (ou sublimação) na temperatura do ponto de orvalho e da entalpia adicionada ao vapor de água (superaquecimento) após a vaporização. Para a aplicação neste trabalho, a entalpia específica do ar saturado na temperatura da água pode ser obtida através da Equação 3.21, dentro da seguinte condição:

Para $273,16 K \leq T_{PO} \leq 373,16 K$:

$$H_U = 1006,92540 \cdot (T_n - 273,16) + 4186,8 \cdot U_A \cdot (T_{PO} - 273,16) + C_{L.vap.Tpo} \cdot U_A + 1875,6864 \cdot U_A \cdot (T_n - T_{PO}) \quad (3.21)$$

3.1.2 Cálculo das entalpias específicas do ar úmido no interior da torre (H_{An})

Para o cálculo das entalpias específicas do ar úmido no interior da torre H_{A1} , H_{A2} , H_{A3} e H_{A4} é necessário obter a entalpia específica do ar na temperatura de bulbo úmido na entrada da torre (H_{BU}), podendo ser calculada através da Equação 3.21 para as condições de bulbo úmido. As entalpias específicas do ar úmido correspondentes à cada ponto (temperaturas intermediárias), encontradas em Casetta (2010), estão representadas pelas equações a seguir:

$$H_{A1} = H_{BU} + 0,1 \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) \cdot c_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.22)$$

$$H_{A2} = H_{BU} + 0,4 \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) \cdot c_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.23)$$

$$H_{A3} = H_{BU} + 0,6 \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) \cdot c_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.24)$$

$$H_{A4} = H_{BU} + 0,9 \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \right) \cdot c_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.25)$$

3.1.3 Cálculo do NUT requerido pelo sistema

Com os valores das entalpias específicas do ar saturado na temperatura da água (H_{Un}) e das entalpias específicas do ar úmido no interior da torre (H_{An}), é calculado a diferença de ambos para cada temperatura intermediária. Com os dados de entrada, temperaturas da corrente de água (entrada e saída) e do calor específico da água (c_w) na temperatura de bulbo úmido, pode ser determinado o NUT requerido pelo sistema, através da Equação 3.2. Contudo, para o desenvolvimento deste trabalho, a temperatura da corrente de água na saída da torre foi posta como incógnita e como forma de validação da metodologia.

A Equação 3.26 é a equação rearranjada da Equação 3.2 para determinação de T_F .

$$T_F = T_Q - \left\{ \frac{4 \cdot NUT}{c_w \cdot \left[\left(\frac{1}{H_{U1} - H_{A1}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U2} - H_{A2}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U3} - H_{A3}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U4} - H_{A4}} \right) \right]} \right\} \quad (3.26)$$

Logo, como $c_w = f(T_F)$, $H_{Un} = f(T_F)$, $H_{An} = f(T_F)$, T_F é calculada com o auxílio da ferramenta solver presente no Excel. Rearranjando e igualando a Equação 3.2 à zero, e com os dados de projeto das variáveis disponíveis (T_Q , KaV , \dot{m}_w) e das entalpias calculadas (H_{Un} , H_{An}), é possível obter o valor de T_F . Esta equação pode ser visualizada da seguinte forma:

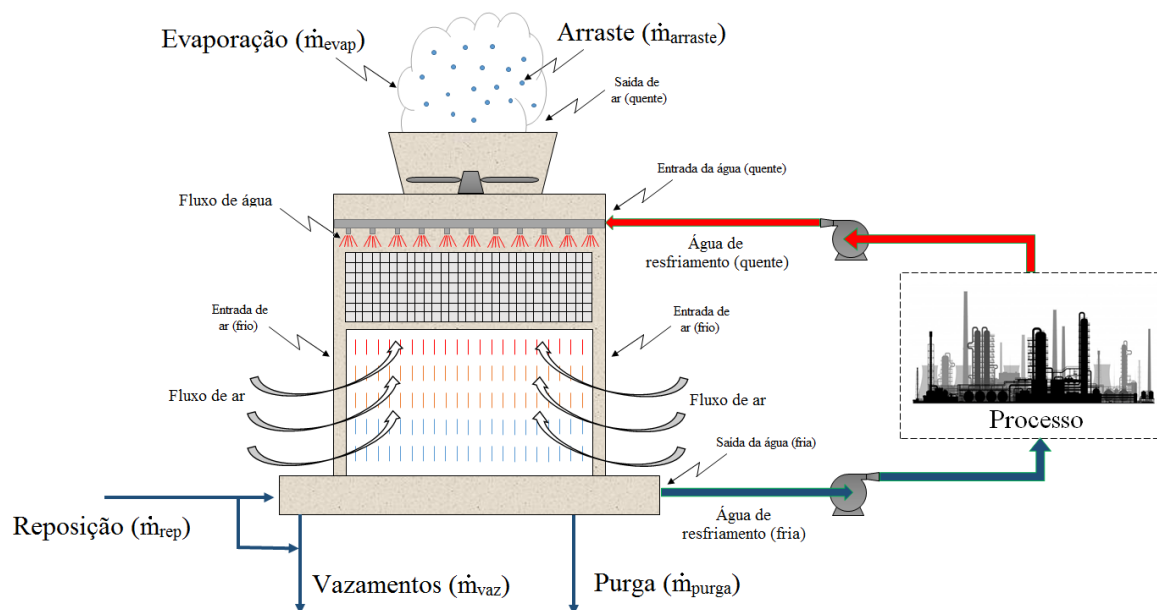
$$fNUT = \left\{ \frac{T_Q - T_F}{4} \cdot c_w \cdot \left[\left(\frac{1}{H_{U1} - H_{A1}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U2} - H_{A2}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U3} - H_{A3}} \right) + \left(\frac{1}{H_{U4} - H_{A4}} \right) \right] \right\} - \frac{K \cdot a \cdot V}{\dot{m}_w} = 0 \quad (3.27)$$

onde, $fNUT$ é a função NUT para o cálculo do T_F , adimensional.

3.1.4 Balanço de massa para a água da torre de resfriamento

A Figura 3.2 ilustra o mecanismo de funcionamento de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente e tiragem mecânica induzida, também considerada como um sistema semiaberto de resfriamento.

Figura 3.2 – Representação esquematizada da torre de resfriamento do tipo contracorrente e tiragem mecânica induzida.



Fonte: Própria.

Tomando como base o sistema de resfriamento representado pela Figura 3.2, operando em regime estacionário e sem acúmulo de matéria, o balanço de massa para a água pode ser representado pela seguinte equação:

$$\dot{m}_{rep} = \dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vaz} + \dot{m}_{evap} \quad (3.28)$$

onde: \dot{m}_{rep} é a vazão da água de reposição (*make-up*), em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; \dot{m}_{purga} é a vazão da água de purga (*blowdown*), em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{arraste}$ é a vazão de perdas da água por arraste, em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; \dot{m}_{vaz} é a vazão de perdas da água por vazamentos, em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; \dot{m}_{evap} é a vazão de perdas da água por evaporação, em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

De acordo com Silva (2015), para as vazões de perdas da água por arraste, vazamentos e evaporação podem ser estimadas, respectivamente, pelas equações empíricas a seguir:

$$\dot{m}_{arraste} = 0,001 \cdot \dot{m}_w \quad (3.29)$$

$$\dot{m}_{vaz} = 4,3 \times 10^{-6} \cdot \dot{m}_w \quad (3.30)$$

$$\dot{m}_{evap} = 0,00153 \cdot \dot{m}_w \cdot (T_Q - T_F) \quad (3.31)$$

3.1.5 Ciclo de concentração da torre de resfriamento

O ciclo de concentração de uma torre de resfriamento está relacionado com a concentração dos sais minerais dissolvidos na água de resfriamento de uma torre durante a sua evaporação, ou também, pode ser interpretado como a quantidade de vezes que a água é concentrada no sistema, como mostra a Equação 3.32 (MANCUSO, 2001; PEREIRA, 2001).

$$CC = \frac{\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vaz} + \dot{m}_{evap}}{\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vaz}} \quad (3.32)$$

onde, CC é o ciclo de concentração da água de resfriamento da torre, adimensional.

3.1.6 Tratamento da água de resfriamento com aditivos químicos e qualidade do meio aquoso

O tratamento da água de resfriamento de um sistema de resfriamento é proporcionado por aditivos químicos que agem para reduzir as possibilidades de formações de corrosões nos equipamentos constituídos pelo sistema de resfriamento, reduzir as formações de depósitos nas tubulações e equipamentos, controlando, também, o crescimento microbiológico no sistema. Perante esses fatores são utilizados produtos químicos como: inibidores de corrosão, agentes dispersantes e biocidas, sendo suas concentrações selecionadas de acordo com a qualidade da água de reposição (HESPANHOL, 2005).

Para o cálculo da dosagem contínua de um aditivo químico selecionado para o tratamento da água de resfriamento, é importante lembrar que somente as perdas por purgas, arrastes e vazamentos propiciam a perda de produtos. Nessas condições, a equação estimada para dosagem de determinado produto na água de resfriamento pode ser representada por:

$$W_n = \frac{C_{adt.n} \cdot (\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vaz})}{1000} \quad (3.33)$$

onde, W_n é a vazão mássica do aditivo químico n , em $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$; $C_{adt.n}$ é a concentração desejada do aditivo químico n , em ppm; \dot{Q}_{purga} é a vazão volumétrica da água de purga (*blowdown*), em $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; $\dot{Q}_{arraste}$ é a vazão volumétrica de perdas da água por arraste, em $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; \dot{Q}_{vaz} é a vazão volumétrica de perdas da água por vazamento, em $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

Para determinação da qualidade do meio aquoso, foram propostos índices de estabilidade, onde indicam se o meio tem a tendência corrosiva ou incrustante, estando diretamente relacionados com o pH e alcalinidade da água de resfriamento (PEREIRA, 2001; TROVATI, 2007). Neste trabalho foram utilizados como base o Índice de Estabilidade de Puckorius (IP) e o Índice de Saturação de Langelier (LSI) para prever a tendência do meio aquoso. As equações a seguir mostram as etapas para os cálculos dos respectivos índices:

$$pH_S = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (3.34)$$

$$pH_{eq} = 1,47 \cdot \log(C_{AT.circ}) + 4,54 \quad (3.35)$$

Onde,

$$A = \frac{\log(C_{SDT.circ}) - 1}{10} \quad (3.36)$$

$$B = -13,12 \cdot \log(T_{rep} + 273,15) + 34,55 \quad (3.37)$$

$$C = \log(C_{Ca^{2+}_{circ}}) - 0,4 \quad (3.38)$$

$$D = \log(C_{AT.circ}) \quad (3.39)$$

Sendo,

$$IP = (2 \cdot pH_S) - pH_{eq} \quad (3.40)$$

$$LSI = pH - pH_S \quad (3.41)$$

onde, pH_S é o pH de saturação, adimensional; pH_{eq} é o pH equivalente, adimensional; $C_{AT.circ}$ é a concentração da alcalinidade total da água de circulação, em ppm $CaCO_3$; $C_{SDT.circ}$ é a concentração dos sólidos dissolvidos totais da água de circulação, em ppm; T_{rep} é a temperatura da água de reposição, em °C; $C_{Ca^{2+}_{circ}}$ é a concentração de dureza cálcica da água de circulação, em ppm $CaCO_3$; IP é o Índice de Estabilidade de Puckorius, adimensional; LSI é o Índice de Saturação de Langelier, adimensional.

3.1.7 Custo total de operação

Com os dados operacionais e de projeto da torre de resfriamento selecionada foi transcrito um modelo para o cálculo do custo total de operação de uma torre de resfriamento de fluxo contracorrente no intuito de mostrar o quanto cada não conformidade abordada neste trabalho pode impactar financeiramente na sua operação. O custo total de operação representado neste trabalho segue o seguinte cálculo:

$$Custo_T = CAPEX + OPEX \quad (3.42)$$

onde, $Custo_T$ é o custo total de operação, em R\$.mês⁻¹ e R\$.ano⁻¹; $CAPEX$ é o custo de capital, em R\$.mês⁻¹ e R\$.ano⁻¹; $OPEX$ é o custo operacional, em R\$.mês⁻¹ e R\$.ano⁻¹.

Para este trabalho, o custo de capital ($CAPEX$) foi levado em consideração apenas o custo relacionado ao volume do enchimento utilizado na torre. Já o custo operacional consiste na soma dos custos da água de reposição, energia elétrica consumida pelos motores dos ventiladores e da bomba, além dos aditivos químicos adicionados para o tratamento da água, ambas as equações podem ser visualizadas a seguir:

$$CAPEX = Custo_{vol. enc} \cdot AT \cdot l_{enc} \cdot Z_{enc} \cdot F \quad (3.43)$$

$$OPEX = Custo_{rep} + Custo_{EE} + Custo_{adt} \quad (3.44)$$

Sendo,

$$Custo_{rep} = \dot{Q}_{rep} \cdot \$_{rep} \cdot t_{op} \quad (3.45)$$

$$Custo_{EE} = t_{op} \cdot \$_{EE} \cdot (Pot_{bomb} + Pot_{vent}) \quad (3.46)$$

$$Custo_{adt} = \sum_{n=1}^5 (t_{op} \cdot \$_{adt.n} \cdot W_{adt.n})_n \quad (3.47)$$

onde, $Custo_{vol. enc}$ é o custo do enchimento da torre de resfriamento, em R\$.m⁻³; AT é a distância percorrida pelo ar na direção horizontal, em m; l_{enc} é a largura do enchimento, em m; Z_{enc} é a altura do enchimento, em m; F é o fator de anualização, em 1.ano⁻¹; $Custo_{rep}$ é o custo de água de reposição, em R\$.mês⁻¹ e R\$.ano⁻¹; $Custo_{EE}$ é o custo com energia elétrica, em R\$.mês⁻¹ e R\$.ano⁻¹; $Custo_{adt}$ é o custo com aditivos químicos, em R\$.mês⁻¹ e R\$.ano⁻¹; $\$_{rep}$

é o preço da água de reposição, em R\$.m⁻³; t_{op} é o tempo de operação, em h.ano⁻¹ e h.mês⁻¹; $\$_{EE}$ é o preço da energia elétrica, em R\$.kWh⁻¹; Pot_{bomba} é a potência do motor da bomba, em kW; Pot_{vent} é a potência do motor do ventilador, em kW; $\$_{adt.n}$ é o preço do aditivo químico n, em R\$.kg⁻¹_{adt.n}.

De acordo com ASME PTC 23-2003 (2003), a potência de um motor de ventilador presente na torre de resfriamento pode ser calculada a partir da Equação 3.48, a seguir:

$$Pot_{vent} = \sqrt{3}.V_n.I_n.FP(n).\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{an}}\right)^{0,333} \quad (3.48)$$

onde, Pot_{vent} é a potência do motor do ventilador, em kW; V_n é tensão nominal do motor do ventilador, em V; I_n é a corrente nominal do motor do ventilador, em A; $FP(n)$ é o fator de potência do motor, adimensional; \dot{m}_a é a vazão mássica de ar induzida pelo ventilador, em kg.h⁻¹; \dot{m}_{an} é a vazão mássica de ar nominal, em kg.h⁻¹.

3.2 ESTUDO DE CASO

O volume de controle estudado neste trabalho é uma torre de resfriamento do tipo contracorrente de tiragem induzida, construída em concreto, constituída de 12 células, com 12 ventiladores axiais e projetada para resfriar 12000 m³/h de água de resfriamento (AGR), sendo a carga térmica de 167364 kW. A água de resfriamento que percorre este equipamento é proveniente da Unidade de Craqueamento Catalítico de Resíduos (UFCR), da Unidade de Águas Ácidas e da Unidade de Recuperação de Enxofre. São utilizadas tanto para o resfriamento em trocadores de calor quanto como água de máquinas. A imagem do equipamento estudado pode ser visualizada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Torre de resfriamento selecionada de uma refinaria do nordeste brasileiro.



Fonte: Própria.

Assim como qualquer equipamento industrial, este equipamento foi projetado para operar em faixas operacionais aceitáveis, mas como são comumente encontradas, as torres de resfriamento trabalham em diferentes e inseguras condições operacionais, em alguns casos, pelo aumento ou redução da demanda produtiva ou negligências administrativas. A atenção voltada para o funcionamento de uma torre de resfriamento pode detectar o seu real desempenho operacional e as suas não conformidades existentes que impactam operacionalmente (equipamento) e economicamente (empresa).

A torre de resfriamento selecionada para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhida e disponibilizada para estudo pela refinaria de petróleo. A proposta foi que ocorresse a disponibilização do material necessário e presente na instituição para o andamento do trabalho, mas que mantivesse o sigilo de determinadas informações, materiais e o nome da empresa. Algumas visitas técnicas foram realizadas para o levantamento dos dados e, em especial, para a inspeção do equipamento.

A seguir, algumas tabelas mostram dados essenciais para o andamento do trabalho. A Tabela 3.1 mostra os dados de projeto utilizados para o cálculo da função NUT, demonstrada pela Equação 3.27, e do custo total de operação da torre de resfriamento. Já a Tabela 3.2 mostram os preços das utilidades e do volume de recheio relacionado ao CAPEX.

Tabela 3.1 – Dados de projeto da torre de resfriamento da unidade de refino de petróleo.

Dados de entrada	Valor	Unidade
Vazão volumétrica da água de circulação (\dot{Q}_w)	12000	m ³ .h ⁻¹
Razão \dot{Q}_w/\dot{Q}_a	1,2	-
Temperatura da água na corrente de entrada (T_Q)	315,15	K
Temperatura da água na corrente de entrada (T_F)	303,15	K
Temperatura da água de reposição (T_{rep})	301,85	K
Temperatura de bulbo úmido (T_{BU})	300,25	K
$NUT_{projeto}$	2,495	-
Pressão ambiente (P_{amb})	101325	Pa
Tensão nominal do motor do ventilador (V_n)	440	V
Corrente nominal do motor do ventilador (I_n)	125	A
Fator de potência do motor do ventilador (FP(n))	0,78	-
Eficiência do motor do ventilador (η)	79,2	%
pH da água de reposição	7,5	-
Altura do recheio (Z)	4,9213	ft
Distância percorrida pelo ar na direção horizontal (AT)	32,8084	ft

Tabela 3.2 – Preços das utilidades e volume de recheio.

Dados de entrada	Valor	Unidade
Energia elétrica	0,76	R\$/kWh
Água de reposição	22,45	R\$/m ³
Volume de recheio	800,00	R\$/m ³

A Tabela 3.3 traz os dados físico-químicos da água de resfriamento utilizado pela refinaria. E a Tabela 3.4 mostra as características dos aditivos químicos usados no tratamento

da AGR pela tratadora contratada pela refinaria.

Tabela 3.3 – Dados das propriedades físico-químicas da AGR utilizada na torre.

Dados de entrada	Valor	Unidade
Concentração da alcalinidade total da água de reposição ($C_{AT.rep}$)	104,8	ppm CaCO ₃
Concentração de dureza cálcica da água de reposição ($C_{Ca^{+2}.rep}$)	56,1	ppm CaCO ₃
Concentração de sólidos dissolvidos totais da água de reposição ($C_{SDT.rep}$)	674,83	ppm

Tabela 3.4 – Dados das características dos aditivos químicos utilizados na AGR da torre.

Dados de entrada	Valor	Unidade	Preço (R\$.kg⁻¹)
Concentração de aditivo 1 / Biocida ($C_{adt.1}$)	0,05	ppm	0,70
Concentração de aditivo 2 / Inibidor ($C_{adt.2}$)	1	ppm	9,26
Concentração de aditivo 3 / Inibidor ($C_{adt.3}$)	2	ppm	3,15
Concentração de aditivo 4 / Inibidor ($C_{adt.4}$)	3	ppm	4,62
Concentração de aditivo 5 / Biocida ($C_{adt.5}$)	8	ppm	2,21

Informações a respeito da água e do ar estão especificadas na Tabela 3.5. Para o desenvolvimento do trabalho, as densidades da água (ρ_w) e do ar (ρ_a) foram consideradas constantes ao longo da torre.

Tabela 3.5 – Densidades da água e do ar.

Dados de entrada	Valor	Unidade
Densidade da água (ρ_w) a 37,5 °C	993	kg.m ⁻¹
Densidade do ar (ρ_a) a 27,1 °C	1,17571	kg.m ⁻¹

A inspeção da torre foi realizada na presença de colaboradores responsáveis pelo funcionamento do equipamento e na presença do coorientador deste trabalho e especialista em torre de resfriamento, o professor Dr. Salvador Ávila Filho. Com o levantamento da literatura, levantamento dos dados históricos monitorados pela empresa, opiniões dos colaboradores participantes no desenvolvimento do trabalho e da inspeção realizada em campo para a identificação de problemas existentes no volume de controle, foram identificados e selecionados quatro tipos de não conformidades presentes na torre de resfriamento, sendo estas: (1) variações da corrente de circulação; (2) variações do ciclo de concentração da água de circulação; (3) variações da corrente de ar; (4) variações do coeficiente de transferência térmica por área de superfície do enchimento.

3.2.1. Considerações teóricas

- a) T_{BU} constante = 300,25 K;
- b) A corrente de ar que sai da torre é saturada de vapor d'água, sendo determinada desta maneira, a sua entalpia específica e umidade (KOPPLERS; KROGER, 2004);
- c) Consideração de uma superfície elementar de transferência ao longo do equipamento (Teoria de Merkel);
- d) O fator de Lewis (L_{ef}), que relaciona à os coeficientes de transferência de calor e massa, é igual a 1 (CORTINOVIS *et al.*, 2009);
- e) As temperaturas, entalpias do ar e fluxos de água e ar são constantes em toda a área de uma mesma seção horizontal da torre (CASSETTA, 2010);
- f) Ar frio na entrada da torre está saturado e na temperatura de bulbo úmido (T_{BU});
- g) Efeito da queda de pressão foi desconsiderado. Área transversal do enchimento constante em toda a torre;
- h) As densidades da água (ρ_w) e do ar (ρ_a) são consideradas constantes ao longo da torre;
- i) Para o custo de capital (CAPEX) é levado em consideração, apenas, o custo com o volume de enchimento;
- j) Para o custo operacional (OPEX) são levados em considerações os custos com água de reposição, custo com energia elétrica e custo com os aditivos;
- k) A potência bomba centrífuga utilizada foi mantida constante no valor de projeto de 1078 kW.
- l) O fator de anualização (F_a) para o enchimento é considerado como $0,2983 \text{ ano}^{-1}$ e o

- fator de mensuração (F_m) é considerado como $0,0220 \text{ mês}^{-1}$;
- m) O tempo de operação anual é considerado como 8016 h.ano^{-1} e mensal como 744 h.mês^{-1} ;
- n) Considerações das unidades no Sistema Internacional de Unidades (SI).

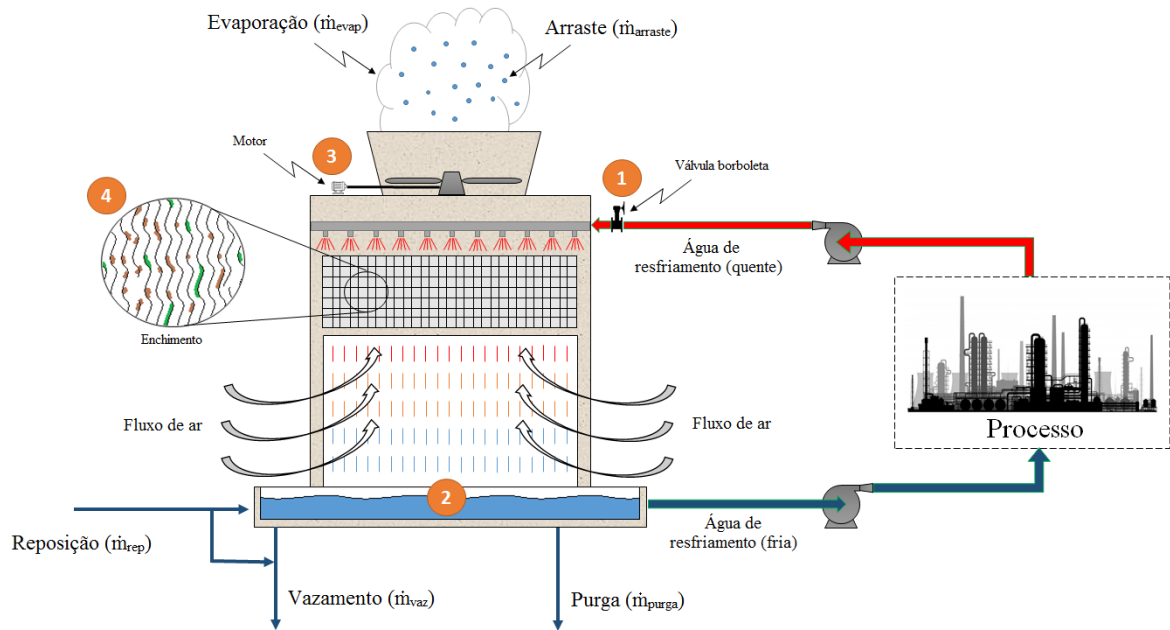
3.3 NÃO CONFORMIDADES

Segundo Ávila Filho (2015), as torres de resfriamento são equipamentos industriais comumente negligenciados, sendo tais atitudes responsáveis por impactar diretamente na confiabilidade operacional destes equipamentos. As torres são facilmente encontradas em más condições de trabalho e com a presença ou aparecimentos constantes de não conformidades que geram grandes perdas operacionais, econômicas e ambientais.

Para as escolhas das irregularidades presentes em operações de torres de resfriamento foram realizados um mapeamento prévio através de pesquisas bibliográficas, visitas de campo para inspeção do equipamento, entrevistas com os profissionais responsáveis pelo setor de utilidades da refinaria e por meio de profissionais com expertise no assunto.

As não conformidades selecionadas para o desenvolvimento deste trabalho foram: (1) variações da corrente de água de circulação; (2) variações do ciclo de concentração da água de circulação; (3) variações da corrente de ar; (4) variações do coeficiente de transferência térmica por área de superfície do enchimento, demonstradas na Figura 3.4. As metodologias aplicadas para a simulação de cada irregularidade são mostradas nos itens posteriores. Os itens demonstram o passo-a-passo aplicado para simular os efeitos de cada não conformidade no processo e no custo operacional total do equipamento.

Figura 3.4 - Representações das não conformidades selecionadas no estudo da torre de resfriamento.



Fonte: Própria.

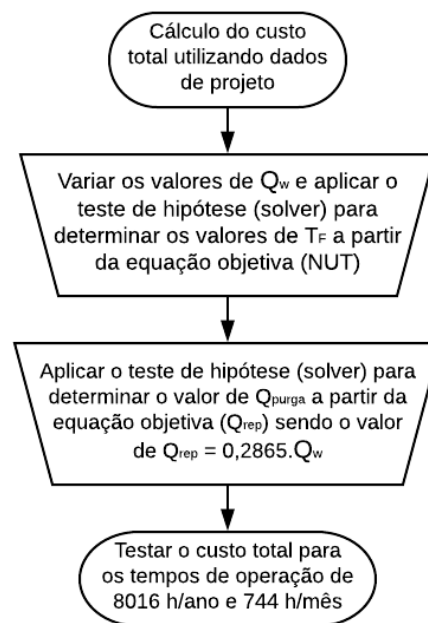
3.3.1. Variações da corrente de água de circulação

As correntes de circulação de uma torre de resfriamento são, constantemente, variadas por diferentes motivos como: (a) pelas necessidades do processo por aumento da carga térmica operacional; (b) por problemas mecânicos em equipamentos auxiliares como, em bombas ou válvulas responsáveis pelo controle do fluxo da água de circulação, em especial, corrente quente. Por motivos de especificações incorretas dos materiais das válvulas ou pela qualidade da água de resfriamento é comum o surgimento de corrosões ou depósitos de materiais químicos ou bioquímicos nestes equipamentos, potencializando o surgimento de falhas e reduzindo a sua confiabilidade operacional (ÁVILA FILHO, 2013).

De acordo com Hensley (1985) e ASME PTC 23 (2003), os limites sugeridos para as variações das vazões de água de circulação de uma torre de resfriamento são de $\pm 10\%$ do seu valor de projeto. Por este motivo, para o desenvolvimento e simulação desta não conformidade foram aplicadas variações das vazões de circulação dentro destes intervalos, considerados como aceitáveis, e variações extrapoladas de $\pm 10\%$ dos limites aceitáveis, para uma análise mais ampla dos efeitos gerados em processo e no custo operacional.

A Figura 3.5 mostra as etapas aplicadas para simular o impacto das variações da corrente de circulação no custo total de operação da torre. A primeira etapa pode ser visualizada na Figura 3.1, onde é realizado o cálculo para o custo total utilizando os dados de projeto. Com o resultado a partir dos dados de projeto (situação padrão), as variações das vazões de circulação (\dot{Q}_w) são realizadas e novas simulações são feitas para cada vazão. Para cada simulação, novos valores de temperatura da corrente de água fria (T_F) e vazão da corrente de reposição (\dot{Q}_{rep}) são obtidos por aplicações do teste de hipótese por meio da ferramenta solver do Excel. Para todas as variações de \dot{Q}_w os valores de \dot{Q}_{rep} será sempre 2,865 % da corrente de circulação, devido as condições de projeto da própria torre estudada. Os custos totais de operação foram levados em considerações para os tempos de operação de 8016 h/ano (análise anual) e 744 h/mês (análise mensal).

Figura 3.5 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações da corrente de circulação.



Fonte: Própria.

3.3.2. Variações do ciclo de concentração da água de circulação

Em um sistema de resfriamento é comum encontrar alguns tipos de perdas de água como, as perdas pela própria evaporação ocorrida no processo de resfriamento na torre, as perdas pelas manobras de purgas (*blowdown*) ou até as perdas devido aos vazamentos,

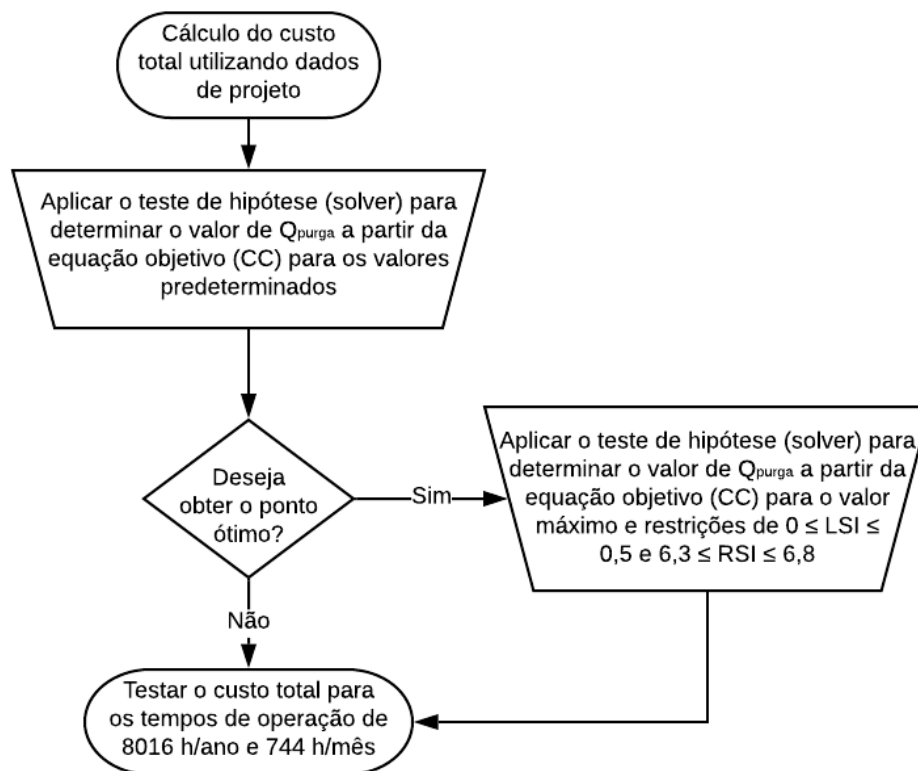
arrastes ou respingos. Devido à existência destas perdas, os sais minerais presentes na água de circulação são concentrados, potencializando as formações de incrustações e corrosões nos equipamentos consumidores desta utilidade. Com o aumento destes sais e, conseqüentemente, facilidade pela formação de um meio incrustante ou corrosivo, as chances da redução da eficiência de troca térmica pelo equipamento também aumenta. Por este motivo a água é constantemente purgada da torre, na tentativa de manter os níveis adequados de sais minerais presentes (MONTEIRO *et al.*, 2004).

De acordo com Trovati (2007), o ciclo de concentração consiste na quantidade de vezes que os sais são concentrados no sistema, tornando o ciclo de concentração um parâmetro de grande importância para um bom funcionamento de uma torre de resfriamento e dos equipamentos consumidores de AGR a jusante, além de ser um parâmetro responsável no combate as questões ambientais e econômicas de uma empresa.

A Figura 3.6 ilustra as etapas aplicadas para simular o impacto das variações do ciclo de concentração no custo total de operação da torre de resfriamento. A etapa inicial aplicada para o cálculo do custo total utilizando os dados de projeto pode ser vista com mais detalhes na Figura 3.1. Com o resultado obtido utilizando os dados de projeto, as variações do ciclo de concentração são feitas e novas simulações são realizadas para cada ciclo de concentração utilizado. A partir de estudos feitos e encontrados na literatura, além dos dados operacionais analisados da refinaria, são sugeridos valores predeterminados de ciclo de concentrações, optando por simulações nos intervalos de 1,7 a 10, onde são encontrados, principalmente, os valores do CC de projeto do equipamento e os obtidos operacionalmente pela refinaria.

Para cada simulação é aplicado um teste de hipótese no Excel, considerando como equação objetivo a equação do ciclo de concentração (Equação 3.32) e o valor do CC como variável controlada. Após cada simulação novos valores da corrente de reposição (\dot{Q}_{rep}) e dos custos totais são obtidos. Os custos totais de operação foram levados em considerações para os tempos de operação de 8016 h/ano (análise anual) e 744 h/mês (análise mensal).

Figura 3.6 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações do ciclo de concentração.



Fonte: Própria.

No entanto, caso queira obter valores ótimos para o ciclo de concentração nas condições de operação, realiza-se um novo teste de hipótese utilizando restrições que caracterizam a estabilidade da água, ou seja, parâmetros que avaliam especificamente a qualidade do meio aquoso. São utilizados índices como o Índice de Puckorius (IP), na faixa aceitável de 6,3 a 6,8, e o Índice de Saturação de Langelier (LSI), na faixa aceitável de -0,5 a 0,5. Novamente, os custos totais de operação podem ser calculados para o sistema com valores ótimos e para os tempos de operação de 8016 h/ano (análise anual) e 744 h/mês (análise mensal).

3.3.3. Variações da corrente de ar

Os ventiladores de uma torre de resfriamento são os principais responsáveis pelo fornecimento da corrente de ar requerido pelo sistema e a sua seleção é feita de acordo com a vazão volumétrica projetada para o funcionamento do equipamento. A potência elétrica

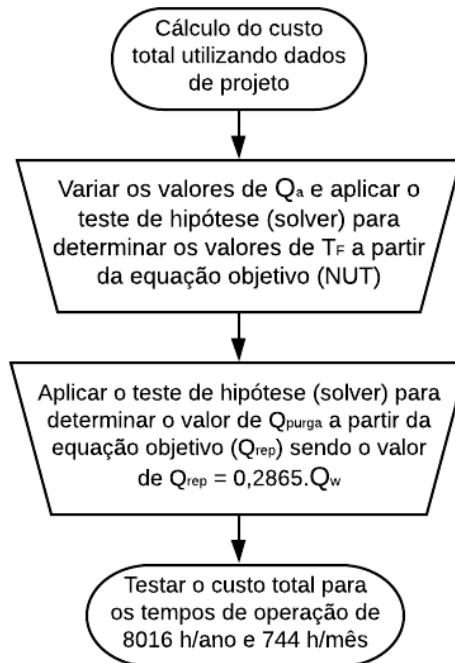
demandada pelo ventilador de uma torre está relacionada diretamente com fatores como, a tensão e corrente nominal (amperagem) dos motores, fator de potência do motor, rotação e das vazões de ar induzida e nominal do ventilador.

A vazão de ar é uma variável que influencia diretamente na troca térmica entre as correntes de ar e água afetando, conseqüentemente, no desempenho da torre e no seu custo operacional. A vazão de ar, também, está diretamente ligada ao tipo de ventilador e motor usado em processo. Por esta razão, situações que impactam na potência do motor podem ser consideradas importantes parâmetros no combate à redução do custo operacional de uma torre e na melhoria do seu desempenho. A vazão de ar (\dot{Q}_a) e corrente elétrica (I_n), variáveis relacionadas à potência do motor, foram levadas em considerações neste trabalho para mostrar o quanto elas podem impactar economicamente na operação deste equipamento. Em empresas onde essas variáveis não são acompanhadas periodicamente, os motores podem ser encontrados operando em condições fora dos limites aceitáveis, tornando tais irregularidades importantes potenciais para estudo.

A Figura 3.7 mostra a etapa desenvolvida para simular os impactos das variações da corrente de ar na potência do motor do ventilador e no custo total de operação do equipamento. A primeira etapa pode ser visualizada na Figura 3.1, onde os cálculos são feitos utilizando os dados de projeto.

De acordo com Hensley (1985) e ASME PTC 23 (2003), os limites sugeridos para as variações da corrente de água são de $\pm 10\%$ do seu valor de projeto. Por este motivo, considerando a proporção \dot{Q}_w/\dot{Q}_a de projeto, foi sugerida uma variação da corrente de ar de $\pm 10\%$ do seu valor de projeto, extrapolando por mais $\pm 10\%$ para uma análise mais ampla dos efeitos gerados em processo e no custo total. Para cada simulação, novos valores de temperatura da corrente de água fria (T_F) são obtidos por aplicações do teste de hipótese no Excel. Para todas as variações de \dot{Q}_a , mantendo \dot{Q}_{rep} constante (valor de projeto), novos valores de \dot{Q}_{purga} serão obtidos, resultando também em novos custos de operação. Os custos totais de operação para ambas as variáveis testadas foram levados em considerações para os tempos de operação de 8016 h/ano (análise anual) e 744 h/mês (análise mensal).

Figura 3.7 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações da corrente de ar.



Fonte: Própria.

3.3.4. Variações do coeficiente global de transferência de calor e massa por área de superfície do enchimento

As torres de resfriamento são projetadas para expor uma grande área superficial entre as correntes de água e ar para auxiliar na troca de massa e energia. Essa área superficial é proporcionada pelos recheios na parte interna da torre. Os recheios podem ser encontrados no mercado em diferentes formatos e materiais, resultando em diferentes desempenhos.

A teoria de Merkel utilizada como base para o desenvolvimento deste trabalho relaciona os coeficientes sensíveis de transferência de calor e massa, permitindo que as duas transferências sejam combinadas em um coeficiente global com entalpia como força motriz (MERKEL, 1926). O desenvolvimento da equação combinada com a transferência dupla pode ser encontrado em trabalhos de muitos autores. No entanto, a equação de transferência em toda a superfície do enchimento de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente pode ser relacionada com o termo NUT, em especial, o termo $K.a$, produto do coeficiente global de transferência de massa e energia por a área de superfície do enchimento.

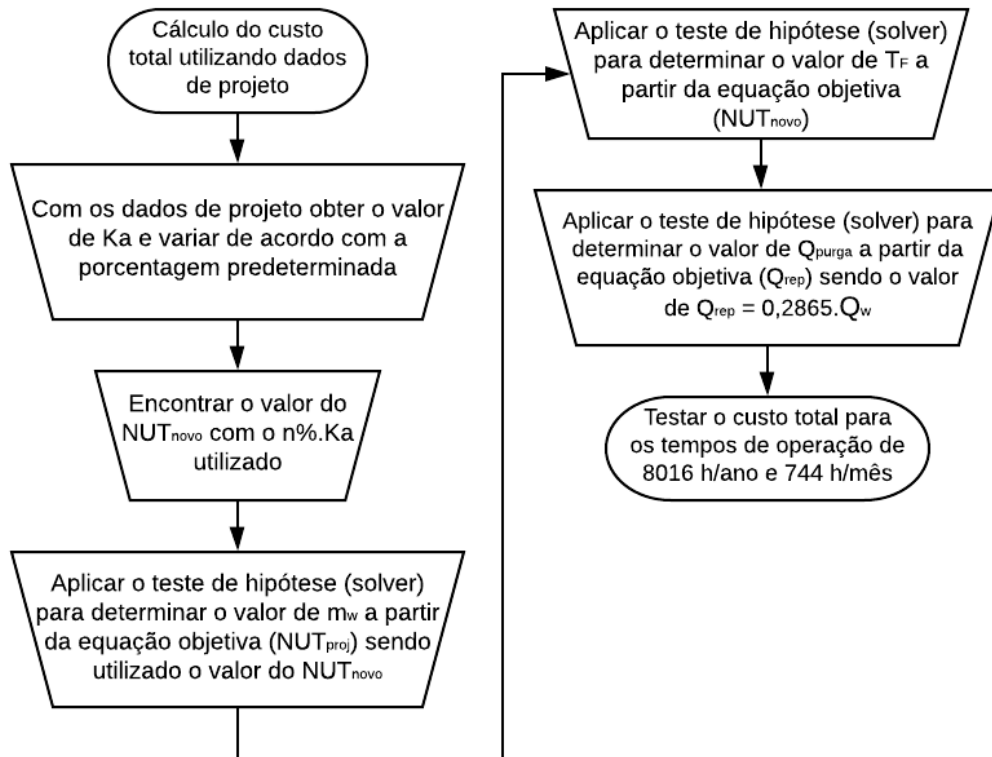
A Figura 3.8 mostra as etapas realizadas para simular o impacto das variações do termo $K.a$ no custo operacional do equipamento. A etapa inicial pode ser visualizada na Figura 3.1, realizando o cálculo do custo total a partir dos dados de projeto. Com o valor determinado de $K.a$ (projeto) a partir do NUT (projeto), foram consideradas variações predeterminadas para o $K.a$ (projeto). Seguindo o mesmo raciocínio das outras irregularidades, foram sugeridos limites de $\pm 20\%$ do seu valor de projeto. Para cada $K.a$ (novo) usado, aplica-se o teste de hipótese para determinar novos valores de \dot{m}_w , a partir da Equação 3.49.

$$NUT_{novo} = \frac{(K.a)_{novo} \cdot V}{\dot{m}_w} \quad (3.49)$$

onde, NUT_{novo} , é o Número de Unidades de Transferência para o valor novo de $K.a_{novo}$, adimensional; $K.a_{novo}$ é o valor do coeficiente global de transferência de massa e energia por área de superfície do enchimento acrescentado da porcentagem predeterminada de $K.a_{projeto}$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; V é o volume específico do enchimento, em m^3 .

Com o novo valor de \dot{m}_w , aplicam-se novamente os testes de hipótese para determinações da temperatura da corrente de água fria (T_F) e vazão da corrente de reposição (\dot{Q}_{rep}), respectivamente. Sendo que para o novo valor de \dot{Q}_w o valor de \dot{Q}_{rep} será sempre 2,865 % de \dot{Q}_w , devido as condições de projeto da própria torre de resfriamento estudada. Finalmente, os custos totais de operação foram levados em considerações para os tempos de operação de 8016 h/ano e 744 h/mês.

Figura 3.8 – Fluxograma para o cálculo do custo total de operação da torre de resfriamento levando em consideração as variações do coeficiente de transferência térmica por área de superfície do enchimento.



Fonte: Própria.

3.4 FERRAMENTAS PARA A ANÁLISE DE NÃO CONFORMIDADES

De acordo com a ISO 9000 (2015), uma não conformidade está relacionada com o não atendimento de um requisito, ou seja, uma necessidade ou expectativa, geralmente implícita ou obrigatória. Em um processo industrial é essencial a busca pela causa raiz das não conformidades ou problemas encontrados, podendo estas ações serem feitas por qualquer colaborador que entre em contato direto ou identifique por alguma maneira o problema existente.

Uma das maneiras mais eficazes de identificar uma não conformidade em um processo industrial é através das implantações periódicas de auditorias, vistorias ou inspeções. Estas ações são cruciais para mitigar problemas e evitar que tais irregularidades não apareçam com frequência e impactem negativamente no desempenho de um processo ou, especificamente,

em um equipamento. Por esta razão, algumas ferramentas de análise de não conformidades podem ser de grande serventia para identificações de potenciais irregularidades em processo e auxiliar na mitigação dos mesmos.

Neste trabalho foram selecionadas dois tipos de ferramentas de análise de não conformidade, que são: (1) Diagrama de Pareto; (2) Diagrama de árvore. Estas duas ferramentas são utilizadas, respectivamente, para ordenar e priorizar os problemas e analisar os fatores causais dos problemas.

3.4.1. Diagrama de Pareto

De acordo com Seleme (2010), o diagrama de Pareto é uma ferramenta desenvolvida para identificar e classificar os problemas de maior relevância e que devem ser corrigidos primeiramente, baseando-se na regra 80/20, ou seja, uma tendência que prevê que 80% dos efeitos surgem a partir de apenas 20% das causas.

A aplicação do diagrama de Pareto neste trabalho tem o intuito de mostrar quais das não conformidades são as mais impactantes no custo total de operação da torre de resfriamento. Estas informações são relevantes, pois a partir de tais informações podem ser possíveis realizar tomadas de decisões para a prevenção, correção e redução dos principais fatores que geram prejuízos econômicos no funcionamento do equipamento.

Para a aplicação do diagrama de Pareto neste trabalho foram obtidos os valores das diferenças dos custos mensais e anuais de cada simulação em relação aos custos com os dados de projeto, de acordo com a Equação 3.50, a seguir:

$$\Delta\text{Custo}_T = \text{Custo}_{T,\text{projeto}} - \text{Custo}_{T,n} \quad (3.50)$$

onde, ΔCusto_T é a diferença entre o custo total de projeto e o custo total da simulação n, em R\$.mês⁻¹ ou R\$.ano⁻¹.

Para cada não conformidade foram construídos os diagramas de Pareto para as condições operacionais extrapoladas (acima dos limites operacionais) e para as condições dos limites operacionais.

3.4.2. Diagrama de árvore

O diagrama de árvore é uma ferramenta excelente para o estudo dos fatores que estão relacionados com um evento indesejável ou não conformidade e suas consequências, orientando a adoção de ações corretivas ou preventivas dos fatores causais (ORIBE, 2004).

Neste estudo, o diagrama de árvore aponta as possíveis causas secundárias geradas pelos eventos ou irregularidades abordadas, identificando a sequência de acontecimentos e facilitando o conhecimento e auxiliando na adoção de medidas preventivas e corretivas, no intuito de reduzir os impactos que levam a prejuízos na empresa.

Esta ferramenta será utilizada para visualizar a estrutura dos problemas, identificando as principais causas secundárias relacionadas aos eventos abordados neste estudo. O intuito da discussão é trazer conhecimentos sobre as situações que, constantemente, são negligenciadas, mas que podem acarretar problemas maiores e afetar tanto o desempenho do equipamento quanto aos custos operacionais do mesmo. Os problemas surgidos em operação, geralmente, estão ligados a outros fatores que passam despercebidos por profissionais responsáveis pelo setor sendo, muitas vezes, considerados irrelevantes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas conforme as metodologias descritas no Capítulo 3. A partir dos diferentes modelos de desempenho de torre de resfriamento do tipo contracorrente discutidos neste trabalho e suas vantagens e desvantagens, o modelo escolhido para aplicação foi o de Merkel. O modelo de Merkel além de ser popularmente conhecido na área acadêmica e o no meio profissional, ainda continuam sendo indicados por instituições regulamentadoras como o CTI (*Cooling Technology Institute*), a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) e a BSI (*British Standards Institution*).

A partir da metodologia proposta, foram desenvolvidas quatro situações envolvendo não conformidades, constantemente, identificadas em operações de torres de resfriamento. Para cada irregularidade tratada foram identificadas variáveis de operação que tivessem impactos direto ou indiretamente no custo total de operação do equipamento, como: (1) a corrente de água de circulação (\dot{Q}_w); (2) o ciclo de concentração da água de resfriamento (CC); (3) a corrente de ar (\dot{Q}_a); (4) o coeficiente global de transferência de calor e massa por área de superfície do enchimento ($K.a$). Tais irregularidades puderam ser percebidas em operação na torre de resfriamento da refinaria, selecionada para estudo de caso deste trabalho.

A seguir, cada item abordará uma não conformidade simulada e por meio dos dados obtidos em planilhas do Microsoft Office Excel e disponibilizados em formatos de tabelas e gráficos, serão avaliados e discutidos. Além dos impactos previstos em outras variáveis de operação e no custo total de operação, também, serão identificadas as irregularidades mais relevantes deste estudo, as principais situações causadoras destes problemas e as medidas preventivas e corretivas que podem ser tomadas para mitigar tais acontecimentos.

4.1 NÃO CONFORMIDADES

4.1.1. Variações da corrente de água de circulação

A corrente de água de circulação é uma das variáveis operacionais que reflete diretamente nas características de uma torre de resfriamento. Como pode ser visualizada pela representação gráfica de uma torre na Figura 2.13, quanto maior for a vazão de circulação, maior será a inclinação da linha de operação e, conseqüentemente, maior a sua aproximação da curva de equilíbrio ou saturação do ar, repercutindo em uma menor remoção térmica da torre. A menor remoção de calor se dá pela redução na diferença entálpica ($H_U - H_A$), resultando na diminuição da força motriz da troca de calor e necessitando de um aumento no tamanho da torre (KERN, 1950).

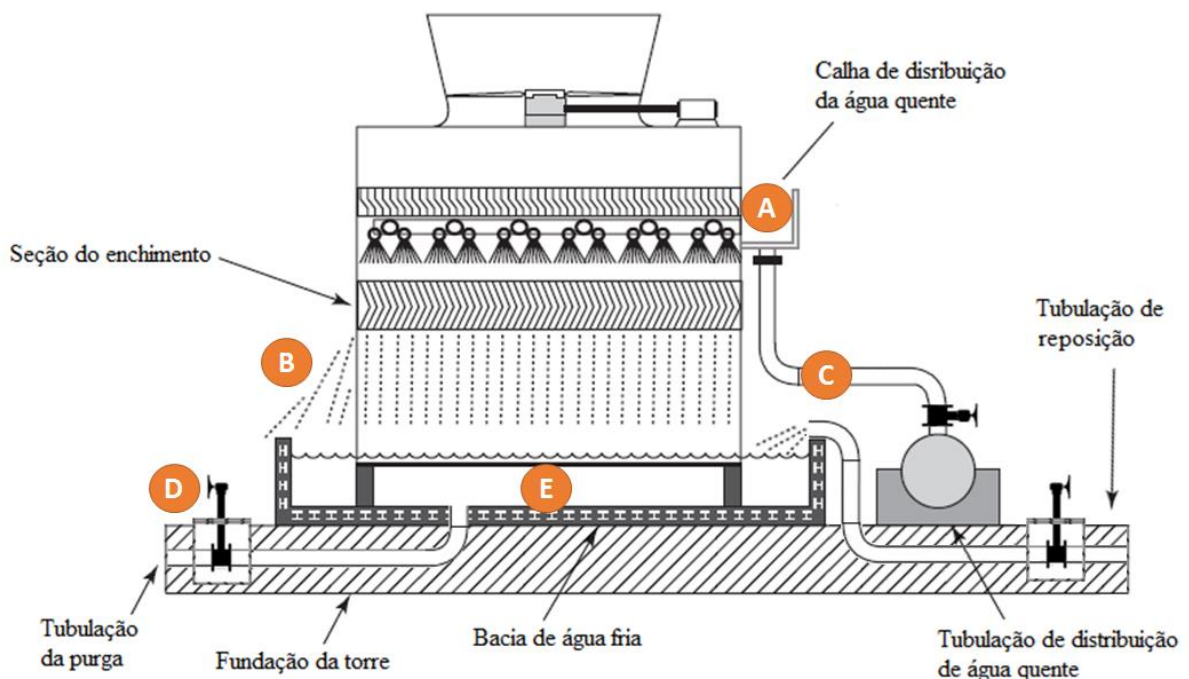
Em muitos estudos literários, a vazão de água está diretamente relacionada com a vazão de ar pela razão (\dot{m}_w/\dot{m}_a) e são utilizadas de forma conjuntas. Contudo, neste estudo a variável \dot{m}_w ou \dot{Q}_w será abordada de forma individual. A sua aplicação neste trabalho tem como objetivo correlacionar algumas situações que são consideradas como fora do padrão ou irregulares no cotidiano operacional de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.

É comum a existência de variações dos parâmetros operacionais de qualquer equipamento, não sendo diferente com a corrente de água de circulação de uma torre. A variação da vazão de água pode se dar por vários motivos, entre eles podem ser destacados: (1) pela demanda da carga térmica do sistema produtivo [aumento/redução da necessidade por energia térmica no processo resulta em variações da vazão da corrente de AGR no processo]; (2) pelas perdas de água na torre e/ou processo [vazamentos, evaporações, arrastes, respingos, transbordos, manobras de reposição e purga]; (3) por métodos inadequados de medições de vazão ou pela inexistência da medição [métodos inadequados de medições geram baixa confiabilidade dos resultados e a inexistência de medidores de vazão no volume de controle para acompanhamento afeta na tomada de decisão]; (4) pela má calibração de instrumentos de medições [instrumentos de medições mal calibrados ou até mesmo sem calibrações periódicas geram resultados imprecisos]; (5) pela variação do ciclo de concentração [resultam em variações nas correntes de reposição e purga]; (6) por erros de projeção de equipamentos [mal projeções de torre de resfriamento, equipamentos auxiliares, sistema de distribuição de água]; (7) por problemas mecânicos em equipamentos auxiliares [danos em válvulas, bombas]; (8) por manobras operacionais inadequadas [manobras de reposição, purga]; (9) pelas condições

ambientais [temperatura ambiente, umidade atmosférica, direção e velocidade do vento]; entre outros (ÁVILHA FILHO *et al.*, 2013; AMJAD *et al.*, 2015).

A partir da visita feita à refinaria e realização da vistoria da torre, puderam ser identificadas em operação algumas das situações abordadas, anteriormente. Notaram-se irregularidades, como: (a) perdas de água por transbordo, sendo visivelmente notada que algumas calhas (partes da torre responsáveis pela coleta da AGR vinda do processo) das células da torre estavam tendo problemas com transbordamento de AGR; (b) perdas por arraste, sendo notado uma certa quantidade de água perdida por arraste através dos ventos para a parte externa da torre; (c) ausência do medidor de vazão no equipamento, sendo a análise feita periodicamente por uma empresa; (d) válvulas emperradas por processos corrosivos, tornando o controle pelas válvulas limitado; (e) busca pelo CC adequado, notado que a empresa tem dificuldade de manter o CC em níveis aceitáveis, tornando manobras operacionais de purga e reposição constantes e em muitos casos contínuas. A Figura 4.1 a seguir demonstram as irregularidades identificadas em operação.

Figura 4.1 – Irregularidades identificadas em operação da torre de resfriamento da refinaria.



Fonte: Adaptada de ASME PTC 23 (2003).

Como visualizado e discutido, a torre de resfriamento da refinaria sofre por algumas situações que afetam diretamente na vazão de água de circulação. Neste trabalho, para simular

a presença de tal irregularidade foi aplicado a metodologia demonstrada pela Figura 3.5. De acordo com a proposta, foi variada a corrente de água de circulação em $\pm 20\%$ do valor de projeto, sendo $\pm 10\%$ considerada como o limite aceitável (HENSLEY, 1985; ASME PTC 23, 2003). Os resultados obtidos das simulações e os impactos em algumas das principais variáveis de operação podem ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados operacionais das simulações variando a corrente de água de circulação.

$\Delta\dot{Q}_w$ (%)	\dot{Q}_w (m ³ /h)	T _F (K)	\dot{Q}_{rep} (m ³ /h)	\dot{Q}_{purga} (m ³ /h)	CC	IP
-20,0%	9600	302,02	275,04	72,57	3,346	5,984
-17,5%	9900	302,16	283,64	76,93	3,265	6,039
-15,0%	10200	302,30	292,23	81,42	3,188	6,094
-12,5%	10500	302,44	300,83	86,05	3,114	6,147
-10,0%	10800	302,58	309,42	90,80	3,044	6,200
-7,5%	11100	302,71	318,02	95,69	2,977	6,251
-5,0%	11400	302,85	326,61	100,69	2,913	6,301
-2,5%	11700	302,99	335,21	105,81	2,851	6,349
*0,0%	12000	303,13	343,80	111,05	2,793	6,397
2,5%	12300	303,27	352,40	116,40	2,737	6,443
5,0%	12600	303,40	360,99	121,84	2,684	6,488
7,5%	12900	303,54	369,59	127,40	2,633	6,531
10,0%	13200	303,67	378,18	133,04	2,585	6,574
12,5%	13500	303,80	386,78	138,78	2,539	6,615
15,0%	13800	303,93	395,37	144,60	2,495	6,655
17,5%	14100	304,06	403,97	150,52	2,453	6,694
20,0%	14400	304,18	412,56	156,51	2,413	6,731

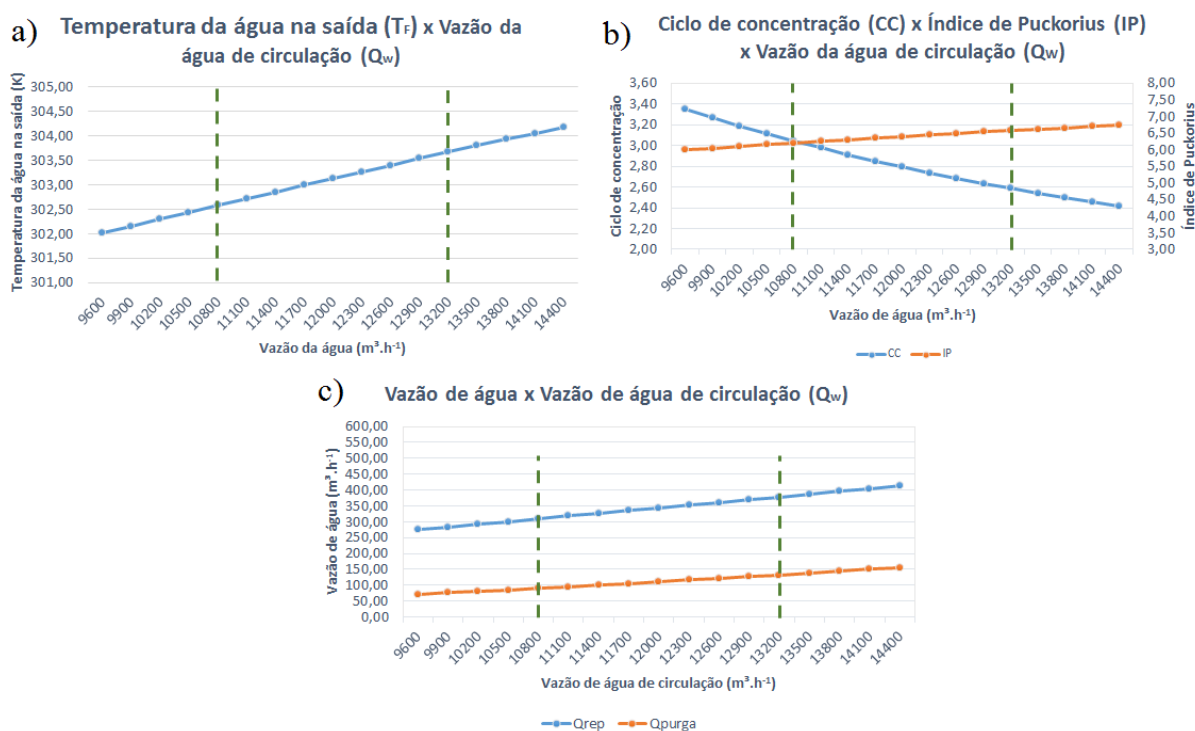
* Simulação com dados de projeto.

Analisando a Tabela 4.1, nota-se que mantendo constante a vazão de ar (\dot{Q}_a) e a temperatura da água da corrente quente (T_Q), o aumento da vazão de água de circulação (\dot{Q}_w) eleva a temperatura da água na saída da torre (T_F), diminuindo o seu range. Este aumento da T_F se dá pela saturação do ar no interior da torre, reduzindo a quantidade de calor trocado entre ambas as correntes. Esta situação pode ser visualizada na Figura 4.2a. Com o aumento da vazão de água, conseqüentemente, ocorre o aumento das manobras operacionais de purga (\dot{Q}_{purga}) e reposição (\dot{Q}_{rep}), sendo sempre esta última 2,865% da \dot{Q}_w de projeto, vistas na Figura 4.2c. A perda por evaporação (\dot{Q}_{evap}) de uma torre, mantendo-se \dot{Q}_w e T_Q constantes, é

diretamente proporcional ao range, ou seja, quanto menor for a T_F , maior será o range e o calor trocado, resultando em uma maior massa de água evaporada. Esta situação pode acontecer quando existe uma melhoria na troca térmica do sistema, como por exemplo: (1) aplicação de um enchimento que proporcione uma melhor superfície de contato para otimizar na troca térmica; (2) baixa umidade do ar atmosférico; (3) aumento no tamanho da torre; (4) aplicações de cooler para auxiliar no resfriamento da AGR; entre outras situações. No entanto, como o aumento de \dot{Q}_w diminui o range da torre, espera-se que a quantidade evaporada de água seja reduzida, mas não é o que acontece, pois o impacto do aumento de \dot{Q}_w acaba sendo muito maior do que a redução do range do sistema, elevando assim \dot{Q}_{evap} .

Com a elevação das perdas de água do sistema (\dot{Q}_{evap} , \dot{Q}_{purga} , \dot{Q}_{vaz}), ocorre a necessidade pela reposição desta água perdida (aumenta \dot{Q}_{rep}). Nota-se que o ciclo de concentração da AGR gera uma redução com o aumento da \dot{Q}_w , pois o impacto da perda de água do sistema pela purga (\dot{Q}_{purga}) é maior do que a perda por evaporação, podendo ser visualizada o seu comportamento na Figura 4.2b. Observa-se, então, que o aumento de \dot{Q}_w gera uma elevação na vazão de purga com um $\Delta\dot{Q}_{purga}$ de ordem crescente e uma elevação da quantidade de água evaporada com um $\Delta\dot{Q}_{evap}$ de ordem decrescente, impactando por isso na redução do CC.

Figura 4.2 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações da corrente de água de circulação: a) Gráfico das variações da Temperatura da água fria na saída da torre x Vazão da água de circulação da torre; b) Gráfico das variações do Ciclo de concentração x Índice de Puckorius x Vazão da água de circulação; c) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Vazão de água de circulação. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para $\Delta\dot{Q}_w$.



Fonte: Própria.

Analisando ainda os resultados das simulações perante o Índice de Puckorius, e as limitações de \dot{Q}_w , os valores mais aceitáveis para serem trabalhados estão entre -5% e 10% do valor de projeto, constituindo resultados dentro dos limites para o Índice de Puckorius ($6,3 \leq IP \leq 6,8$) e da vazão de água circulante ($\pm 10\%$ de \dot{Q}_w de projeto). Já os resultados obtidos relacionados aos custos operacionais, podem ser visualizados na Tabela 4.2, a seguir:

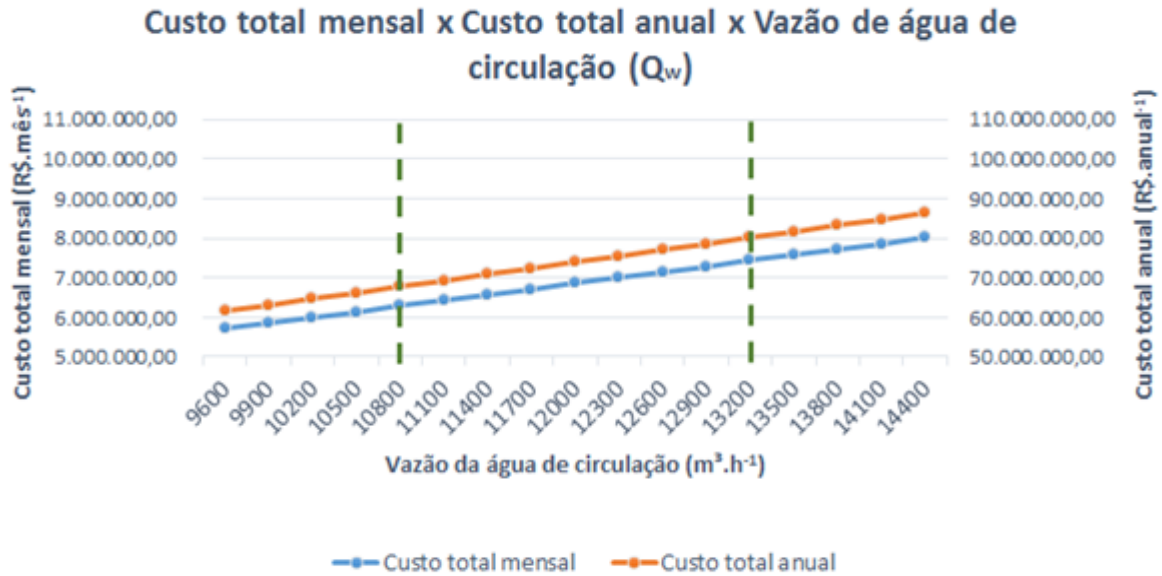
Tabela 4.2 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação da corrente de água de circulação.

$\Delta\dot{Q}_w$ (%)	Custo _{rep} (R\$/mês)	Custo _{rep} (R\$/ano)	Custo _{adt} (R\$/mês)	Custo _{adt} (R\$/ano)	OPEX (R\$/mês)	OPEX (R\$/ano)	Custo _T (R\$/mês)	Custo _T (R\$/ano)
-20,0%	4593933,45	49495928,09	2883,03	31062,34	5680841,26	61206483,30	5706177,20	61550124,89
-17,5%	4737582,19	51043627,49	3046,44	32822,95	5824653,42	62755943,31	5849989,36	63099584,90
-15,0%	4881059,24	52589477,02	3214,34	34631,92	5968298,37	64303601,80	5993634,31	64647243,39
-12,5%	5024703,32	54137126,14	3387,31	36495,53	6112115,42	65853114,53	6137451,36	66196756,12
-10,0%	5168180,38	55682975,66	3564,51	38404,72	6255769,67	67400873,25	6281105,61	67744514,84
-7,5%	5311824,46	57230624,78	3746,50	40365,46	6399595,74	68950483,12	6424931,67	69294124,70
-5,0%	5455301,51	58776474,31	3932,41	42368,56	6543258,71	70498335,74	6568594,64	70841977,33
-2,5%	5598945,59	60324123,43	4122,80	44419,89	6687093,18	72048036,19	6712429,12	72391677,78
*0,0%	5742422,64	61869972,96	4316,82	46510,24	6830764,25	73595976,07	6856100,18	73939617,66
2,5%	5886072,52	63417684,53	4515,02	48645,66	6974612,32	75145823,06	6999948,26	75489464,65
5,0%	6029549,71	64963535,59	4716,52	50816,69	7118291,02	76693845,15	7143626,95	77037486,74
7,5%	6173193,93	66511186,24	4921,90	53029,46	7262140,62	78243708,57	7287476,55	78587350,16
10,0%	6316671,13	68057037,30	5130,30	55274,88	7405826,22	79791805,05	7431162,15	80135446,64
12,5%	6460315,35	69604687,95	5342,31	57559,03	7549682,44	81341739,85	7575018,38	81685381,44
15,0%	6603792,54	71150539,01	5557,07	59872,94	7693374,40	82889904,81	7718710,33	83233546,40
17,5%	6747436,76	72698189,66	5775,17	62222,80	7837236,72	84439905,32	7862572,66	84783546,91
20,0%	6890913,96	74244040,72	5995,78	64599,74	7980934,53	85988133,32	8006270,47	86331774,91

* Simulação com dados de projeto.

De acordo com os resultados obtidos para os tempos operacionais mensal (744 h/mês) e anual (8016 h/ano), nota-se que a variação da corrente de água de circulação é diretamente proporcional aos custos com OPEX (água de reposição, energia elétrica, aditivos químicos). Considerando o aumento de \dot{Q}_w e visto pelos resultados na Tabela 4.1, a vazão de reposição também se eleva devido ao aumento das perdas de água no sistema e as condições de projeto. Por esta razão, a quantidade de aditivos utilizados no tratamento da água torna-se maior. O custo com aditivo além de estar relacionado a quantidade de AGR perdida, também, são influenciados pelo tipo e concentrações dos aditivos utilizados e o tempo de operação. Já o custo de capital (CAPEX) por considerar apenas os gastos com o volume do enchimento utilizado na torre e os fatores de mensalização/anualização, se manteve constante em todas as quatro situações problemas abordadas neste trabalho, resultando em gastos mensais de R\$ 25.335,94 e gastos anuais de R\$ 343.641,59. Os custos operacionais totais mensais e anuais em relação às variações de \dot{Q}_w podem ser visualizados na Figura 4.3, a seguir:

Figura 4.3 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais totais mensais e anuais relacionadas com as variações da corrente de água de circulação.



Fonte: Própria.

4.1.2. Variações do ciclo de concentração da água de circulação

O ciclo de concentração da água de circulação de uma torre de resfriamento reflete muito no seu desempenho operacional e no estado físico do equipamento. A torre de resfriamento é apenas um dos equipamentos que têm o contato direto com a água, mas também existem outros que possuem este contato e podem ter algum tipo de dano devido a qualidade da água utilizada, como as bombas, tubulações, válvulas, trocadores de calor, tanques, entre outros equipamentos consumidores presentes em uma linha que circula esta utilidade.

O ciclo de concentração compara o nível de sólidos totais dissolvidos (TDS) da água de circulação com o nível de TDS da água de reposição, ou simplesmente, podendo ser interpretado pela quantidade de vezes que a água é concentrada no sistema (RAHMANI, 2017; MANCUSO, 2001; PEREIRA, 2001). A água perdida no sistema pela evaporação tem a tendência de concentrar os sais minerais e impurezas, aumentando o CC, já as perdas por arrastes, purgas e vazamentos limitam a concentração, necessitando o reabastecimento com água de reposição com baixas concentrações de sais para manter os níveis de contaminantes nos parâmetros aceitáveis.

De acordo com Amjad *et al.* (2015), as variações no CC podem ser classificadas em três níveis: (1) consumo excessivo de água [$3 < CC < 6$]; (2) consumo aceitável de água [$6 < CC < 14$]; (3) consumo reduzido de água ou sustentável [$14 < CC < 22$]. É de conhecimento que, em processos onde o consumo da água é excessivo, existe uma redução dos processos corrosivos, mas se gasta muito com utilidades. Esta não é uma situação considerada sustentável ao longo prazo. Já em casos que o consumo beira a sustentabilidade, ocorre uma melhoria nos gastos com água, mas as ocorrências de problemas corrosivos aumentam, necessitando de tratamentos frequentes.

Existem algumas razões que podem gerar variações do ciclo de concentração de uma torre, como: (1) concentração de sais minerais totais dissolvidos na corrente de água de circulação e/ou na água de reposição [a qualidade das fontes de água de reposição]; (2) mudanças climáticas [alterações na umidade do ar e temperatura de bulbo úmido influenciam na taxa de evaporação do sistema]; (3) qualidade do ar atmosférico [o ar atmosférico contém impurezas que são transferidas para a água no momento do contato]; (4) métodos inadequados de medições de vazão de purga, reposição e temperaturas da água quente e fria [a confiabilidade dos resultados das variáveis citados podem influenciar nos resultados das tomadas de decisões. Sendo assim, quanto mais confiável o resultado das análises, mais assertivas serão as ações tomadas]; (5) má calibração de instrumentos de medições [instrumentos de medições mal calibrados ou até mesmo sem calibrações periódicas geram resultados imprecisos]; (6) erros de medições dos sais minerais da corrente de circulação [assim como os métodos inadequados utilizados para medir uma variável, os erros cometidos em análise também impactam nas ações tomadas pelos colaboradores. Essas ações podem gerar variações do CC e impactar negativamente o sistema]; (7) perda de água no processo sendo considerada como substituta da purga [a purga realizada na torre serve não só para controlar o CC, mas para retirar impurezas decantadas na bacia de água, como os lodos, materiais insolúveis e outros compostos]; (8) mudanças nas angulações das palhetas dos ventiladores [tais mudanças afetam o fluxo de ar e modificam a taxa de evaporação]; entre outros (AMJAD *et al.*, 2015).

Com a visita à refinaria puderam ser adquiridas informações operacionais importantes sobre o CC da torre. A partir de reuniões com operadores da unidade em que a torre faz parte e análises dos dados de processo, foram notados que existe uma dificuldade para manter o CC em condições satisfatórias. A empresa terceirizada responsável pelo tratamento da AGR utiliza como método de cálculo do CC, informações relacionadas com a qualidade da água de

circulação e reposição, o que neste trabalho foi calculado a partir das vazões do sistema. A vantagem de conhecer as vazões do sistema é de poder ter um maior controle e tomadas de decisões mais assertiva, para buscar com maior facilidade o consumo sustentável da água e reduzir os custos operacionais e dos produtos finais.

Como notado, o CC da AGR de uma torre de resfriamento é um importante parâmetro operacional de uma torre e a sua variação pode afetar diretamente o desempenho deste equipamento, assim como outros equipamentos consumidores da água de circulação. Por esta razão, as variações no CC podem ser identificadas como irregularidades presentes em operação. De acordo com a proposta, explicada na Figura 3.6, as simulações foram realizadas com valores de CC nos intervalos de 1,7 à 10, onde são encontrados os valores do CC de projeto do equipamento e os adquiridos operacionalmente.

Além das classificações do CC já abordadas anteriormente, outras duas formas de critérios utilizadas são para avaliar a tendência à corrosão e incrustação neste estudo, o Índice de Puckorius (IP) e o Índice de Saturação de Langelier (LSI). Ambos os índices fazem a predição do potencial de incrustação do CaCO_3 na água ou, simplesmente, determina as propriedades corrosivas do meio aquoso. O Índice de Puckorius aceitável se encontra na faixa de 6,3 à 6,8, de acordo com a Tabela 2,1, considerada como uma tendência neutra, e o Índice de Saturação de Langelier na faixa de -0,5 à 0,5, de acordo com a Tabela 2,2. Os resultados obtidos das simulações e os impactos em algumas das variáveis de operação podem ser visualizados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados operacionais das simulações variando o ciclo de concentração.

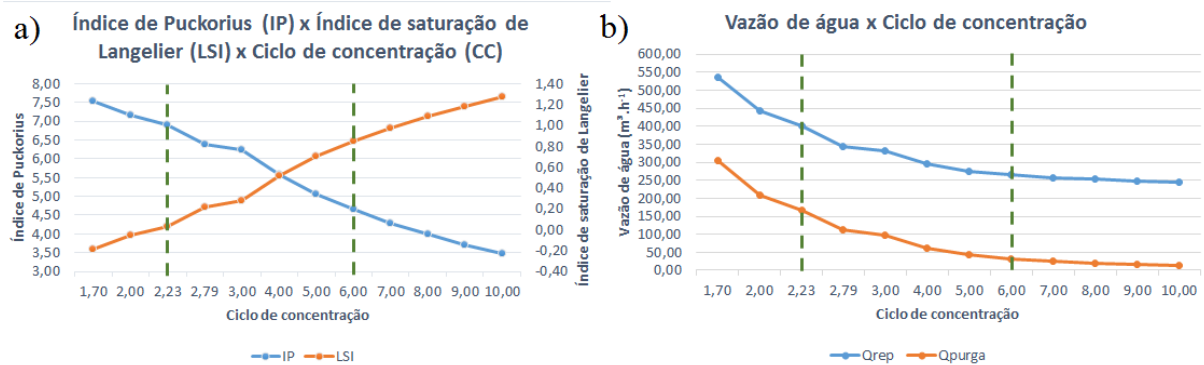
CC	IP	LSI	\dot{Q}_{rep} (m ³ /h)	\dot{Q}_{purga} (m ³ /h)
1,700	7,533	-0,191	535,99	303,24
2,000	7,161	-0,057	441,41	208,65
2,232	6,910	0,034	399,85	167,09
*2,790	6,397	0,219	343,80	111,05
3,000	6,233	0,278	331,05	98,30
4,000	5,575	0,515	294,27	61,52
5,000	5,064	0,699	275,88	43,12
6,000	4,647	0,850	264,84	32,09
7,000	4,294	0,977	257,49	24,73
8,000	3,988	1,087	252,23	19,48
9,000	3,719	1,184	248,29	15,54
10,000	3,478	1,271	245,23	12,47

* Simulação com dados de projeto.

Analisando a Tabela 4.3 e a demonstração gráfica na Figura 4.4a, nota-se que com o aumento do CC, o IP é reduzido e o LSI aumenta, demonstrando que o sistema aumenta o seu potencial incrustante. Observa-se, também, que mantendo constantes a vazão de circulação e o range da torre, para se elevar um CC é necessário reduzir as vazões de reposição e purga do sistema, visto na Figura 4.4b. No entanto, não adianta elevar um CC se a água não estiver em boas condições de uso, por isso são aplicados os índices de estabilidade da água como critérios para seleção do intervalo do CC mais apropriado para o uso.

Com a torre operando nas condições de projeto é observado que os índices de estabilidade da água se encontram dentro dos padrões aceitáveis. Contudo, de acordo com Amjad *et al.* (2015), o seu CC está estabelecido em uma região de CC que corresponde a um consumo excessivo de água impactando, definitivamente, no custo com as utilidades. Esta situação acontece devido as qualidades da água utilizada para reposição e a água de circulação. Algumas características da água refletem diretamente no comportamento do CC, como a alcalinidade total, STD, concentrações de determinadas substâncias como o cálcio, além de propriedades como a temperatura e o pH da água de reposição. Por este motivo, buscar o melhor CC não está apenas em equilibrar as vazões de reposição e purga é importante optar por melhores fontes de reposição.

Figura 4.4 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações do ciclo de concentração da água de circulação: a) Gráfico das variações dos Índices de Puckorius e de Saturação de Langelier x Ciclo de concentração; b) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Ciclo de concentração. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para ΔCC .



Fonte: Própria.

Uma fonte de reposição de boa qualidade quase sempre não será de fácil disponibilidade, pois não é comum encontrar a água na natureza sem a presença de sais minerais e impurezas dissolvidas. Por esta razão, é importante a água de reposição passa por tratamentos como: (1) tratamentos químicos [adição de determinados aditivos químicos como os inibidores de corrosão e incrustação, biocidas, dispersantes, entre outros]; (2) tratamentos mecânicos [osmose reversa, eletrodíálise reversa, catalisadores eletroquímicos, condicionadores magnéticos, entre outros]. Neste trabalho, é levado em consideração apenas o tratamento químico utilizando aditivos químicos com concentrações representados na Tabela 3.4. Os custos operacionais obtidos para cada simulação podem ser visualizados na Tabela 4.4.

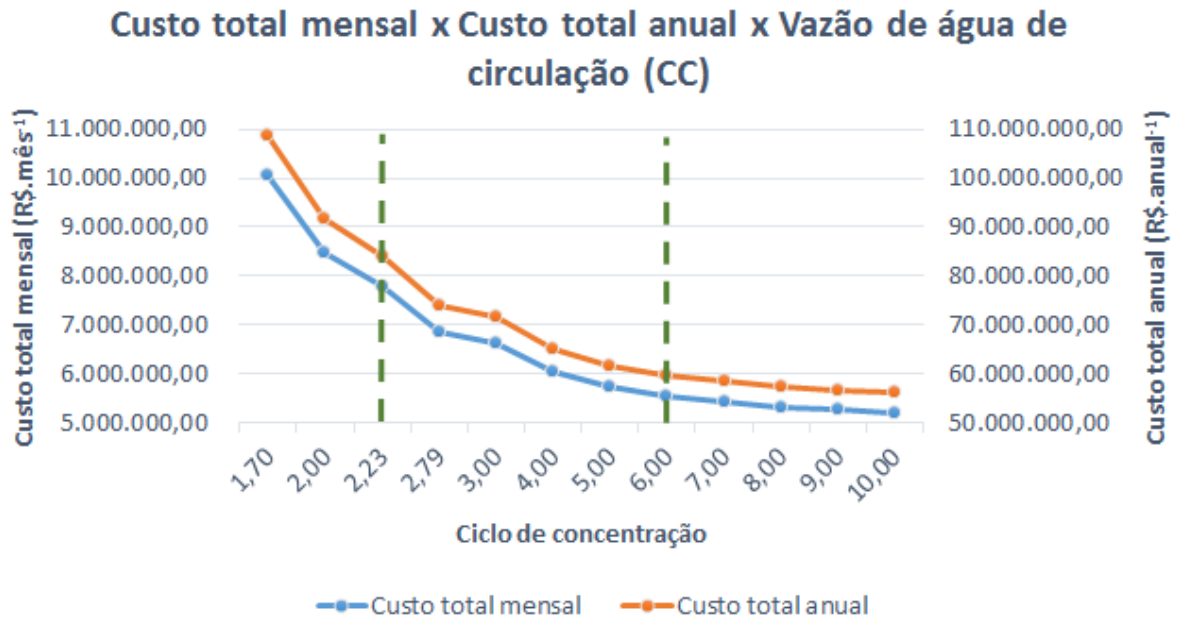
Tabela 4.4 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação do CC.

CC	Custo _{rep} (R\$/mês)	Custo _{rep} (R\$/ano)	Custo _{adt} (R\$/mês)	Custo _{adt} (R\$/ano)	OPEX (R\$/mês)	OPEX (R\$/ano)	Custo _T (R\$/mês)	Custo _T (R\$/ano)
1,700	8952592,35	96456962,79	11056,75	119127,52	10047673,89	108255583,17	10073009,82	108599224,76
2,000	7372713,60	79435043,32	7739,70	83389,07	8464478,09	91197925,25	8489814,03	91541566,84
2,232	6678534,91	71955827,79	6282,24	67686,05	7768841,94	83703006,70	7794177,88	84046648,29
*2,790	5742427,61	61870026,54	4316,83	46510,36	6830769,23	73596029,76	6856105,17	73939671,35
3,000	5529535,55	59576286,21	3869,85	41694,52	6617430,18	71297473,60	6642766,12	71641115,19
4,000	4915143,99	52956712,62	2579,90	27796,37	6001748,67	64664001,85	6027084,61	65007643,44
5,000	4607947,27	49646915,77	1934,93	20847,27	5693906,99	61347255,91	5719242,92	61690897,50
6,000	4423629,81	47661043,74	1547,94	16677,82	5509202,54	59357214,43	5534538,47	59700856,02
7,000	4300751,41	46337128,13	1289,95	13898,19	5386066,15	58030519,19	5411402,09	58374160,78
8,000	4212981,23	45391475,22	1105,67	11912,74	5298111,69	57082880,82	5323447,63	57426522,41
9,000	4147152,90	44682228,04	967,46	10423,64	5232145,15	56372144,54	5257481,09	56715786,13
10,000	4095953,98	44130600,91	859,97	9265,46	5180838,73	55819359,24	5206174,67	56163000,83

* Simulação com dados de projeto.

De acordo com os resultados demonstrados na Tabela 4.4 e visualizados graficamente na Figura 4.5, nota-se que com o aumento do CC os gastos operacionais são reduzidos. Isto se dá pela diminuição no consumo de água de reposição e, conseqüentemente, pelo uso dos aditivos químicos. Por motivo de comparações com as demais situações problemas, foi variado o CC em -20 % do valor de projeto, resultando em um valor de 2,232. Com os resultados obtidos, nota-se que além do valor se encontrar fora dos critérios de IP e LSI, os custos se elevam devidos aos gastos com água de reposição e aditivos químicos.

Figura 4.5 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais totais mensais e anuais relacionadas com as variações do ciclo de concentração da água de circulação.



Fonte: Própria.

Através da ferramenta solver presente no Microsoft Excel foi possível determinar os limites aceitáveis do ciclo de concentração de acordo com os critérios do IP e LSI. Determinando os critérios de IP e LSI e optando pelas escolhas dos pontos máximo e mínimo foram obtidos os resultados demonstrados nas Tabelas 4.5 e 4.6. De acordo com os valores nota-se que o ponto ótimo a se trabalhar, de acordo com os critérios predeterminados, possui um CC de 2,91, proporcionando uma economia mensal de R\$ 129.937,81 e anual de R\$ 1.399.975,16.

Tabela 4.5 – Resultados operacionais das simulações para limites aceitáveis do ciclo de concentração.

ΔCC	CC	IP	LSI	\dot{Q}_{rep} (m ³ /h)	\dot{Q}_{purga} (m ³ /h)
-16,13%	2,34	6,800	0,073	385,18	152,43
4,30%	2,91	6,300	0,254	336,04	103,28

Tabela 4.6 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento para limites aceitáveis de CC.

Custo_{rep} (R\$/mês)	Custo_{rep} (R\$/ano)	Custo_{adt} (R\$/mês)	Custo_{adt} (R\$/ano)	OPEX (R\$/mês)	OPEX (R\$/ano)	Custo_T (R\$/mês)	Custo_T (R\$/ano)
6433662,25	69317522,32	5768,11	62146,78	7523455,15	81059161,97	7548791,09	81402803,56
5612762,04	60472984,55	4044,59	43577,19	6700831,42	72196054,61	6726167,35	72539696,20

4.1.3. Variações da corrente de ar

O processo de troca de calor realizado pelas correntes de água e ar podem ser feitos de duas maneiras, por convecção e evaporação. Na convecção, o calor é transferido da água para o ar devido a diferença das temperaturas. Já na evaporação, responsável por grande parte da troca térmica do sistema, a água passa por mudanças do seu estado físico retirando a energia térmica necessária da própria corrente de água, reduzindo assim a temperatura da mesma. Por esta razão, a vazão de ar e a sua qualidade influenciam diretamente na quantidade de energia térmica absorvida e na temperatura da água na saída da torre (T_F).

Alguns parâmetros estão diretamente relacionados com a variação da corrente de ar, como por exemplo, a corrente elétrica (I_n), tensão (V), fator de potência, rotação e vazões de ar induzida e nominal. Todos estes fatores refletem na potência fornecida pelo motor sobre o eixo do ventilador. Este conjunto de fatores podem ser considerados os responsáveis pelo deslocamento do ar, mas ainda existem componentes presentes na torre que exercem influências na circulação eficiente do ar pelo equipamento, como: difusores, enchimentos, eliminadores de gotas, dimensionamento da torre (AMJAD *et al.*, 2015).

Existem algumas situações encontradas em operação que podem variar a corrente de ar que circula na torre, como: (1) variações da potência do motor [a potência do motor do ventilador pode variar por motivos relacionados a variações da carga, variações da amperagem e tensão da rede, problemas mecânicos, falta de lubrificação, aumento de vibrações e ruídos]; (2) variações dos ângulos das pás dos ventiladores [as variações dos ângulos das pás podem alterar a vazão de ar fornecida pelo ventilador]; (3) aumento da perda de carga nos enchimentos [a perda de carga causadas por acúmulos de materiais nos enchimentos e eliminadores de gotículas podem alterar a potência do motor e a circulação do ar]; (4) lubrificações [a lubrificação periódica nos componentes mecânicos evitam problemas como desgastes, aquecimento, aumento da potência, desequilíbrios, outros]; (5) aumento das

vibrações [o equilíbrio e balanceamento do eixo de transmissão do ventilador evitam problemas de vibrações]; (6) desgastes mecânicos dos componentes [desgastes causados por atritos entre as peças, erosão pelo vento, corrosões devido ao ambiente úmido e propício aos efeitos corrosivos são exemplos de situações que podem ser encontradas nos motores, nas hélices dos ventiladores, no eixo de transmissão e impactar no desempenho do sistema de ventilação]; entre outros (AMJAD *et al.*, 2015).

Para demonstrar a influência das variações da corrente de ar no custo operacional da torre de resfriamento foi aplicada a metodologia demonstrada pela Figura 3.7. As variações da vazão de ar, seguindo as limitações sugeridas por Hensley (1985) e ASME PTC 23 (2003) para a vazão de água de circulação e mantendo a proporção do \dot{Q}_w/\dot{Q}_a de projeto, foi sugerida uma variação de $\pm 10\%$ do seu valor de projeto, extrapolando por mais $\pm 10\%$. Os resultados das simulações podem ser visualizados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados operacionais das simulações variando a corrente de ar de circulação.

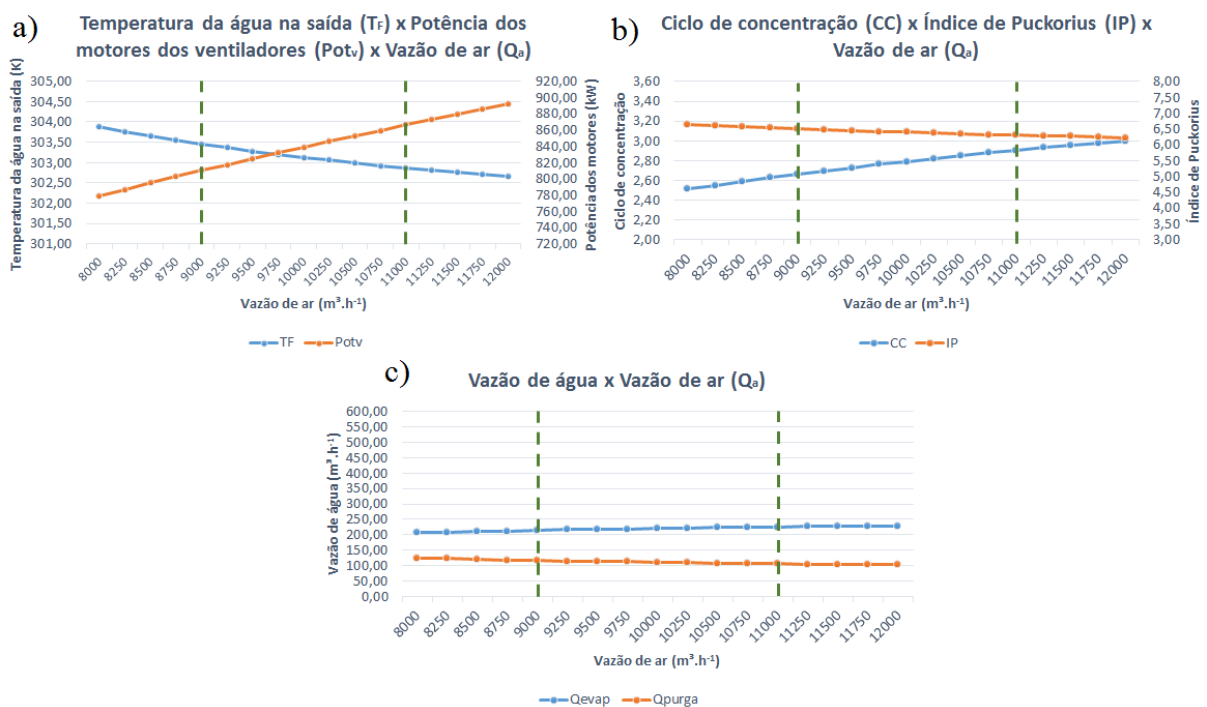
$\Delta\dot{Q}_a$ (%)	\dot{Q}_a (m ³ /h)	T _F (K)	Pot _{vent} (kW)	\dot{Q}_{purga} (m ³ /h)	\dot{Q}_{evap} (m ³ /h)	CC	IP
-20,0%	8000	303,88	779,04	124,88	206,87	2,511	6,641
-17,5%	8250	303,77	787,07	122,73	209,02	2,551	6,604
-15,0%	8500	303,66	794,93	120,72	211,03	2,589	6,570
-12,5%	8750	303,55	802,64	118,84	212,91	2,627	6,537
-10,0%	9000	303,46	810,20	117,08	214,67	2,662	6,506
-7,5%	9250	303,37	817,63	115,43	216,32	2,697	6,477
-5,0%	9500	303,28	824,92	113,88	217,87	2,730	6,449
-2,5%	9750	303,20	832,09	112,42	219,33	2,762	6,422
*0,0%	10000	303,13	839,13	111,05	220,70	2,793	6,397
2,5%	10250	303,06	846,06	109,75	222,00	2,823	6,373
5,0%	10500	302,99	852,88	108,53	223,22	2,851	6,350
7,5%	10750	302,93	859,59	107,38	224,37	2,879	6,328
10,0%	11000	302,87	866,19	106,29	225,46	2,905	6,307
12,5%	11250	302,81	872,70	105,25	226,49	2,931	6,287
15,0%	11500	302,76	879,11	104,27	227,47	2,955	6,267
17,5%	11750	302,71	885,43	103,35	228,40	2,979	6,249
20,0%	12000	302,66	891,66	102,46	229,29	3,002	6,231

* Simulação com dados de projeto.

De acordo com os dados da Tabela 4.7, nota-se que com o aumento da vazão de ar

existe uma redução em T_F (Figura 4.6a), ou seja, com o aumento de \dot{Q}_a mantendo-se \dot{Q}_w constante, a troca de energia se torna mais eficiente devido ao aumento na evaporação da água por unidade de massa de ar. A massa de ar saturada em contato com o líquido é renovada constantemente, reduzindo T_F e aumentando a quantidade de água evaporada (\dot{Q}_{evap}). As potências dos motores dos ventiladores são elevadas, pois requerem uma maior força para a demanda de ar prevista. Com a elevação da corrente de ar, nota-se também que devido ao aumento das perdas por evaporação, o CC se eleva e o IP cai (Figura 4.6b).

Figura 4.6 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações da vazão de ar: a) Gráfico das variações da Temperatura da água fria na saída da torre x Potências dos motores dos ventiladores da torre; b) Gráfico das variações do Ciclo de concentração x Índice de Puckorius x Vazão de ar; c) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Vazão de ar. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para $\Delta\dot{Q}_a$.



Fonte: Própria.

A partir dos dados e das limitações de projeto, os valores aceitáveis e seguros de \dot{Q}_a são de $9000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Nestes intervalos notam-se que os valores para o IP se enquadram nos parâmetros ideais mostrados na Tabela 2.1. Na Tabela 4.8 são mostrados os custos operacionais obtidos para cada simulação.

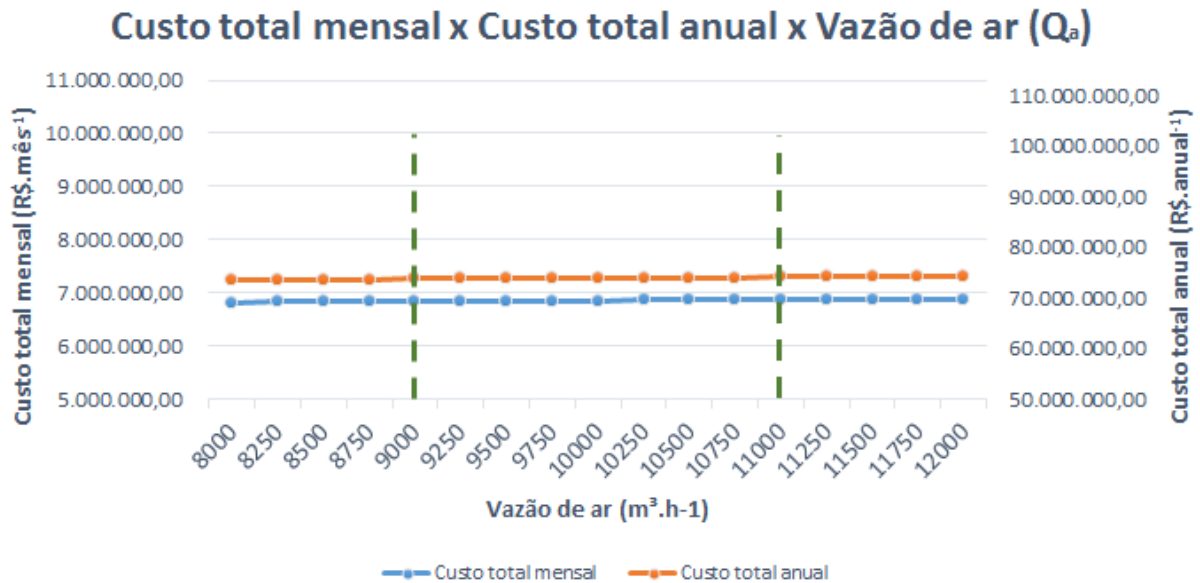
Tabela 4.8 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação da corrente de ar.

Custo_{EE} (R\$/mês)	Custo_{EE} (R\$/ano)	Custo_{adt} (R\$/mês)	Custo_{adt} (R\$/ano)	OPEX (R\$/mês)	OPEX (R\$/ano)	Custo_T (R\$/mês)	Custo_T (R\$/ano)
1050045,73	11313395,94	4801,96	51737,24	6797276,04	73235167,62	6822611,97	73578809,21
1054582,74	11362278,53	4726,59	50925,15	6801737,67	73283238,15	6827073,61	73626879,74
1059028,94	11410182,82	4656,12	50165,98	6806107,71	73330321,76	6831443,64	73673963,35
1063388,76	11457156,33	4590,21	49455,82	6810407,33	73376646,66	6835743,26	73720288,25
1067666,26	11503242,96	4528,45	48790,39	6814623,07	73422067,89	6839959,00	73765709,48
1071865,23	11548483,44	4470,52	48166,24	6818764,11	73466684,23	6844100,04	73810325,82
1075989,17	11592915,53	4416,12	47580,13	6822833,64	73510530,23	6848169,58	73854171,82
1080041,34	11636574,42	4364,97	47029,08	6826828,94	73553576,33	6852164,88	73897217,92
*1084024,79	11679492,87	4316,82	46510,24	6830764,25	73595976,07	6856100,18	73939617,66
1087942,35	11721701,48	4271,45	46021,41	6834636,44	73637695,85	6859972,38	73981337,44
1091796,69	11763228,91	4228,64	45560,16	6838447,97	73678762,03	6863783,91	74022403,62
1095590,30	11804101,96	4188,20	45124,44	6842201,14	73719199,36	6867537,07	74062840,95
1099325,51	11844345,82	4149,95	44712,34	6845898,10	73759031,12	6871234,03	74102672,71
1103004,52	11883984,16	4113,73	44322,13	6849540,89	73798279,24	6874876,82	74141920,83
1106629,39	11923039,24	4079,39	43952,08	6853125,66	73836902,23	6878461,59	74180543,82
1110202,08	11961532,04	4046,81	43601,15	6856671,53	73875106,15	6882007,47	74218747,74
1113724,41	11999482,38	4015,86	43267,61	6860162,91	73912722,95	6885498,84	74256364,53

* Simulação com dados de projeto.

Os resultados dos custos na Tabela 4.8, demonstram que o aumento de \dot{Q}_a reflete diretamente no custo total de operação da torre. Além do custo com energia elétrica devido ao aumento da potência do motor, os gastos também estão relacionados aos custos com aditivos químicos, pois a qualidade da água sofre alterações com o aumento de \dot{Q}_{evap} e elevação do CC. No entanto, quando comparando com as demais situações problemas os gastos gerados pelas variações de \dot{Q}_a acabam sendo muito menores. Os gastos com $\Delta\dot{Q}_a$ podem ser visualizados na Figura 4.7. A vazão de reposição foi mantida constante nesta abordagem para que os resultados não fossem influenciados pelo custo com reposição, já que o impacto dos custos com água de reposição é considerado relevante.

Figura 4.7 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais totais mensais e anuais relacionadas com as variações da vazão de ar.



Fonte: Própria.

Uma forma de ajustar a corrente de ar de uma torre é com a utilização de um inversor de frequência. O inversor de frequência é um dispositivo que transforma corrente elétrica alternada fixa em corrente elétrica alternada variável, controlando assim, a potência do motor através da frequência entregue pela rede. E como visualizado pela Equação 3.39, variando a corrente elétrica, a potência é variada e a corrente de ar é modificada.

4.1.4. Variações do coeficiente global de transferência de calor e massa por área de superfície do enchimento

As torres de resfriamento são equipamentos destinados a realizar troca térmica de uma corrente fluida de maior temperatura, comumente a água, com uma corrente de ar de menor temperatura. Para auxiliar na troca de calor entre o ar e água, os enchimentos utilizados no interior da torre, são projetados para expor uma maior superfície de contato para um maior tempo possível de retenção da água, permitindo que a água se espalhe em um fino filme sobre grandes áreas verticais. Os enchimentos são selecionados de acordo com o seu design, material constituinte e pelo desempenho que é obtido. As duas classificações básicas são dos tipos filme e respingo, mas comumente são utilizados os do tipo filme (STAFF, 2006).

Um parâmetro importante relacionado ao enchimento da torre é o coeficiente global de transferência de calor e massa por área de superfície do enchimento ou simplesmente, $K.a$. O $K.a$ não é constante e depende das condições operacionais do equipamento. Existem algumas situações encontradas em operações nas torres de resfriamento que podem influenciar na transferência de calor e, conseqüentemente, no coeficiente $K.a$ como, por exemplo: (1) formações de materiais incrustantes e microbiológicos nos enchimentos [materiais incrustantes e microbiológicos nos enchimentos reduzem a superfície de contato de troca térmica, podem danificar o enchimento, aumentar a perda de carga dos ventiladores e criar caminhos alternativos para a água, problemas que prejudicam na troca térmica entre as correntes]; (2) qualidade da água de reposição e de circulação [a qualidade da água utilizada como reposição e da água de circulação estão relacionadas com os surgimentos de incrustações e materiais biológicos presentes nos recheios]; (3) tipo do enchimento utilizado [existem várias opções de enchimentos com formatos e materiais diferenciados que proporcionam desempenhos variados]; (4) as variações das correntes de água e ar [as variações das correntes de água e ar influenciam na quantidade de calor fornecido entre ambas as correntes e na fração de água evaporada por unidade de massa de ar]; (5) dispersão da água sobre o enchimento [a forma como a água é dispersada sobre o recheio fará com que a superfície do recheio exerça a sua função de uma forma eficiente, melhorando o contato entre as correntes e o tempo de retenção da água]; (6) umidade relativa do ar [a concentração de umidade no ar interfere na quantidade de água retida no processo de troca térmica]; (7) altura do enchimento [a altura do enchimento eleva a área de contato entre as correntes e aumenta o tempo de retenção da água no recheio]; entre outros (LEMOUARI *et al.*, 2009).

A partir de trabalhos desenvolvidos e encontrados na literatura e discussões realizadas com profissionais da área e com expertise no assunto, puderam ser selecionadas as irregularidades, anteriormente abordadas, que influenciam no desempenho da troca térmica das correntes de uma torre e, conseqüentemente, no coeficiente global de transferência de calor e massa ($K.a$). Este coeficiente é um importante parâmetro para demonstrar o desempenho de troca realizada pelo enchimento e foi selecionado neste trabalho para demonstrar o impacto no custo operacional do equipamento.

Para demonstrar a influência do coeficiente $K.a$ no custo operacional do equipamento foi aplicada a metodologia demonstrada na Figura 3.8. As variações do coeficiente foram de $\pm 20\%$ do seu valor de projeto, seguindo o mesmo raciocínio das outras irregularidades abordadas. Os resultados das simulações e os impactos em algumas das variáveis operacionais

podem ser visualizados na Tabela 4.9.

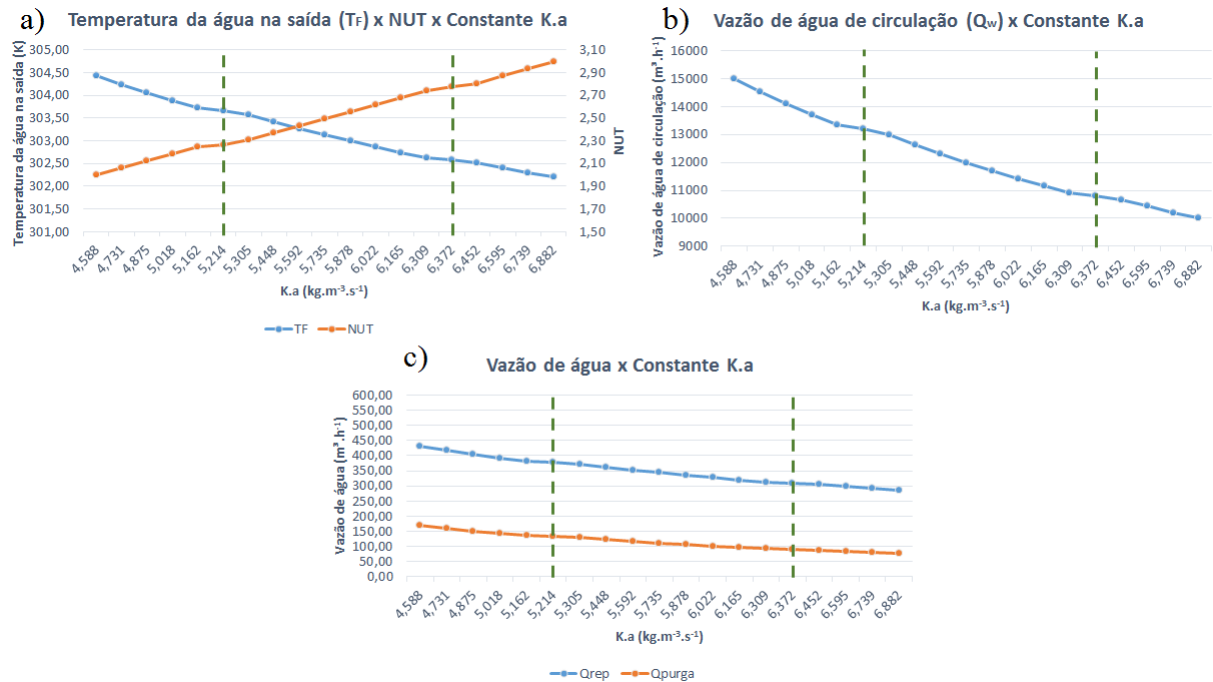
Tabela 4.9 – Resultados operacionais das simulações variando o coeficiente $K.a$.

$K.a$ (%)	$K.a$ (kg/m ³ .s)	NUT	T _F (K)	\dot{Q}_w (m ³ /h)	\dot{Q}_{rep} (m ³ /h)	\dot{Q}_{purga} (m ³ /h)
-20,0%	4,588	1,996	304,43	15000	429,75	168,73
-17,5%	4,731	2,058	304,25	14545	416,73	159,45
-15,0%	4,875	2,121	304,07	14118	404,47	150,87
-12,5%	5,018	2,183	303,89	13714	392,91	142,93
-10,0%	5,162	2,246	303,73	13333	382,00	135,58
-9,1%	5,214	2,268	303,67	13200	378,18	133,04
-7,5%	5,305	2,308	303,57	12973	371,68	128,76
-5,0%	5,448	2,370	303,42	12632	361,89	122,42
-2,5%	5,592	2,433	303,27	12308	352,62	116,53
*0,0%	5,735	2,495	303,13	12000	343,80	111,05
2,5%	5,878	2,557	303,00	11707	335,40	105,92
5,0%	6,022	2,620	302,87	11427	327,40	101,15
7,5%	6,165	2,682	302,74	11163	319,81	96,71
10,0%	6,309	2,745	302,63	10907	312,50	92,54
11,1%	6,372	2,772	302,58	10800	309,42	90,80
12,5%	6,452	2,807	302,51	10667	305,60	88,67
15,0%	6,595	2,869	302,41	10435	299,00	85,07
17,5%	6,739	2,932	302,30	10213	292,60	81,61
20,0%	6,882	2,994	302,21	10000	286,50	78,41

* Simulação com dados de projeto.

Analisando a Tabela 4.9 e a visualização gráfica na Figura 4.8a, nota-se que mantendo a vazão de ar constante (\dot{Q}_a), com o aumento da constante $K.a$ o valor do NUT aumenta, significando que a temperatura da água na corrente de saída (T_F) tende à temperatura de bulbo úmido (T_{BU}), reduzindo o approach da torre (TOMÁS *et al.*, 2018). A redução do approach caracteriza uma melhora no desempenho térmico da torre, ou seja, uma melhor troca térmica entre ambas as correntes, tendendo a reduzir a T_F. Com o aumento de $K.a$, mantendo a vazão de ar constante, é notada uma redução na vazão de água de circulação (Figura 4.8b), podendo ser atribuído ao aumento da fração de água evaporada por unidade de massa da corrente de ar (LEMOUARI *et al.*, 2009). Esta redução de \dot{Q}_w implica, também, nas reduções das vazões de reposição e purga, por serem diretamente proporcionais (Figura 4.8c).

Figura 4.8 – Representações gráficas dos resultados obtidos pelas simulações das variações da constante $K.a$: a) Gráfico das variações da Temperatura da água fria na saída da torre x NUT; b) Gráfico das variações da vazão de água de circulação x Constante $K.a$; c) Gráfico das variações das vazões de água de reposição e purga x Constante $K.a$. As linhas tracejadas verdes representam os limites aceitáveis para $K.a$.



Fonte: Própria.

Levando em consideração os limites aceitáveis das variações de $\pm 10\%$ de \dot{Q}_w de projeto, abordados no item 4.1.1 e em Hensley (1985) e ASME PTC 23 (2003), podem ser identificadas na tabela que os limites aceitáveis para das variações relacionadas ao termo $K.a$ estão entre $-9,1\% \leq K.a_{projeto} \leq 11,1\%$. Já os impactos de $K.a$ no custo operacional podem ser observados na Tabela 4.10.

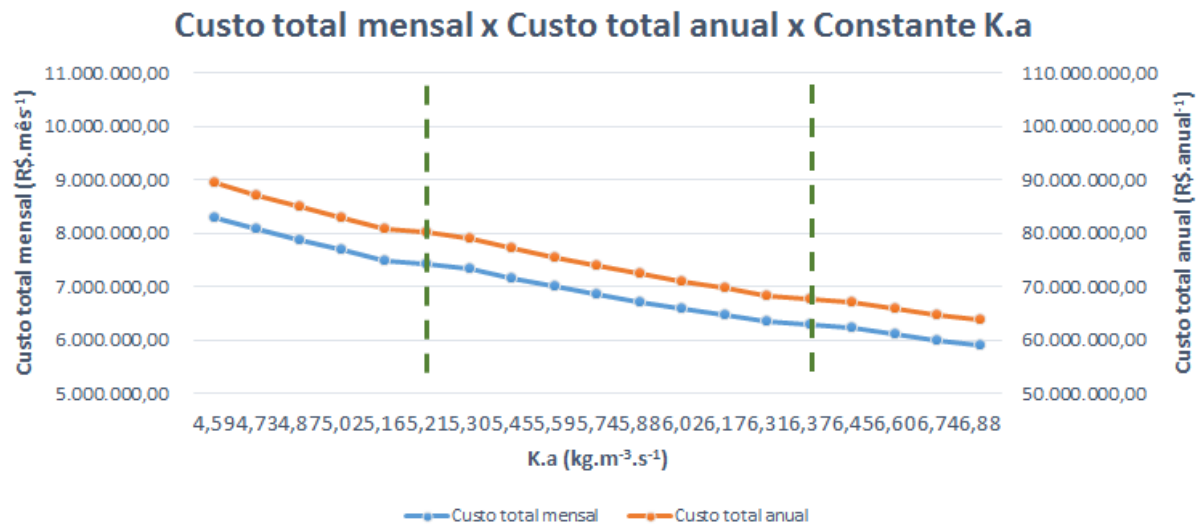
Tabela 4.10 – Resultados dos impactos no custo operacional da torre de resfriamento pela variação do coeficiente $K.a$.

Custo_{rep} (R\$/mês)	Custo_{rep} (R\$/ano)	Custo_{adt} (R\$/mês)	Custo_{adt} (R\$/ano)	OPEX (R\$/mês)	OPEX (R\$/ano)	Custo_T (R\$/mês)	Custo_T (R\$/ano)
7178035,32	77337541,87	6445,50	69445,04	8268505,61	89086479,77	8293841,54	89430121,36
6960564,66	74994470,87	6103,93	65764,87	8050693,37	86739728,60	8076029,31	87083370,19
6755788,14	72788168,98	5787,88	62359,77	7845600,81	84530021,62	7870936,74	84873663,21
6562703,59	70707838,66	5495,20	59206,32	7652223,57	82446537,84	7677559,51	82790179,43
6380475,94	68744482,69	5224,06	56284,99	7469724,78	80480260,54	7495060,72	80823902,13
6316671,15	68057037,54	5130,30	55274,85	7405826,24	79791805,26	7431162,17	80135446,85
6208102,81	66887301,20	4972,30	53572,55	7297099,90	78620366,62	7322435,83	78964008,21
6044582,24	65125498,96	4737,79	51045,86	7133344,82	76856037,69	7158680,75	77199679,28
5889746,64	63457270,28	4520,13	48700,70	6978291,55	75185463,85	7003627,49	75529105,44
*5742428,04	61870031,18	4316,83	46510,37	6830769,66	73596034,42	6856105,60	73939676,01
5602124,26	60358371,09	4126,82	44463,13	6690275,87	72082327,08	6715611,80	72425968,67
5468491,17	58918582,33	3949,75	42555,36	6556465,71	70640630,56	6581801,65	70984272,15
5341722,47	57552751,75	3784,78	40777,98	6429532,04	69273022,59	6454867,97	69616664,18
5219619,64	56237192,21	3629,30	39102,83	6307273,73	67955787,91	6332609,66	68299429,50
5168175,11	55682918,92	3564,50	38404,61	6255764,40	67400816,39	6281100,33	67744457,98
5104375,68	54995531,52	3485,12	37549,34	6191885,59	66712573,73	6217221,52	67056215,32
4994137,20	53807800,80	3350,70	36101,10	6081512,69	65523394,77	6106848,62	65867036,36
4887239,28	52656061,92	3221,75	34711,75	5974485,82	64370266,54	5999821,75	64713908,13
4785352,20	51558310,80	3101,76	33418,96	5872478,75	63271222,62	5897814,68	63614864,21

* Simulação com dados de projeto.

A partir dos resultados demonstrados na Tabela 4.10, observa-se que o aumento do coeficiente $K.a$ gera uma redução nos custos operacionais. Esta redução acontece devido à redução da corrente de circulação de água e, conseqüentemente, os gastos com água de reposição (\dot{Q}_{rep}) e aditivos químicos. Como a vazão de ar é considerada constante, então o custo com energia elétrica se mantém constante. As variações dos custos operacionais totais mensais e anuais podem ser visualizadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Gráfico representando as variações dos custos operacionais mensais e anuais relacionadas com as variações da Constante $K.a$.



Fonte: Própria.

4.2 FERRAMENTAS PARA A ANÁLISE DE NÃO CONFORMIDADES

4.2.1. Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto foi aplicado neste trabalho para identificar e classificar as não conformidades de maiores relevâncias no custo operacional da torre de resfriamento, impactando tanto negativamente quanto positivamente. A partir da Equação 4.2 e dos dados dos custos totais da Tabela 4.2 para as variações da corrente água de circulação, tem-se:

Tabela 4.11 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações da corrente de água de circulação.

$\Delta\dot{Q}_w$ (%)	Custo _T (R\$/mês)	Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (R\$/mês)	Δ Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (%)
-20,0%	5706177,20	61550124,89	1149922,98	12389492,77	16,77%
-17,5%	5849989,36	63099584,90	1006110,83	10840032,76	14,67%
-15,0%	5993634,31	64647243,39	862465,88	9292374,27	12,58%
-12,5%	6137451,36	66196756,12	718648,83	7742861,54	10,48%
-10,0%	6281105,61	67744514,84	574994,57	6195102,82	8,39%
-7,5%	6424931,67	69294124,70	431168,51	4645492,96	6,29%
-5,0%	6568594,64	70841977,33	287505,54	3097640,33	4,19%
-2,5%	6712429,12	72391677,78	143671,07	1547939,88	2,10%
*0,0%	6856100,18	73939617,66	0,00	0,00	0,00%
2,5%	6999948,26	75489464,65	-143848,07	-1549846,99	-2,10%
5,0%	7143626,95	77037486,74	-287526,77	-3097869,08	-4,19%
7,5%	7287476,55	78587350,16	-431376,37	-4647732,50	-6,29%
10,0%	7431162,15	80135446,64	-575061,97	-6195828,98	-8,39%
12,5%	7575018,38	81685381,44	-718918,19	-7745763,78	-10,49%
15,0%	7718710,33	83233546,40	-862610,15	-9293928,74	-12,58%
17,5%	7862572,66	84783546,91	-1006472,48	-10843929,25	-14,68%
20,0%	8006270,47	86331774,91	-1150170,28	-12392157,25	-16,78%

* Simulação com dados de projeto.

O sinal de negativo em alguns valores das colunas que representam a diferença dos custos (Δ Custo_T) na Tabela 4.11 foi inserido apenas como forma representativa para os gastos acima dos custos com os dados de projeto. Analisando a tabela, ainda pode ser observado que o sistema operando com a vazão de água de circulação na condição limite (± 10 %), existe um gasto ou uma economia de 8,39 % em relação aos custos obtidos nas condições de projeto. E operando a uma vazão extrapolada (± 20 %) o valor é dobrado.

Tabela 4.12 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações do ciclo de concentração.

ΔCC	Custo _T (R\$/mês)	Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (R\$/mês)	Δ Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (%)
1,700	10073009,82	108599224,76	-3216904,66	-34659553,41	-46,92%
2,000	8489814,03	91541566,84	-1633708,86	-17601895,49	-23,83%
2,232	7794177,88	84046648,29	-938072,71	-10106976,94	-13,68%
2,342	7548791,09	81402803,56	-692685,92	-7463132,20	-10,10%
*2,790	6856105,17	73939671,35	0,00	0,00	0,00%
2,914	6726167,35	72539696,20	129937,81	1399975,16	1,90%
3,000	6642766,12	71641115,19	213339,04	2298556,16	3,11%
4,000	6027084,61	65007643,44	829020,55	8932027,91	12,09%
5,000	5719242,92	61690897,50	1136862,24	12248773,85	16,58%
6,000	5534538,47	59700856,02	1321566,69	14238815,33	19,28%
7,000	5411402,09	58374160,78	1444703,08	15565510,57	21,07%
8,000	5323447,63	57426522,41	1532657,54	16513148,94	22,35%
9,000	5257481,09	56715786,13	1598624,08	17223885,23	23,32%
10,000	5206174,67	56163000,83	1649930,50	17776670,52	24,07%

* Simulação com dados de projeto.

Na Tabela 4.12 trazem os resultados obtidos para as variações do ciclo de concentração. Nota-se que para uma extrapolação do valor nas condições de projeto de -20 % existem gastos operacionais de 13,68 %. Extrapolando positivamente para um valor de CC de 6, valor este caracterizado como sendo o consumo de água do sistema aceitável, foi obtido uma economia de 19,28%. Para as condições limites de operação ($-16,13 \% \leq CC_{\text{projeto}} \leq 4,30 \%$) encontram-se gastos de 10,10 % e economia de 1,9 %. Com os resultados, notam-se, também, que a sensibilidade nos custos operacionais com a queda do CC é muito maior do que com o seu crescimento devido aos gastos com água de reposição e aditivos químicos.

Tabela 4.13 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações da vazão de ar.

$\Delta\dot{Q}_a$ (%)	Custo _T (R\$/mês)	Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (R\$/mês)	Δ Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (%)
-20,0%	6822611,97	73578809,21	33488,21	360808,45	0,49%
-17,5%	6827073,61	73626879,74	29026,57	312737,92	0,42%
-15,0%	6831443,64	73673963,35	24656,54	265654,31	0,36%
-12,5%	6835743,26	73720288,25	20356,92	219329,41	0,30%
-10,0%	6839959,00	73765709,48	16141,18	173908,18	0,24%
-7,5%	6844100,04	73810325,82	12000,14	129291,84	0,18%
-5,0%	6848169,58	73854171,82	7930,60	85445,84	0,12%
-2,5%	6852164,88	73897217,92	3935,31	42399,74	0,06%
*0,0%	6856100,18	73939617,66	0,00	0,00	0,00%
2,5%	6859972,38	73981337,44	-3872,19	-41719,78	-0,06%
5,0%	6863783,91	74022403,62	-7683,73	-82785,95	-0,11%
7,5%	6867537,07	74062840,95	-11436,89	-123223,28	-0,17%
10,0%	6871234,03	74102672,71	-15133,85	-163055,05	-0,22%
12,5%	6874876,82	74141920,83	-18776,64	-202303,17	-0,27%
15,0%	6878461,59	74180543,82	-22361,41	-240926,16	-0,33%
17,5%	6882007,47	74218747,74	-25907,28	-279130,08	-0,38%
20,0%	6885498,84	74256364,53	-29398,66	-316746,87	-0,43%

* Simulação com dados de projeto.

Na Tabela 4.13 os resultados estão relacionados com as variações da vazão de ar. Mostra que o impacto da variação do ar é muito menor nos custos operacionais da torre, comparadas as demais irregularidades. Com valores extrapolados de $\pm 20\%$ das condições de projeto os custos não chegam a $0,5\%$, tanto na forma de gastos quanto na de economia.

Tabela 4.14 – Diferença dos custos totais de operação da torre de resfriamento para as variações do coeficiente $K.a$.

$\Delta K.a$ (%)	Custo _T (R\$/mês)	Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (R\$/mês)	Δ Custo _T (R\$/ano)	Δ Custo _T (%)
-20,0%	8293841,54	89430121,36	-1437735,95	-15490445,35	-20,97%
-17,5%	8076029,31	87083370,19	-1219923,71	-13143694,18	-17,79%
-15,0%	7870936,74	84873663,21	-1014831,15	-10933987,20	-14,80%
-12,5%	7677559,51	82790179,43	-821453,91	-8850503,42	-11,98%
-10,0%	7495060,72	80823902,13	-638955,12	-6884226,12	-9,32%
-9,09%	7431162,17	80135446,85	-575056,58	-6195770,85	-8,39%
-7,50%	7322435,83	78964008,21	-466330,23	-5024332,20	-6,80%
-5,00%	7158680,75	77199679,28	-302575,15	-3260003,27	-4,41%
-2,50%	7003627,49	75529105,44	-147521,89	-1589429,43	-2,15%
*0,00%	6856105,60	73939676,01	0,00	0,00	0,00%
2,50%	6715611,80	72425968,67	140493,79	1513707,34	2,05%
5,00%	6581801,65	70984272,15	274303,95	2955403,86	4,00%
7,50%	6454867,97	69616664,18	401237,62	4323011,82	5,85%
10,00%	6332609,66	68299429,50	523495,93	5640246,51	7,64%
11,11%	6281100,33	67744457,98	575005,27	6195218,02	8,39%
12,50%	6217221,52	67056215,32	638884,08	6883460,69	9,32%
15,00%	6106848,62	65867036,36	749256,97	8072639,65	10,93%
17,50%	5999821,75	64713908,13	856283,85	9225767,88	12,49%
20,00%	5897814,68	63614864,21	958290,92	10324811,80	13,98%

* Simulação com dados de projeto.

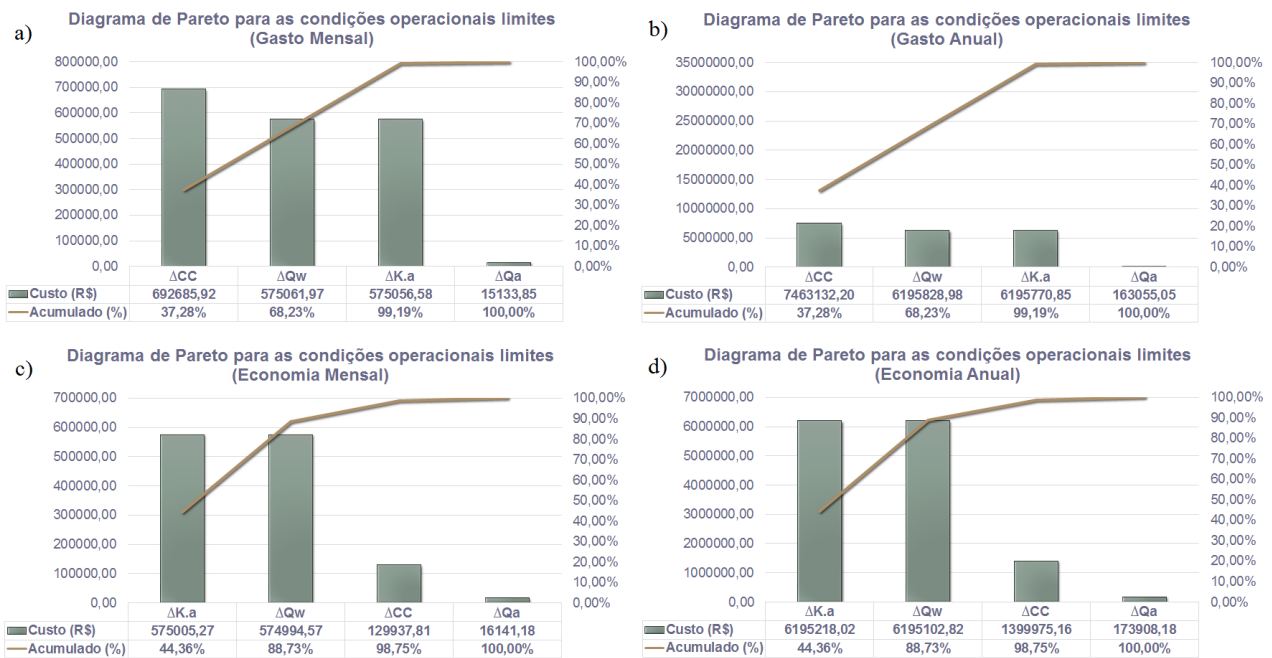
Já a Tabela 4.14 traz os resultados relacionados aos custos com as variações do coeficiente $K.a$. Mostra que o impacto do coeficiente global de troca de calor e massa em ± 20 % das condições de projeto é maior nos custos operacionais em valores reduzidos do que com o seu aumento, tornando-o mais sensível em condições negativas (gastos) do que positivas (economia). Nas condições operacionais limites encontram-se gastos e economia de 8,39 %, contudo para condições operacionais de -9,09 % e 11,11% do $K.a_{projeto}$.

A seguir, os diagramas de Pareto foram desenvolvidos de acordo com os resultados apresentados nas tabelas neste item. Os diagramas podem ser visualizados por duas maneiras, pelas condições operacionais limites, demonstradas na Figura 4.10, e pelas condições operacionais extrapoladas, demonstradas na Figura 4.11.

Na Figura 4.10 são mostrados os diagramas de Pareto do custo operacional total da torre em função das não conformidades. Os resultados mostram os impactos negativos no

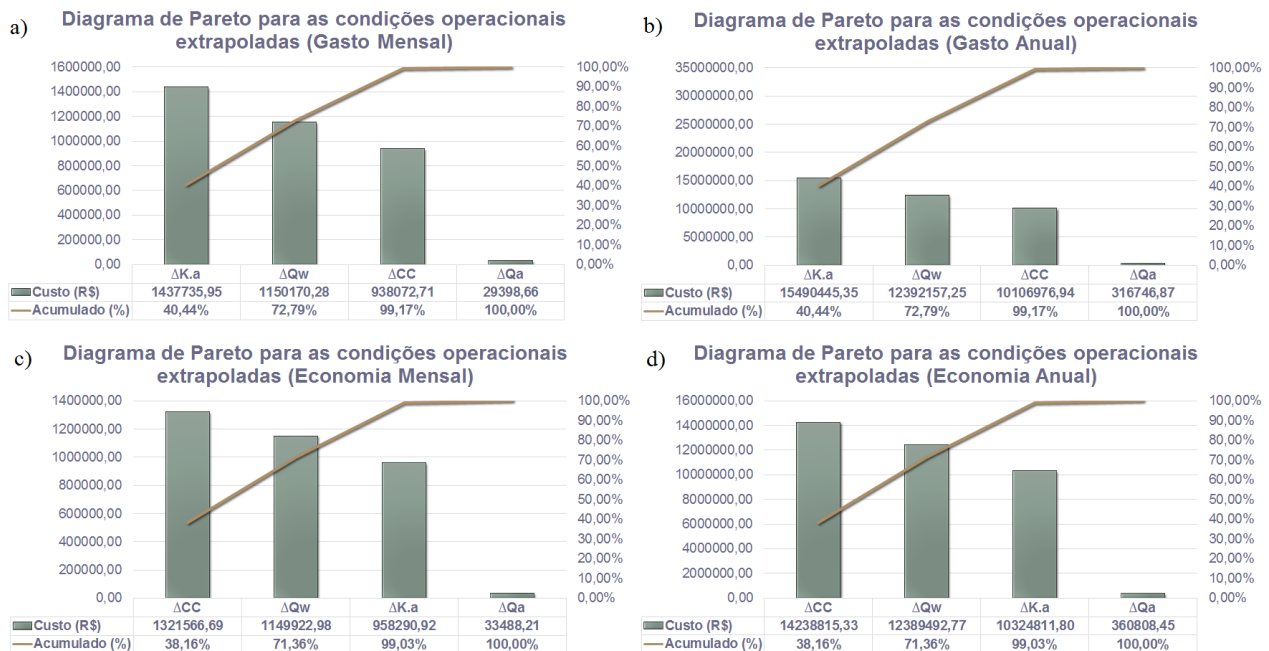
custo operacional (gastos) quanto os positivos (economia). Analisando os diagramas “a” e “b”, relacionados aos gastos mensal e anual, são notados que a variação do ciclo de concentração é a não conformidade que mais impacta no custo operacional total da torre, devido a sua maior sensibilidade no custo à CC menores, o que não acontece na mesma proporção quando este valor é elevado. O impacto de um menor valor de CC se dar pelo aumento alarmante no consumo da água de reposição e dos aditivos químicos para o tratamento da água de circulação.

Figura 4.10 – Diagramas de Pareto do Custo operacional total x Não conformidades para as condições operacionais limites: a) Gráfico para os gastos mensal; b) Gráfico para os gastos anual; c) Gráfico para as economias mensal; d) Gráfico para as economias anual.



Fonte: Própria.

Figura 4.11 – Diagramas de Pareto do Custo operacional total x Não conformidades para as condições operacionais extrapoladas: a) Gráfico para os gastos mensal; b) Gráfico para os gastos anual; c) Gráfico para as economias mensal; d) Gráfico para as economias anual.



Fonte: Própria.

Ainda analisando os diagramas “a” e “b”, notam-se que as irregularidades relacionadas à água de circulação e ao coeficiente $K.a$ têm impactos semelhantes no custo total. Já a variação da vazão de ar afeta muito pouco o custo operacional da torre, visto que o seu impacto nas condições limites é menor que 1% dentre as irregularidades abordadas. Nos diagramas “c” e “d”, relacionados a economia mensal e anual e resultados obtidos nas condições limites de operação, observa-se que o coeficiente $K.a$ já passa a ser o parâmetro que mais impacta positivamente nos custos operacionais, mostrando que o CC não tem o mesmo impacto para valores maiores. Os parâmetros relacionados às irregularidades que mais afetam positivamente no custo operacional, quando operando nas condições aceitáveis, são o coeficiente $K.a$ e a vazão de água de circulação, totalizando um impacto positivo de 88,73 % no custo.

Os diagramas apresentados na Figura 4.11 mostram os impactos negativos no custo operacional (gastos) e os impactos positivos (economia), porém extrapolando os limites operacionais. Os diagramas “a” e “b” demonstram que extrapolando as condições operacionais o impacto negativo no custo pelo coeficiente $K.a$ e pela vazão de água de

circulação totalizam 72,79 % entre as irregularidades, tornando as duas causas de grande relevância no combate às perdas econômicas. Já nos diagramas “c” e “d”, são demonstrados que a influência de forma positiva do coeficiente $K.a$ no custo já não tem a mesma força demonstrada no impacto negativo, perdendo o lugar para o ΔCC e $\Delta \dot{Q}_w$.

A partir de todas essas análises feitas pelos resultados apresentados nas tabelas e visualizadas através dos diagramas de Pareto, pode ser inferido que estando a torre operando em condições de processo, das quatro irregularidades abordadas, três delas impactam negativamente com intensidade o custo operacional, sendo elas: ΔCC , $\Delta \dot{Q}_w$ e $\Delta K.a$. As variações da vazão de ar, comparada as demais não conformidades, tiveram valores muito pequenos, demonstrando pouco impacto no custo operacional da torre nas condições propostas.

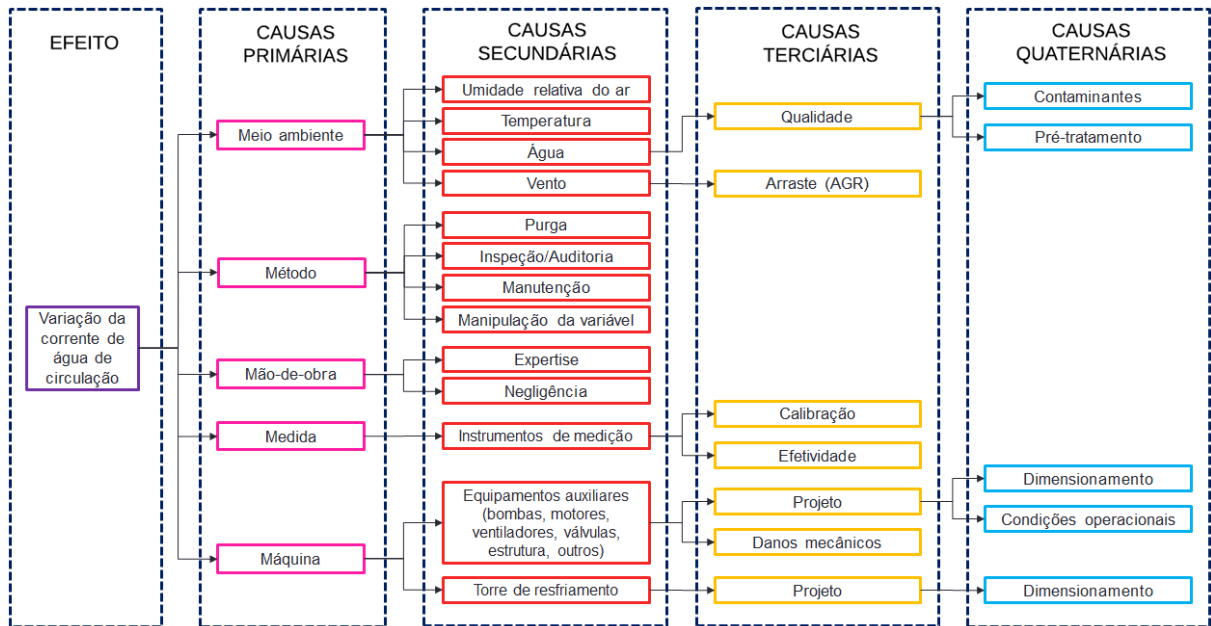
4.2.2. Diagrama de árvore

O diagrama de árvore foi implantado neste estudo para auxiliar no pensamento sistemático sobre cada irregularidade fazendo com que causas secundárias e essenciais ligadas aos eventos primários não sejam omitidas. A análise de cada diagrama pode ser usada para auxiliar decisões que levem a melhorias no processo, de maneira a evitar problemas que possam afetar significativamente o referido processo.

As causas primárias de todos os diagramas são divididas em categorias para organizar e facilitar nas identificações dos problemas relacionados aos surgimentos dos eventos. As causas secundárias, terciárias e quaternárias podem ser caracterizadas como subcausas ou ramificações relacionadas às causas primárias e, por fim, ao evento ocorrido. Assim, como no diagrama de Ishikawa (espinha-de-peixe), ferramenta utilizada na área da qualidade, as causas primárias foram classificadas como causas originadas pelo meio ambiente, método, mão-de-obra, material, medida e máquina.

A Figura 4.12 mostra o diagrama de árvore da não conformidade relacionada a variação da corrente de água de circulação e suas possíveis causas relacionadas a tal efeito.

Figura 4.12 – Diagrama de árvore relacionada à variação da corrente de água de circulação da torre de resfriamento.



Fonte: Própria.

De acordo como o diagrama de árvore ilustrado pela Figura 4.12 as variações de \dot{Q}_w podem ser causadas por situações relacionadas ao:

- (1) **Meio ambiente** – Analisando o ambiente externo da torre é possível identificar algumas causas secundárias que favorecem a ocorrência do evento, como: (a) umidade relativa do ar - influencia na quantidade de água evaporada absorvida pela corrente de ar, tornando a umidade relativa inversamente proporcional a quantidade de vapor de água absorvido e diretamente proporcional a T_F . No entanto, quanto maior a perda de água por evaporação, maior será o consumo com água de reposição; (b) temperatura - I) temperatura do ambiente, influencia na temperatura da corrente de ar, estando este a temperaturas maiores haverá uma evaporação mais rápida da água, porém, reduzirá o ΔT entre as correntes, reduzindo o fluxo de calor trocado. A temperatura ambiente também pode influenciar em T_F , sendo necessária as variações da vazão de água para o controle da mesma; II) temperatura de bulbo úmido, quanto mais próximo da T_{BU} estiver T_F maior será a eficiência do equipamento; (c) água – a qualidade e a temperatura da água de reposição oriunda do meio ambiente influencia no CC da água de circulação da torre e no consumo da mesma, além de gastos com aditivos químicos no seu tratamento; (d) vento – quando a torre está mal posicionada e projetada, o vento

pode aumentar a porcentagem de perdas por arraste da água de circulação, ampliando os gastos com a água de reposição. (AMJAD *et al.*, 2015; PUSHPA *et al.*, 2014).

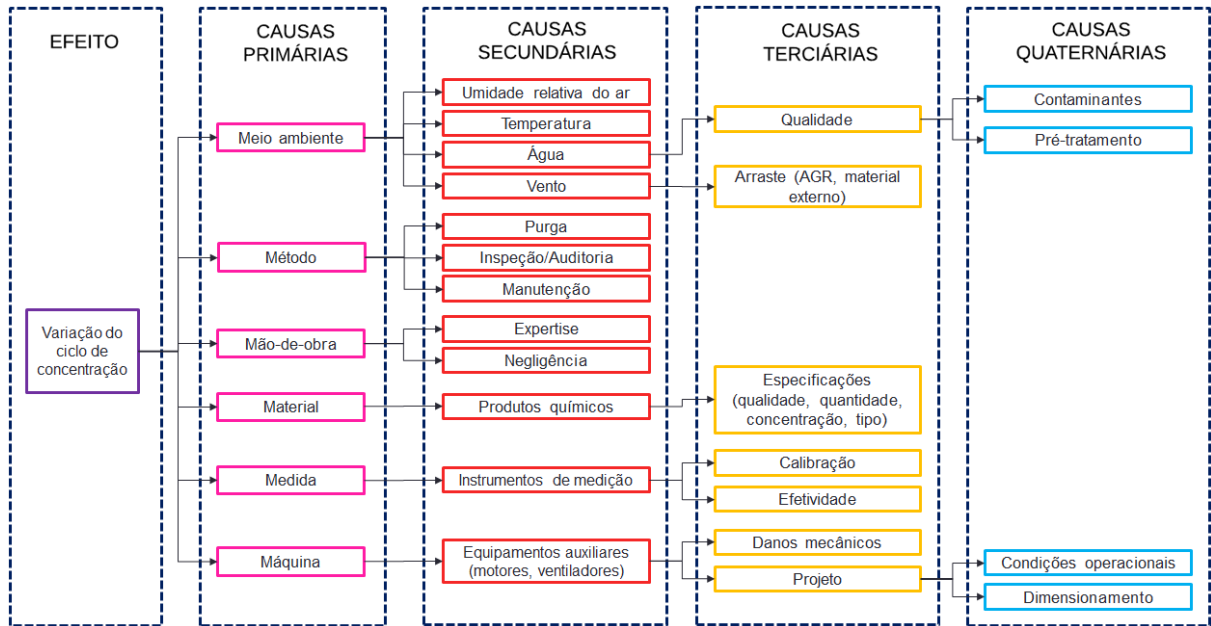
(2) **Método** – Os métodos, procedimentos, ações ou manobras utilizadas durante as atividades e funcionamento do equipamento podem influenciar e ser motivo para ocorrência da irregularidade, como: (a) purga (*blowdown*) – é o método utilizado para controlar o CC e adequar os níveis de sólidos totais dissolvidos (SDT) na água para que não comprometa equipamentos consumidores da AGR. No entanto, quando a purga não é administrada da forma correta, além do comprometimento com os equipamentos, os custos com água de reposição pode ser elevado; (b) inspeções e/ou auditorias – são ações essenciais para verificar os parâmetros operacionais e se os mesmos estão de acordo com os dados de projeto. São importantes para as identificações das falhas na torre ou em equipamentos auxiliares. Problemas nas bombas, ventiladores, válvulas, medidores, entre outros, podem afetar diretamente a vazão de água de circulação; (c) manutenções – o reparo ou troca de materiais danificados (bombas, válvulas, motores, medidores, etc) podem aumentar a confiabilidade do sistema e permitir um controle mais eficiente da corrente de água; (d) manipulação da variável – modificações da carga térmica do processo podem gerar variações na demanda por AGR. Contudo, é preciso seguir as condições de projeto para que não haja sobrecarga do equipamento e aumento dos custos operacionais. Vazões elevadas podem acarretar, por exemplo, transbordos nas calhas, aumento da pressão pelos dispersores, gerando “filetes” de água ao invés de gotículas, inundação do enchimento, entre outros efeitos. Já vazões muito baixas podem proporcionar baixas pressões nos dispersores, reduzindo o alcance dos jatos sobre os enchimentos gerando áreas secas, caminhos preferenciais do ar, arraste da água pela corrente de ar, entre outros (ÁVILA FILHO *et al.*, 2013; STAFF, 2006).

(3) **Mão-de-obra** – Relacionadas com as atitudes dos colaboradores nas execuções das atividades voltadas à torre de resfriamento, podem ser verificadas relações com: (a) expertise – o conhecimento dos colaboradores a respeito do equipamento, dos parâmetros de processo e das execuções tomadas são essenciais para minimizar os erros humanos e manter um funcionamento ótimo e sustentável da torre; (b) negligência – a falta de atenção e imprudência tidas por responsáveis do setor, podem acarretar danos na operação, elevações dos custos operacionais e até a parada da

planta. Todas as causas primárias da Figura 4.12, associadas a variação da corrente de água de circulação quando negligenciadas podem ser precursoras ao surgimento do evento.

- (4) **Medida** – O monitoramento do processo é fundamental para manter o controle das variáveis nas condições necessárias. As medições precisam ser eficazes para garantir a qualidade dos resultados e gestão do equipamento. Sendo assim a causa relacionada ao evento, comumente, identificada é: (a) instrumentos de medição – a ausência de medidores de vazão influencia no controle eficiente das correntes perante as necessidades do processo. Sem as medições dessas variáveis, informações importantes obtidas através dos balanços de massa e energia não serão possíveis de serem determinadas, minimizando a confiabilidade operacional da torre e aumentando os riscos econômicos e ambientais (AMJAD *et al.*, 2015).
- (5) **Máquina** – Muitos problemas são decorrentes de falhas em maquinários. Entre os maquinários presentes em uma torre, alguns podem afetar diretamente nas variações da água de circulação, como: (a) torre de resfriamento – o dimensionamento da torre na etapa de projeto é essencial que leve em consideração possíveis alterações na sua capacidade térmica para variações da carga térmica da planta. Estas variações quando não previstas em projeto podem gerar estresses térmicos na torre e gastos desnecessários com água de reposição; (b) equipamentos auxiliares – alguns equipamentos que fazem parte do sistema de resfriamento quando exercendo suas funções com baixo rendimento podem acarretar variações na corrente de água de circulação, como no caso: I) válvulas – quando as válvulas sofrem danos, em especial, por processos corrosivos, as ações de abertura e fechamento acabam sendo limitadas prejudicando no controle da vazão e no alinhamento com as necessidades do sistema. Distribuições desiguais das células e vazamentos da calha de distribuição também são problemas que podem ser encontrados por danos em válvulas; II) bombas – Amperagem, temperatura, pressão, ruídos, lubrificação são alguns parâmetros que precisam ser avaliados na operação de uma bomba, pois irregularidades nestes quesitos podem afetar no ótimo funcionamento do equipamento e até na vazão da corrente (ÁVILA FILHO *et al.*, 2013).

Figura 4.13 – Diagrama de árvore relacionada à variação do ciclo de concentração da água de circulação da torre de resfriamento.



Fonte: Própria.

De acordo como o diagrama de árvore ilustrado pela Figura 4.13 as variações do CC podem ser causadas por situações relacionadas ao:

- (1) **Meio ambiente** – (a) umidade relativa do ar – a umidade do ar influencia diretamente a quantidade do vapor de água absorvido pela corrente de ar. O processo de evaporação realizado pela troca térmica na torre concentra os sais minerais dissolvidos na água, alterando o seu CC e a sua necessidade por água de reposição; (b) temperatura – a temperatura da AGR influencia não só no desempenho dos trocadores de calor, mas também, afetam o pH da água, tornando o ambiente propício as formações de materiais microbiológicos, além de poder alterar o CC do sistema; (c) água – a qualidade da água de reposição reflete diretamente no CC do sistema. Quando a água de reposição é obtida diretamente da natureza e constatada como fora de especificações devido aos níveis de contaminantes, o ideal é que passe por processos de tratamento químicos e/ou mecânicos (pré-tratamentos) para se adequar aos parâmetros de qualidade, pois variações do CC devido à má qualidade da água pode acarretar maiores gastos com água de reposição e manutenções de equipamentos por danos causados por corrosões e incrustações; (d) vento – em situações operacionais de torres que existam perdas por arraste da água de circulação o CC pode

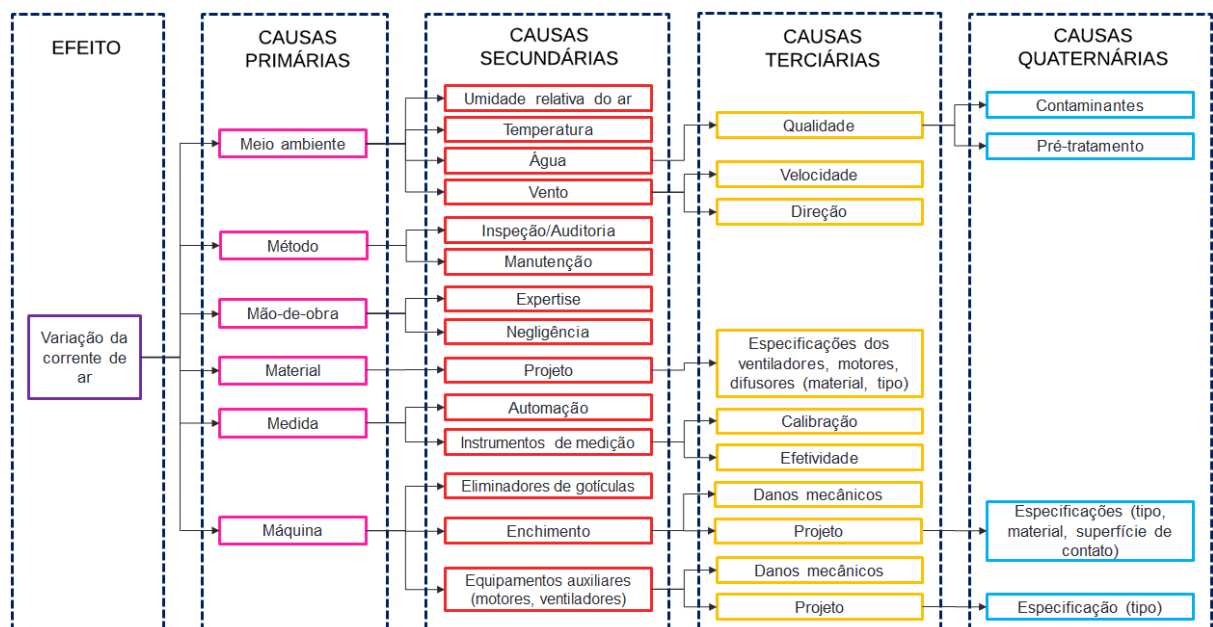
variari e a reposição da água se faz necessária. O vento também pode ser responsável por arrastar contaminantes externos para dentro da torre, contaminando a água de circulação e aumentando os valores do SDT ou dos sólidos em suspensão (PUSHPA *et al.*, 2014; TROVATI, 2004).

- (2) **Método** – (a) purga – a purga é uma das ações mais importantes para o controle das impurezas presentes na água de circulação (sais minerais dissolvidos totais, lama, materiais microbiológicos, materiais orgânicos, entre outros) e do CC do sistema. O seu controle irá impactar na qualidade da AGR e nos gastos com reposições; (b) inspeções e/ou auditorias – o acompanhamento periódico do CC previne danos aos consumidores de AGR e mantém a sustentabilidade da operação. As verificações, periodicamente, das características da água podem ser feitas *in loco* por instrumentos de medições, cupons de teste ou por análises em laboratório; (c) manutenções – a torre, trocadores de calor, equipamentos auxiliares (bombas, válvulas, filtros, tubulações, outros), componentes internos (enchimento, eliminadores de gotículas, ventiladores, estrutura e componentes metálicos, outros) são alguns dos equipamentos que podem ser afetados pelas variações do CC. São essenciais as manutenções dos mesmos para uma melhora no desempenho e da confiabilidade operacional (AMJAD *et al.*, 2015; TROVATI, 2004).
- (3) **Mão-de-obra** – (a) expertise – o conhecimento dos colaboradores sobre o CC e seus efeitos sobre o operacional da torre refletem diretamente nas tomadas de decisões. Ações equivocadas podem reduzir o CC, impactar em outros equipamentos a curto/médio prazo, criar situações de risco, propiciar paradas inesperadas da planta e afetar nos custos da empresa com utilidades; (b) negligências – ações negligenciadas envolvendo o CC podem resultar em problemas discutidos na letra “a” deste item e as suas causas podem estar ligadas a todas as causas primárias da Figura 4.13.
- (4) **Material** – (a) produtos químicos – com o auxílio dos produtos químicos é possível realizar o tratamento da água (inibidores de corrosão, biocidas, surfactantes, dispersantes, outros) e o controle do CC. São fundamentais o controle dos parâmetros da água (pH, condutividade, SDT, dureza, cloretos, sílica, ferro, outros) para a mitigação dos problemas relacionados a qualidade da mesma. Para os produtos químicos agirem de forma eficaz precisam ser selecionados corretamente, levando em

considerações características como o tipo, qualidade e concentração do produto, além de serem dosados da forma adequada (TROVATI, 2004).

- (5) **Medida** – (a) instrumentos de medição – os instrumentos de medições presentes no volume de controle ou utilizados *in loco* ou em laboratórios de análises precisam estar calibrados corretamente para o fornecimento de dados confiáveis. Os resultados das análises são importantes parâmetros nas tomadas de decisões para o controle ótimo da torre de resfriamento.
- (6) **Máquina** – (a) equipamentos auxiliares – o estado do ventilador e dos seus componentes (motor, eixo), juntamente com a vazão de ar fornecida por ele, também, podem influenciar no CC do sistema. Como já abordado, com o aumento da vazão de ar, maior será a massa de ar disponível resultando em uma maior renovação do ar saturado durante a troca térmica. Por resultar em maiores perdas de água por evaporação o sistema precisará ser repostado e o CC tenderá a sofrer variações.

Figura 4.14 – Diagrama de árvore relacionada à variação da corrente de ar da torre de resfriamento.



Fonte: Própria.

De acordo como o diagrama de árvore ilustrado pela Figura 4.14 as variações de \dot{Q}_a podem ser causadas por situações relacionadas ao:

- (1) **Meio ambiente** – (a) água – o surgimento de materiais incrustantes e microbiológicos nos enchimentos das torres são resultados de uma má qualidade da AGR. Estes materiais formados aumentam a perda de carga do ventilador, pois dificulta a passagem da corrente de ar, impactando nas suas variações e na potência do motor do ventilador; (b) umidade relativa do ar – a umidade do ar impacta diretamente na vazão de ar, pois quanto maior for o fluxo de calor trocado (baixa umidade do ar) menor será a vazão necessária para o resfriamento; (c) temperatura – quanto maior for o ΔT entre a temperatura do ar e T_Q maior será a força motriz de troca térmica entre as correntes e menor será T_F ; (d) vento – I) velocidade do vento – a taxa de evaporação aumenta com a velocidade do vento, pois quanto maior a velocidade do vento, mais rápido o ar saturado é removido para o posicionamento do ar não saturado. Já o ar saturado e efluente da torre (pluma), quando arrastado pelo vento em altas velocidades, acontece de forma horizontal para uma zona de baixa pressão na parte superior da torre e pode provocar a sua reentrada (recirculação), reduzindo o processo de troca térmica e a eficiência do equipamento; II) direção – a direção do vento pode acarretar o processo denominado de interferência, onde o ar saturado efluente de uma torre pode ser fonte para outra torre próxima, reduzindo a sua eficiência de troca térmica. O posicionamento e a orientação das torres podem minimizar o efeito da interferência. (AMJAD *et al.*, 2015; PUSHPA *et al.*, 2014; STAFF, 2006).
- (2) **Método** – (a) inspeções e/ou auditorias – uma das maiores causas por defeitos em uma torre está ligada aos motores dos ventiladores, podendo levar a parada da torre para manutenção. Por motivos como este, as inspeções e/ou auditorias periódicas reduzem a probabilidade do surgimento de falhas no sistema. Problemas mecânicos em ventiladores, motores e outros componentes presentes no sistema de ventilação podem ser responsáveis por variações da corrente de ar; (b) manutenções – é comum substituições de rolamentos, correias, parafusos, recuperação das pás e balanceamento, remoções de camadas corroídas, pintura de componentes, troca de óleo, entre outros. A integridade dos equipamentos deve ser preservada para garantir um ótimo funcionamento de todo o conjunto mecânico e torna-lo apto a operar nas condições desejadas (CARNEIRO, 2013).
- (3) **Mão-de-obra** – (a) expertise – seguindo o mesmo raciocínio das abordagens anteriores relacionadas aos conhecimentos e experiências dos colaboradores, as

atitudes tomadas precisam sempre ter cautelas, pois podem refletir diretamente ou indiretamente em alterações da vazão de ar e acabar afetando outros parâmetros operacionais da torre; (b) negligências – imprudências relacionadas a qualquer componente do sistema de ventilação pode a curto/médio prazo afetar no desempenho deste sistema e gerar variações na corrente de ar.

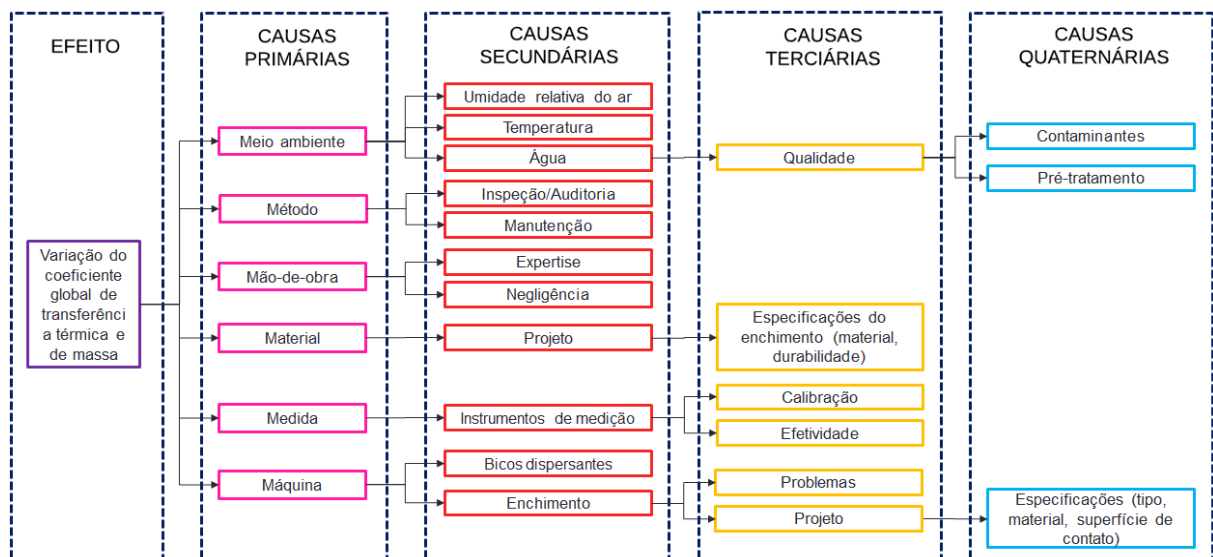
(4) **Material** – (a) projeto – para seleção do ventilador e dos componentes utilizados no sistema de ventilação da torre, há uma exigência por materiais resistentes a corrosões, pois os equipamentos estão localizados em uma região de muita umidade e condições propícias aos efeitos corrosivos. As corrosões ou danos causados nos materiais, também, são fatores responsáveis por alterações no funcionamento dos equipamentos. Por estes motivos são utilizados materiais de aço-carbono, proteções por galvanização, pinturas anticorrosivas, fibra de vidro, materiais pultrudados, entre outros (CARNEIRO, 2013).

(5) **Medida** – (a) instrumentos de medição – é importante que os instrumentos de medição presentes no volume de controle ou utilizados *in loco* estejam calibrados. Alguns instrumentos úteis para identificações de parâmetros que estão direta ou indiretamente ligados aos ajustes da vazão de ar são: potenciômetro, amperímetro, pirômetro, medidor de umidade, medidor de vazão de água, termômetro ou termopar e anemômetro; (b) automação – A automação permite um controle mais eficiente dos parâmetros de processo. Quando ajustados ao sistema de ventilação podemos encontrar situações como, o controle e operação dos ventiladores com inversores de frequência operando de acordo com a temperatura de bulbo úmido, temperatura da água quente ou da água fria na saída da torre. Aplicações como essas podem custar um investimento maior, porém torna o sistema mais eficiente evitando atrasos nas tomadas de decisões e possíveis danos materiais ou econômicos (AMJAD *et al.*, 2015).

(6) **Máquina** – (a) enchimento – enchimentos danificados ou com a presença de materiais incrustantes e microbiológicos são os maiores responsáveis pela queda de desempenho. Por esta razão, são necessárias vistorias e manutenções periódicas. A ideia da recapacitação da torre, optando por enchimentos de maiores rendimentos, podem ser ótimas escolhas para um melhor aproveitamento do volume interno da torre

e otimização na troca térmica; (b) eliminadores de gotículas – eliminadores de gotas mal selecionados podem aumentar a perda de carga do sistema e impactar na vazão de ar repercutindo na T_F e nos gastos com energia elétrica; (c) equipamentos auxiliares – I) ventiladores – o dimensionamento (quantidade, tamanho, número de pás) e a mudança nas inclinações das pás dos ventiladores podem afetar na vazão de ar do sistema; II) motores – o seleção dos motores e a análise da amperagem, ruídos, lubrificação, temperatura, velocidade são essenciais para manter o desempenho adequado dos ventiladores; III) difusores – em casos de danos de um difusor a torre pode sofrer a recirculação do ar saturado, reduzindo o desempenho do equipamento e tendo que alterar suas condições operacionais (CARNEIRO, 2013).

Figura 4.15 – Diagrama de árvore relacionada a variação do coeficiente global de transferência térmica e de massa da torre de resfriamento.



Fonte: Própria.

De acordo como o diagrama de árvore ilustrado pela Figura 4.15 as variações de $K.a$ podem ser causadas por situações relacionadas ao:

- (1) **Meio ambiente** – (a) água – a qualidade da AGR é responsável pelo surgimento de incrustações e materiais microbiológicos nos enchimentos. Estes materiais reduzem a superfície de contato e prejudica na troca térmica entre as correntes. Ainda podem ser responsáveis por criar caminhos alternativos no interior da torre, dificultando o contato direto com o ar e aumentando T_F ; (b) umidade relativa do ar – a umidade do ar impacta diretamente no coeficiente de troca térmica, pois a partir da quantidade de

vapor d'água presente no ar que irá definir a quantidade de massa e energia que será trocada entre ambas as correntes; (c) temperatura – I) temperatura do ambiente – tem influência direta na temperatura do ar, aumentando a velocidade de evaporação da água, porém gerando um fluxo menor de energia trocado devido a redução do ΔT entre as correntes de água e ar; II) temperatura de bulbo úmido – quanto mais próximo da T_{BU} estiver T_F , maior será a eficiência do equipamento (AMJAD *et al.*, 2015; PUSHPA *et al.*, 2014).

- (2) **Método** – (a) inspeções e/ou auditorias – as inspeções/auditorias realizadas periodicamente podem evitar problemas maiores causados nos enchimentos e no seu desempenho. Como já mencionado, as incrustações e danos no enchimento afetam, significativamente, na troca térmica entre as correntes, reduzindo a eficiência do equipamento e resultando em um aumento de T_F ; (b) manutenções – são ações importantes para a melhoria do desempenho dos enchimentos. Limpezas, consertos, trocas são algumas ações tomadas para poder manter as variáveis nas condições ótimas de operação (ÁVILA FILHO *et al.*, 2013).
- (3) **Mão-de-obra** – (a) expertise – assim como nos demais problemas abordados o conhecimento é a base de uma boa gestão operacional da torre. Sendo assim, uma tomada de decisão errada envolvendo o enchimento do equipamento pode ter um impacto negativo e significativo; (b) negligências – imprudências envolvendo os enchimentos são comuns e ainda são encontradas torres operando com enchimentos em condições irregulares. A presença de materiais incrustantes e microbiológicos são as mais constantes;
- (4) **Material** – (a) projeto – a qualidade do material do enchimento selecionado mostrará o quanto será resistente às condições do sistema. Por ser considerado um meio propício a corrosões, incrustações e formações de materiais microbiológicos a resistência do mesmo determinará a durabilidade do enchimento e os gastos com manutenções e até a sua troca. Hoje, já são disponibilizados enchimentos de diversos tipos com materiais anti-incrustantes, anticorrosivos e para outras formas de deteriorações.
- (5) **Medida** – (a) instrumento de medição – a análise periódica da água de circulação pode

permitir o controle eficiente do CC e identificar possíveis contaminações por vazamentos do processo. Estas situações impactam na qualidade da água e no surgimento de materiais incrustantes e microrganismos. As medições também são importantes para o controle das variáveis relacionadas ao desempenho do enchimento e podem alertar sobre possíveis problemas mecânicos existentes. O tubo de Pitot, por exemplo, pode ser utilizado para determinar a perda de carga provocada pelo enchimento. O acompanhamento deste parâmetro é importante para determinar o momento certo para manutenções ou troca do enchimento. Com o acúmulo de materiais no enchimento a perda de carga se eleva, e quanto maior a perda de carga, menor será o desempenho do enchimento e maior será o consumo elétrico requerido pelo motor (ÁVILA FILHO *et al.*, 2013).

- (6) **Máquina** – (a) enchimento – I) projeto – a seleção do enchimento tem um peso muito grande no desempenho da torre, pois por este componente interno que a troca térmica será realizada. O mercado dispõe de muitos tipos de enchimento e algumas condições são levadas em considerações, como: material, superfície de contato, perda de carga, peso, preço, outros; II) problemas – alguns problemas são frequentes e podem interferir no desempenho do enchimento, como: presença de algas, materiais incrustantes, enchimentos danificados ou empenados, outros; (b) bicos dispersantes – a má distribuição da água sobre os enchimentos podem afetar no reaproveitamento da superfície de contato disponível para troca térmica, reduzindo a eficácia da troca de energia entre as correntes. Podem gerar caminhos alternativos para a água comprometendo o desempenho do recheio. Estes problemas podem ser gerados por bicos ineficientes, danificados e entupidos por materiais estranhos.

CONCLUSÃO

As torres de resfriamentos são equipamentos que mais consomem água no setor industrial. No setor de refino de petróleo a sua presença é essencial, pois existem grandes necessidades pelos resfriamentos de correntes quentes oriundas de processos físico-químicos para o fracionamento do petróleo bruto em seus subprodutos mais úteis e rentáveis. Essa grande necessidade por água e sua importância no contexto produtivo, torna a torre de resfriamento um equipamento de grande potencial para estudo, pois melhorias no seu desempenho trazem efeitos positivos no processo produtivo e nos setores financeiro da empresa e ambiental.

Este trabalho apresenta a análise dos impactos de quatro não conformidades encontradas em uma torre de resfriamento do tipo contracorrente sobre o seu custo total (OPEX e CAPEX), são essas não conformidades: as variações da corrente de água de circulação ($\Delta\dot{Q}_w$), variações do ciclo de concentração da água de circulação (ΔCC), variações da corrente de ar ($\Delta\dot{Q}_a$) e variações do coeficiente de transferência térmica por área de superfície do enchimento ($\Delta K.a$). Para esta análise foi proposto e implementado um modelo matemático baseado na equação de Merkel, que simula o comportamento da torre de resfriamento contracorrente relacionando os principais parâmetros com as não conformidades e a função custo total. Para a integração da equação de Merkel foi aplicado o método de integração numérica de Chebyshev de quatro pontos, recomendados pelo *British Standard* e o *Cooling Tower Institute*. Os quatro intervalos são responsáveis em determinar a mudança de entalpia de água e ar através do enchimento da torre.

Os resultados obtidos mostram que das quatro irregularidades abordadas, três impactaram com relevância no custo operacional, sendo elas: ΔCC , $\Delta\dot{Q}_w$ e $\Delta K.a$. Já a quarta irregularidade relacionada a variação da vazão de ar, não teve tanta influência no custo operacional da torre.

Sobre as variações do ciclo de concentração (ΔCC) é observado que a sua redução tem uma influência muito grande nos gastos com água de reposição e aditivos químicos, elevando o custo total de operação da torre. Já com valores maiores, notam-se economias, de menor potencialização, com água de *make-up* e produtos químicos, porém, aumentando os riscos por

problemas relacionados as corrosões e incrustações, tornando necessário uma maior atenção no seu controle. Alternativas de tratamentos físico-químicos da água de reposição ou a reutilização com um estudo prévio de qualidade, também, podem trazer benefícios econômicos e reduzir problemas gerados pela água de baixa qualidade.

As variações da vazão de água (ΔQ_w) impactam no custo operacional um pouco menos do que problemas relacionados ao enchimento, ou seja, variações no coeficiente de transferência $K.a$. Essas duas irregularidades impactaram tanto no custo com água de reposição, quanto no custo com aditivos químicos, porém, foi mostrado que a variação do coeficiente $K.a$ é um pouco mais sensível ao custo do que a variação da água de circulação. Importante salientar que os custos com manutenções periódicas no enchimento não foram levados em considerações. O enchimento é uma parte muito importante da torre, responsável em fornecer a superfície de contato para a troca térmica, sendo assim, quanto maior for o problema ocasionado, menor será a troca e maiores serão os gastos com água de reposição e aditivos químicos. A presença de incrustações, algas ou outros materiais depositados no enchimento é um fator de alerta para a qualidade da água ou substâncias oriundas do processo ou do meio externo.

Por fim, a variação da corrente de ar teve um impacto muito menor no custo operacional, pois o seu principal gasto foi relacionado a energia elétrica, possuindo este um preço muito menor em comparação com a água de reposição. No entanto, tal resultado não exclui a importância em se atentar ao consumo de energia elétrica em uma torre de resfriamento.

Através da metodologia de cálculo trazida neste trabalho, e com as respectivas considerações aplicadas, nota-se que houveram resultados satisfatórios, demonstrando as influências significantes das não conformidades selecionadas no estudo, sobre o custo operacional total da torre de resfriamento do tipo contra corrente. As ferramentas de gestão aplicadas também contribuíram significativamente para uma melhor análise e visualização dos resultados e possíveis causas raízes das respectivas não conformidades. As ações mitigatórias também foram sugeridas neste trabalho com o intuito de proporcionar conhecimento e mostrar que existem soluções para as reduções de tais irregularidades, mostrando, contudo, que a negligência humana ainda é considerada o fator-chave na busca por um funcionamento sustentável de uma torre de resfriamento.

Dentro das possíveis considerações feitas, como sugestão para continuidade e

melhoria deste trabalho, a busca por um estudo onde as variáveis podem ser estendidas e aplicadas para outras não conformidades e variadas ao mesmo tempo através de uma implementação computacional, tornando a simulação multivariável, tenderá a ter uma visão dos impactos no custo operacional em conjunto, aproximando o estudo a um estado mais próximo do real. O vínculo dos resultados aos impactos não somente econômico, como também ambiental, torna a metodologia mais completa e robusta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADIE, E. **Curso de formação de operadores de refinaria** - Processos de refino, UNICENP, Curitiba, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **GEO Brasil: recursos hídricos**. ANA. Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/GEO%20Brasil%20Recursos%20Hídricos%20-%20Relatório.pdf>. Acesso em: 15 Jul. 2019.

AMJAD, Z.; DEMADIS, K. D. **Mineral Scales and Deposits: Scientific and Technological Approaches**. Elsevier. 1ª Edição. p. 499-531. 2015.

AMORIM, R. S. **Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo – Caso REPLAN**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sistema de Gestão, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2005.

ASAE, 1983. **Agricultural Engineers Yearbook**. ASAE D245.4, D243.3, D271.2, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, p. 297-321, 1983.

ASHRAE, 2001. **ASHRAE Systems and Equipment Handbook (SI)**, Chapter 36, ASHRAE, Atlanta, USA, 2001.

ASME PTC 23-2003; **Atmospheric Water Cooling Equipment** – Performance Test Codes. American Society of Mechanical Engineers. Na American National Standard, 2003.

ÁVILA FILHO, S.; NÓBREGA, B. S. Oportunidades para melhorar o desempenho térmico em torres de resfriamento. *In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, Campinas, 2015.

ÁVILA FILHO, S., RODRIGUES, Z., KALID, R. A., NASCIMENTO, V. Good practices in cooling towers: comparison between industrial audits. *In: Cooling Technology Institute Annual Conference*. Corpus Christi, Texas, 2013.

ÁVILA, J. S. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional em vba/excel para avaliar a eficiência de uma torre de resfriamento**. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

BRASIL, N. I. *et al.* **Processamento de petróleo e gás**. Editora LTC. p. 266. 2011.

BRITISH STANDARD 4485, **Water Cooling Towers**, Part 2: Methods for Performance Testing, 1988.

BURGER, R. **Cooling tower technology: Maintenance, upgrading and rebuilding**. 3ª Edição. The Fairmont Press Inc. Índia. 1994.

CARNEIRO, P. W. G. **Reforma de torre de resfriamento exige capacitação tecnológica**. Portal Petróleo e Energia. 2013. Disponível em:

<https://www.petroleoenergia.com.br/artigo-tecnico-reforma-de-torres-de-resfriamento-exige-capacidade-tecnologica/>. Acesso em: 19 Jun. 2020.

CASSETTA, E. **Curso teórico: torres de resfriamento de água**. São Paulo, 2003.

CASSETTA, E.; MANSUR, W. **Curso teórico: Torres de resfriamento de água**. 2010.

COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE. Disponível em: <http://www.cti.org>. Acesso em: 13 Jun. 2019.

COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE. **CTI Code ATC-105**: acceptance test code for water cooling towers. USA, 2000.

COOLING TOWER DESIGN. Disponível em: <http://coolingtower-design.com>. Acesso em: 21 Abr. 2016.

COOLING TOWER INSTITUTE, **CTI Code Tower**, Standard Specifications, Acceptance Test Code for Water-Cooling Towers, v. 1, CTI Code ATC-105(97), Revised, 1997.

CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N. **Cooling Towers**: Selection, Design, and Practice. Butterworth-Heinemann, f. 174, 1981. 347 p.

DANTAS NETO, A. A.; GURGEL, A. **Refino de Petróleo e Petroquímica**. Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Química – UFRN, 2008.

EUROVENT 9/7. Recommended code of practice to keep your cooling system efficient and safe. **Eurovent Product Group 9 - Cooling Tower**. 2011.

FEMP - FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM. **Cooling towers: understanding key components of cooling towers and how to improve water efficiency**. Energy Efficiency & Renewable Energy. 2011. Disponível em: <https://www.petroleoenergia.com.br/artigo-tecnico-reforma-de-torres-de-resfriamento-exige-capacidade-tecnologica/>. Acesso em: 19 Jun. 2020.

FERNANDES, M. **Proposta e comparação de um modelo fenomenológico com base em alto transporte de massa e supersaturação para torre de resfriamento de água**. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2012.

FOUST, A. Princípios das operações unitárias. **Editora LTC**. 2ª Edição. 1982.

FURTADO, M. Água – Clientes exigem resfriamento de baixo custo. **Revista Química e Derivados**. São Paulo, p. 32 – 34. 2009.

GEA Process Engineering. **Steam Jet Vacuum Pumps: Technology and Applications**. GEA. Disponível em: https://www.gea.com/pt/binaries/ejector-vacuum-pump-steam-gea_tcm38-34892.pdf. Acesso em: 14 Abr. 2021.

GONDIM, N. M. Alternativas para redução do consumo de água e energia em sistemas de água de resfriamento e geração de vapor em Refinarias de Petróleo do Brasil. Dissertação

(Mestrado) - Programa de Engenharia Ambiental (PEA). Escola de Química e Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

GONDIM, N. M.; YOKOYAMA, L. Otimização do ciclo de concentração em sistema de resfriamento de refinarias de petróleo no Brasil. *In: ABES, Anais... [S.I]: 27° CBESA. 2013a.*

HWANG, S.; MOORE, I. Water network synthesis in refinery. **Korean. J. Chem. Eng.**, [S.I.], v. 28, no. 10, p. 1978-1985, 2011.

IEA (International Energy Agency). **World Energy Outlook-2016**, OECD/IEA, Paris, 2016.

IPCC AR4/SPM, 2007. Contribuição do Grupo de Trabalho I do Quarto Relatório de Avaliação (AR4), Resumo para os Elaboradores de Políticas, OMM/UNEP, Paris, França, 2014.

KERN, D. Q. **Process heat transfer**. New York: McGraw Hill, 1950.

KIM, S.; KIM, B.S.; JUN, H.; KIM, H.S. Assessment of future water resources and water scarcity considering the factors of climate change and social–environmental change in Han River basin, Korea. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* v. 28, p. 1999–2014, 2014.

KLOPPERS, J. C. **A critical evaluation and refinement of the performance prediction of wet-cooling towers**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Stellenbosch. Stellenbosch, África do Sul, 2003.

KLOPPERS, J. C.; KROGER, D G. Cooling Tower Performance: A Critical Evaluation of the Merkel Assumptions. **R & D Journal, incorporated into the SA Mechanical Engineer.** v. 20, n. 1, p. 24-29, 2004.

KNUST, C. M. **Análise de superfícies de respostas para Projeto de Unidades de Tratamento de Águas Ácidas**. 168 p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

KUNDU, S.; KHARE, D.; Modal, A. Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance. **Ecol. Eng. Elsevier.** v. 105, p. 42-57, 2017.

LEMOUARI, M.; BOUMAZA, M.; KAABI, A. Experimental analysis of heat and mass transfer phenomena in a direct contact evaporative cooling tower. **Energy Conversion and Management.** v. 50, p. 1610-1617, 2009.

LIMA JÚNIOR, R. C. **Modelagem fenomenológica do desempenho de torres de resfriamento de água acopladas e estudos de caso**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, 2011.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, f. 557, 2005. 1114 p.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. Água na indústria – Uso racional e reúso. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2005.

MONTEIRO, J.P., MAGRINI, A., SZKLO, A.S., NUNES, R.T.S. Gerenciamento de água na indústria de refino de petróleo e as perspectivas de reuso. *In: 12º Congresso Acadêmico sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro (CADMA), Rio de Janeiro, RJ, 2004.*

MULYANDASART, V.; KOLMETZ, K. Cooling tower selection and sizing – Engineering design guideline. **KLM Technology Group**. 2011.

OLIVEIRA, J. D. **Auditoria em torres de resfriamento em indústrias químicas**. 43 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, BA, 2011.

ORIBE, C. Y. Diagrama de Árvore: a ferramenta para os tempos atuais. **Banas Qualidade, Editora EPSE**, São Paulo, a. XIII, n. 142, p. 78-82, 2004.

PANNKOKE, T. Cooling tower basic. **Journal HPAC Engineering**. 1996.

PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. de F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/57612/1/Doc232ultima-versao.pdf>>. Acesso em: 26 Set. 2020.

PERES, A. L. Impactos da gestão de recursos hídricos no setor industrial. Palestra para a disciplina de mestrado “Poluição Ambiental” do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ. 03 Set. 2010.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry’s chemical engineers’ handbook**. 8ª Edição. New York: McGraw Hill Professional, v. 3, f. 1200, 2008. 2400 p.

PUSHPA B. S.; VAZE V.; NIMBALKAR, P. T. Performance Evaluation of Cooling Tower in Thermal Power Plant. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**. 2ª Edição. ISSN 2249 – 8958, v. 4. 2014.

RAHMANI, K. Reducing water consumption by increasing the cycles of concentration and considerations of corrosion and scaling in a cooling system. **Applied Thermal Engineering, Elsevier**, v. 114, p. 849-856, 2017.

REKLAITIS, G. V. Introduction to Material and Energy Balance. **Mc Graw-Hill Book Company**. New York. 1983.

SILVA, A. F. **Otimização de torres de resfriamento**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

SILVA, J. M. P., ÁVILA FILHO, S. Energy efficiency - Opportunities and techniques applicable in the oil and gas. *In: Rio Oil & Gas – Expo and Conference*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, P. M. C. S. **Descrição das Unidades de Recuperação de Enxofre na Refinaria de Sines**. 53 p. Dissertação (Instituto Superior de Agronomia) -Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

SILVA, V. N. **Biocidas alternativos em sistemas de resfriamento industrial**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

SILVEIRA, R. S. **O desenvolvimento do processo de craqueamento do petróleo**. Macofren Tecnologias. 2019. Disponível em: <https://macofren.com/desenvolvimento-do-processo-de-craqueamento/>. Acesso em: 14 Abr. 2021.

SKZLO, A.; ULLER, V. C. Fundamentos do refino de petróleo: tecnologia e economia. 2ª Edição. **Editora Interciência**. Rio de Janeiro. 2008.

SPEIGHT, J. G. The refinery of the future. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. p. 39-80, 2011.

STAFF, M. **Cooling Tower Fundamentals. SPX Cooling Technologies**. 2ª Edição, Kansas USA, p. 116, 2006.

TOMÁS, A. C. C.; ARAÚJO, S. D. O.; PAES, M. D.; PRIMO, A. R. M.; DA COSTA, J. A. P.; OCHOA, A. A. V. Experimental analysis of the performance of new alternative materials for cooling tower fill. **Elsevier**. Applied Thermal Engineering. v. 144, p. 444-456, 2018.

TROVATI, J., Tratamento de água de resfriamento. **Apostila de curso de atualização**. Portal Tratamento de Água. São Paulo. 2007.

TROVATI, J. **Curso on-line: Tratamento de água (água de resfriamento)**. Portal Tratamento de Água. Araraquara, SP. 2004. Disponível em: <http://www.tratamentodeagua.com.br/curso>. Acesso em: 21 Set. 2019.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Greenhouse Gas Bulletin - N_ 12: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015**. WMO. 2016. Disponível em: <https://www.wmo.int>. Acesso em: 25 Jan. 2019.

YADAV, P.; GOJARE, S.; PATIL, B.; KANTHALE, K.; DUBE, A. S. Performance evaluation of evaporated water in cooling towers. **International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education**. 3ª Edição. v. 2, 2016.

ANEXO A – Tabela de constantes de calores específicos para determinadas substâncias

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Name	Liquid Heat Capacity in J/mol-K when Temperature in K			
	a	b	c	d
136 T-BUTYL ALCOHOL	4.88045D+00	1.54948D+00	-4.66330D-03	5.85875D-06
137 TETRAETHENE GLYCOL	1.12812D+00	1.90413D+00	-3.04611D-03	2.26240D-06
138 THIOPHENE	-3.93905D+01	1.04007D+00	-2.38173D-03	2.34822D-06
139 TOLUENE	1.80826D+00	8.12223D-01	-1.51267D-03	1.63001D-06
140 TRANS-2-BUTENE	2.52418D+01	8.87012D-01	-3.30491D-03	5.18957D-06
141 TRANS-2-PENTENE	1.69958D+01	9.34177D-01	-2.72023D-03	3.74189D-06
142 TRICHLOROACETYL-CL	-2.32210D+01	2.14161D+00	-6.34230D-03	6.61378D-06
143 TRICHLOROETHYLENE	1.71931D+01	9.31709D-01	-2.74646D-03	3.08927D-06
144 TRIETHYLENE GLYCOL	7.99807D+00	1.76246D+00	-3.52085D-03	3.09510D-06
145 TRIMETHYLAMINE	-1.62116D+01	1.13684D+00	-3.67488D-03	5.27623D-06
146 VINYLACETYLENE	2.32080D+01	8.21960D-01	-3.04898D-03	4.36824D-06
147 VINYL CHLORIDE	-7.94162D+00	8.86957D-01	-3.33590D-03	4.82845D-06
148 WATER	1.82964D+01	4.72118D-01	-1.33878D-03	1.31424D-06
149 1-BUTENE	-7.03548D-01	1.02601D+00	-3.63907D-03	5.58528D-06
150 1-ET-2-ME-BENZENE	-2.14660D+01	1.28851D+00	-2.22048D-03	1.91681D-06
151 1-HEPTENE	2.00903D+01	1.14211D+00	-2.55737D-03	3.01294D-06
152 1-HEXENE	1.11256D+01	1.05516D+00	-2.59179D-03	3.20045D-06
153 1-ME-4-ETH-NAPHTHA	-5.45979D+01	1.49414D+00	-1.84755D-03	1.23156D-06
154 1-METHYLINDENE	-3.21486D+01	1.18921D+00	-1.74392D-03	1.35295D-06
155 1-METHYLNAPHTHALEN	-4.88822D+01	1.20998D+00	-1.53729D-03	1.03385D-06
156 1-PENTENE	5.45455D+00	1.02076D+00	-2.93262D-03	3.93623D-06
157 1-PHENYLINDENE	-7.59414D+01	1.59722D+00	-1.82973D-03	1.04060D-06
158 1-PHENYLNAPHTHALEN	-9.05449D+01	1.64726D+00	-1.84168D-03	1.04703D-06
159 1,1-DICHLOROETHANE	1.01731D+01	8.73659D-01	-2.60121D-03	3.11481D-06
160 1,2-BUTADIENE	6.25816D+00	9.13303D-01	-3.10142D-03	4.38633D-06
161 1,2-DICHLOROETHANE	1.99518D+01	8.14846D-01	-2.29913D-03	2.56998D-06
162 1,2-DIME-3-ETHBZ	-2.31556D+01	1.20294D+00	-1.70706D-03	1.43219D-06
163 1,2,3-TRIME-INDENE	-3.79693D+01	1.40735D+00	-1.87484D-03	1.38180D-06
164 1,2,4-TRI-CL-BZ	-1.73071D+01	1.10113D+00	-1.91718D-03	1.42793D-06
165 1,3-BUTADIENE	-1.61777D+01	1.08511D+00	-3.68261D-03	5.41041D-06
166 112TRI-CL-ETHANE	6.30739D+00	8.91575D-01	-2.15051D-03	2.08369D-06
167 2-ETHYLFLUORENE	-7.76821D+01	1.68493D+00	-1.97725D-03	1.19039D-06
168 2-ME-1-BUTENE	6.85913D+00	1.00156D+00	-2.83730D-03	3.82462D-06
169 2-ME-2-BUTENE	9.02049D+00	9.50674D-01	-2.68985D-03	3.60341D-06
170 2-METHYLINDENE	-3.81172D+01	1.20843D+00	-1.73213D-03	1.30948D-06
171 2-METHYLNAPHTHALEN	-4.79704D+01	1.21302D+00	-1.56000D-03	1.06587D-06
172 2-METHYLPENTANE	3.36802D+01	9.38653D-01	-2.24842D-03	3.06594D-06
173 2,2-DIMETHYLBUTANE	2.00732D+01	9.87609D-01	-2.39907D-03	3.26302D-06
174 2,3-DIMETHYLBUTANE	1.28551D+01	1.02940D+00	-2.41758D-03	3.13353D-06
175 2,3,5-TRIME-NAPHTH	-5.74309D+01	1.50154D+00	-1.82573D-03	1.18242D-06
176 2,7-DIMETHYLNAPHTH	-5.27406D+01	1.34672D+00	-1.66099D-03	1.09319D-06
177 3-ME-1-BUTENE	-2.38042D+01	1.26801D+00	-3.55766D-03	4.48758D-06
178 3-METHYLPENTANE	3.17843D+01	9.58431D-01	-2.31456D-03	3.07474D-06

ANEXO B – Planilha de cálculo no Microsoft Excel

Figura B.1 – Cálculo para determinação da função NUT (f_{NUT}).

NÃO-CONFORMIDADE: VARIÇÕES DA CORRENTE DE CIRCULAÇÃO														
DADOS DE ENTRADA			CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO (f_{obj})											
Parâmetro	Valor	Unidade	T - Temperatura (K)	C - Capacidade Calorífica (J/K)	Pa - Pressão Parcial (Pa)	UA - Umidade Absoluta (kgH2O/kgar seco)	TPO - Temperatura de Orvalho (K)	CL - Calor Latente (J/kg)	hU - Entalpia da película de ar (J/kg)	hA - Entalpia do ar não saturado (J/kg)	Δh			
TQ	315,15	K	TBU	300,25	4162,89	-8297,69	950,78	3583,39	0,022800	297,56	2444794,38	85452,79	-	-
Qw	12000	m³/h	Tsa	303,13	4166,60	-8187,52	956,46	4234,73	0,027125	300,23	2437955,12	95528,00	-	-
Qa	10000	m³/h	T1	304,33	4168,10	-8141,82	959,81	4535,75	0,029144	301,43	2435098,52	105962,30	91465,29	6,89799E-05
Qw/Qa	1,2	-	T2	307,94	4172,50	-8005,71	965,80	5553,13	0,036060	305,02	2426524,14	127525,18	109528,16	5,53649E-05
NUT _{proj}	2,495	-	T3	310,34	4175,33	-7915,81	970,40	6336,44	0,041485	307,42	2420803,75	144044,85	121590,33	4,45345E-05
TBU	300,25	K	T4	313,95	4179,43	-7782,20	977,22	7690,26	0,051077	311,02	2412216,66	172655,40	139712,41	3,03555E-05
KaV	29940	-	Text	315,15	4180,77	-7737,99	979,47	8193,83	0,054716	312,22	2409352,58	183358,89	-	-
TF	303,13	K												
f _{obj}	-8,8E-08	-												

Figura B.2 – Cálculo do balanço de massa e custo total operacional.

CONSTANTES PV			CÁLCULO DO CUSTO OPERACIONAL											
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade									
R	22105649	-	CustoT.ano	73939617,66	RS/ano									
A	-27405,5	-	CustoT.mes	73621312,01	RS/mês									
B	97,5413	-	Custoop	73595976,07	RS/tempo									
C	-0,14624	-	Custocap.ano	343641,59	RS/ano									
D	0,000126	-	Custocap.mes	25355,94	RS/mês									
E	-4,9E-08	-	Custonep	61869972,96	RS/tempo									
F	4,34903	-	Custoenergia	11679492,87	RS/tempo									
G	0,003938	-	Custoad	46510,25	RS/tempo									
			top	8016	h/ano									
CONSTANTES TPO			BALANÇO DE MASSA											
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade									
C14	100,45	-	Qsep	343,80	m³/h									
C15	33,193	-	Qpurga	111,05	m³/h									
C16	2,319	-	Qaraste	12	m³/h									
C17	0,17074	-	Qvaz	0,05	m³/h									
C18	1,2063	-	Qevap	220,70	m³/h									

Figura B.3 – Cálculo da potência dos motores dos ventiladores, do ciclo de concentração e índice de estabilidade.

CONSTANTES pH			CÁLCULO DA POTÊNCIA DOS MOTORES DOS VENTILADORES											
Parâmetros	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade									
A	0,2275	-	Potcomb	1078	kW									
B	2,0151	-	Potvent	839,13	kW									
C	1,7950	-	Va	440	V									
D	2,4664	-	In	125	A									
			FR(n)	0,78	-									
			η	0,792	-									
			ρa	1,17571	kg/m³									
PREÇOS			CÁLCULO DO CC											
Parâmetros	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade									
Sep	22,45	RS/m³	CC	2,793	-									
SEE	0,76	RS/kWh	CCideal	1,90	-									
Sad.1	3,15	RS/kg	CÁLCULO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE											
Sad.2	2,21	RS/kg	Parâmetro	Valor	Unidade									
Sad.3	4,62	RS/kg	IP	6,397	-									
Sad.4	9,26	RS/kg	pH	7,5	-									
Sad.5	0,7	RS/kg	pHeq	8,17	-									
CUSTOvol.ens	800	RS/m³	pHf	7,28	-									

Figura B.4 – Cálculo do fator de mensalização e anualização, cálculo da variação do $K.a$ e dados das propriedades físico-químicas da AGR e da torre de resfriamento.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
60	CÁLCULO DA VARIAÇÃO DO $K.a$			DADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA AGR													
61	Parâmetros	Valor	Unidade		Parâmetros	Valor	Unidade										
62	NUT	2,495	-		Trep	28,7	°C										
63	NUT%	2,495	-		CATrep	104,8	ppm CaCO ₃										
64	pw	993	kg/m ³		CSDTrep	674,832	ppm										
65	pw	3310,00	kg/s		CCarep	56,1	ppm CaCO ₃										
66	$K.a$	5,735	kg/m ² .s		CSirep	10	ppm										
67	$\Delta K.a$	5,735	kg/m ² .s		CATcirc	292,70	ppm CaCO ₃										
68	% $K.a$	0	-		CSDTcirc	1884,75	ppm										
69	Venc	1440	m ²		CCcirc	156,68	ppm CaCO ₃										
70					CScirc	27,93	ppm										
71					DADOS DA TORRE DE RESFRIAMENTO												
72					Parâmetros	Valor	Unidade										
73					Zenc	1,5	m										
74					AT	10	m										
75					lenc	8	m										
76					Ncel	12	-										
77																	
78					CÁLCULO DO FATOR DE MENSALIZAÇÃO/ANUALIZAÇÃO												
79					Parâmetros	Valor	Unidade										
80					n	12	meses										
81					i	2,1993	%										
82					Fm	0,0220	l/mês										
83					Fa	0,2983	l/ano										
84																	
85																	

Figura B.5 – Cálculo das vazões mássicas dos aditivos químicos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
86	CÁLCULO DAS VAZÕES MÁSSICAS DOS ADITIVOS																
87					Parâmetros	Valor	Unidade										
88					Cad:1	2	ppm										
89					Cad:2	8	ppm										
90					Cad:3	3	ppm										
91					Cad:4	1	ppm										
92					Cad:5	0,05	ppm										
93					Wad:1	0,246	kg/h										
94					Wad:2	0,985	kg/h										
95					Wad:3	0,369	kg/h										
96					Wad:4	0,133	kg/h										
97					Wad:5	0,006	kg/h										