UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

Amanda Fernandes da Silva

Otimização de Torres de Resfriamento

Dissertação de Mestrado

Rio de Janeiro
2015

Amanda Fernandes da Silva

OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE RESFRIAMENTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D. Sc.

Heloísa Lajas Sanches, D. Sc.

Rio de Janeiro
2015

S586o

Silva, Amanda Fernandes da
Otimização de torres de resfriamento / Amanda Fernandes da Silva. -- Rio de Janeiro, 2015.
116 f.

Orientador: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.
Coorientadora: Heloísa Lajas Sanches.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2015.

1. Torre de resfriamento. 2. Otimização. 3. Custo. I. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini, orient. II. Sanches, Heloísa Lajas, coorient. III. Título.

OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE RESFRIAMENTO

Amanda Fernandes da Silva

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da **Escola de Química** da **Universidade Federal do Rio de Janeiro,** como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada por:

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
(Orientador)

Prof.ª Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.
(Orientadora)

Prof. André Luiz Hemerly Costa, D.Sc.
(UERJ)

Prof. Argimiro Resende Secchi, D.Sc.
(COPPE/UFRJ)

Prof. Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro, D.Sc.
(EQ/UFRJ)

Rio de janeiro, RJ - Brasil
Setembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar todas as etapas da minha vida.

Aos meus pais e meu irmão pelo amor, companheirismo e incentivo que contribuíram para minha formação.

Aos meus orientadores Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Heloísa Lajas Sanches pelos ensinamentos, atenção, e pela dedicação, disponibilidade e conhecimento que compartilharam.

Ao Sr. Paul Tasca, o funcionário da Brentwood, que liberou o acesso da professora Heloísa a uma parte do site da empresa.

Aos familiares e amigos pelo apoio e amizade.

RESUMO

SILVA, Amanda Fernandes da. **Otimização de torres de resfriamento.** Rio de Janeiro, 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A produção de água de resfriamento é muito importante em refinarias de petróleo, na indústria química em geral, e em outros setores industriais e comerciais. É comum que grandes quantidades de água de resfriamento sejam necessárias para as aplicações industriais, com altos custos associados às torres de resfriamento de água. A partir da avaliação das correntes de purga e *make-up*, do ciclo de concentração, e da adição de biocidas e produtos químicos inibidores de corrosão e incrustação, é possível otimizar as condições operacionais de uma torre de resfriamento e reduzir o custo do processo. Além disso, um sistema de resfriamento com aditivos químicos é mais vantajoso, pois prolonga o tempo de vida útil, além de permitir a elevação do ciclo de concentração e, consequentemente, a minimização dos custos da água de *make-up* e de inibidores. O presente trabalho consiste na otimização das torres de resfriamento em termos de redução dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos, utilizando o software GAMS. A otimização foi realizada para cenários com diferentes composições de água de *make-up*, e o índice de Puckorius (IP) foi avaliado para garantir a qualidade da água. Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius.

Palavras-chave: Torres de resfriamento. Otimização. Custo.

ABSTRACT

SILVA, Amanda Fernandes da. **Cooling tower optimization.** Rio de Janeiro, 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The cooling water production is very important in oil refineries, in the chemical industry in general, and in other industrial and commercial sectors. Large quantities of cooling water are commonly required by industries, including high costs associated with cooling towers. From the analysis of the blowdown and make-up streams, the cycles of concentration, and the use of biocides and corrosion and scale inhibitors, it is possible to optimize the operational conditions of a cooling tower and reduce the cost of the process. Furthermore, a cooling system with chemical additives is advantageous because it prolongs the lifespan, besides permitting the elevation of the cycle of concentration and, consequently, the cost of make-up water and inhibitors minimization. This work consists of the cooling tower optimization in terms of make-up water and chemical additives cost reduction, by using the GAMS software. The optimization was performed for scenarios with different water make-up compositions, and the Puckorius Scaling Index (IP) was evaluated to assure the quality of the water. The results showed that the minimum cost is obtained with the highest allowed cycle of concentration according to the Puckorius Scaling Index interval.

Keywords: Cooling tower. Optimization. Cost.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Contexto 1
1.2. Objetivo 2
1.3. Organização do texto 2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1. A torre de resfriamento em refinarias de petróleo 3
2.2. Água para resfriamento 5
2.2.1. Sistema aberto sem recirculação da água 5
2.2.2. Sistema fechado com recirculação da água 6
2.2.3. Sistema semiaberto com recirculação da água 7
2.3. Classificação das torres de resfriamento 8
2.3.1. Contato entre as correntes de água e ar 9
2.3.2. Tipos de ventilação 10
2.3.3. Direção do fluxo de ar em relação ao escoamento da água 12
2.3.4. Sistema de distribuição de água 14
2.4. Princípio de funcionamento da torre de resfriamento em circuito semiaberto com recirculação da água 15
2.4.1. Terminologia e definições típicas da torre de resfriamento 16
2.4.2. Tratamento da água de resfriamento 20
2.5. Balanços de massa e energia da torre de resfriamento 24
2.5.1. Balanço de massa 25
2.5.2. Balanço de energia 28
2.6. Dosagem de produtos químicos 33
2.7. Ciclo de concentração 35
2.8. Custos da torre de resfriamento 36
2.9. Otimização da torre de resfriamento 39
3. METODOLOGIA 41
3.1. Modelo Matemático 41
3.2. GAMS 49
3.3. Descrição do sistema de resfriamento 50
3.3.1. Curva NUT x mw/mar para o recheio da torre de resfriamento 55
3.3.2. Bomba 56
3.3.3. Ventilador 57

3.3.4. Custo da água e da energia 58

3.3.5. Custo de capital 58

3.4. Estudo de casos 58

3.4.1. Caso 1: Custo total da torre de resfriamento 58

3.4.2. Caso 2: Minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento 59

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 69

4.1. Caso 1: Custo total da torre de resfriamento 69

4.2. Caso 2: Ciclo de concentração ideal a partir da avaliação do índice de Puckorius 73

5. CONCLUSÃO 90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92

APÊNDICE A – VALORES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÂO DO pH DE SATURAÇÂO 977

APÊNDICE B – CÁLCULO DO NUT REQUERIDO PELO SISTEMA 99

APÊNDICE C - CÁLCULO DO CUSTO TOTAL DO ESTUDO DE CASO 1 104

APÊNDICE D – MODELO DE OTIMIZAÇÂO DO CUSTO TOTAL (IP entre 6,1 e 7) 108

APÊNDICE E – MODELO DE OTIMIZAÇÂO DO CUSTO TOTAL (IP entre 5,1 e 7,5) 112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição do consumo de água na PETROBRAS (Sede da Petrobras, 2004 apud. AMORIM, 2005). 3

Figura 2: Sistema de água de resfriamento aberto (Adaptado de FÓFANO, 2000). 5

Figura 3: Sistema fechado de água de resfriamento (Adaptado de FÓFANO, 2000). 6

Figura 4: Sistema semiaberto de água de resfriamento (Adaptado de FÓFANO, 2000). 8

Figura 5: Torre direta (Adaptado de FACÃO, 1999). 9

Figura 6: Torre indireta (Adaptado de FACÃO, 1999). 10

Figura 7: Torre de tiragem hiperbólica (Adaptado de OMNI, 1989). 11

Figura 8: Torres de tiragem mecânica (Adaptado de OMNI, 1989). 12

Figura 9: Torre de resfriamento com fluxo cruzado (Adaptado de FEMP, 2011). 13

Figura 10: Torre de resfriamento com fluxo contracorrente (LIMA JÚNIOR, 2011). 14

Figura 11: Representação esquemática de uma torre de resfriamento (Adaptado de REVISTA MEIO FILTRANTE, 2003). 16

Figura 12: Fluxos de água na torre de resfriamento (Adaptado de REVISTA MEIO FILTRANTE, 2003). 25

Figura 13: Volume de controle da torre de resfriamento com escoamento água/ar contracorrente (Adaptado de SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010). 29

Figura 14: Balanço térmico em uma torre de resfriamento com fluxo contracorrente (Adaptado de PERRY, 2008). 31

Figura 15: Curva NUT x $\boldsymbol{mw/mar}$ do recheio V-Bar (BRENTWOOD, 2015). 56

Figura 16: Curva característica da bomba centrífuga KSB Meganorm 350/370 A (MEGANORM, 2015). 57

Figura 17: Curva da potência versus a vazão volumétrica da corrente de água (MEGANORM, 2015). 57

Figura 18: Determinação do $\boldsymbol{mw/mar}$ operacional do sistema para o recheio V-Bar com altura 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14ft. 70

Figura 19: Determinação do $\boldsymbol{mw/mar}$ operacional do sistema para o recheio V-Bar com altura 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 20ft. 71

Figura 20: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando água filtrada como *make-up*. 75

Figura 21: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando água filtrada como *make-up*. 76

Figura 22: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando água do processo de eletrodiálise reversa como *make-up*. 78

Figura 23: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando água do processo de eletrodiálise reversa como *make-up*. 78

Figura 24: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* esperado" como *make-up*. 80

Figura 25: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* esperado" como *make-up*. 80

Figura 26: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* real" como *make-up*. 82

Figura 27: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* real" como *make-up*. 82

Figura 28: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando as águas subterrâneas do rio São Domingos como *make-up*. 85

Figura 29: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando as águas subterrâneas do rio São Domingos como *make-up*. 85

Figura 30: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando a água com padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como *make-up*. 87

Figura 31: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando a água com padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como *make-up*. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de qualidade recomendados para a água de *make-up* em sistemas de resfriamento semiabertos com recirculação da água (EPA, 1992). 4

Tabela 2: Relação entre condutividade elétrica e sólidos dissolvidos (PINTO, 2006). 23

Tabela 3: Propriedades físico-químicas da água de *make-up* utilizadas no estudo de Veiga (2010). 51

Tabela 4: Composição média de possíveis águas de make-up do sistema de resfriamento (VEIGA, 2010). 52

Tabela 5: Características dos biocidas adicionados à torre de resfriamento (VEIGA, 2010). . 52

Tabela 6: Características dos aditivos químicos adicionados à torre de resfriamento (VEIGA, 2010). 53

Tabela 7: Dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da Refinaria Gabriel Passos (VEIGA, 2010). 54

Tabela 8: Propriedades da água e do ar. 54

Tabela 9: Característica de estabilidade da água de acordo com o IP (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012). 60

Tabela 10: Característica de estabilidade da água de acordo com o LSI (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012). 60

Tabela 11: Característica de estabilidade da água de acordo com o RSI (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012). 61

Tabela 12: Composição média de possíveis águas de make-up do sistema de resfriamento da unidade do Coque (REGAP). 66

Tabela 13: Composição média de águas subterrâneas da bacia do rio São Domingos (SANTOS, 2009). 67

Tabela 14: Padrão de qualidade da água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (CARVALHO E MACHADO, 2010). 68

Tabela 15: Valor determinado de NUT para razão $\boldsymbol{mw}/\boldsymbol{mar}$ estimada na torre com Z=36ft e AT=14ft. 69

Tabela 16: Valor determinado de NUT para razão $\boldsymbol{mw}/\boldsymbol{mar}$ estimada na torre com Z=36ft e AT=20ft. 71

Tabela 17: Custo do sistema de resfriamento com altura do recheio igual a 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft e de 20ft. 72

Tabela 18: Custo operacional do sistema de resfriamento com altura do recheio igual a 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft e de 20ft. 72

Tabela 19: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento utilizando água filtrada como *make-up*. 74

Tabela 20: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando água do processo de eletrodiálise reversa como *make-up*. 77

Tabela 21: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água "*Looping* esperado" como make-up. 79

Tabela 22: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água "*Looping* real" como make-up. 81

Tabela 23: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água subterrânea da bacia do rio São Domingos como *make-up*. 84

Tabela 24: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água com padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como *make-up*. 86

Tabela 25: Custo total dos sistemas de resfriamento com as águas de *make-up* estudadas. 89

Tabela A-1: Valores dos coeficientes A da equação do pH de saturação do carbonato de cálcio na água (AQUA AMBIENTE, 2004) 97

Tabela A-2: Valores dos coeficientes B da equação do pH de saturação do carbonato de cálcio na água (AQUA AMBIENTE, 2004) 97

Tabela A-3: Valores dos coeficientes C e D da equação do pH de saturação do carbonato de cálcio na água (AQUA AMBIENTE, 2004) 98

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

Símbolo	Descrição
$\%p/p$	Porcentagem em massa de cloro ativo na solução (%)
a_{fi}	Área de contato por unidade de volume (m^{-1})
A	Coeficiente em função dos sólidos dissolvidos totais
A_{fr}	Área da seção transversal da torre de resfriamento (m)
Ap	*Approach* (K)
AT	Distância percorrida pelo ar na direção horizontal no recheio (ft)
B	Coeficiente em função da temperatura
C	Coeficiente em função da dureza em cálcio
c_a	Concentração salina na corrente de arraste (ppm)
$c_{aditivo}$	Concentração desejada de aditivo químico (ppm)
CAPEX	Custo de capital da torre de resfriamento (R$. ano^{-1})
$c_{AT\ make-up}$	Alcalinidade total da água de *make-up* (ppm)
$c_{ATcircula\ ção}$	Alcalinidade total da água de circulação (ppm)
CC	Ciclo de concentração
$c_{Ca^{2+}circula\ ção}$	Concentração de dureza cálcica da água de circulação (ppm)
$c_{Ca^{2+}make-up}$	Concentração de dureza cálcica da água de *make-up* (ppm)
CC_{ideal}	Ciclo de concentração ideal
c_{Cl_2}	Concentração de cloro residual livre (ppm)
CC_{max}	Ciclo máximo de concentração
c_e	Concentração salina na corrente de evaporação (ppm)
c_f	Concentração do produto após um tempo t (ppm)
c_i	Concentração inicial do produto químico (ppm)
c_m	Concentração salina na corrente de *make-up* (ppm)
COD	Carbono orgânico dissolvido (mg . L^{-1})
c_p	Concentração salina na corrente de purga (ppm)
$C_{p\ água\ entra}$	Calor específico da água que entra na torre (J. kg^{-1}. K^{-1})
$C_{p\ água\ sai}$	Calor específico da água que sai da torre (J. kg^{-1}. K^{-1})
C_{Par}	Calor específico do ar seco (J. kg^{-1}. K^{-1})
C_{Pv}	Calor específico do vapor de água (J. kg^{-1}. K^{-1})
C_{pw}	Calor específico da água (J. kg^{-1}. K^{-1})
c_s	Concentração salina na água circulante (ppm)
$c_{SDT\ circula\ ção}$	Sólidos dissolvidos totais na água de circulação (ppm)
$c_{SDT\ make-up}$	Sólidos dissolvidos totais na água de *make-up* (ppm)
$c_{SiO_2 make-up}$	Concentração de sílica na água de *make-up* (ppm)
$c_{SO_4^{2-} make-up}$	Concentração de sulfato na água de *make-up* (ppm)
$Custo_{aditivo\ ,m}$	Custo do aditivo m (R$. kg^{-1})
$Custo_{aditivo\ ,n}$	Custo do aditivo n (R$. kg^{-1})
$Custo_{água\ make-up}$	Custo da água de *make-up* (R$. m^{-3})
$Custo_B$	Custo operacional com o bombeamento de água de resfriamento (£ . ano^{-1})
$Custo_{CTF}$	Custo fixo da torre de resfriamento (US$)
$Custo_{CTMA}$	Custo relacionado à vazão mássica de ar (US$ .s. kg^{-1})
$Custo_{CTV}$	Custo relacionado ao volume do recheio da torre (US$. m^{-3})
$Custo_{elet}$	Custo da eletricidade (R$. kWh^{-1})

$Custo_{TOT}$	Custo total da torre de resfriamento (R$. ano^{-1})
$Custo_V$	Custo operacional com ventilador (£ . ano^{-1})
c_v	Concentração salina na corrente de vazamento (ppm)
D	Coeficiente em função da alcalinidade total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg . L^{-1})
Dc	Dosagem de choque (kg)
dH_{ar}	Variação da entalpia na corrente de ar (J . kg^{-1})
dH_w	Variação da entalpia na corrente de água (J . kg^{-1})
Dc_m	Dosagem de choque do aditivo m (kg)
DQO	Demanda Química de Oxigênio (mg . L^{-1})
dZ	Altura infinitesimal (m)
E_e	Energia elétrica (kW)
F	Fator de anualização (ano^{-1})
FC	Fator de correção
G_{ar}	Fluxo mássico do ar (kg . $s^{-1}.m^{-2}$)
G_w	Fluxo mássico da água (kg . $s^{-1}.m^{-2}$)
H	Entalpia do ar úmido (J . kg^{-1})
H_a	Entalpia específica da mistura ar-água na temperatura de bulbo úmido (J . kg^{-1})
H_{ai}	Entalpia específica da mistura ar-água na T_i (J . kg^{-1})
H_{ar}	Entalpia da corrente de ar (J . kg^{-1})
H'_{ar}	Entalpia do ar saturado na temperatura da água (J . kg^{-1})
H_{ar1}	Entalpia do ar na corrente de entrada (J . kg^{-1})
H_{ar2}	Entalpia do ar na corrente de saída (J . kg^{-1})
H'_{ar1}	Entalpia do ar saturado na temperatura da água na corrente de entrada (J . kg^{-1})
H'_{ar2}	Entalpia do ar saturado na temperatura da água na corrente de saída (J . kg^{-1})
h_c	Coeficiente de transferência de calor ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
h_d	Coeficiente de transferência de massa (kg. $s^{-1}.m^{-2}$. Pa^{-1})
$H_{entrada}$	Entalpia específica do ar na temperatura de bulbo úmido na entrada (J . kg^{-1})
$H_{Lsub\ po\ i}$	Calor latente de sublimação na $T_{po\ i}$ (J . kg^{-1})
$H_{Lvap\ poi}$	Calor latente de vaporização na $T_{po\ i}$ (J . kg^{-1})
$H_{saída}$	Entalpia específica do ar na saída (J . kg^{-1})
H_w	Entalpia específica da mistura ar-água na temperatura do seio do líquido (J . kg^{-1})
$H_{w\ i}$	Entalpia específica da mistura ar-água na T_i (J . kg^{-1})
H_Y	Tempo de operação anual ($h.ano^{-1}$)
IP	Índice de saturação de Puckorius
K	Coeficiente de transferência de massa ($kg.s^{-1}$. m^{-2})
k_d	Constante (h^{-1})
LSI	Índice de saturação de Langelier
m_a	Massa de vapor de água (kg)
M_a	Massa molar da água (g . mol^{-1})
$\dot{m}_{água\ entra}$	Vazão mássica da água que entra na torre (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{água\ make-up}$	Vazão mássica da água de *make-up* (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{água\ sai}$	Vazão mássica da água que sai da torre (kg . s^{-1})
m_{ar}	Massa de ar seco (kg)

M_{ar}	Massa molar do ar (g . mol^{-1})
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica da corrente de ar (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{arraste}$	Vazão mássica da água de arraste (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{ar\ seco\ entra}$	Vazão mássica de ar seco que entra na torre (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{ar\ seco\ sai}$	Vazão mássica de ar seco que sai da torre (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{ar\ úmido\ entra}$	Vazão mássica de ar úmido que entra da torre (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{ar\ úmido\ sai}$	Vazão mássica do ar úmido que sai da torre (kg . s^{-1})
Me	Número de Merkel
$\dot{m}_{evapora\ ção}$	Vazão mássica da água de evaporação (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{perdas\ \ fase\ líquida}$	Vazão mássica das perdas de fase líquida na torre (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{purga}$	Vazão mássica da água de purga (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{\text{vazamento}}$	Vazão mássica da água de vazamento (kg . s^{-1})
$\dot{m}_{w}$	Vazão mássica da corrente de água (kg . s^{-1})
NUT	Número de unidades de transferência da torre
$NUT_{\text{contracorrrente}}$	Número de unidades de transferência da torre com fluxo contracorrente
NUT_{cruzado}	Número de unidades de transferência da torre com fluxo cruzado
NUT_{recheio}	Número de unidades de transferência do recheio disponível
$NUT_{\text{requerido}}$	Número de unidades de transferência requerido pelo sistema
OPEX	Custo operacional da torre de resfriamento (R$. ano^{-1})
pCa^{+2}	Logaritmo negativo da concentração de cálcio
pAlc	Logaritmo negativo da alcalinidade total
pH_{eq}	pH equivalente
pH_s	pH de saturação
pK_2	Logaritmo negativo da segunda constante de dissociação do ácido carbônico
pK_s	Logaritmo negativo da constante do produto de solubilidade do $CaCO_3$
POW_f	Energia elétrica consumida pelos ventiladores (kW)
POW_p	Energia elétrica consumida pelas bombas (kW)
P_T	Pressão total (Pa)
P_v	Pressão parcial do vapor de água (Pa)
P_s	Pressão de vapor da água (Pa)
P_{sbu}	Pressão de vapor da água na temperatura de bulbo úmido (Pa)
$P_{sbu,i}$	Pressão de vapor da água na temperatura T_i (Pa)
Q	Carga térmica removida na torre (W)
$\dot{Q}_{água\ make-up}$	Vazão volumétrica da água de *make-up* (m³. h^{-1})
$\dot{Q}_{arraste}$	Vazão volumétrica da perda por arraste (m³. h^{-1})
$\dot{Q}_{dispon\ ível}$	Vazão disponível do sistema hipoclorador (L. h^{-1})
$\dot{Q}_{evapora\ ção}$	Vazão volumétrica de evaporação (m³. h^{-1})
$\dot{Q}_{purga}$	Vazão volumétrica de purga (m³. h^{-1})
$\dot{Q}_{\text{teórico}}$	Vazão mássica teórica do hipoclorador (L. h^{-1})
$\dot{Q}_{vazamento}$	Vazão volumétrica de purga (m³. h^{-1})
R	*Range* (K)
RSI	Índice de estabilidade de Ryznar
SDT	Sólidos dissolvidos totais (mg . L^{-1})
T	Temperatura (K)
T_0	Temperatura de referência (K)
$t_{\frac{1}{2}}$	Tempo de meia vida do aditivo químico (h)

$t_{\frac{1}{4}}$	Tempo de um quarto de vida do aditivo químico (h)
T_{ar1}	Temperatura do ar na corrente de entrada (K)
T_{ar2}	Temperatura do ar na corrente de saída (K)
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido (K)
$T_{bu\ ent}$	Temperatura de bulbo úmido na corrente de entrada (K)
t_c	Tempo de ciclo (h)
$t_{cloração}$	Tempo real de cloração (h)
t_d	Tempo decorrido após a dosagem de choque (h)
T_{db}	Temperatura de bulbo seco (da mistura de ar e vapor de água) (K)
T_i	Temperatura i (K)
$T_{po\ i}$	Temperatura do ponto de orvalho na $P_{sbu,i}$ (K)
$T_{make-up}$	Temperatura da água de *make-up* (K)
$t_{teórico}$	Tempo teórico de cloração (h)
T_{w1}	Temperatura da água na corrente de entrada (K)
T_{w2}	Temperatura da água na corrente de saída (K)
UA	Umidade absoluta ((kg de água).(kg de ar seco)$^{-1}$)
$UA_{entrada}$	Umidade da corrente de ar na entrada ((kg de água).(kg de ar seco)$^{-1}$)
UA_i	Umidade da corrente de ar na temperatura T_i ((kg de água).(kg de ar seco)$^{-1}$)
$UA_{saída}$	Umidade da corrente de ar na saída ((kg de água).(kg de ar seco)$^{-1}$)
V	Volume total do sistema (m³)
V_e	Volume efetivo de resfriamento (m³)
V_a	Volume de água na torre (m³)
W	Vazão mássica de aditivos químicos (dosagem contínua) (kg . h^{-1})
W_n	Dosagem contínua do aditivo químico n (kg . h^{-1})
Z	Altura do recheio (m)

LETRAS GREGAS

Símbolo	**Descrição**
λ	Calor latente de vaporização (J . kg^{-1})
λ_0	Calor latente da água a 0°C (J . kg^{-1})
ν	Volume específico (m³)
ϕ	Umidade relativa
η	Eficiência da torre (%)
$\rho_{água}$	Densidade da água de resfriamento (kg . m^{-3})
ρ_{ar}	Densidade do ar (kg . m^{-3})

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

A maioria dos processos industriais utiliza a água como fluido de resfriamento de sistemas que requerem remoção de carga térmica. Após a troca de calor realizada nos processos produtivos industriais, a água de resfriamento pode ser eliminada ou reaproveitada no sistema (OMNI, 1989). Entretanto, o reúso de água é fundamental devido à sua crescente escassez, preocupação com o meio ambiente e otimização do processo (SOUZA, 2010).

Dessa forma, o resfriamento da água e o seu reaproveitamento podem ocorrer a partir de sistemas não evaporativos (sistemas fechados com recirculação de água) ou sistemas evaporativos (sistemas em circuitos semiabertos com recirculação de água), que utilizam uma torre de resfriamento (MANCUSO, 2001). Nos sistemas em circuitos semiabertos, os quais são normalmente utilizados, a água passa por uma rede de trocadores de calor, e é enviada para uma torre de resfriamento. Neste equipamento, a transferência de calor e massa entre a água e o fluxo de ar atmosférico proporciona a redução de temperatura da água, a qual retorna para absorver o calor de um novo ciclo de processo (CTI, 2013).

Nas torres de resfriamento, parte da água é evaporada em função do diferencial de temperatura, umidade do ar, temperatura do bulbo úmido, entre outros. Com as perdas por evaporação e arraste de gotículas de água, a concentração de sais dissolvidos na água das torres de resfriamento deve ser controlada por purgas (*blowdown*), a fim de evitar corrosão, incrustações e crescimento biológico (MANCUSO, 2001). Além disso, produtos químicos inibidores de corrosão e incrustação são adicionados no sistema, e a água de reposição (*make-up*) deve apresentar teores baixos de salinidade, material orgânico, sólidos suspensos e microorganismos (TROVATI, 2004).

Para operar uma torre de resfriamento e mantê-la funcionando adequadamente, é necessário avaliar alguns fatores, como as relações matemáticas entre a vazão da corrente de purga e de *make-up*, a taxa de evaporação, o ciclo de concentração, entre outros.

As torres de resfriamento são normalmente aplicadas na geração de fluido de resfriamento para refinarias de petróleo, estações de energia, siderúrgicas, indústria de processamento químico, e na refrigeração de grandes edifícios comerciais, incluindo

aeroportos, hospitais, hotéis, etc. (FEMP, 2011). Em refinarias de petróleo, por exemplo, são necessárias grandes quantidades de água de resfriamento. Além disso, o reúso de água é importante, pois se estima que para cada litro de óleo processado, é necessário um litro de água tratada (FURTADO, 2013).

1.2. Objetivo

Dada a importância da água de resfriamento para as refinarias de petróleo e outros setores industriais e comerciais, o presente trabalho consiste na otimização das torres de resfriamento em termos de redução dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos, a partir da avaliação das correntes de purga e *make-up*, do ciclo de concentração e da adição dos produtos químicos inibidores de corrosão e incrustação.

Os objetivos específicos desta dissertação são: i) elaborar o modelo matemático a partir da função objetivo, das restrições e do método de otimização; ii) analisar e comparar os resultados gerados para os diferentes cenários.

1.3. Organização do texto

Esta dissertação divide-se em capítulos descritos a seguir.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do trabalho, dando uma visão dos conceitos gerais de torres de resfriamento.

O capítulo 3 dedica-se à descrição do modelo matemático para minimizar os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento, apresentando a função objetivo, as restrições e o método de otimização.

No capítulo 4 os resultados são apresentados e discutidos.

Finalmente, o capítulo 5 consiste na conclusão do trabalho, destacando os resultados obtidos e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda inicialmente a aplicação das torres de resfriamento nas refinarias de petróleo. Posteriormente, são apresentados os sistemas de resfriamento com água e as principais características das torres de resfriamento, assim como seus balanços de massa e energia, e sua avaliação econômica.

2.1. A torre de resfriamento em refinarias de petróleo

As refinarias de petróleo utilizam grandes quantidades de água em diversas atividades, desde os processos de destilação primária até os tratamentos finais (NEMEROW, 1971 apud. MARIANO, 2001). Sendo assim, as unidades de processos, os sistemas de geração de vapor, e as torres de resfriamento são exemplos de consumidores de água, como mostra a Figura 1.

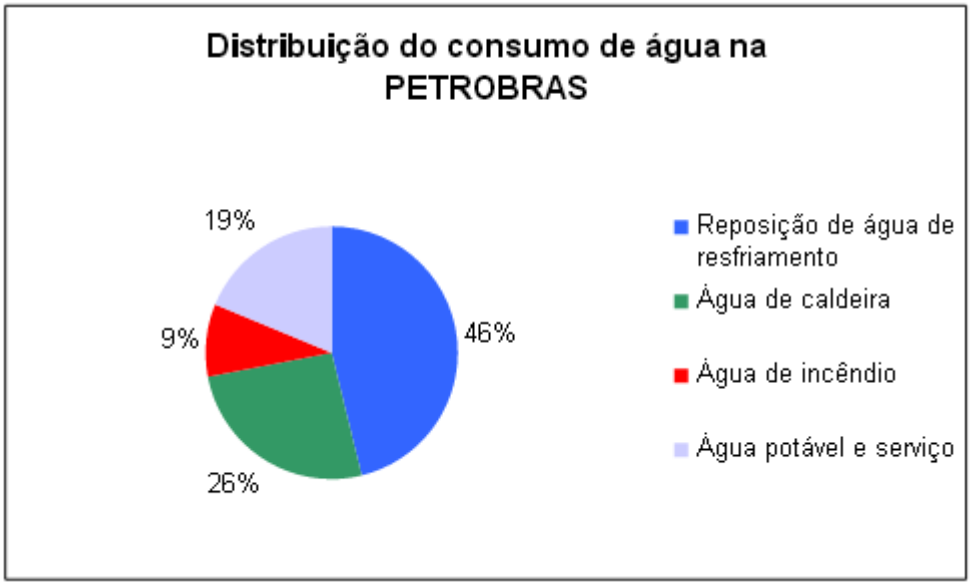

Figura 1: Distribuição do consumo de água na PETROBRAS (Sede da Petrobras, 2004 apud. AMORIM, 2005).

Logo, uma das principais finalidades da água nas plantas de refino é o resfriamento dos processos geradores de calor residual, o qual deve ser reduzido ou removido. As torres de resfriamento com circuito semiaberto e recirculação de água são normalmente utilizadas nas refinarias (VANELLI, 2004).

.

Porém, é necessária água de boa qualidade para manter a operação adequada das torres de resfriamento (MARIANO, 2011). Além disso, a corrente de purga (*blowdown*) reduz a concentração de sais dissolvidos, e está relacionada com a água de circulação por meio do ciclo de concentração. Quanto maior a concentração de sais dissolvidos na água de *make-up*,

maior será o número de ciclos de concentração, e a necessidade de adição de inibidores de corrosão e incrustação. A Tabela 1 apresenta o padrão de qualidade recomendado para a água de *make-up* em sistemas semiabertos com recirculação da água.

Tabela 1: Padrões de qualidade recomendados para a água de *make-up* em sistemas de resfriamento semiabertos com recirculação da água (EPA, 1992).

Parâmetro	Limite recomendado
pH	6,9 – 9,0
Turbidez (NTU)	50
Alcalinidade (mg/L)	350
Dureza (mg/L)	650
Cloretos (mg/L)	500
DBO (mg O_2/L)	25
DQO (mg O_2/L)	75
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	500
Sólidos em suspensão totais (mg/L)	100
Material orgânico (mg/L) *	1,0
NH_4-N (mg/L)	1,0
PO_4 (mg/L)	4
SiO_2 (mg/L)	50
Al (mg/L)	0,1
Fe (mg/L)	0,5
Mn (mg/L)	0,5
Ca (mg/L)	50
Mg (mg/L)	0,5
HCO_3 (mg/L)	24
SO_4 (mg/L)	200

*Substâncias ativas ao azul de metileno.

Dessa maneira, pode ser necessário o tratamento da corrente de purga, para permitir seu reúso na refinaria e redução dos custos operacional e ambiental (este último relacionado ao descarte do rejeito de tratamento) (NASCIMENTO, 2004). Entretanto, um dos desafios é o alto custo desse tratamento, devido às grandes quantidades de produtos químicos e sais utilizados (FURTADO, 2013).

Em razão da crescente escassez de recursos hídricos e da capacidade das refinarias de petróleo, é essencial a adoção de medidas que racionalizem o consumo de água, como o reúso de efluentes industriais. Dessa maneira, o reúso de efluentes na torre de resfriamento e a otimização de suas condições operacionais são fundamentais para alcançar uma relação custo/benefício atraente.

2.2. Água para resfriamento

Na maioria das vezes, o fluido de resfriamento utilizado para absorver o calor gerado nos processos produtivos é a água, pois possui alto calor específico, baixa viscosidade, alta condutividade térmica e alta densidade (OMNI, 1989). Sendo assim, existem os seguintes sistemas de resfriamento com água:

- Sistema aberto, sem recirculação da água;
- Sistema fechado, com recirculação de água;
- Sistema semiaberto, com recirculação da água.

2.2.1. Sistema aberto sem recirculação da água

Nos sistemas abertos, a água de resfriamento entra em contato com os trocadores de calor apenas uma vez. Dessa maneira, a água fria proveniente de um manancial é bombeada para os equipamentos resfriadores de calor, e em seguida, é descartada em sua fonte original (FÓFANO, 2000). O sistema está ilustrado na Figura 2.

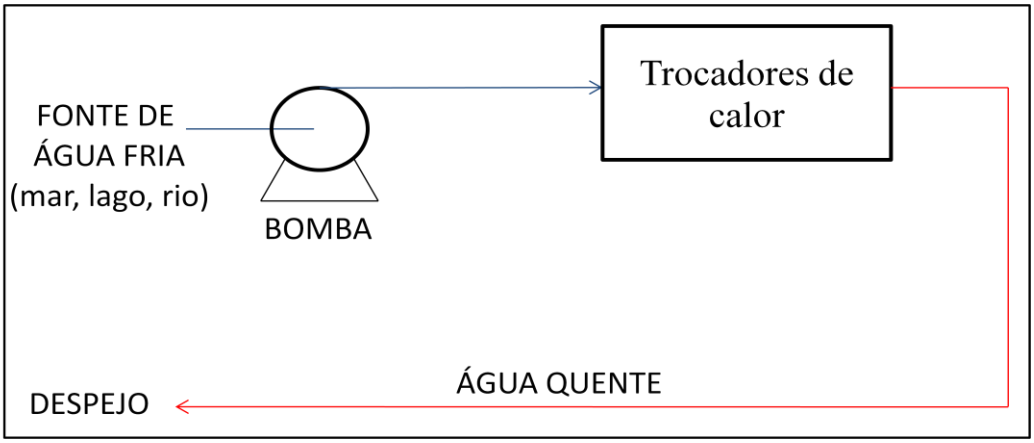

Figura 2: Sistema de água de resfriamento aberto (Adaptado de FÓFANO, 2000).

Embora a concentração de sais minerais na água permaneça praticamente inalterada devido à pequena taxa de evaporação, esse sistema apresenta algumas desvantagens. O custo

do tratamento para evitar problemas como corrosão e incrustação nos equipamentos é elevado, por causa das grandes quantidades de água utilizada (GE, 2014). Além da necessidade de água em abundância, esses sistemas podem gerar poluição térmica. Ou seja, a elevação de temperatura de corpos hídricos (mares, lagos, rios) pode prejudicar as vidas aquáticas, devido ao desenvolvimento de bactérias e fungos e à redução de oxigênio dissolvido no local de despejo (FÓFANO, 2000).

Apesar da simplicidade desse sistema, apenas indústrias próximas aos grandes mananciais possuem condições de usá-lo em razão do elevado consumo de água. Além disso, é importante que os equipamentos e as tubulações sejam constituídos de materiais metálicos mais resistentes à corrosão, especialmente nos tubos dos trocadores de calor (MACHADO, 2004).

2.2.2. Sistema fechado com recirculação da água

Os sistemas fechados com recirculação da água não são evaporativos, e o resfriamento da água é realizado em um trocador de calor. No trocador de calor, a água não entra em contato com o fluido de resfriamento (TROVATI, 2004). O circuito fechado com recirculação de água está ilustrado na Figura 3.

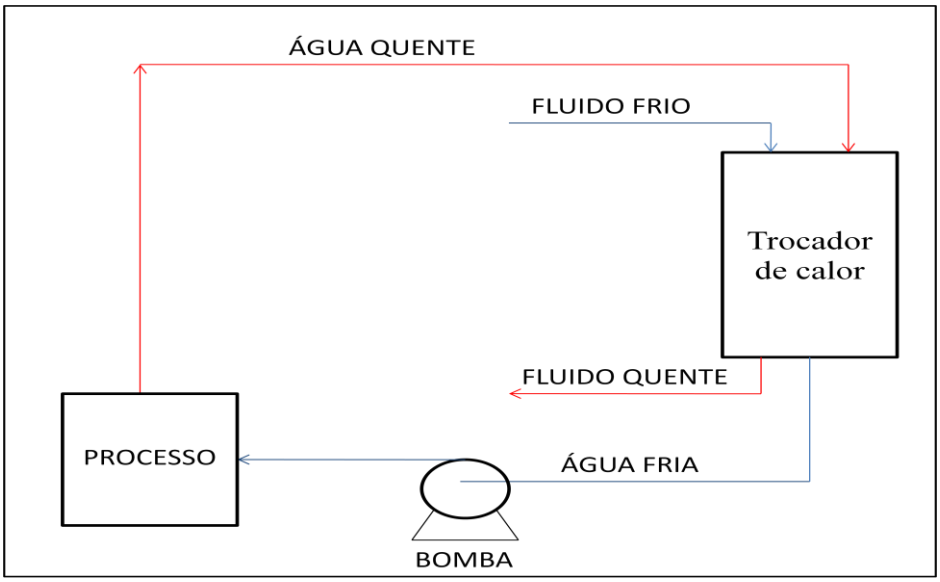

Figura 3: Sistema fechado de água de resfriamento (Adaptado de FÓFANO, 2000).

Algumas vantagens dos circuitos fechados são: melhor controle das temperaturas nos equipamentos de transferência de calor, e necessidade de pequenas quantidades de água de

make-up (consumida apenas quando ocorrem vazamentos). Além disso, a evaporação da água é praticamente nula. Logo, não há necessidade de correntes de purga, pois o ciclo de concentração permanece constante. O uso de água de alta qualidade também minimiza problemas de incrustação e contaminação biológica (GE, 2014).

Outra vantagem é a ausência de descartes contínuos, a qual permite o aumento da concentração de produtos químicos e, consequentemente, da vida útil dos equipamentos (MACHADO, 2004).

Os circuitos fechados são adequados para resfriamento de motores a gás, compressores, motores a diesel e sistemas de ar condicionado (GE, 2014).

2.2.3. Sistema semiaberto com recirculação da água

Nos sistemas semiabertos, os quais são considerados evaporativos, a água é continuamente resfriada para ser aplicada em outros processos (MANCUSO, 2001). Inicialmente, a água passa pelo tratamento químico, e é encaminhada para os equipamentos que devem ser resfriados. Em seguida, a água com sua temperatura elevada é enviada para uma instalação de resfriamento (torre, lagoa, *spray*, etc.), para se tornar apropriada para o reúso (TROVATI, 2004). A Figura 4 demonstra a representação esquemática deste circuito, o qual será mais detalhado adiante, visto que é o sistema mais usual em refinarias de petróleo.

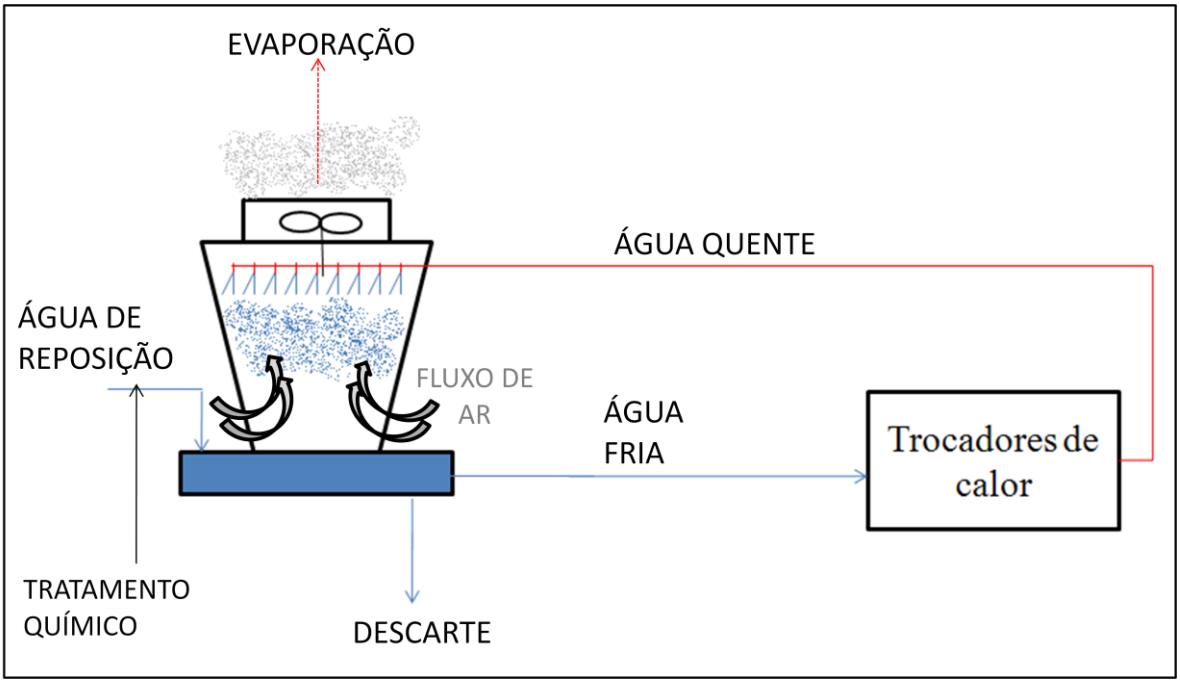

Figura 4: Sistema semiaberto de água de resfriamento (Adaptado de FÓFANO, 2000).

Estes sistemas são comumente utilizados em processos que exigem alta vazão de água e a disponibilidade de água é limitada. Além da segurança no fornecimento de água fria nos circuitos semiabertos, a água de *make-up* é consumida apenas para substituir as perdas por respingo, drenagem e vazamentos em cada ciclo, e o tratamento da água pode ser realizado de maneira econômica e eficaz (ELKIND, 2002). Dessa forma, os equipamentos e tubulações podem ser constituídos de materiais mais baratos (aços- carbono) e menos resistentes à corrosão (MACHADO, 2004).

No entanto, a elevada temperatura da água, um longo tempo de detenção e o contato direto com o ar atmosférico contribuem para o crescimento microbiológico, o qual deve ser combatido com biocidas (MACHADO, 2004). Além disso, esses sistemas apresentam maior consumo de energia (FÓFANO, 2000).

2.3. Classificação das torres de resfriamento

As torres de resfriamento podem ser classificadas pela forma de contato entre as correntes de ar e água, pelo tipo de ventilação, pela direção do fluxo de ar em relação ao escoamento da água, pelo sistema de distribuição de água, entre outros.

2.3.1. Contato entre as correntes de água e ar

As torres de resfriamento podem ser classificadas como torres diretas (torres abertas) e torres indiretas (torres fechadas), de acordo com a forma de contato entre as correntes de água e ar.

- **Torres diretas**

Na torre direta, a troca de calor entre a água e o ar ocorre no seu recheio, como mostra a Figura 5. Dessa maneira, a água é resfriada à medida que desce pelo recheio e entra em contato com o ar em escoamento (CTI, 2013). Esta forma de contato entre a água e o ar proporciona alta eficiência da transferência de calor (SAMPAIO, 2013).

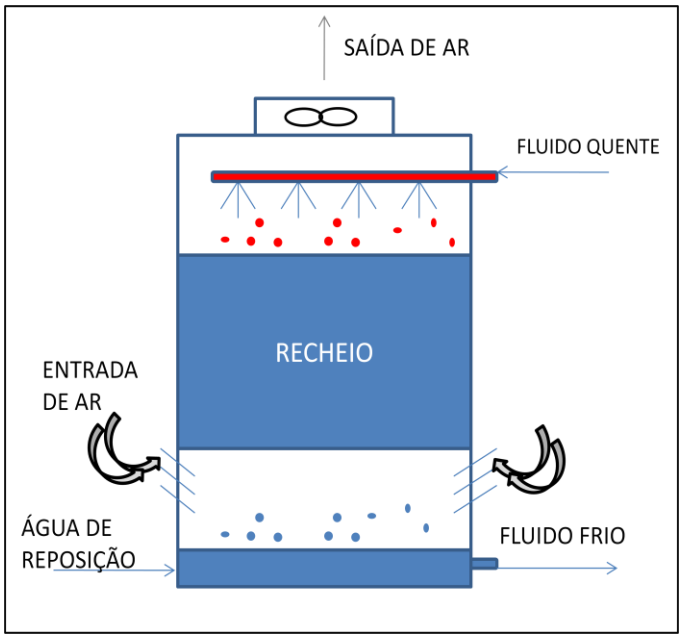

Figura 5: Torre direta (Adaptado de FACÃO, 1999).

- **Torres Indiretas**

Na torre indireta, pode haver dois escoamentos (sem a pulverização de água em torres hiperbólicas), ou pode haver três escoamentos diferentes (o fluido quente que é transportado em um feixe de tubos para ser resfriado; o ar no sentido ascendente; e a água fria que passa por um circuito fechado e molha o exterior do feixe de tubos, a fim de resfriá-los) (FACÃO, 1999).

Nas torres com três escoamentos, a ausência de contato entre o fluido de trabalho e a atmosfera permite a utilização de diversos tipos de fluido, além de reduzir o consumo de água (FACÃO, 1999). Este tipo de torre está ilustrado na Figura 6.

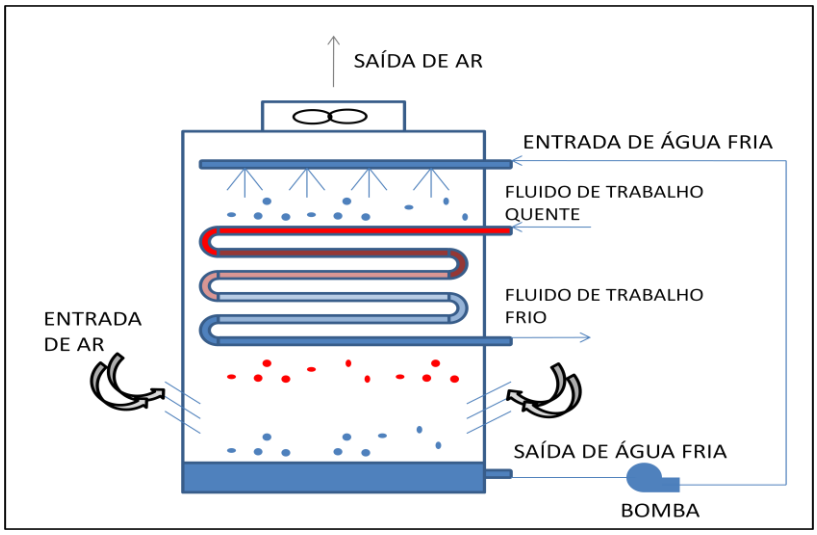

Figura 6: Torre indireta (Adaptado de FACÃO, 1999).

2.3.2. Tipos de ventilação

De acordo com o processo de fornecimento de ar, as torres de resfriamento podem ser classificadas em torres com ventilação natural e torres de tiragem mecânica.

- **Torres com ventilação natural**

Nas torres com ventilação natural, o movimento do ar ocorre de acordo com o vento ou diferença de densidade do ar (LIMA JÚNIOR, 2011).

As torres que utilizam o vento e o efeito dos bicos pulverizadores para o movimento do ar são denominadas torres atmosféricas. Estas torres possuem venezianas que orientam e auxiliam a passagem do ar (OMNI, 1989). Entretanto, a partir da Segunda Guerra Mundial, as torres atmosféricas (com ou sem enchimento) foram substituídas pelas torres de tiragem mecânica (MANCUSO, 2001).

As torres que utilizam a densidade do ar para o movimento do ar são denominadas torres hiperbólicas. Neste sistema, o ar quente com sua densidade reduzida tende a subir, e

uma zona de baixa pressão é formada na base da torre, facilitando a entrada de nova massa de ar frio (OMNI, 1989). Este tipo de torre está ilustrado na Figura 7.

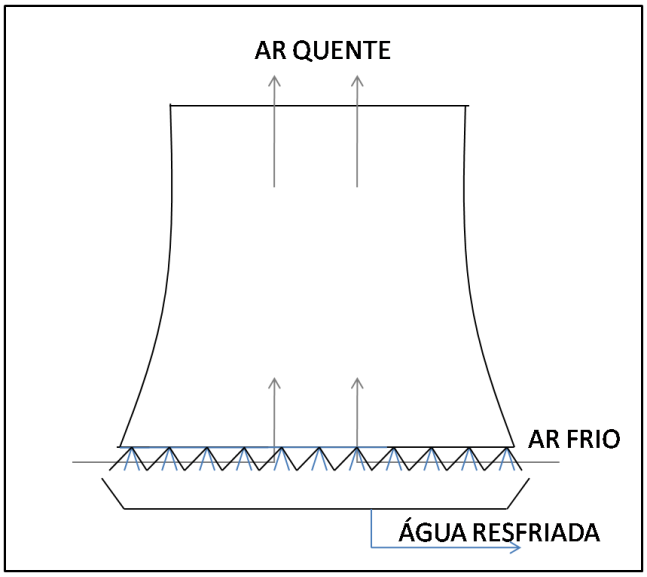

Figura 7: Torre de tiragem hiperbólica (Adaptado de OMNI, 1989).

As torres de tiragem hiperbólica apresentam algumas vantagens, como o elevado tempo de vida útil, e a capacidade de resfriamento de grande quantidade de água. E apesar da baixa eficiência e do alto custo inicial, essas torres possuem baixos custos operacionais (manutenção, energia e resfriamento da água) (SAMPAIO, 2013).

- **Torres de tiragem mecânica**

Nas torres de tiragem mecânica, a vazão de ar é controlada por um ventilador, e a aspiração pode ser induzida ou forçada (LIMA JÚNIOR, 2011). As torres que possuem o ventilador localizado na saída do ar são denominadas torres de tiragem induzida. Quando o ar é aspirado pelo ventilador localizado na base, as torres são conhecidas como torres de tiragem forçada (FEMP, 2011). As torres de tiragem mecânica induzida e forçada estão ilustradas na Figura 8.

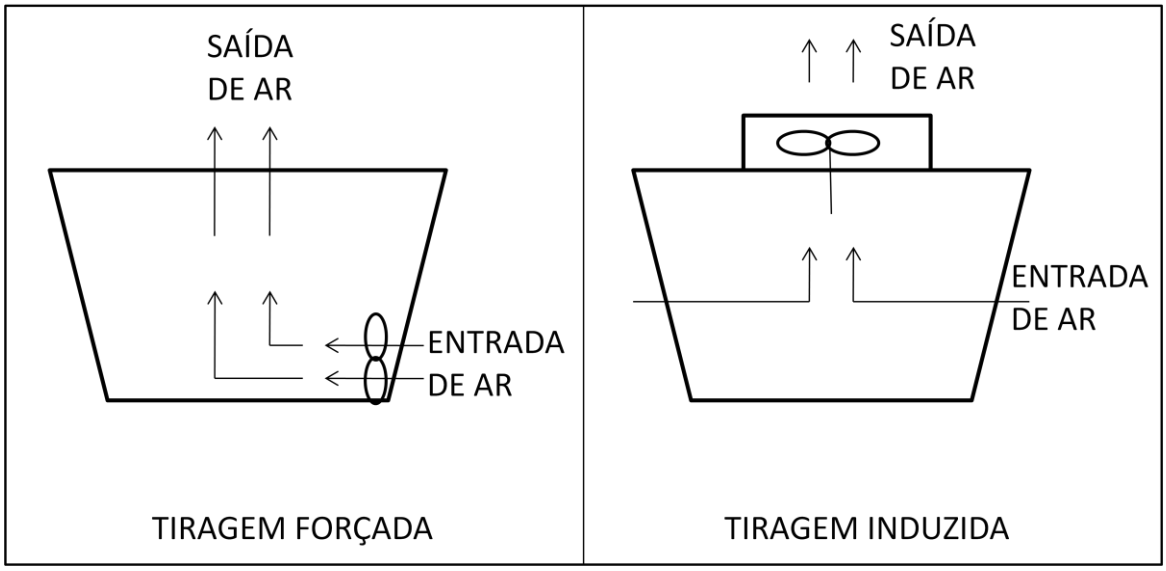

Figura 8: Torres de tiragem mecânica (Adaptado de OMNI, 1989).

As torres de tiragem mecânica são mais compactas e eficientes do que as torres com ventilação natural, e permitem o melhor controle da temperatura. Além disso, essas torres necessitam de um espaço menor e apresentam maiores custos de energia, manutenção e operação (SAMPAIO, 2013).

Como as torres de tiragem mecânica induzida possuem o ventilador situado na saída do ar, há possibilidade de utilizar grandes ventiladores. Logo, a manutenção é mais difícil e o gasto energético é menor do que nas torres de tiragem mecânica forçada, as quais possuem o ventilador de tamanho limitado posicionado na entrada de ar (SAMPAIO, 2013).

2.3.3. Direção do fluxo de ar em relação ao escoamento da água

As torres de resfriamento podem apresentar fluxo cruzado ou contracorrente, conforme a direção do fluxo de ar em relação ao escoamento da água.

- **Torre com fluxo cruzado**

Na torre com fluxo cruzado (*cross-flow*), ilustrada na Figura 9, o fluxo de ar é direcionado perpendicularmente ao escoamento de água. Sua estrutura oferece menos resistência ao ar, reduzindo a potência do ventilador necessária para a refrigeração (FEMP, 2011). Além disso, os sistemas mecânicos e de distribuição de água dessas torres são mais acessíveis (SAMPAIO, 2013).

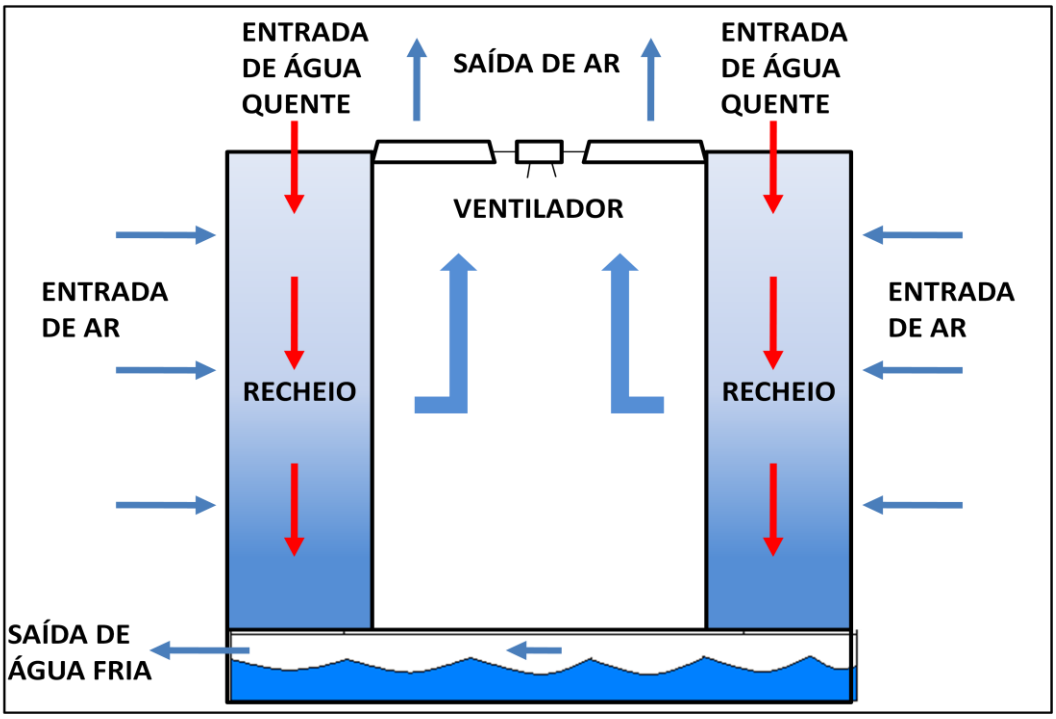

Figura 9: Torre de resfriamento com fluxo cruzado (Adaptado de FEMP, 2011).

- **Torre com fluxo contracorrente**

Na torre com fluxo contracorrente (*counter-flow*), ilustrada na Figura 10, o ventilador cria um fluxo de ar ascendente no sentido contrário do escoamento da água. Sua estrutura promove um resfriamento com alta eficiência, pois a água fria entra em contato com o ar mais seco, enquanto a água mais aquecida entra em contato com o ar úmido (OIKAWA, 2012). Além disso, há menor possibilidade de recirculação de ar do que nas torres com fluxo cruzado. Entretanto, estas torres apresentam maior gasto de energia (SAMPAIO, 2013).

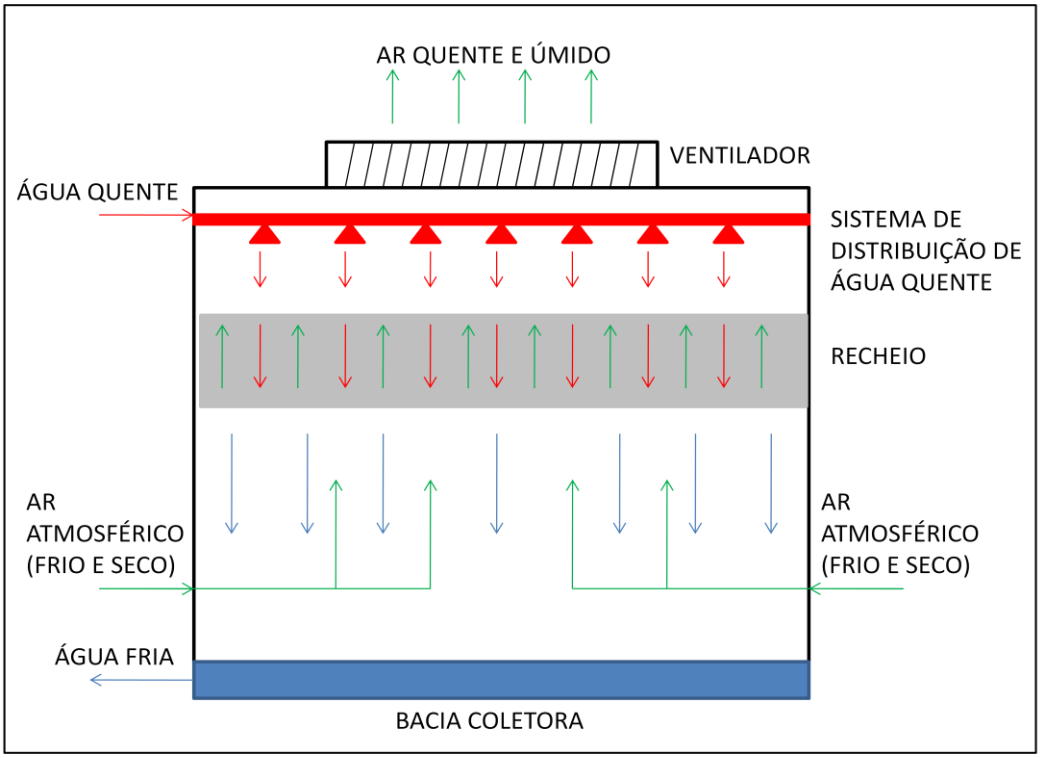

Figura 10: Torre de resfriamento com fluxo contracorrente (LIMA JÚNIOR, 2011).

2.3.4. Sistema de distribuição de água

As torres de resfriamento apresentam os sistemas de distribuição de água por gravidade e por bicos pulverizadores (sprays).

- **Distribuição de água por gravidade**

No sistema de distribuição de água por gravidade, a água quente é recolhida numa bacia localizada no topo da torre. A bacia contém orifícios, os quais possuem estruturas de aspersão e permitem um melhor espalhamento da água (LIMA JÚNIOR, 2011). Esses sistemas são normalmente utilizados em torres com fluxo cruzado, pois o escoamento da água é mais lento, e o tempo de contato com a corrente de ar é maior (SAMPAIO, 2013).

- **Distribuição de água por bicos pulverizadores**

Neste sistema de distribuição, a água quente escoa por um tubo principal constituído por uma série de bicos pulverizadores. Dessa maneira, é possível a distribuição uniforme da água pela superfície do recheio da torre (LIMA JÚNIOR, 2011). Esses sistemas são

normalmente utilizados em torres com fluxo contracorrente, pois o aumento da pressão gera maiores fluxos de água (SAMPAIO, 2013).

2.4. Princípio de funcionamento da torre de resfriamento em circuito semiaberto com recirculação da água

As torres de resfriamento com circuito semiaberto e recirculação de água são normalmente utilizadas nas refinarias de petróleo. Inicialmente, a água proveniente dos equipamentos de processo é transportada para a torre de resfriamento, a qual é formada por um recheio interno para a distribuição uniforme da água. A redução de temperatura da água ocorre, principalmente, devido à evaporação de uma parcela da água circulante (CORTINOVIS E SONG, 2005). Dessa forma, a transferência de massa da água (fase líquida) para o ar (fase gasosa) é responsável por aproximadamente 80 % do resfriamento, enquanto a transferência de calor sensível por convecção provocada pela diferença de temperatura entre o ar e a água é normalmente responsável por 20 % do calor transferido (TROVATI, 2004).

Em seguida, a água resfriada é recolhida na bacia da torre, e pode retornar aos sistemas resfriadores de processo. Além disso, a corrente de purga (*blowdown*) controla a concentração de contaminantes na água circulante, sendo encaminhada para a unidade de tratamento de efluentes. Simultaneamente, a corrente de *make-up* repõe as perdas de água por evaporação, purga e arraste de gotículas (REVISTA MEIO FILTRANTE, 2003). A Figura 11 ilustra uma torre de resfriamento com circuito semiaberto e recirculação da água.

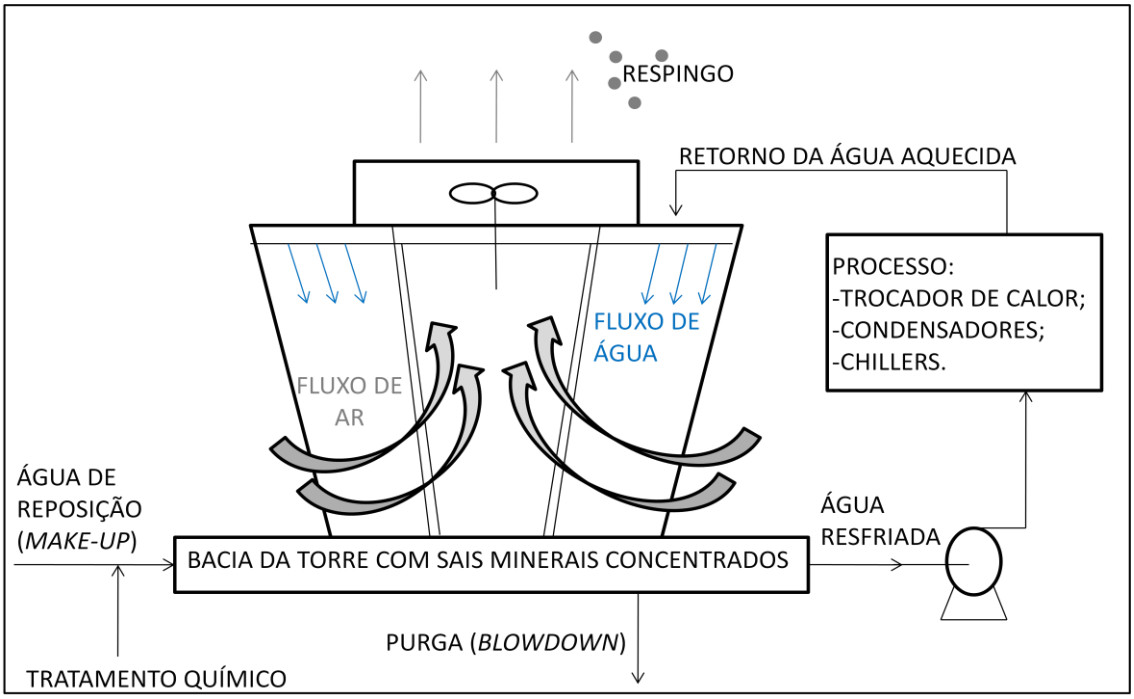

Figura 11: Representação esquemática de uma torre de resfriamento (Adaptado de REVISTA MEIO FILTRANTE, 2003).

A água circulante da torre deve ser tratada ou condicionada com produtos químicos, a fim de evitar ou minimizar incrustações, corrosão e proliferação de microorganismos. Podem ser utilizados, por exemplo, produtos químicos a base de fosfato para controlar a corrosão, e cloro gás e hipoclorito de sódio para controlar o crescimento biológico (OIKAWA, 2012). Além disso, o tratamento da água de resfriamento em torres com circuito semiaberto e recirculação da água engloba o monitoramento e controle do pH; uso de inibidores de corrosão e biocidas; uso de aditivos para evitar a precipitação de carbonato de cálcio; filtração parcial (THULUKKANAM, 2013).

O ciclo de concentração é um dos parâmetros importantes da torre de resfriamento, e indica a quantidade de vezes que a água é concentrada na torre (TROVATI, 2004). Esse termo relaciona os sólidos dissolvidos na água de *make-up* com os sólidos presentes na água que circulam na torre de resfriamento (FEMP, 2011).

2.4.1. Terminologia e definições típicas da torre de resfriamento

Para avaliar o funcionamento de uma torre de resfriamento, é importante conhecer alguns conceitos relacionados a essa tecnologia, os quais são apresentados a seguir.

- Arraste (*drift*): perda de gotículas de água que são arrastadas pela corrente de ar para a atmosfera. Para reduzir o arraste, são utilizados alguns dispositivos, como as venezianas, as quais são alocadas na entrada de ar, e os eliminadores de gotas, os quais representam um conjunto de chicanas projetado para recolher as gotículas de água presentes no ar efluente (MACHADO, 2004).

- Purga (*blowdown*): parcela da água circulante removida de maneira contínua ou intermitente, com a finalidade de controlar a concentração dos sólidos dissolvidos e outras impurezas (CTI, 2013).

- *Make-up*: água de reposição adicionada continuamente ao sistema, para compensar as perdas por evaporação, arraste, purga e vazamentos (CTI, 2013).

- Pluma: o fluxo de ar saturado que sai da torre de resfriamento, com concentração salina praticamente nula. A pluma é visível quando o seu vapor d'água se condensa em contato com o ar ambiente à temperatura menor (CTI, 2013).

- *Approach*: diferença entre a temperatura da água fria e a temperatura de bulbo úmido do ar que entra na torre (CTI, 2013). Normalmente, as torres de resfriamento apresentam um valor mínimo de *approach* igual a 2,8 °C (CTI JOURNAL, 2014).

- *Range*: diferença entre a temperatura da água quente e a temperatura da água fria (CTI, 2013).

- Carga térmica: quantidade de calor removido da água que circula no interior da torre (CTI, 2013).

- Recheio: estrutura interna da torre com a função de aumentar o tempo e a superfície de contato entre a água e o ar e, consequentemente, a transferência de massa e de calor. O recheio pode ser do tipo respingo (gotejamento) ou do tipo filme (laminar). O enchimento do tipo respingo consiste em uma série de barras com diversos arranjos a fim de gerar gotículas de água. O enchimento do tipo filme consiste em finas películas

de diferentes formas com a finalidade de espalhar a água pela superfície da torre. Como não há geração de gotículas, o enchimento do tipo filme é mais eficiente, pois permite velocidades de ar superiores, maior transferência de calor, e menor perda por arraste. Entretanto, a chance de acúmulo de sujeiras entre as placas é maior (SAMPAIO, 2013).

Além disso, os aspectos psicrométricos, relacionados às propriedades das misturas de gás e vapor, também são fundamentais na avaliação do funcionamento da torre, e estes são descritos a seguir.

- Umidade absoluta: equivale à massa de vapor de água presente na massa de ar seco, e pode ser determinada pela Equação 2.1 (PERRY, 1997):

$$UA = \frac{m_a}{m_{ar}} = \frac{M_a \cdot P_v}{M_{ar} \cdot (P_T - P_v)} \tag{2.1}$$

em que:

m_a = massa de vapor de água;

m_{ar} = massa de ar seco;

M_a = massa molar da água;

M_{ar} = massa molar do ar;

P_v = pressão parcial do vapor de água;

P_T = pressão total.

- Umidade relativa: razão entre a pressão parcial do vapor de água presente no ar e a pressão de vapor da água a uma determinada temperatura. Dessa maneira, a umidade relativa (ϕ) expressa em porcentagem é determinada pela Equação 2.2 (PERRY, 1997):

$$\phi = 100 \cdot \frac{P_v}{P_s} \tag{2.2}$$

em que:

P_s = pressão de vapor da água.

- Volume específico: equivale ao volume por massa de ar seco, e pode ser determinado pela Equação 2.3 (Smith *et al*., 2007):

$$\nu = \frac{V}{m_{ar}} \tag{2.3}$$

em que:

V= volume total do sistema.

- Entalpia do ar úmido: quantidade de calor do ar úmido a uma determinada temperatura (T) por unidade de massa de ar seco, em relação à outra temperatura de referência (T_0), geralmente 0°C. Se a capacidade de calor for invariante com a temperatura, a entalpia do ar úmido (H) pode ser obtida pela Equação 2.4 (PERRY, 2008):

$$H = (C_{Par} + C_{Pv} \cdot UA)\,(T - T_0) + \lambda_0 \cdot UA \tag{2.4}$$

em que:

C_{Par} = calor específico do ar seco;

C_{Pv} = calor específico do vapor de água;

λ_0 = calor latente da água a 0°C.

- Temperatura de bulbo seco: é a temperatura do ar indicada pelo termômetro sem qualquer fator de modificação (PERRY, 2008).

- Temperatura de bulbo úmido: é definida como a temperatura de equilíbrio dinâmico, que uma superfície totalmente úmida atinge quando a taxa de transferência de calor para a superfície por convecção é igual à taxa de resfriamento evaporativo para fora da superfície (PERRY, 2008). Dessa forma, considerando a temperatura de bulbo seco constante, o balanço de calor no equilíbrio é determinado pela Equação 2.5 (PERRY, 1997):

$$h_c \cdot (T_{db} - T_{bu}) = K \cdot \lambda \cdot (P_{sbu} - P_v) \quad (2.5)$$

em que:

h_c = coeficiente de transferência de calor;

T_{db} = temperatura de bulbo seco (da mistura de ar e vapor de água);

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido;

K = coeficiente de transferência de massa;

λ = calor latente de vaporização;

P_{sbu} = pressão de vapor da água à temperatura de bulbo úmido;

P_v = pressão parcial do vapor de água no ambiente.

- Temperatura de orvalho ou temperatura de saturação: é a temperatura na qual a mistura de ar e vapor de água torna-se saturada, estabelecendo o início da condensação. Nesta temperatura, a pressão de vapor da água equivale à pressão parcial do vapor de água na mistura (PERRY, 1997).

Dessa maneira, as condições ambientais, como a temperatura e umidade do ar, influenciam no desempenho da torre de resfriamento, e são possivelmente alteradas no decorrer do dia e durante as estações do ano (OIKAWA, 2012). Quanto mais seco estiver o ar, por exemplo, maior a taxa de evaporação da água e menor a temperatura de bulbo úmido (MACHADO, 2004).

2.4.2. Tratamento da água de resfriamento

Para evitar a corrosão e a formação de incrustações, depósitos e biodepósitos, é necessário o tratamento da água de resfriamento. O tratamento químico consiste na adição de aditivos como inibidores de corrosão, inibidores de incrustação, dispersantes e biocidas. Dessa maneira, é possível otimizar a segurança e a eficiência da operação do equipamento.

- Corrosão

A corrosão consiste na destruição de um material por meio da reação química ou eletroquímica com o ambiente (GENTIL, 2003). Em sistemas de resfriamento, a corrosão

provoca a redução da transferência de calor e pode causar falhas no equipamento, sendo necessária a sua reposição (GE, 2014).

Alguns fatores como a quantidade de oxigênio dissolvido, o teor de sólidos dissolvidos e em suspensão, o pH, e a velocidade de escoamento da água dos sistemas de resfriamento influenciam o processo de corrosão (ELKIND, 2002). Além disso, a elevação da temperatura promove o aumento da taxa de corrosão do aço. Por isso, a temperatura máxima da água de 50°C é normalmente adotada (ELKIND, 2002).

Em torres de resfriamento com recirculação, a corrosão pode ser controlada a partir da remoção do oxigênio da água, proteção catódica, e adição de inibidores de corrosão (MELLO, 2008).

Os inibidores utilizados podem ser clasificados em anódicos (nitritos, silicatos, molibdatos, ortofosfatos), catódicos (polifosfatos, fosfanatos orgânicos, zinco) e mistos (combinação de inibidores) (ELKIND, 2002).

- Depósitos e incrustações

Os depósitos são formados por materiais em suspensão, os quais se aderem fracamente à superfície, e as incrustações são formadas por material inorgânico (carbonato de cálcio, fosfato de cácio, silicato de magnésio, sílica) aderido fortemente à superfície da torre de resfriamento (ELKIND, 2002).

A formação de depósitos e incrustações é influenciada pela temperatura, velocidade de escoamento, concentração de sólidos dissolvidos, processo de corrosão, pH, entre outros fatores. E para evitar a precipitação das impurezas, são utilizados dispersantes (poliacrilatos, co-polímeros acrílico/maleico, poliamelatos, fosfonatos). Além disso, as incrustações e os depósitos também são controlados por outros tratamentos como filtração, abrandamento, deionização ou desmineralização, osmose reversa, cloração, controle do ciclo de concentração, etc. (SILVA, 2009).

O índice de saturação de Langelier (LSI), dado pela Equação 2.6, permite a previsão da tendência de precipitação ou dissolução do carbonato de cálcio. Dessa maneira, o LSI

positivo indica a tendência de deposição do carbonato de cálcio, e o LSI negativo indica a tendência de sua dissolução (GE, 2014):

$$\mathrm{LSI} = \mathrm{pH} - \mathrm{pH_s} \tag{2.6}$$

O pH de saturação ($\mathrm{pH_s}$) do carbonato de cálcio na água, no qual a água com uma dada concentração de cálcio e alcalinidade está em equilíbrio com o $CaCO_3$, é determinado pela Equação 2.7, a qual é válida no pH entre 6,5 e 9,5 (GE, 2014):

$$\mathrm{pH_s} = (\mathrm{pK_2} - \mathrm{pK_s}) + \mathrm{pCa^{+2}} + \mathrm{pAlc} \tag{2.7}$$

em que:

$\mathrm{pK_2}$= Logaritmo negativo da segunda constante de dissociação do ácido carbônico;

$\mathrm{pK_s}$= Logaritmo negativo da constante do produto de solubilidade do $CaCO_3$;

$\mathrm{pCa^{+2}}$= Logaritmo negativo da concentração de cálcio;

pAlc= Logaritmo negativo da alcalinidade total.

O pHs também é determinado pela Equação 2.8 (AQUA AMBIENTE, 2004):

$$\mathrm{pH_s} = (9{,}3 + \mathrm{A} + \mathrm{B}) - (\mathrm{C} + \mathrm{D}) \tag{2.8}$$

em que:

A=f(sólidos dissolvidos totais);

B= f(temperatura);

C= f(dureza em cálcio);

D= f(alcalinidade total).

Os coeficientes A, B, C, D podem ser determinados pelas Equações 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, respectivamente (PEREIRA, 2001 apud. MIRRE, 2012):

$$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{Log}\,(c_{SDT\ \ circula\ \ ção}) - 1}{10} \tag{2.9}$$

$$\mathrm{B} = -13{,}12 \cdot \mathrm{Log}\left(\mathrm{T_{make\ -up}} + 273\right) + 34{,}55 \tag{2.10}$$

$$\mathrm{C} = \mathrm{Log}\left(c_{Ca^{2+}circula\ ção}\right) - 0{,}4 \tag{2.11}$$

$$\mathrm{D} = \mathrm{Log}\left(c_{AT\ circula\ ção}\right) \tag{2.12}$$

em que:

$c_{SDT\ circula\ ção}$ = Sólidos dissolvidos totais na água de circulação (ppm);

$\mathrm{T}_{\mathrm{make-up}}$ = Temperatura da água de *make-up* (°C);

$c_{Ca^{2+}circula\ ção}$ = Concentração de dureza cálcica da água de circulação (ppm $CaCO_3$);

$c_{AT\ circula\ ção}$ = Alcalinidade total da água de circulação (ppm $CaCO_3$).

Os valores dos coeficientes também podem ser obtidos a partir das Tabelas A-1, A-2 e A-3 disponíveis no APÊNDICE A.

Os sólidos dissolvidos totais na água de circulação podem ser estimados pela sua condutividade elétrica, quando o pH está entre 6,5 e 8,5, como mostra a Tabela 2:

Tabela 2: Relação entre condutividade elétrica e sólidos dissolvidos (PINTO, 2006).

Condutividade (μS.cm^{-1})	**Sólidos dissolvidos (ppm)**
<1000	0,68 x condutividade
1000-4000	0,75 x condutividade
4000-10000	0,82 x condutividade

Além disso, o índice de estabilidade de Ryznar (RSI), representado pela Equação 2.13, permite a determinação da tendência corrosiva e incrustante da água (GE, 2014):

$$\mathrm{RSI} = (2 \cdot \mathrm{pH_s}) - \mathrm{pH} \tag{2.13}$$

Dessa maneira, a água apresenta características incrustantes quando RSI é menor que 6, e características corrosivas quando RSI é maior que 7.

O índice de saturação de Puckorius (IP), determinado pela Equação 2.14, também é utilizado para medir a estabilidade da água, e possui aplicação específica em sistemas de resfriamento (GENTIL, 2003):

$$\mathrm{IP} = (2 \cdot \mathrm{pH_s}) - \mathrm{pH_{eq}} \tag{2.14}$$

$$\mathrm{pH_{eq}} = 1{,}47 \cdot \mathrm{Log}(c_{AT}) + 4{,}54 \tag{2.15}$$

Dessa forma, a água é estável quando IP está entre 6 e 7, pois apresenta características incrustantes quando IP é menor que 6, e características corrosivas quando IP é maior que sete.

- Biodepósitos

Os fungos, as algas e bactérias podem formar biodepósitos, os quais deterioram o equipamento, causam obstrução do recheio da torre e da tubulação de distribuição, reduzem a eficiência da troca térmica, entre outros (SILVA, 2009).

Dessa forma, a velocidade mínima da água de escoamento igual a 0,5 m/s é estabelecida para evitar a formação de biofilmes (TROVATI, 2004). Além do controle de variáveis, como a velocidade de escoamento da água, e do processo de filtração, é necessário utilizar biocidas e biodispersantes, pois são produtos adequados para controlar a população microbiana no sistema de resfriamento. Os biocidas são classificados em oxidantes (hipoclorito de sódio, ácido hipobromoso, dióxido de cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio) e não oxidantes (sulfato de tetrakis-hidroximetil-fosfônio (THPS), 2,2-dibromo-3-nitrilopropionamida (DBNPA)), e os biodispersantes facilitam a sua penetração no limo microbiano (SILVA, 2009).

2.5. Balanços de massa e energia da torre de resfriamento

Além dos conceitos relacionados às torres de resfriamento, é importante avaliar as equações presentes na transferência de calor e massa a fim de verificar o seu funcionamento.

2.5.1. Balanço de massa

O balanço de massa de água em uma torre de resfriamento contempla as correntes de água de make-up, evaporação, arraste e purga. Essas correntes estão representadas na Figura 12.

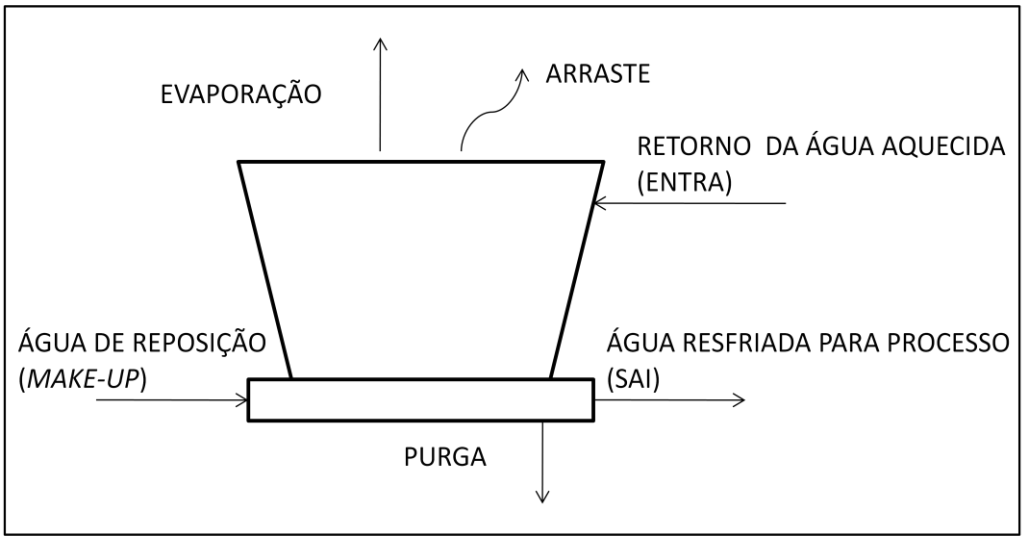

Figura 12: Fluxos de água na torre de resfriamento (Adaptado de REVISTA MEIO FILTRANTE, 2003).

Considerando as perdas por evaporação e as trocas térmicas entre a água e o ar, o balanço de massa global em uma torre de resfriamento operando em regime estacionário é dado pelas Equações 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19:

$$\dot{m}_{ar\ seco\ entra} = \dot{m}_{ar\ seco\ sai} \tag{2.16}$$

$$\dot{m}_{água\ entra} + \dot{m}_{água\ make-up} + \dot{m}_{ar\ úmido\ entra} = \dot{m}_{perdas\ fase\ líquida} + \dot{m}_{ar\ úmido\ sai} + \dot{m}_{água\ sai} \tag{2.17}$$

$$\dot{m}_{perdas\ fase\ líquida} = \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{purga} + \dot{m}_{vazamento} \tag{2.18}$$

$$\dot{m}_{evaporação} = \dot{m}_{ar\ úmido\ sai} - \dot{m}_{ar\ úmido\ entra} \tag{2.19}$$

em que:

$\dot{m}_{ar\ seco\ entra}$ = vazão mássica de ar seco que entra na torre;

$\dot{m}_{ar\ seco\ sai}$ = vazão mássica de ar seco que sai da torre;

$\dot{m}_{água\ entra}$ = vazão mássica da água que entra na torre;

$\dot{m}_{água\ make-up}$ = vazão mássica da água de *make-up*;

$\dot{m}_{ar\ úmido\ entra}$ = vazão mássica de ar úmido que entra da torre;

$\dot{m}_{perdas\ fase\ líquida}$ = vazão mássica das perdas de fase líquida na torre;

$\dot{m}_{água\ sai}$ = vazão mássica da água que sai da torre;

$\dot{m}_{ar\ úmido\ sai}$ = vazão mássica do ar úmido que sai da torre.

$\dot{m}_{arraste}$ = vazão mássica da perda por arraste;

$\dot{m}_{purga}$ = vazão mássica de purga;

$\dot{m}_{vazamento}$ = vazão mássica de vazamento;

$\dot{m}_{evaporação}$ = vazão mássica de evaporação.

A água de make-up é utilizada para repor as perdas da corrente de entrada de água aquecida, causadas por evaporação, purga e arraste. Dessa maneira, a vazão da água de *make-up* é determinada pela Equação 2.20 (PEREIRA, 2001):

$$\dot{m}_{água\ make-up} = \dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vazamento} + \dot{m}_{evaporação} \qquad (2.20)$$

A equação da água de *make-up* também pode ser escrita para os sais dissolvidos, como mostra a Equação 2.21:

$$\dot{m}_{água\ make-up} \cdot c_m = c_p \cdot \dot{m}_{purga} + c_a \cdot \dot{m}_{arraste} + c_v \cdot \dot{m}_{vazamento} + c_e \cdot \dot{m}_{evaporação} \qquad (2.21)$$

em que:

c_m = concentração salina na corrente de *make-up*;

c_p = concentração salina na corrente de purga;

c_a = concentração salina na corrente de arraste;

c_v = concentração salina na corrente de vazamento;

c_e = concentração salina na corrente de evaporação.

A Equação 2.22 é obtida, considerando a concentração salina na água de evaporação (c_e) nula, e as concentrações salinas nas correntes de purga (c_p), arraste (c_a) e vazamento (c_v) iguais a c_s (PEREIRA, 2001):

$$\dot{m}_{água\ make-up} \cdot c_m = c_s \cdot (\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vazamento}) \qquad (2.22)$$

No equilíbrio, a carga da corrente de *make-up* equivale à carga da corrente de água removida (purga e arraste), desprezando sua perda por evaporação devido à concentração de sais nula (componente solúvel e não volátil). Dessa forma, o ciclo de concentração (CC), o qual consiste na quantidade de vezes que a água é concentrada no sistema, é dado pela Equação 2.23 (MANCUSO, 2001):

$$\mathrm{CC} = \frac{\mathrm{c_s}}{\mathrm{c_m}} = \text{constante} \tag{2.23}$$

Segundo Perry (1997), a vazão da água evaporada pode ser estimada pela Equação 2.24, que é empírica, devido à variação da vazão da água de evaporação de acordo com o clima.

$$\dot{m}_{evapora\ ção} = 0{,}00153 \cdot \dot{m}_w \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{2.24}$$

A vazão da água evaporada também pode ser calculada a partir da vazão mássica do ar seco ($\dot{m}_{ar}$) e da umidade das correntes de ar na entrada ($\mathrm{UA_{entrada}}$) e na saída ($\mathrm{UA_{saída}}$) da torre, como mostra a Equação 2.25 (SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010):

$$\dot{m}_{evapora\ ção} = \dot{m}_{ar} \cdot (\mathrm{UA_{saída}} - \mathrm{UA_{entrada}}) \tag{2.25}$$

Além disso, a vazão de água de arraste pode ser estimada pela Equação 2.26, que é empírica, devido à variação da vazão da água de arraste de acordo com o modelo do eliminador de gotas da torre de resfriamento (PERRY, 2008):

$$\dot{m}_{arraste} = 0.001\, \dot{m}_w \tag{2.26}$$

Com as Equações 2.22 e 2.23, a vazão da corrente de purga pode ser determinada a partir da equação do ciclo de concentração, ou seja, a razão entre os sais dissolvidos na água circulante e os sais dissolvidos na água de *make-up*, como mostram as Equações 2.27 e 2.28 (PEREIRA, 2001):

$$\mathrm{CC} = \frac{(\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{evapor\ ação} + \dot{m}_{vazamento})}{(\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vazamento})} \tag{2.27}$$

$$\dot{m}_{purga} = \frac{\dot{m}_{evaporação} - (CC-1)\cdot\dot{m}_{arraste} - (CC-1)\cdot\dot{m}_{vazamento}}{(CC-1)} \quad (2.28)$$

A carga térmica (Q) removida na torre de resfriamento é dada pela Equação 2.29 (SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010):

$$Q = C_{p\ água\ entra} \cdot \dot{m}_{água\ entra} \cdot T_{w1} - C_{p\ água\ sai} \cdot \dot{m}_{água\ sai} \cdot T_{w2} \quad (2.29)$$

Além disso, a eficiência da torre de resfriamento depende da temperatura de bulbo úmido e das temperaturas de entrada e saída da torre, e é dada pela Equação 2.30 (HUCHLER, 2009):

$$\eta = \frac{(T_{W1} - T_{W2})}{(T_{W1} - Tbu)} \cdot 100 \quad (2.30)$$

em que:

η = eficiência da torre de resfriamento (%).

2.5.2. Balanço de energia

O balanço de energia considera uma torre de resfriamento com fluxo contracorrente, temperatura da água maior do que a temperatura do ar, e um volume de controle com altura infinitesimal dZ, sendo Z a altura do recheio. Na Figura 13, estão representadas a corrente de água (com vazão $\dot{m}_w$, temperaturas de entrada T_{w1} e saída T_{w2}) e a corrente de ar (com vazão $\dot{m}_{ar}$, temperaturas de entrada T_{ar1} e saída T_{ar2}, entalpias de entrada H_{ar1} e saída H_{ar2}, e temperatura de bulbo úmido na entrada $T_{bu\ ent}$).

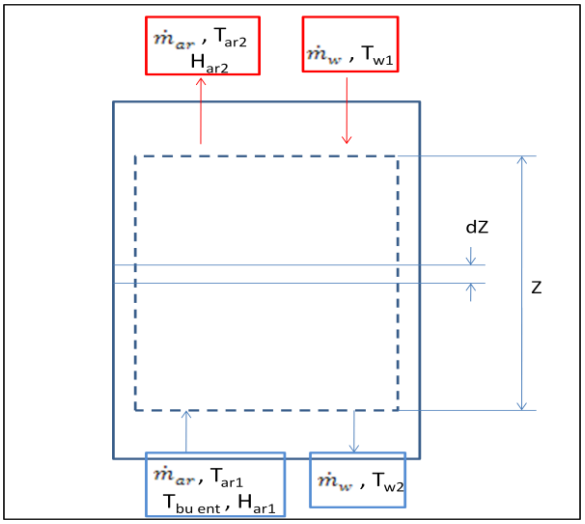

Figura 13: Volume de controle da torre de resfriamento com escoamento água/ar contracorrente (Adaptado de SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010).

O balanço de energia no volume de controle apresentado na Figura 13 é dado pela Equação 2.31 (MCCABE *et al*., 1993):

$$G_{ar} \cdot dH_{ar} = G_w \cdot dH_w \tag{2.31}$$

em que:

G_{ar} = Fluxo mássico do ar;

G_w = Fluxo mássico da água.

Segundo a teoria de Merkel, a transferência de calor na torre de resfriamento utiliza a diferença de entalpia como força motriz (PERRY, 2008). Além disso, esta teoria considera a existência de uma película de ar saturado envolvendo as gotículas de água, que possui a mesma temperatura da gota. Sendo assim, há diferença de entalpia entre a película de ar e o ar da região em torno da gota, a qual gera a força motriz do processo de resfriamento. A integração da equação de Merkel é dada pela Equação 2.32 (PERRY, 2008):

$$Me = \frac{K \cdot a_{fi} \cdot V_e}{\dot{m}_w} = \int_{T_{w2}}^{T_{w1}} \frac{C_{pw} \cdot dT}{(H'_{ar} - H_{ar})} \tag{2.32}$$

em que:

Me = número de Merkel;

K = coeficiente de transferência de massa;

a_{fi} = área de contato por unidade de volume;

V_e = volume efetivo de resfriamento;

C_{pw} = calor específico da água;

H'_{ar} = entalpia do ar saturado na temperatura da água;

H_{ar} = entalpia da corrente de ar;

T_{W1}= Temperatura de entrada da água;

T_{W2}= Temperatura de saída da água.

Além disso, o número de Merkel (Me) também pode ser calculado pela Equação 2.33 (SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010):

$$\mathrm{Me} = \frac{\mathrm{K} \cdot \mathrm{a_{fi}} \cdot \mathrm{A_{fr}} \cdot \mathrm{Z}}{\dot{m}_w} = \frac{\mathrm{K} \cdot \mathrm{a_{fi}} \cdot \mathrm{Z}}{\mathrm{G_w}} \tag{2.33}$$

em que:

A_{fr} = área da seção transversal da torre de resfriamento;

Z= altura do recheio da torre.

Dessa maneira, os termos do lado direito da Equação 2.32 dependem apenas das propriedades do ar e da água, as quais estão representadas no gráfico da Figura 14.

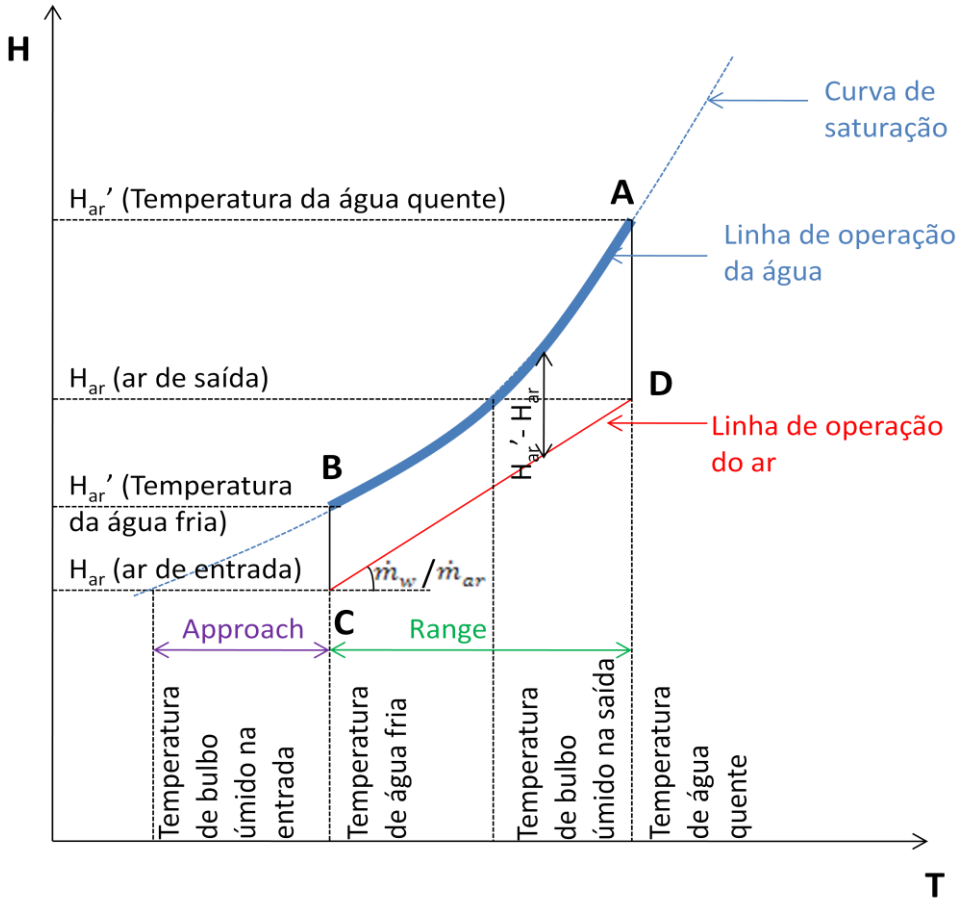

Figura 14: Balanço térmico em uma torre de resfriamento com fluxo contracorrente (Adaptado de PERRY, 2008).

Na Figura 14, a curva superior representa a entalpia do ar saturado ($H_{ar}^{'}$) em função da temperatura da água, enquanto a reta CD é a linha de operação do ar resultante do balanço global de energia da torre, dado pela Equação 2.34 (SERNA-GONZÁLEZ *et al.*, 2010):

$$C_{pw} \cdot \dot{m}_w \cdot (T_{w1} - T_{w2}) = \dot{m}_{ar} \cdot (H_{ar2} - H_{ar1}) \tag{2.34}$$

Além disso, a linha de operação da água AB é traçada pelas temperaturas de entrada e saída da torre, e a linha BC representa a força motriz inicial ($H_{ar}^{'} - H_{ar}$). A inclinação da linha de operação do ar (CD) corresponde à razão das vazões de líquido e gás ($\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$). E a temperatura de bulbo úmido é determinada a partir da projeção horizontal do ponto da linha de operação CD sobre a curva de saturação (PERRY, 2008).

A área ABCD, conhecida como “característica da torre”, representa a integral presente na Equação 2.32, e pode variar de acordo com a razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$. O termo $\frac{K \cdot a_{fi} \cdot V_e}{\dot{m}_w}$, o qual representa o número de unidades de transferência (NUT), é um número adimensional, e pode ser determinado a partir da resolução da integral pelo método da quadratura de Chebyshev com quatro pontos, como mostra a Equação 2.35 (PERRY, 2008):

$$NUT = \frac{K \cdot a_{fi} \cdot V_e}{\dot{m}_w} = \int_{T_{w2}}^{T_{w1}} \frac{C_{pw} \cdot dT}{(H_w - H_a)} \cong \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{4} \cdot C_{pw} \cdot \left(\frac{1}{\Delta H_1} + \frac{1}{\Delta H_2} + \frac{1}{\Delta H_3} + \frac{1}{\Delta H_4}\right) \quad (2.35)$$

em que:

ΔH_1 = valor de (H_w - H_a) na Temperatura T_{w2} + 0,1 (T_{w1} – T_{w2});

ΔH_2 = valor de (H_w - H_a) na Temperatura T_{w2} + 0,4 (T_{w1} – T_{w2});

ΔH_3 = valor de (H_w- H_a) na Temperatura T_{w1} – 0,4 (T_{w1} – T_{w2});

ΔH_4 = valor de (H_w - H_a) na Temperatura T_{w1} – 0,1 (T_{w1} – T_{w2});

H_w = entalpia específica da mistura ar-água na temperatura do seio do líquido;

H_a = entalpia específica da mistura ar-água na temperatura de bulbo úmido.

Em torres de resfriamento com fluxo cruzado, existe um fator F para corrigir o valor do coeficiente de transferência de massa de uma torre com fluxo contracorrente, expresso nas Equações 2.36 e 2.37 (FUJITA E TEZUKA, 1986 apud. LIMA JÚNIOR, 2011). Dessa maneira, o valor de NUT pode ser expresso pela equação 2.38.

$$(K \cdot a_{fi})_{cruzado} = \frac{(K \cdot a_{fi})_{contracorrente}}{F} \quad (2.36)$$

$$FC = 1 - 0{,}106 \cdot \left(1 - \frac{H'_{ar\,2} - H_{ar\,2}}{H'_{ar\,1} - H_{ar\,1}}\right)^{3{,}5} \quad (2.37)$$

$$NUT_{cruzado} = \frac{NUT_{\,contracorrrente}}{FC} \quad (2.38)$$

2.6. Dosagem de produtos químicos

Os produtos químicos inibidores de corrosão, incrustações e crescimento biológico podem sair do sistema pela corrente de purga e pelos respingos. Portanto, a dosagem contínua de um determinado aditivo químico na água de resfriamento pode ser calculada pela Equação 2.39 (TROVATI, 2004):

$$W = \frac{C_{aditivo} \cdot (\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento})}{1000} = \frac{C_{aditivo} \cdot \dot{Q}_{água\ make-up}}{(CC \cdot 1000)} = \frac{C_{aditivo} \cdot \dot{Q}_{evaporação}}{((CC-1) \cdot 1000)} \quad (2.39)$$

em que:

W = vazão mássica de aditivos químicos (dosagem contínua);

$C_{aditivo}$ = Concentração desejada de aditivo químico;

$\dot{Q}_{arraste}$ = vazão volumétrica da perda por arraste;

$\dot{Q}_{água\ make-up}$ = vazão volumétrica da água de *make-up*;

$\dot{Q}_{evaporação}$ = vazão volumétrica de evaporação;

$\dot{Q}_{purga}$ = vazão volumétrica de purga;

$\dot{Q}_{vazamento}$ = vazão volumétrica de vazamento.

Para alguns aditivos químicos, como inibidores de corrosão anódicos e catódicos e microbicidas não oxidantes, é empregada a dosagem de choque, dada pela Equação 2.40 (PEREIRA, 2001):

$$Dc = \frac{C_{aditivo} \cdot V_a}{1000} \quad (2.40)$$

em que:

Dc= dosagem de choque;

V_a = volume de água na torre.

Na dosagem de choque, a concentração do produto químico diminui em função do tempo, conforme as Equações 2.41, 2.42 e 2.43 (PEREIRA, 2001):

$$\ln \frac{c_i}{c_f} = k_d \cdot t_d \quad (2.41)$$

$$2{,}30 \cdot \log \frac{c_i}{c_f} = k_d \cdot t_d \tag{2.42}$$

$$k_d = \frac{\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento}}{V_a} = \frac{\dot{Q}_{evaporação}}{V_a \cdot (CC-1)} \tag{2.43}$$

em que:

c_i = concentração inicial do produto químico;

c_f = concentração do produto após um tempo t;

k_d = constante;

t_d = tempo decorrido após a dosagem de choque.

Os tempos de meia vida e de um quarto de vida dos aditivos químicos são dados, respectivamente, pelas Equações 2.44 e 2.45 (PEREIRA, 2001):

$$t_{\frac{1}{2}} = 0{,}690 \cdot \frac{V_a}{\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento}} \tag{2.44}$$

$$t_{\frac{1}{4}} = 1{,}38 \cdot \frac{V_a}{\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento}} \tag{2.45}$$

Normalmente, o intervalo de tempo entre duas adições de choque de microbicidas é considerado igual ao tempo de um quarto de vida, enquanto o intervalo de tempo entre a dosagem de choque inicial e a dosagem de manutenção de um inibidor de corrosão é considerado igual ao tempo de meia vida, conforme as Equações 2.46 e 2.47 (PEREIRA, 2001):

$$\Delta t_{\text{microbicida}} = 1{,}38 \cdot \frac{V_a}{\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento}} = 1{,}38 \cdot \frac{V_a \cdot (CC-1)}{\dot{Q}_{evaporação}} \tag{2.46}$$

$$\Delta t_{\text{inibidor corrosão}} = 0{,}69 \cdot \frac{V_a}{\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento}} = 0{,}69 \cdot \frac{V \cdot (CC-1)}{\dot{Q}_{evaporação}} \tag{2.47}$$

O processo de cloração, utilizado no controle do crescimento microbiológico, é realizado por meio de uma técnica, na qual o tempo de cloração é obtido a partir das Equações 2.48, 2.49, 2.50 e 2.51 (PEREIRA, 2001):

$$t_c = \frac{V_a}{\dot{Q}_w} \tag{2.48}$$

$$t_{teórico} = 3 \cdot t_c \tag{2.49}$$

$$\dot{Q}_{teórico} \cong \frac{\dot{Q}_w \cdot c_{Cl_2}}{1000 \cdot \%p/p} \tag{2.50}$$

$$\dot{Q}_{teórico} \cdot t_{teórico} = \dot{Q}_{disponível} \cdot t_{cloração} \tag{2.51}$$

em que:

c_{Cl_2}= concentração de cloro residual livre;

t_c= tempo de ciclo;

$t_{teórico}$ = tempo teórico de cloração;

$\dot{Q}_{teórico}$ = vazão teórica do hipoclorador;

$\dot{Q}_{disponível}$ = vazão disponível do sistema hipoclorador;

$\%p/p$= porcentagem em massa de cloro ativo na solução;

$t_{cloração}$ = tempo real de cloração, contado a partir da obtenção do nível de cloro residual livre desejado.

2.7. Ciclo de concentração

O ciclo de concentração pode ser determinado pela relação da concentração dos íons na água de circulação e na água de reposição. Dessa maneira, é possível limitar o ciclo máximo de concentração a partir das espécies contaminantes presentes na água de resfriamento.

Elevadas concentrações de sílica, por exemplo, causam incrustações. Por isso, a concentração de sílica na água de circulação deve ser inferior a 180 ppm SiO_2. Portanto, o ciclo máximo de concentração (CC_{max}) em sílica é dado pela Equação 2.52 (PEREIRA, 2001):

$$CC_{max} = \frac{180}{(c_{SiO_2 make-up})} \tag{2.52}$$

em que:

$c_{SiO_2 make-up}$ = concentração de sílica na água de *make-up* (ppm SiO_2).

Altas concentrações de sulfato de cálcio também formam depósitos, e o ciclo de concentração máximo em sulfato de cálcio é estimado pela Equação 2.53 (PEREIRA, 2001):

$$\mathrm{CC_{max}} = \frac{480}{\sqrt{(c_{Ca^{2+}make-up} \cdot c_{SO_4^{2-}make-up})}} \tag{2.53}$$

em que:

$c_{Ca^{2+}make-up}$ = concentração de cálcio na água de *make-up* (ppm $CaCO_3$);

$c_{SO_4^{2-}make-up}$ = concentração de sulfato na água de *make-up* (ppm SO_4).

Além disso, o ciclo de concentração ideal pode ser determinado com base no índice de estabilidade de Puckorius, o qual deve estar entre 6,3 e 6,8. O ciclo de concentração ideal ($\mathrm{CC_{ideal}}$) também pode ser calculado pela Equação 2.54, desenvolvida por Pereira (2001):

$$\mathrm{CC_{ideal}} = 10^{\left(\frac{12{,}1-2\cdot\log c_{Ca^{2+}make-up} - 3{,}5\cdot\log c_{AT\ make-up}}{5{,}5}\right)} \tag{2.54}$$

2.8. Custos da torre de resfriamento

Visto que as torres de resfriamento são bastante utilizadas nas refinarias de petróleo e outros setores industriais e comerciais, é importante determinar o custo desta tecnologia e minimizá-lo.

Na análise econômica das torres de resfriamento, deve ser considerado o custo total ($\mathrm{Custo_{TOT}}$), o qual inclui o custo de capital (CAPEX) e o custo operacional (OPEX):

$$\mathrm{Custo_{TOT}} = \mathrm{CAPEX} + \mathrm{OPEX} \tag{2.55}$$

Os custos de capital incluem (OMNI, 1989):

- Custo da torre de resfriamento;
- Custo dos motores e bombas;
- Custo da bacia coletora de água fria;

- Custo do sistema elétrico (fiação elétrica, painel de comando, chaves de partida e controles);
- Custo da tubulação (entrada e saída de água, dreno, etc.) e válvulas (de fechamento e controle de vazão).

Além disso, os custos operacionais incluem (SAMPAIO, 2013):

- Custo da energia elétrica (consumida por ventiladores e bombas);
- Custo de manutenção;
- Custo de tratamento químico para evitar corrosão, incrustação, depósitos e biodepósitos;
- Custo da água de *make-up*;
- Custos com os trabalhadores.

Dada a importância da minimização dos custos totais de torres de resfriamento, alguns trabalhos foram realizados com este objetivo. Kim *et al*. (2001) realizaram um estudo para otimizar o projeto de uma torre de resfriamento, determinando o sistema mais econômico. Dessa forma, o custo de capital e o custo operacional (composto pelo custo de energia elétrica consumida pelo ventilador e pela bomba) podem ser estimados pelas Equações 2.56 e 2.57, respectivamente (Kim *et al*., 2001):

$$\mathrm{CAPEX} = \mathrm{F} \cdot 148{,}05 \cdot (3{,}67 \cdot \dot{m}_w)^{0{,}79} \cdot (0{,}12 \cdot \mathrm{R})^{0{,}57} \cdot (0{,}18 \cdot \mathrm{Ap})^{-0{,}9924} \cdot (0{,}022 \cdot \mathrm{T_{bu}} + 0{,}39)^{2{,}447} \quad (2.56)$$

em que:

CAPEX = Custo de capital (£ . ano^{-1});

$\dot{m}_w$ = Vazão mássica da corrente de água (t . h^{-1});

F= Fator de anualização;

R= *Range* (ºC);

Ap=*Approach* (ºC);

T_{bu} = Temperatura de bulbo úmido (ºC).

$$\mathrm{OPEX} = \mathrm{Custo_B} + \mathrm{Custo_V} \quad (2.57)$$

em que:

Custo_B = Custo operacional com o bombeamento de água de resfriamento (£ . ano^{-1});
Custo_V = Custo operacional com ventilador (£ . ano^{-1}) .

Além disso, Cortinovis *et al.* (2009) desenvolveram um modelo para minimizar os custos operacionais de um sistema composto pela torre de resfriamento e uma série de trocadores de calor. A função objetivo, representada pela Equação 2.58, consiste na adição do custo de eletricidade consumida pelas bombas e ventiladores, representado na Equação 2.59, e da água de *make-up*. Neste estudo, as variáveis consideradas mais importantes para a redução do custo operacional foram a vazão da água de recirculação, a vazão do ar, e a remoção forçada de uma parte da água que entra na torre com a água de *make-up*.

$$\text{OPEX} = \text{Custo}_{água\ make-up} \cdot \dot{Q}_{água\ make-up} + \text{Custo}_{\text{elet}} \cdot \text{E}_\text{e} \tag{2.58}$$

$$\text{E}_\text{e} = \text{POW}_\text{p} + \text{POW}_\text{f} \tag{2.59}$$

em que:
OPEX= custo operacional (US$. h^{-1});
$\text{Custo}_{água\ make-up}$ = custo da água de *make-up* (US$. m^{-3});
$\text{Custo}_{\text{elet}}$ = custo de eletricidade (US$. kWh^{-1});
E_e= energia elétrica (kW);
POW_p = Energia elétrica consumida pela bomba (kW);
POW_f = Energia elétrica consumida pelo ventilador (kW).

No trabalho de Serna-González *et al.* (2010), foi desenvolvido um modelo para minimizar o custo total anual de uma torre de resfriamento com fluxo contracorrente, utilizando programação não linear inteira mista (MINLP). As variáveis inteiras são os coeficientes usados para selecionar o tipo de recheio (*film*, *splash*, e *trickle*), influenciando o custo relacionado ao volume do recheio da torre, a perda de carga no recheio, e o NUT. Neste estudo, o custo total anual incluiu o custo de capital, obtido pela Equação 2.60 (KINTNER-MEYER E EMERY, 1995 apud SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010), e o custo operacional, calculado pela Equação 2.61 (SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010). Os resultados obtidos mostraram que os custos operacionais são proporcionais ao *range*, enquanto o CAPEX

depende da relação ótima entre o *range* e a vazão de ar. Além disso, a área do recheio da torre foi considerada uma variável importante que influencia o custo total anual.

$$\mathrm{CAPEX} = \mathrm{Custo}_{\mathrm{CTF}} + \mathrm{Custo}_{\mathrm{CTV}} \cdot \mathrm{A_{fr}} \cdot \mathrm{Z} + \mathrm{Custo}_{\mathrm{CTMA}} \cdot \dot{m}_{ar} \tag{2.60}$$

em que:

$\mathrm{Custo}_{\mathrm{CTF}}$ = custo fixo da torre de resfriamento (US$);

$\mathrm{Custo}_{\mathrm{CTV}}$ = custo relacionado ao volume do recheio da torre (US$. m^{-3});

$\mathrm{Custo}_{\mathrm{CTMA}}$ = custo relacionado à vazão mássica de ar (US$ .s. kg^{-1}).

$$\mathrm{OPEX} = \mathrm{H_Y} \cdot \mathrm{Custo}_{água\ make-up} \cdot \dot{m}_{água\ make-up} + \mathrm{H_Y} \cdot \mathrm{Custo_{elet}} \cdot \mathrm{POW_f} \tag{2.61}$$

em que:

$\mathrm{H_Y}$ = tempo de operação anual (h. ano^{-1}).

2.9. Otimização da torre de resfriamento

Alguns trabalhos da literatura relatam a otimização de torres de resfriamento, como por exemplo, Castro et al. (2000), Kim *et al*. (2001), Cortinovis et al. (2009), Serna-González et al. (2010) e Souza (2010).

Castro et al. (2000) desenvolveram um modelo de minimização do custo operacional da torre de resfriamento em conjunto com trocadores de calor, incluindo o custo energético e custo da água de *make-up*. Neste trabalho, foi utilizada programação não linear, e os resultados indicaram que a remoção forçada de uma parte da água que entra na torre com a água de *make-up* é uma solução ótima para situações que exigem remoção adicional de calor. Além disso, os estudos de caso mostraram que a temperatura de bulbo úmido é a variável que mais influencia o desempenho da torre.

Kim *et al*. (2001) realizaram a otimização do uma torre de resfriamento, determinando o custo total mínimo do sistema. A partir do custo de capital (função da vazão de circulação de água de resfriamento, *range* e *approach*) e do custo operacional (energia elétrica consumida pelo ventilador e pela bomba), foram determinadas as condições ótimas. Dessa

maneira, foi verificado que o custo total mínimo nem sempre será obtido com a vazão mínima de água.

Cortinovis *et al.* (2009) desenvolveram um modelo de minimização dos custos operacionais de um sistema composto pela torre de resfriamento com fluxo cruzado e uma série de trocadores de calor, a partir da programação não linear. A função objetivo consistiu na adição dos custos de energia consumida pelas bombas e ventiladores, e da água de *make-up*. A partir dos estudos de caso, as variáveis consideradas mais importantes para a redução do custo operacional foram a vazão da água de recirculação, a vazão do ar, e a remoção forçada de uma parte da água que entra na torre com a água de *make-up*.

No trabalho de Serna-González *et al.* (2010), foi desenvolvido um modelo para minimizar o custo total anual de uma torre de resfriamento com fluxo contracorrente, utilizando programação não linear inteira mista (MINLP). Neste estudo, a função objetivo inclui o custo de capital e o custo operacional. Os resultados obtidos mostraram que os custos operacionais são proporcionais ao *range*, enquanto o CAPEX depende da relação ótima entre o *range* e a vazão de ar. Além disso, a área do recheio da torre foi considerada uma variável importante que influencia o custo total anual.

Souza (2010) utilizou programação linear para minimizar o custo de operação da torre de resfriamento, incluindo o custo de captação de água, o custo do envio do efluente para tratamento e o custo de tratamento de água. Devido ao elevado custo de tratamento de água, o custo de operação ótimo foi obtido para vazão mínima da corrente de purga e, consequentemente, ciclo de concentração máximo.

Dessa forma, todos os trabalhos avaliaram o custo operacional da torre de resfriamento. Entretanto, não foi considerado o custo de aditivos, que são importantes para evitar a formação de depósitos, incrustação, corrosão e biodepósitos, e prolongam o tempo de vida útil da torre.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, o modelo matemático para a torre de resfriamento e o modelo de otimização abordados neste trabalho são apresentados. Além disso, são apresentados os estudos de caso.

3.1. Modelo Matemático

O modelo matemático da torre de resfriamento é importante para descrever e prever seu comportamento em determinadas condições operacionais.

O número de unidades de transferência requerido pelo sistema ($NUT_{requerido}$) pode ser calculado pela resolução da integral pelo método da quadratura de Chebyshev com quatro pontos, conforme a Equação 3.1:

$$NUT_{requerido} = \frac{K \cdot a_{fi} \cdot V_e}{\dot{m}_w} = \int_{T_{w2}}^{T_{w1}} \frac{C_{pw} \cdot dT}{(H_w - H_a)} \cong \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{4} \cdot C_{pw} \cdot \left(\frac{1}{\Delta H_1} + \frac{1}{\Delta H_2} + \frac{1}{\Delta H_3} + \frac{1}{\Delta H_4}\right) \quad (3.1)$$

Para calcular o valor de NUT, as entalpias específicas da mistura ar-água na temperatura do seio do líquido (H_w) e na temperatura de bulbo úmido (H_a) foram determinadas nas temperaturas representadas pelas Equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5:

$$T_1 = T_{w2} + 0{,}1 \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (3.2)$$

$$T_2 = T_{w2} + 0{,}4 \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (3.3)$$

$$T_3 = T_{w1} - 0{,}4 \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (3.4)$$

$$T_4 = T_{w1} - 0{,}1 \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (3.5)$$

Duarte e Nascimento (2015) realizaram um projeto de uma torre de resfriamento de fluxo contracorrente, incluindo as equações das propriedades do ar e os cálculos do número de unidades de transferência. Dessa forma, as entalpias necessárias para o cálculo do NUT foram calculadas a partir das propriedades do ar. As equações utilizadas estão descritas a seguir.

- **Cálculo da entalpia da mistura ar-água na temperatura de bulbo úmido na entrada**

A entalpia da mistura ar-água na temperatura de bulbo úmido na entrada é função da temperatura de bulbo úmido, umidade absoluta, temperatura de orvalho, e calor latente de vaporização ou de sublimação no ponto de orvalho.

- **Cálculo da pressão parcial do vapor de água na temperatura de bulbo úmido na entrada**

A partir da definição da temperatura de bulbo úmido, e considerando o ar saturado, a pressão parcial do vapor de água (P_v), que foi considerada equivalente à pressão de vapor da água (P_{sbu}), é calculada pela Equação 3.6 (BROOKER, 1967 apud. ASAE, 1998) ou Equação 3.7 (adaptado de KEENAN E KEYES, 1936 apud. ASAE, 1998):

$$\ln P_v = \ln P_{s\,bu} = 31{,}9602 - \frac{6270{,}3605}{T_{bu}} - 0{,}46057 \cdot \ln T_{bu} \tag{3.6}$$

$255{,}38 \leq T_{bu} \leq 273{,}16$

$$\ln \frac{P_v}{R} = \ln \frac{P_{sbu}}{R} = \frac{A + B \cdot T_{bu} + C \cdot T_{bu}^2 + D \cdot T_{bu}^3 + E \cdot T_{bu}^4}{F \cdot T_{bu} - G \cdot T_{bu}^2} \tag{3.7}$$

$273{,}16 \leq T_{bu} \leq 533{,}16$

em que:

R = 22.105.649,25;

A = -27.405,526;

B = 97,5413;

C = -0,146244;

D = 0,12558 x 10^{-3};

E = -0,48502 x 10^{-7};

F = 4,34903;

G = 0,39381 x 10^{-2}.

- **Cálculo da umidade absoluta na temperatura de bulbo úmido na entrada ($UA_{entrada}$) e da temperatura de orvalho (T_{po})**

A partir da pressão de vapor da água, a umidade absoluta na temperatura de bulbo úmido na entrada ($UA_{entrada}$) e a temperatura de orvalho (T_{po}) são calculadas, respectivamente, pelas Equações 3.8 e 3.9 (ASHRAE, 2001):

$$UA_{entrada} = \frac{0{,}6219 \cdot P_{sbu}}{P_{atm} - P_{sbu}} \quad (3.8)$$

$255{,}38 \leq T_{bu} \leq 533{,}16$

$P_{sbu} < P_{atm}$

$$T_{po} = \{[C_{14} + C_{15} \cdot \ln(P_{sbu} \cdot 1{,}4503 \cdot 10^{-4}) + C_{16} \cdot [\ln(P_{sbu} \cdot 1{,}4503 * 10^{-4})]^2 + C_{17} \cdot [\ln(P_{sbu} \cdot 1{,}4503 \cdot 10^{-4})]^3 + C_{18} \cdot (P_{sbu} \cdot 1{,}4503 \cdot 10^{-4})^{0{,}1984}] + 459{,}67\} \cdot \frac{5}{9} \quad (3.9)$$

$273{,}16 \leq T_{po} \leq 366{,}48$

em que:

$C_{14} = 100{,}45$;

$C_{15} = 33{,}193$;

$C_{16} = 2{,}319$;

$C_{17} = 0{,}17074$;

$C_{18} = 1{,}2063$.

- **Cálculo do calor latente na temperatura de orvalho**

Dependendo da faixa da temperatura de orvalho, é necessário o cálculo do calor latente de sublimação ($H_{Lsub\ po}$) ou do calor latente de vaporização ($H_{Lvap\ po}$) nesta temperatura, a partir das Equações 3.10, 3.11 e 3.12 (BROOKER, 1967).

$$H_{Lsub\ po} = 2.839.683{,}144 - 212{,}56384 \cdot (T_{po} - 255{,}38) \quad (3.10)$$

$255{,}38 \leq T_{po} \leq 273{,}16$

$$H_{Lvap\ po} = 2.502.535{,}259 - 2.385{,}76424 \cdot \left(T_{po} - 273{,}16\right) \quad (3.11)$$

$273{,}16 \leq T_{po} \leq 338{,}72$

$$H_{Lvap\ po} = \left(7.329.155.978.000 - 15.995.964{,}08 \cdot \left(T_{po}{}^{2}\right)\right)^{1/2} \quad (3.12)$$

$338{,}72 \leq T_{po} \leq 533{,}16$

- **Cálculo da entalpia específica do ar na temperatura de bulbo úmido na entrada ($H_{entrada}$):**

A partir da temperatura de bulbo úmido na entrada, umidade absoluta, temperatura de orvalho e calor latente, a entalpia específica do ar na entrada é obtida pela Equação 3.13 ou 3.14:

$$H_{entrada} = 1006{,}92540 \cdot (T_{bu} - 273{,}16) - UA_{entrada} \cdot \left[333.432{,}1 + 2030{,}5980 \cdot \left(273{,}16 - T_{po}\right)\right] + H_{Lsubpo} \cdot UA_{entrada} + 1875{,}6864 \cdot UA_{entrada} \cdot \left(T_{bu} - T_{po}\right) \quad (3.13)$$

$255{,}38 \leq T_{po} \leq 273{,}16$

$$H_{entrada} = 1006{,}92540 \cdot (T_{bu} - 273{,}16) + 4186{,}8 \cdot UA_{entrada} \cdot \left(T_{po} - 273{,}16\right) + H_{L\ vap\ po} \cdot UA_{entrada} + 1875{,}6864 \cdot UA_{entrada} \cdot \left(T_{bu} - T_{po}\right) \quad (3.14)$$

$273{,}16 \leq T_{po} \leq 373{,}16$

- **Cálculo da entalpia da mistura ar-água na temperatura de bulbo úmido na saída ($H_{saída}$)**

Com o valor da entalpia da mistura ar-água na entrada, das temperaturas de entrada e saída da água, e definindo a razão entre as vazões mássicas de água e ar na torre de resfriamento, a entalpia específica do ar na saída é obtida pela reta de operação do ar, representada pela Equação 3.15:

$$H_{saída} = H_{entrada} + C_{pw} \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}}\right) \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (3.15)$$

- **Cálculo das entalpias específicas da mistura na temperatura de bulbo úmido (H_a)**

Após o cálculo das entalpias da mistura ar-água na temperatura de bulbo úmido na entrada e saída, as entalpias específicas na temperatura de bulbo úmido necessárias para a resolução da equação de NUT são obtidas pelas Equações 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19:

$$\mathrm{H_{a1}} = \mathrm{H_{entrada}} + 0{,}1 \cdot \mathrm{C_{pw}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}}\right) \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{3.16}$$

$$\mathrm{H_{a2}} = \mathrm{H_{entrada}} + 0{,}4 \cdot \mathrm{C_{pw}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}}\right) \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{3.17}$$

$$\mathrm{H_{a3}} = \mathrm{H_{saída}} - 0{,}4 \cdot \mathrm{C_{pw}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}}\right) \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{3.18}$$

$$\mathrm{H_{a4}} = \mathrm{H_{saída}} - 0{,}1 \cdot \mathrm{C_{pw}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}}\right) \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{3.19}$$

- **Cálculo das entalpias específicas da mistura na temperatura do seio do líquido ($\mathbf{H_w}$)**

As entalpias específicas da mistura na temperatura do seio do líquido ($\mathrm{H_w}$) também são necessárias para a resolução da equação de NUT.

Primeiramente, a pressão parcial da água ($\mathrm{P_{sbu\,1}}$) é calculada na temperatura T_1 a partir das equações 3.6 e 3.7. Em seguida, a umidade absoluta ($\mathrm{UA_1}$) e a temperatura de orvalho $T_{po\,1}$ são calculadas pelas equações 3.8 e 3.9, respectivamente. Dependendo da faixa da temperatura de orvalho, é necessário o cálculo do calor latente de sublimação ($H_{Lsub\ po\,1}$) ou do calor latente de vaporização ($H_{Lvap\ po\,1}$), a partir das Equações 3.10, 3.11 e 3.12. Finalmente, a entalpia específica da mistura na temperatura T_1 é determinada pela Equação 3.20 ou 3.21:

$$\mathrm{H_{w1}} = 1006{,}92540 \cdot (\mathrm{T_1} - 273{,}16) - \mathrm{UA_1} \cdot \left[333.432{,}1 + 2030{,}5980 \cdot \left(273{,}16 - \mathrm{T_{po\,1}}\right)\right] + \mathrm{H_{Lsubpo\ 1}} \cdot \mathrm{UA_1} + 1875{,}6864 \cdot \mathrm{UA_1} \cdot \left(\mathrm{T_1} - \mathrm{T_{po\,1}}\right) \tag{3.20}$$

$255{,}38 \leq \mathrm{T_{po\,1}} \leq 273{,}16$

$$H_{w1} = 1006{,}92540 \cdot (T_1 - 273{,}16) + 4186{,}8 \cdot UA_1 \cdot (T_{po} - 273{,}16) + H_{L\ vap\ po\,1} \cdot UA_1 + 1875{,}6864 \cdot UA_1 \cdot (T_1 - T_{po\,1}) \quad (3.21)$$

$273{,}16 \leq T_{po\,1} \leq 373{,}16$

Dessa maneira, as entalpias específicas da mistura H_{w2}, H_{w3}, H_{w4} foram determinadas nas temperaturas T_2, T_3 e T_4, respectivamente, de acordo com o mesmo procedimento utilizado para o cálculo de H_{w1}.

- **Cálculo do número de unidades de transferência (NUT)**

Com os valores das entalpias específicas da mistura na temperatura de bulbo úmido (H_a) e com das entalpias específicas da mistura na temperatura do seio do líquido (H_w), são determinados os valores de variação de entalpia, necessários para o cálculo do número de unidades de transferência requerido pelo sistema ($NUT_{requerido}$), a partir das Equações 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25:

$$\Delta H_1 = H_{w1} - H_{a1} \quad (3.22)$$

$$\Delta H_2 = H_{w2} - H_{a2} \quad (3.23)$$

$$\Delta H_3 = H_{w3} - H_{a3} \quad (3.24)$$

$$\Delta H_4 = H_{w4} - H_{a4} \quad (3.25)$$

Finalmente, o número de unidades de transferência requerido pelo sistema ($NUT_{requerido}$), representado pelo termo $\frac{K \cdot a_{fi} \cdot V_e}{\dot{m}_w}$, é calculado pelo método da quadratura de Chebyshev com quatro pontos pela Equação 3.1.

Além disso, se o fluxo da torre de resfriamento for cruzado, o valor de NUT é expresso pela Equação 3.26, e o fator de correção é dado pela Equação 3.27 (FUJITA E TEZUKA, 1986 apud. LIMA JÚNIOR, 2011):

$$NUT_{requerido\ \ cruzado} = \frac{NUT_{\ requerido\ \ \ contracorrrente}}{FC} \quad (3.26)$$

$$FC = 1 - 0{,}106 \cdot \left(1 - \frac{H'_{ar\,2} - H_{ar\,2}}{H'_{ar\,1} - H_{ar\,1}}\right)^{3,5} = 1 - 0{,}106 \cdot \left(1 - \frac{H_{w\,4} - H_{a\,4}}{H_{w\,1} - H_{a\,1}}\right)^{3,5} \quad (3.27)$$

Dessa forma, com alguns valores estimados de $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, é possível construir as curvas de $NUT_{requerido}$ x $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ e de $NUT_{recheio}$ x $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ (DUARTE E NASCIMENTO, 2015).

A partir das equações de $NUT_{requerido}$ e de $NUT_{recheio}$, é possível determinar a interseção entre as duas curvas, que representa a razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ do sistema, pela Equação 3.28:

$$NUT_{requerido} - NUT_{recheio} = 0 \quad (3.28)$$

O balanço de massa da torre de resfriamento em circuito semiaberto com recirculação da água é dado pelas Equações 3.29, 3.30 e 3.31:

$$\dot{m}_{água\ make-up} + \dot{m}_{ar\ úmido\ entra} = \dot{m}_{perdas\ fase\ líquida} + \dot{m}_{ar\ úmido\ sai} \quad (3.29)$$

$$\dot{m}_{perdas\ fase\ líquida} = \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{purga} + \dot{m}_{vazamento} \quad (3.30)$$

$$\dot{m}_{evaporação} = \dot{m}_{ar\ úmido\ sai} - \dot{m}_{ar\ úmido\ entra} \quad (3.31)$$

As vazões do ar úmido na entrada e na saída podem ser obtidas, respectivamente, pelas Equações 3.32 e 3.33:

$$\dot{m}_{ar\ úmido\ entra} = \dot{m}_{ar} \cdot UA_{entrada} \quad (3.32)$$

$$\dot{m}_{ar\ úmido\ sai} = \dot{m}_{ar} \cdot UA_{saída} \quad (3.33)$$

As vazões da água de arraste e da água de evaporação podem ser estimadas pelas Equações 3.34 e 3.35, respectivamente:

$$\dot{m}_{arraste} = 0{,}001 \cdot \dot{m}_w \quad (3.34)$$

$$\dot{m}_{evapora\ ção} = 0{,}00153 \cdot \dot{m}_w \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{3.35}$$

O ciclo de concentração é dado pela Equação 3.36:

$$\mathrm{CC} = \frac{(\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vazamento} + \dot{m}_{evapora\ ção})}{(\dot{m}_{purga} + \dot{m}_{arraste} + \dot{m}_{vazamento})} \tag{3.36}$$

Considerando o calor específico e a vazão da corrente de água constantes, a carga térmica removida da torre de resfriamento é dada pela Equação 3.37:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{C_{pw}} \cdot \dot{m}_w \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}}) \tag{3.37}$$

A eficiência da torre de resfriamento é dada pela Equação 3.38:

$$\eta = \frac{(\mathrm{T_{W1}} - \mathrm{T_{W2}})}{(\mathrm{T_{W1}} - \mathrm{T_{bu}})} \cdot 100 \tag{3.38}$$

A dosagem contínua do aditivo na água de resfriamento é obtida pela Equação 3.40:

$$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{C} \cdot (\dot{Q}_{purga} + \dot{Q}_{arraste} + \dot{Q}_{vazamento})}{1000} = \frac{\mathrm{C} \cdot \dot{Q}_{água\ make-up}}{(\mathrm{CC} \cdot 1000)} = \frac{\mathrm{C} \cdot \dot{Q}_{evapora\ ção}}{((\mathrm{CC} - 1) \cdot 1000)} \tag{3.40}$$

A dosagem de choque do aditivo químico é dada pela Equação 3.41:

$$\mathrm{Dc} = \frac{\mathrm{C_{aditivo}} \cdot \mathrm{V_a}}{1000} \tag{3.41}$$

Normalmente, as torres de resfriamento apresentam um valor mínimo de approach igual a 2,8 °C (SERNA-GONZÁLEZ *et al.*, 2010):

$$\mathrm{T_{w2}} - \mathrm{T_{bu}} \geq 2{,}8 \tag{3.42}$$

Além disso, a elevação da temperatura promove o aumento da taxa de corrosão do aço. Para evitar corrosão, a temperatura máxima da água de 50°C é normalmente adotada:

$$T_{w1} \leq 50\ °C \tag{3.43}$$

A função objetivo, representada pela Equação 3.44, é a equação do custo total, o qual engloba os custos de capital e operacional:

$$\text{Custo}_{TOT} = \text{CAPEX} + \text{OPEX} \tag{3.44}$$

O custo de capital foi determinado pelo custo relacionado ao recheio da torre de resfriamento, como mostra a Equação 3.45:

$$\text{CAPEX} = \text{Custo}_{CTV} \cdot A_{fr} \cdot Z \tag{3.45}$$

O custo operacional consiste na soma dos custos da água de *make-up*, de eletricidade, e de aditivos químicos, conforme a Equação 3.46:

$$\text{OPEX} = H_Y \cdot \text{Custo}_{água\ make-up} \cdot \dot{m}_{água\ make-up} + H_Y \cdot \text{Custo}_{elet} \cdot (POW_p + POW_f) + H_Y \cdot \sum(\text{Custo}_{aditivo\ ,n} \cdot W_n) \tag{3.46}$$

em que:

$\text{Custo}_{aditivo\ ,n}$ = Custo do aditivo n;

W_n = Dosagem contínua do aditivo n.

3.2. GAMS

O GAMS (General Algebraic Modeling System) é um *software* de programação matemática e otimização criado na década de 70 por Alex Meeraus (RUTHERFORD, 1999). Este programa apresenta diversos *solvers* (algoritmos de otimização), os quais permitem resolver problemas de programação linear, não linear, inteira mista, entre outros (ROSENTHAL, 2014).

Neste trabalho, o GAMS (versão 24.3.3) foi utilizado para implementar um modelo não linear. Além disso, o *solver* escolhido foi o CONOPT 3, que aplica o método de gradiente reduzido generalizado (GRG) como método de otimização.

Inicialmente, todas as variáveis do modelo matemático são apresentadas e classificadas como *free* (variáveis contínuas irrestritas), *positive* (variáveis contínuas não negativas), *negative* (variáveis contínuas não positivas), *binary* (variáveis binárias do tipo 0-1), *integer* (variáveis inteiras não negativas). A variável de custo total ($\mathrm{Custo}_{\mathrm{TOT}}$) foi considerada contínua irrestrita (*free variable*), enquanto as outras variáveis foram consideradas contínuas não negativas (*positive variables*).

Em seguida, todas as equações (função objetivo e restrições) são nomeadas e, posteriormente, representadas algebricamente.

Finalmente, o modelo é nomeado, e o tipo de otimização é especificado.

O comando *display* indica as variáveis cujo valor otimizado será apresentado.

3.3. Descrição do sistema de resfriamento

Veiga (2010) realizou um estudo com objetivo de avaliar o efeito biocida do cloro e do peróxido de hidrogênio em sistemas de resfriamento com reúso de efluentes como água de *make-up*. Dessa maneira, Veiga (2010) realizou experimentos em um sistema de resfriamento em escala piloto, utilizando água de *make-up* com características semelhantes à futura água de reposição da torre de resfriamento com fluxo contracorrente da Unidade do Coque da Refinaria Gabriel Passos (REGAP-MG). As propriedades físico-químicas da água utilizada no estudo de Veiga (2010) estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades físico-químicas da água de *make-up* utilizadas no estudo de Veiga (2010).

Dados	Valor
Condutividade (microhms.cm^{-1})	2000
Cálcio (mg Ca^{+2}. L^{-1})	56
Magnésio (mg Mg^{+2}. L^{-1})	22
Dureza total (mg $CaCO_3$. L^{-1})	230
Cloretos (mg Cl^{-}.L^{-1})	500
pH	7
COD (mg.L^{-1})	80
Alcalinidade total (mg.L^{-1})	150

Além disso, segundo Veiga (2010), as composições médias de possíveis águas de *make-up* da torre de resfriamento da Unidade do Coque estão apresentadas na Tabela 4. A água filtrada corresponde à água da Lagoa de Ibirité (MG), que passa pelo processo de clarificação e filtração, a fim de ser utilizada na corrente de *make-up* da torre de resfriamento. Outra possível água de reposição é a água de reúso obtida a partir do tratamento secundário de efluentes, seguido de coagulação, floculação de alta taxa, filtros de areia e carvão ativado, e finalmente, o processo de eletrodiálise reversa (EDR). Além disso, o termo "*loopping* esperado" corresponde à água de reúso obtida a partir das análises da água utilizada na reposição das purgas no sistema estudado por Veiga (2010), considerando o ciclo de concentração igual a 5. E a água "*looping* real" é a água de reúso obtida a partir dos valores médios dos parâmetros analisados nos experimentos de Veiga (2010), considerando ciclo de concentração igual a 5.

Tabela 4: Composição média de possíveis águas de make-up do sistema de resfriamento (VEIGA, 2010).

Dados	Filtrada	Eletrodiálise reversa	Looping esperado	Looping real
Alcalinidade total (mg . L^{-1})	50	22	30	30
Cloreto (mg Cl^-. L^{-1})	50	68	100	60
Ferro total (mg . L^{-1})	0,6	0,2	-	0
pH	6,9	6,9	7,0	6,9
COD (mg . L^{-1})	-	-	16	-
Dureza Cálcio (mg $CaCO_3$. L^{-1})	46	80	28	19
Dureza Magnésio (mg $CaCO_3$. L^{-1})	-	55	18	15
Sílica (mg $\mathbf{SiO_2}$. L^{-1})	6,0	7,4	-	-
Amônia (mg . L^{-1})	1,5	1,5	-	-
Fosfato total (mg $\mathbf{PO_4^{-3}}$. L^{-1})	-	0,9	-	-
Sulfato (mg . L^{-1})	90	200	-	-

Dessa forma, Veiga (2010) realizou experimentos com diversas concentrações residuais de cloro livre e peróxido de hidrogênio, e os melhores resultados no controle microbiano foram obtidos nos casos apresentados na Tabela 5. Além do biocida, foram utilizados aditivos químicos usualmente empregados em sistemas de resfriamento industriais em todos os experimentos, como mostra a Tabela 6.

Tabela 5: Características dos biocidas adicionados à torre de resfriamento (VEIGA, 2010).

Experimento	Produto	Concentração residual (mg.L^{-1})	Preço (R$.$kg^{-1}$)
1	NaClO	0,2	0,73
2	NaClO	0,5	0,73
3	H_2O_2	6	1,79

Tabela 6: Características dos aditivos químicos adicionados à torre de resfriamento (VEIGA, 2010).

Aditivo Químico/ Princípio ativo	**Produto**	**Preço ($R\$.kg^{-1}$) ***	**Concentração residual ($mg.L^{-1}$)**
Dispersante (poliacrilato)	DISPERSOLTC5H	14,156	2
Inibidor anódico (fosfato)	DODICOR SA4	2,646	8
Inibidor catódico (zinco)	DODICOR SA10	7,716	3
Inibidor ao Cu e suas ligas (azol)	DODICOR SA20	9,080	1

(*) Referente a mar/2012- Fonte: PETROBRAS.

Dessa maneira, o estudo de caso consiste na minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento do Coque (REGAP, MG), cujos dados de operação estão representados na Tabela 7. Além disso, a temperaturas de bulbo úmido é igual a 23,3°C (296,45 K), representando a maior temperatura de bulbo úmido determinada na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais (ABNT NBR 16401-1, 2008).

Tabela 7: Dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da Refinaria Gabriel Passos (VEIGA, 2010).

Dados	Valor
Temperatura da água na corrente de entrada (T_{w1}) (°C)	34
Temperatura da água na corrente de saída (T_{w2}) (°C)	25
Vazão de recirculação ($\dot{Q}_w$) ($m^3 . h^{-1}$)	2300
Vazão da água de *make-up* ($\dot{Q}_{água\ make-up}$) ($m^3 . h^{-1}$)	29,8
Vazão de evaporação ($\dot{Q}_{evaporação}$) ($m^3 . h^{-1}$)	23,8
Vazão da água de purga ($\dot{Q}_{evaporação}$) ($m^3 . h^{-1}$)	5,8
Vazão da perda por arraste ($\dot{Q}_{arraste}$) ($m^3 . h^{-1}$)	0,115
Vazão da perda por vazamentos ($\dot{Q}_{vazamentos}$) ($m^3 . h^{-1}$)	0,01
Ciclo de concentração	5

As informações adicionais do ar e da água estão especificadas na Tabela 8. Neste trabalho, o calor específico da água (c_{pw}) e as densidades da água ($\rho_{água}$) e do ar (ρ_{ar}) foram considerados constantes:

Tabela 8: Propriedades da água e do ar.

Parâmetro	Valor
$\mathbf{c_{pw}\ (kJ/kg.K)}$	$4{,}179 \cdot 10^{-3}$
$\boldsymbol{\rho_{ar}\left(\frac{kg}{m^3}\right)}$ **a 20°C**	1,2041
$\boldsymbol{\rho_{água}\left(\frac{kg}{m^3}\right)}$ **a 37,5°C**	993

3.3.1. Curva NUT x $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ para o recheio da torre de resfriamento

Cada tipo de recheio da torre de resfriamento possui uma curva característica NUT x $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, a qual também varia de acordo com a altura do recheio (Z). Neste trabalho, foi escolhido o recheio do tipo respingo (*splash fill*) V-Bar da empresa Brentwood®, cuja curva NUT x $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ está representada na Figura 15. Este tipo de recheio foi selecionado, pois apresenta altura suficiente para a alta vazão de recirculação do estudo de caso, além de ser recomendado para situações em que a probabilidade de incrustação é alta. Além disso, o recheio V-bar é utilizado em torres de resfriamento com fluxo cruzado, presentes em indústrias petroquímicas, usinas elétricas, entre outros (BRENTWOOD, 2015). Embora a torre de resfriamento da REGAP apresente fluxo contracorrente, o recheio para torres com fluxo cruzado foi selecionado, devido à disponibilidade de dados dos recheios com altura elevada (aproximadamente 10 metros) da empresa Brentwood®.

Desse modo, a razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ de operação foi determinada a partir do ponto de interseção entre a curva característica do recheio V-Bar e a curva requerida pelo sistema. Além disso, a altura do recheio do tipo V-Bar está compreendida entre 18 ft e 42 ft, enquanto a distância percorrida pelo ar na direção horizontal no recheio (AT) está compreendida entre 14 ft e 20 ft.

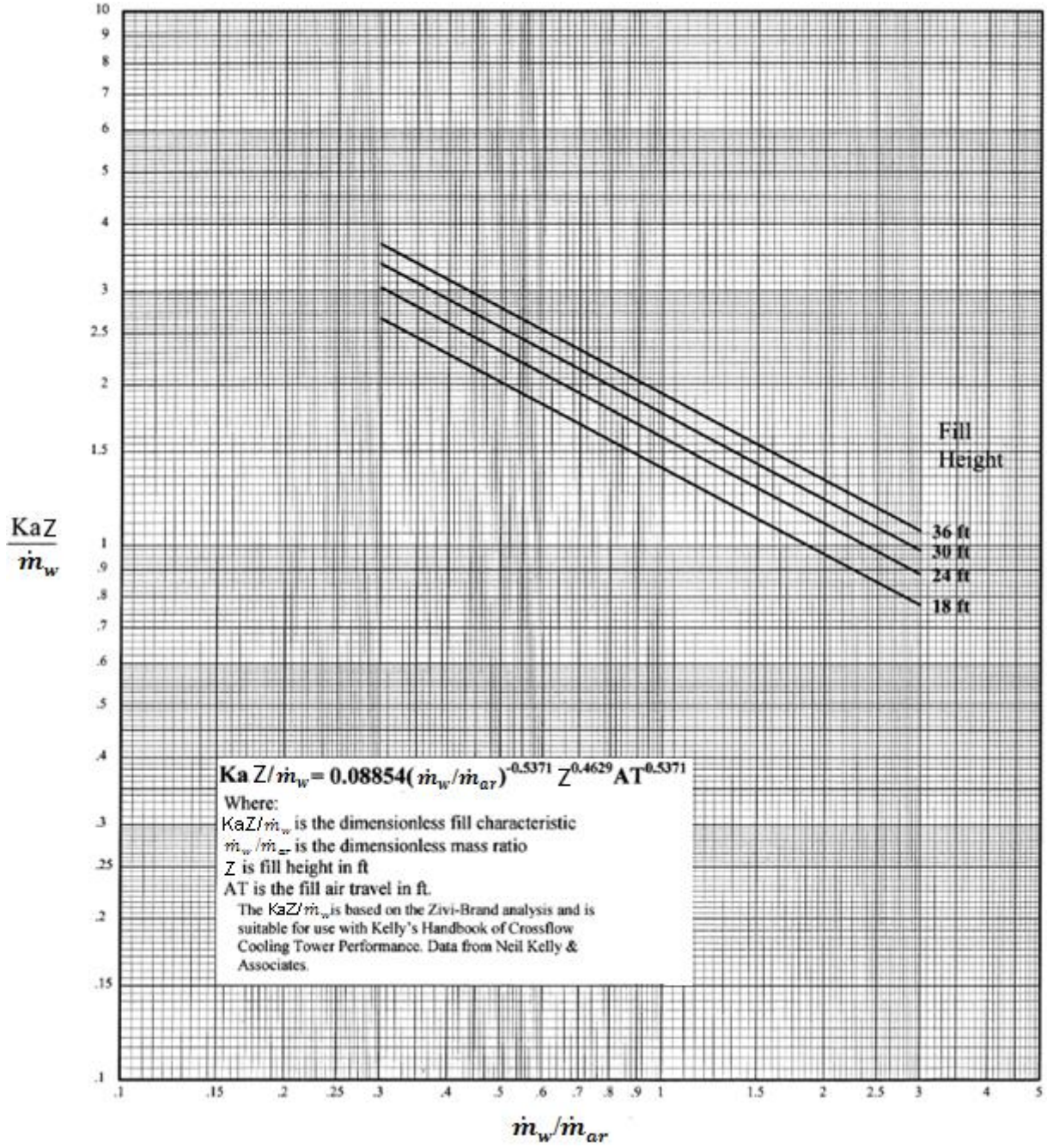

Figura 15: Curva NUT x $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ do recheio V-Bar (BRENTWOOD, 2015).

3.3.2. Bomba

Neste estudo, foi escolhida a bomba centrífuga KSB Meganorm, a qual é indicada para bombeamento de água e de líquidos limpos ou turvos e atinge vazões até 3700 $m^3.h^{-1}$. Como a vazão de água do estudo de caso é igual a 2300 $m^3.h^{-1}$, foi selecionada a curva de diâmetros 363/240 representada na Figura 16, que ilustra a curva característica da bomba centrífuga

350/370 A. Além disso, a Figura 17 mostra a curva da potência versus a vazão volumétrica da corrente de água da bomba selecionada.

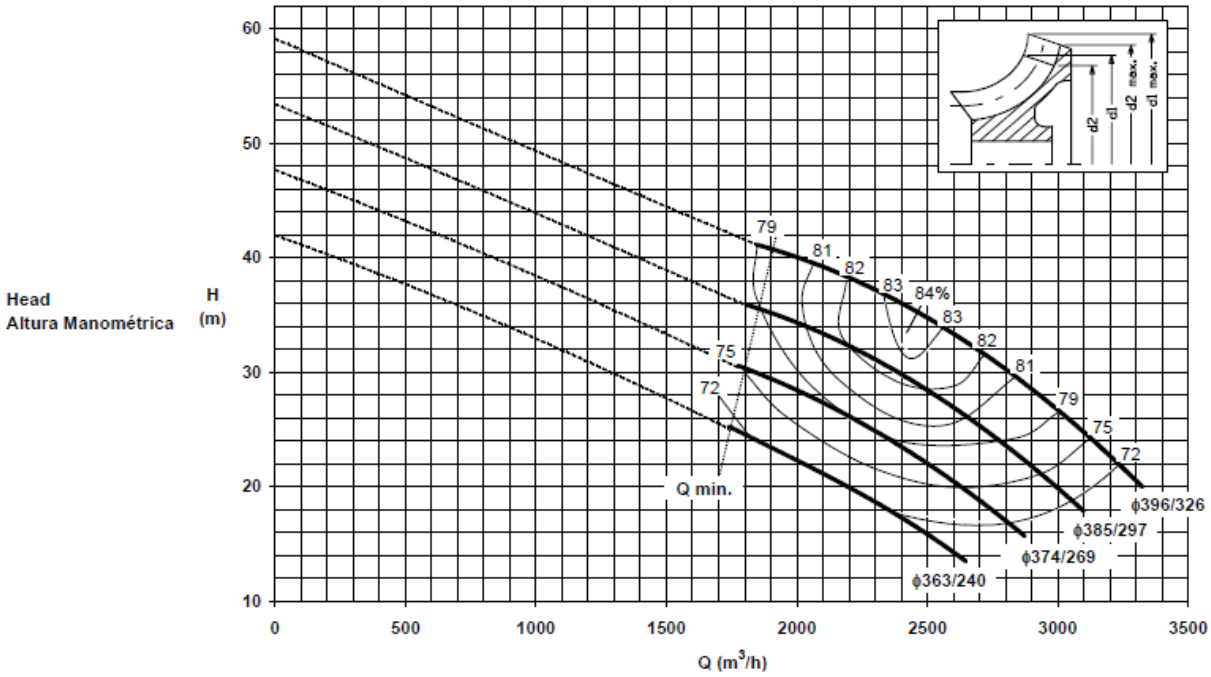

Figura 16: Curva característica da bomba centrífuga KSB Meganorm 350/370 A (MEGANORM, 2015).

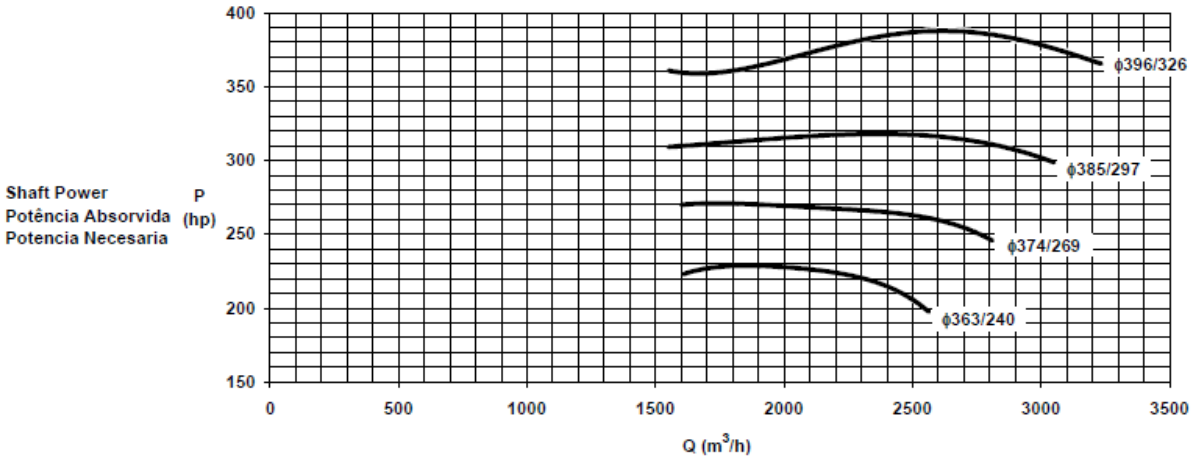

Figura 17: Curva da potência versus a vazão volumétrica da corrente de água (MEGANORM, 2015).

Dessa maneira, a altura manométrica da bomba escolhida para vazão de água igual a 2300 $m^3.h^{-1}$ e a potência necessária são iguais a 19 m e 220 hp, respectivamente.

3.3.3. Ventilador

Os ventiladores, responsáveis pela circulação da corrente de ar na torre de resfriamento, são escolhidos de acordo com a vazão volumétrica de ar requerida e a perda de

carga do sistema. Entretanto, como a vazão volumétrica de ar neste estudo é muito elevada, não foi encontrada uma curva adequada de ventiladores comerciais. Logo, foi considerada a Equação 3.47 para determinar a potência do ventilador de acordo com a vazão de ar (CASTRO et al., 2000):

$$\mathrm{POW_f} = 0.0548 \cdot \frac{\dot{Q}_{ar}}{\rho_{ar}} \tag{3.47}$$

3.3.4. Custo da água e da energia

Os custos de água e de eletricidade são necessários para o cálculo do custo da água de *make-up* e da energia consumida pela bomba e ventilador, respectivamente.

Para reduzir os custos com a água de *make-up*, utiliza-se água de reúso. O preço da água de reúso de efluente de refinaria atualmente utilizada na REGAP é R$ 1,00/ m³ (SOUZA, 2015). Além disso, o custo de eletricidade é igual a R$ 0,4038/kWh, o qual corresponde ao custo da energia elétrica para a indústria no Brasil (FIRJAN, 2015).

3.3.5. Custo de capital

Neste trabalho, o custo de capital foi determinado pelo custo relacionado ao recheio da torre de resfriamento, como mostra a Equação 3.45. O custo relacionado ao volume do recheio da torre é igual a 2006,6 US$, e o fator de anualização é igual a 0,2983 ano^{-1} (SERNA-GONZÁLEZ *et al*., 2010). Além disso, o fator de conversão monetário é igual a 0,38 US$/R$ (BANCO CENTRAL, 2015).

3.4. Estudo de casos

3.4.1. Caso 1: Custo total da torre de resfriamento

A partir dos dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da REGAP, e dos valores estimados da razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, é determinado o número de unidades de transferência requerido pelo sistema e do recheio V-Bar com altura de 36ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft (distância mínima) e 20 ft (distância máxima).

Além disso, são determinados os custos de uma torre de resfriamento com altura igual a 36 ft (10,97 m) e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14 ft (distância mínima) e 20ft (distância máxima). O tempo de operação considerado foi de 8000 h por ano (CORTINOVIS et al., 2009), e foi utilizado o ciclo de concentração igual a 5 (VEIGA, 2010).

3.4.2. Caso 2: Minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento

A partir das variáveis fixadas AT e $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ obtidas no estudo de caso 1 e do modelo de otimização, os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento foram otimizados, com o ciclo de concentração como a variável de decisão.

Apesar de os aditivos serem essenciais para o bom desempenho e para a prolongação do tempo de vida útil da torre, sua adição aumenta o custo de operação da torre, e por isto, é desejável minimizar as vazões destes aditivos. Uma das maneiras de reduzir o consumo é encontrando o ciclo de concentração ideal, ou seja, o ciclo de concentração máximo que evite incrustações, corrosão e biodepósitos.

Neste estudo, foi realizada a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento, a partir da avaliação do índice de saturação de Puckorius, o qual é utilizado para medir a estabilidade da água de resfriamento. Quando IP está entre 6 e 7, a água é estável; quando IP é menor que 6, a água apresenta características incrustantes; e quando IP é maior que sete, a água apresenta características corrosivas.

Além disso, o índice de Puckorius pode ter uma classificação mais detalhada, de acordo com a Tabela 9 (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012).

Tabela 9: Característica de estabilidade da água de acordo com o IP (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012).

Índice de Puckorius (IP)	Característica
$4 < IP \leq 5$	Formação de depósito pesado
$5 < IP \leq 6$	Formação leve de depósito
$6 < IP \leq 7$	Pouco depósito ou corrosão
$7 < IP \leq 7,5$	Corrosão significante
$7,5 < IP \leq 9$	Corrosão pesada
$IP > 9$	Corrosão intolerável

Adicionalmente, também foram determinados os índices de estabilidade de Langelier (LSI) e de Ryznar (RSI). O índice de saturação de Langelier (LSI) permite a previsão da tendência de precipitação ou dissolução do carbonato de cálcio, e o índice de Ryznar permite a determinação da tendência corrosiva e incrustante da água. A classificação detalhada dos índices LSI e RSI é apresentada nas tabelas 10 e 11, respectivamente (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012).

Tabela 10: Característica de estabilidade da água de acordo com o LSI (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012).

Índice de Langelier (LSI)	Característica
$- 2,0 \leq LSI < - 0,5$	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
$0,5 < LSI \leq 2,0$	Formação de incrustação, não corrosiva: condição altamente insegura

Tabela 11: Característica de estabilidade da água de acordo com o RSI (CARRIER, 1965 apud. MIRRE, 2012).

Índice de Ryznar (RSI)	Característica
4 < RSI ≤ 5	Formação de depósito pesado
5 < RSI ≤ 6	Formação leve de depósito
6 < RSI ≤ 7	Pouco depósito ou corrosão
7 < RSI ≤ 7,5	Corrosão significante
7,5 < RSI ≤ 9	Corrosão pesada
RSI > 9	Corrosão intolerável

Dessa maneira, para calcular o ciclo de concentração que minimize os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos, dois casos foram avaliados: um caso considerando o uso de aditivos, e consequentemente, limitando o índice de Puckorius na faixa entre 5,1 e 7,5; um caso desconsiderando o uso de aditivos e limitando o índice de Puckorius na faixa entre 6,1 e 7.

A partir das condições do estudo de caso descritas anteriormente, o modelo de otimização, com o ciclo de concentração como variável de decisão e considerando o uso de aditivos, consiste em:

Minimizar $\mathrm{Custo_{TOT}} = \mathrm{CAPEX} \cdot \mathrm{F} + \mathrm{OPEX}$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\mathrm{CAPEX} = \mathrm{Custo_{CTV}} \cdot \mathrm{A_{fr}} \cdot \mathrm{Z}$$

$$\mathrm{OPEX} = \mathrm{H_Y} \cdot \mathrm{Custo}_{água\ make-up} \cdot \dot{m}_{água\ make-up} + \mathrm{H_Y} \cdot \mathrm{Custo_{elet}} \cdot (\mathrm{POW_p} + \mathrm{POW_f}) + \mathrm{H_Y} \cdot \sum(\mathrm{Custo_{aditivo\ ,n}} \cdot \mathrm{W_n});$$

$$\mathrm{POW_f} = 0.0548 \cdot \frac{\dot{Q}_{ar}}{\rho_{ar}};$$

$$\mathrm{POW_p} = 220;$$

$$\mathrm{RAZAOLG} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}};$$

$$\mathrm{NUT}_{\text{requerido cruzado}} - \mathrm{NUT}_{\text{recheio}} = 0;$$

$$\dot{Q}_{\text{água } make-up} = \dot{Q}_{\text{perdas fase líquida}} + \dot{Q}_{\text{evaporação}};$$

$$\dot{Q}_{\text{perdas fase líquida}} = \dot{Q}_{\text{arraste}} + \dot{Q}_{\text{purga}} + \dot{Q}_{\text{vazamento}};$$

$$\dot{Q}_{\text{arraste}} = 0{,}001 \cdot \dot{Q}_{\text{w}};$$

$$\dot{Q}_{\text{evaporação}} = 0{,}00153 \cdot \dot{Q}_{\text{w}} \cdot (T_{w1} - T_{w2});$$

$$\dot{Q}_{\text{vazamento}} = 0{,}01;$$

$$\mathrm{CC} = \frac{(\dot{Q}_{\text{purga}} + \dot{Q}_{\text{arraste}} + \dot{Q}_{\text{vazamento}} + \dot{Q}_{\text{evaporação}})}{(Q_{\text{purga}} + \dot{Q}_{\text{arraste}} + Q_{\text{vazamento}})};$$

$$Q = c_{\text{pw}} \cdot \dot{m}_w \cdot (T_{w1} - T_{w2});$$

$$\eta = \frac{(T_{W1} - T_{W2})}{(T_{W1} + T_{bu})};$$

$$W_n = \frac{C_{\text{aditivo},n} \cdot (\dot{Q}_{\text{purga}} + \dot{Q}_{\text{arraste}} + \dot{Q}_{\text{vazamento}})}{1000} = \frac{C_{\text{aditivo},n} \cdot \dot{Q}_{\text{água } make-up}}{(CC \cdot 1000)} = \frac{C_{\text{aditivo},n} \cdot \dot{Q}_{\text{evaporação}}}{((CC-1) \cdot 1000)};$$

$$c_{dispersante} = 2;$$

$$c_{inib\ catódico} = 8;$$

$$c_{inib\ anódico} = 3;$$

$$c_{inib\ Cu\ e\ Zn} = 1;$$

$$c_{bio\ NaClO} = 0{,}5;$$

$$\mathrm{pH_s} = (9{,}3 + \mathrm{A} + \mathrm{B}) - (\mathrm{C} + \mathrm{D})\ ;$$

$$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{Log}\,(c_{SDT\ \ circula\ \ ção}) - 1}{10}\ ;$$

$$\mathrm{B} = -13{,}12 \cdot \mathrm{Log}\left(\mathrm{T_{make\ -up}} + 273\right) + \ 34{,}55;$$

$$\mathrm{C} = \mathrm{Log}\left(c_{Ca^{2+}circula\ ção}\right) - 0{,}4\ ;$$

$$\mathrm{D} = \mathrm{Log}\left(\mathrm{c}_{ATcircula\ ção}\right)\ ;$$

$$\mathrm{CC} = \frac{\mathrm{c}_{ATcircula\ \ ção}}{\mathrm{c_{AT}}_{\mathrm{make\ \ -up}}}\ ;$$

$$\mathrm{CC} = \frac{c_{SDT\ circula\ ção}}{c_{SDT\ make\ -up}}\ ;$$

$$\mathrm{CC} = \frac{c_{Ca^{2+}circul\ ação}}{c_{Ca^{2+}make\ -up}}\ ;$$

$$\mathrm{CC} \leq \frac{180}{c_{SiO\ 2make\ \ -up}}\ ;$$

$$\mathrm{LSI} = \mathrm{pH} - \ \mathrm{pH_s}\ ;$$

$$\mathrm{RSI} = (2 \cdot \mathrm{pH_s}) - \ \mathrm{pH}\ ;$$

$$\mathrm{IP} = (2 \cdot \mathrm{pH_s}) - \ \mathrm{pH_{eq}}\ ;$$

$$5{,}1 \leq \mathrm{IP} \leq 7{,}5\ .$$

Além disso, o modelo de otimização, com o ciclo de concentração como variável de decisão, que desconsidera o uso de aditivos consiste em:

Minimizar $\mathrm{Custo_{TOT}} = \mathrm{CAPEX} \cdot \mathrm{F} + \mathrm{OPEX}$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\mathrm{CAPEX} = \mathrm{Custo_{CTV}} \cdot \mathrm{A_{fr}} \cdot \mathrm{Z}$$

$$\mathrm{OPEX} = \mathrm{H_Y} \cdot \mathrm{Custo}_{água\ make-up} \cdot \dot{m}_{água\ make-up} + \mathrm{H_Y} \cdot \mathrm{Custo_{elet}} \cdot (\mathrm{POW_p} + \mathrm{POW_f})\ ;$$

$$\mathrm{POW_f} = 0.0548 \cdot \frac{\dot{Q}_{ar}}{\rho_{ar}}\ ;$$

$$\mathrm{POW_p} = 220;$$

$$\mathrm{RAZAOLG} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{ar}};$$

$$\mathrm{NUT_{requerido\ \ cruzado}} - \mathrm{NUT_{recheio}} = 0;$$

$$\dot{\mathrm{Q}}_{água\ make-up} = \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{perdas\ \ fase\ líquida}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{evaporação}}\ ;$$

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{perdas\ \ fase\ líquida}} = \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{arraste}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{purga}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{vazamento}}\ ;$$

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{arraste}} = 0{,}001 \cdot \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{w}};$$

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{evaporação}} = 0.00153 \cdot \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{w}} \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}});$$

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{vazamento}} = 0{,}01;$$

$$\mathrm{CC} = \frac{(\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{purga}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{arraste}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{vazamento}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{evaporação}})}{(\mathrm{Q_{purga}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{arraste}} + \mathrm{Q_{vazamento}})};$$

$$\mathrm{Q} = \mathrm{c_{pw}} \cdot \dot{m}_w \cdot (\mathrm{T_{w1}} - \mathrm{T_{w2}});$$

$$\eta = \frac{(T_{W\,1} - T_{W\,2})}{(T_{W\,1} + T_{bu})};$$

$$pH_s = (9{,}3 + A + B) - (C + D);$$

$$A = \frac{\mathrm{Log}\,(c_{SDT\ circula\ ção}) - 1}{10};$$

$$B = -13{,}12 \cdot \mathrm{Log}\left(T_{make\ -up} + 273\right) + 34{,}55;$$

$$C = \mathrm{Log}\left(c_{Ca^{2+}circula\ ção}\right) - 0{,}4;$$

$$D = \mathrm{Log}\left(c_{ATcircula\ ção}\right);$$

$$CC = \frac{c_{ATcircula\ ção}}{c_{AT\ make\ -up}};$$

$$CC = \frac{c_{SDT\ circula\ ção}}{c_{SDT\ make\ -up}};$$

$$CC = \frac{c_{Ca^{2+}circula\ ção}}{c_{Ca^{2+}make\ -up}};$$

$$CC \leq \frac{180}{c_{SiO\ 2\,make\ -up}};$$

$$LSI = pH - pH_s;$$

$$RSI = (2 \cdot pH_s) - pH;$$

$$IP = (2 \cdot pH_s) - pH_{eq};$$

$$6{,}1 \leq IP \leq 7.$$

O custo total foi apresentado para diferentes tipos de água de reposição, descritos a seguir.

- **Possíveis águas de *make-up* na torre de resfriamento do Coque (REGAP)**

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos foram minimizados para as possíveis águas de *make-up*, apresentadas na Tabela 12. Como a concentração de sólidos totais dissolvidos não foi informada, esta foi estimada a partir da condutividade elétrica, de acordo com a Tabela 2. Como a condutividade elétrica da água filtrada não foi especificada, foi considerado o valor de condutividade da água clarificada encontrada na literatura (VANELLI, 2004). Além disso, visto que a condutividade da água oriunda da eletrodiálise reversa não foi especificada, foi considerado um valor típico encontrado na literatura (MACHADO, 2008). A temperatura das águas é igual a 40ºC.

Tabela 12: Composição média de possíveis águas de make-up do sistema de resfriamento da unidade do Coque (REGAP).

Dados	Filtrada	Eletrodiálise reversa	Looping esperado	Looping real
Condutividade ($\mu S.cm^{-1}$)	400	500	931	1169
Sólidos dissolvidos totais (ppm)	272	340	633,08	876,75
Alcalinidade total (mg $CaCO_3$. L^{-1})	50	22	30	30
Cloreto (mg Cl^-. L^{-1})	50	68	100	60
Ferro total (mg . L^{-1})	0,6	0,2	-	0
pH	6,9	6,9	7,0	6,9
COD (mg . L^{-1})	-	-	16	-
Dureza Cálcio (mg $CaCO_3$. L^{-1})	46	80	28	19
Dureza Magnésio (mg $CaCO_3$. L^{-1})	-	55	18	15
Sílica (mg $\mathbf{SiO_2}$. L^{-1})	6,0	7,4	-	-
Amônia (mg . L^{-1})	1,5	1,5	-	-
Fosfato total (mg $\mathbf{PO_4^{-3}}$. L^{-1})	-	0,9	-	-
Sulfato (mg . L^{-1})	90	200	-	-

- **Águas subterrâneas da bacia do Rio São Domingos (RJ)**

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos foram minimizados para a água subterrânea proveniente da bacia do rio São Domingos (RJ), cujas propriedades físico-químicas e a composição química média estão apresentadas na Tabela 13. Diferentemente dos outros casos, o custo da água de *make-up* utilizado foi igual a R$ 0,70/m³, o qual equivale ao custo de captação de água dos poços da Lagoa de Ibirité (MG) (SOUZA, 2015).

Tabela 13: Composição média de águas subterrâneas da bacia do rio São Domingos (SANTOS, 2009).

Dados	Valor
Temperatura (ºC)	28,7
Condutividade ($\mu S.cm^{-1}$)	430
Sólidos dissolvidos totais (ppm)	237
Alcalinidade total (mg $CaCO_3$. L^{-1})	188
Cloreto (mg Cl^-. L^{-1})	20,16
Ferro total (mg . L^{-1})	0,6
pH	7,08
Dureza Cálcio (mg $CaCO_3$. L^{-1})	13,75
Magnésio (mg Mg . L^{-1})	4,760
Sílica (mg $\mathbf{SiO_2}$. L^{-1})	21,9
Coliformes totais (NMP)	500
Fosfato total (mg $\mathbf{PO_4^{-3}}$. L^{-1})	0,65
Sulfato (mg . L^{-1})	11,98

- **Água com o padrão de qualidade para água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro**

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos foram minimizados para a água com o padrão de qualidade para água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internaional do Rio de Janeiro, cuja composição química média está apresentada na Tabela

14. Neste caso, o custo da água de *make-up* utilizado foi igual a R$ 2,90/m³, o qual equivale ao custo da reutilização do efluente secundário da estação de tratamento de efluentes (ETE APOIO) do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro a partir do tratamento por osmose inversa (CARVALHO E MACHADO, 2010). A temperatura foi considerada igual a 24,9ºC e o pH igual a 7, que correspondem à temperatura e pH do efluente secundário da ETE APOIO (CARVALHO E MACHADO, 2010).

Tabela 14: Padrão de qualidade da água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (CARVALHO E MACHADO, 2010).

Dados	Valor
Cloreto (mg Cl^-. L^{-1})	29
Sólidos dissolvidos totais (ppm)	500
Alcalinidade total (mg $CaCO_3$. L^{-1})	29
DQO (mg. L^{-1})	75
Cálcio (mg $CaCO_3$. L^{-1})	125
Sólidos suspensos totais	100
Magnésio (mg Mg . L^{-1})	0,5
Sílica (mg $\mathbf{SiO_2}$. L^{-1})	21
Ferro (mg . L^{-1})	0,29
Fosfato (mg $\mathbf{PO_4^{-3}}$. L^{-1})	4
Sulfatos (mg . L^{-1})	200

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os resultados obtidos a partir da metodologia desenvolvida serão apresentados e discutidos.

4.1. Caso 1: Custo total da torre de resfriamento

Inicialmente, serão determinados os custos de uma torre de resfriamento com altura igual a 36 ft (10,97 m) e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14 ft (4,28 m) e 20ft (6,10 m).

- **Cálculo da razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ para torre de resfriamento com distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14 ft (4,28 m) (distância mínima)**

A partir dos dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da REGAP, e dos valores estimados da razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, foi determinado o número de unidades de transferência requerido pelo sistema e do recheio V-Bar com altura de 36ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft, conforme a Tabela 15 e o gráfico da Figura 18.

Tabela 15: Valor determinado de NUT para razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ estimada na torre com Z=36ft e AT=14ft.

$\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ (kg água.s^{-1}/ kg ar.s^{-1})	NUT requerido pelo sistema	NUT do recheio V-Bar
0,3	2,200	3,664
0,35	2,270	3,373
0,4	2,346	3,140
0,45	2,428	2,947
0,5	2,517	2,785
0,55	2,614	2,646
0,6	2,721	2,525
0,65	2,838	2,419
0,7	2,968	2,325
0,75	3,114	2,240
0,8	3,279	2,164
0,85	3,467	2,094
0,9	3,684	2,031
0,95	3,940	1,973
1	4,248	1,919

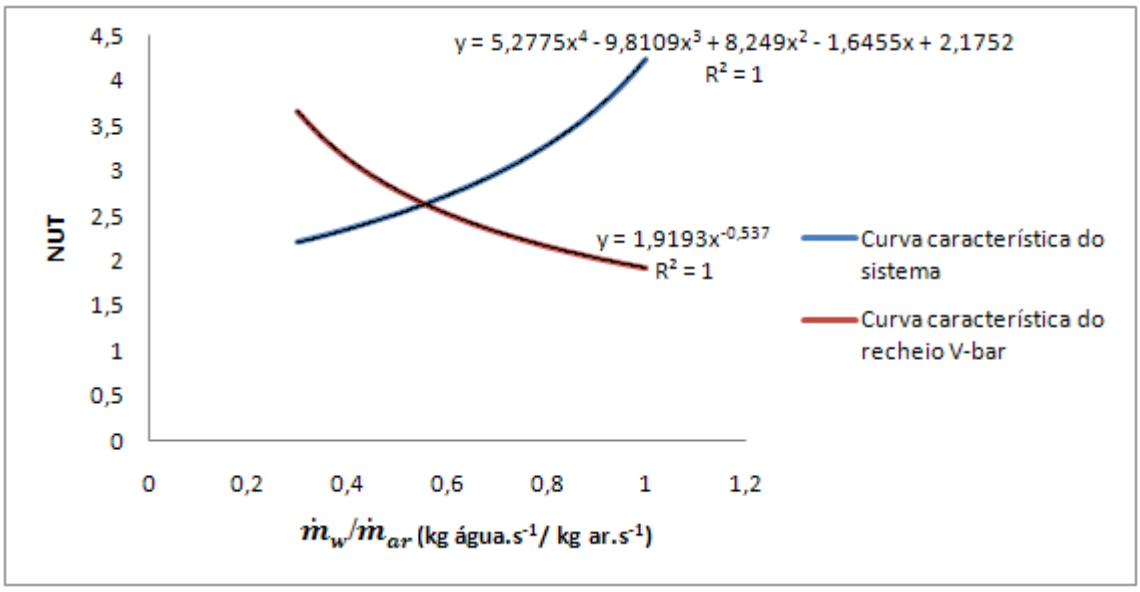

Figura 18: Determinação do $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ operacional do sistema para o recheio V-Bar com altura 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14ft.

A razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ operacional dada pela interseção das curvas representadas na Figura 18 é igual a 0,56 kg água.s^{-1}/ kg ar.s^{-1}.

A determinação da razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ é importante, pois, para uma dada vazão de água, quanto menor a razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, maior será a vazão de ar, e consequentemente, maior será o custo energético do ventilador.

- **Cálculo da razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ para torre de resfriamento com distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 20 ft (6,10 m) (distância máxima)**

A partir dos dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da REGAP, e dos valores estimadas da razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, foi determinado o número de unidades de transferência requerido pelo sistema e do recheio V-Bar com altura de 36ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 20 ft, conforme a Tabela 16 e o gráfico da Figura 19.

Tabela 16: Valor determinado de NUT para razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ estimada na torre com Z=36ft e AT=20ft.

$\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ (kg água.s^{-1}/ kg ar.s^{-1})	NUT requerido pelo sistema	NUT do recheio V-Bar
0,3	2,200	4,438
0,35	2,270	4,085
0,4	2,346	3,802
0,45	2,428	3,569
0,5	2,517	3,373
0,55	2,614	3,205
0,6	2,721	3,058
0,65	2,838	2,930
0,7	2,968	2,815
0,75	3,114	2,713
0,8	3,279	2,621
0,85	3,467	2,537
0,9	3,684	2,460
0,95	3,940	2,389
1	4,248	2,325

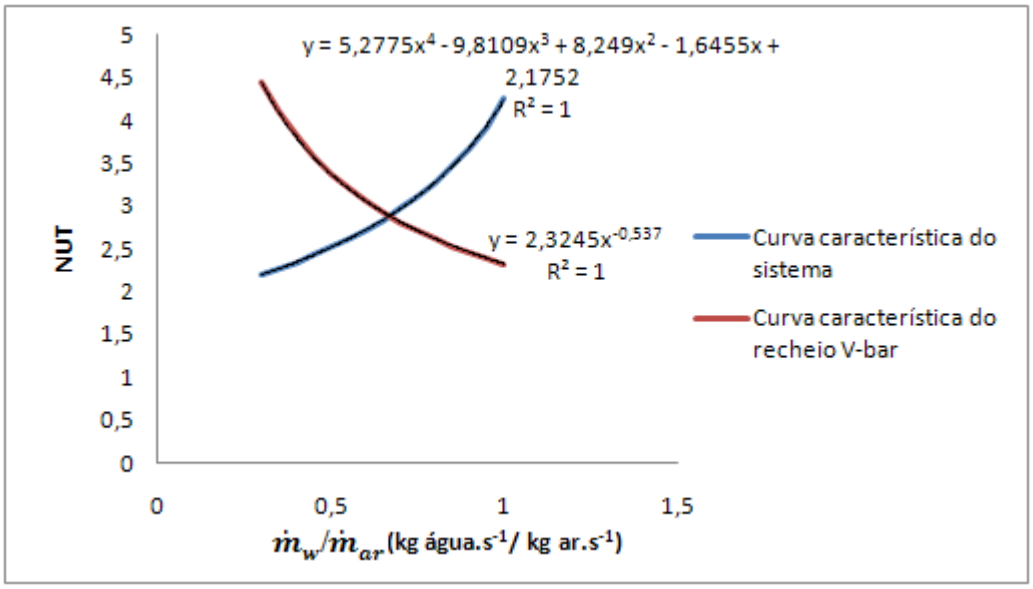

Figura 19: Determinação do $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ operacional do sistema para o recheio V-Bar com altura 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 20ft.

A razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ operacional dada pela interseção das curvas representadas na Figura 19 é igual a 0,67 kg água.s^{-1}/ kg ar.s^{-1}. Como a distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio é maior, a transferência de calor é maior. Dessa maneira, para uma vazão de água fixa, a vazão de ar é menor do que na torre com distância percorrida pelo ar na direção horizontal igual a 14 ft.

- **Cálculo do custo**

O custo total, incluindo os custos de capital e operacional estão apresentados na Tabela 17, considerando o ciclo de concentração igual a 5.

Tabela 17: Custo do sistema de resfriamento com altura do recheio igual a 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft e de 20ft.

Custo	Torre com Z=36ft e AT=14ft	Torre com Z=36ft e AT=20ft
Custo de capital	318.126,00	649.236,73
Custo operacional	1.451.450,23	1.353.008.04
Custo total	1.769.576,22	2.002.244,77

Apesar do custo operacional anual da torre de resfriamento com AT=14ft ser superior ao custo da torre com AT=20ft, os custos anuais de capital e total são menores. Logo, a torre de altura igual a 36ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14ft é mais econômica.

O custo operacional engloba custo da água de make-up, o custo de aditivos e o custo de energia elétrica, os quais estão representados na Tabela 18.

Tabela 18: Custo operacional do sistema de resfriamento com altura do recheio igual a 36 ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft e de 20ft.

Custo	Torre com Z=36ft e AT=14ft	Torre com Z=36ft e AT=20ft
Custo da água de make-up	316.710,00	316.710,00
Custo energético	1.129.562,37	1.031.120,18
Custo de aditivo	5.177,86	5.177,86

Nas duas torres, a maior parcela do custo operacional está relacionada com o custo energético, o qual engloba o ventilador e a bomba de água. A torre com AT=20ft apresenta menor custo energético, pois a maior distância para o percurso do ar na direção horizontal proporciona maior transferência de calor, e consequentemente, é necessária uma vazão de ar menor.

Dessa maneira, os valores de AT influenciam a razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$, a qual é importante para o cálculo do custo de energia da torre, assim como o custo de capital, o qual está relacionado ao volume de recheio neste trabalho.

4.2. Caso 2: Ciclo de concentração ideal a partir da avaliação do índice de Puckorius

Os resultados da minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos de uma torre de resfriamento com altura igual a 36 ft (10,97 m) e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio igual a 14ft (mínima) serão apresentados para diferentes águas de *make-up*.

- **Possíveis águas de *make-up* na torre de resfriamento do Coque (REGAP)**

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos mínimos para a água de *make-up* filtrada considerando as duas faixas do índice de Puckorius, assim como as outras variáveis são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos da torre de resfriamento utilizando água filtrada como *make-up*.

Variáveis	**Valor da variável otimizada (5,1≤IP≤7,5)**	**Valor da variável otimizada (6,1≤IP≤7)**
IP	5,1	6,1
LSI	0,212	-0,148
RSI	6,477	7,196
Ciclo de concentração	6,967	4,49
Vazão da água de *make-up* ($m^3 . h^{-1}$)	36,98	40,745
Custo de capital (R$. ano^{-1})	318.126,0	318.126,0
Custo de energia (R$. ano^{-1})	1.129.562,37	1.129.562,37
Custo da água de *make-up* (R$. ano^{-1})	295.828,73	325.962,58
Custo de aditivos (R$. ano^{-1})	3.470,93	0
Custo total (R$. ano^{-1})	1.746.988,02	1.773.650,95

Os resultados mostram que o custo total do caso com índice de Puckorius entre 5,1 e 7,5 é menor, pois o ciclo de concentração maior permite a redução das vazões da água de *make-up* e dos aditivos. Consequentemente, os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos também são minimizados.

Como o índice de Puckorius igual a 5,1 indica a formação leve de depósito, o uso de inibidores e dispersantes é fundamental. Além disso, os valores de LSI e de RSI indicam corrosão leve, reforçando a importância do tratamento químico.

Apesar do valor ótimo do índice de Puckorius no segundo caso ser igual a 6,1 e indicar pouco depósito e corrosão, os índices LSI e RSI revelam a ocorrência de corrosão. Além disso, a utilização de aditivos químicos é vantajosa, pois permite a elevação do ciclo de concentração e, consequentemente, a redução do custo da água de *make-up*.

O comportamento da função objetivo em relação ao ciclo de concentração e ao índice de Puckorius está apresentado nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

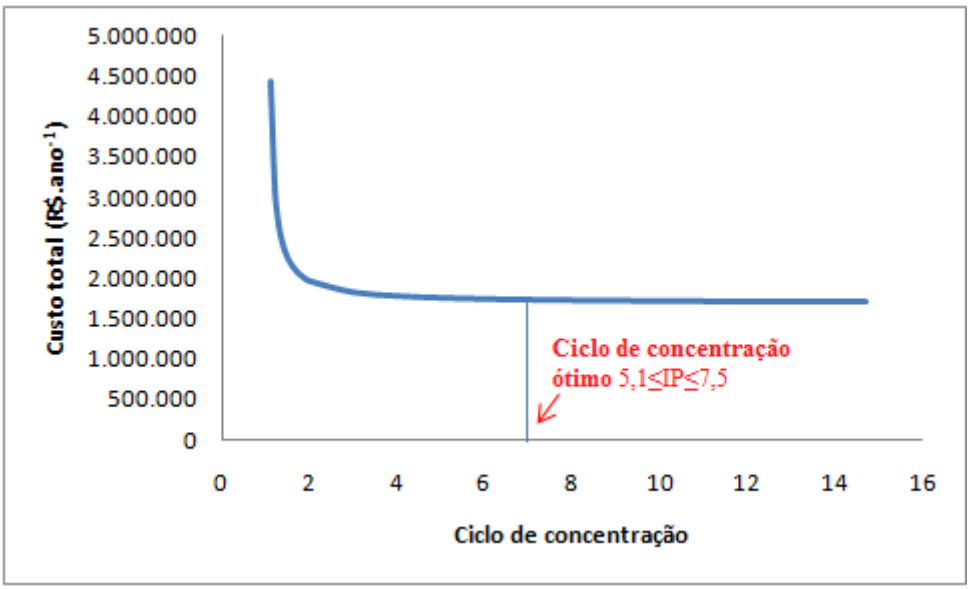

Figura 20: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando água filtrada como *make-up*.

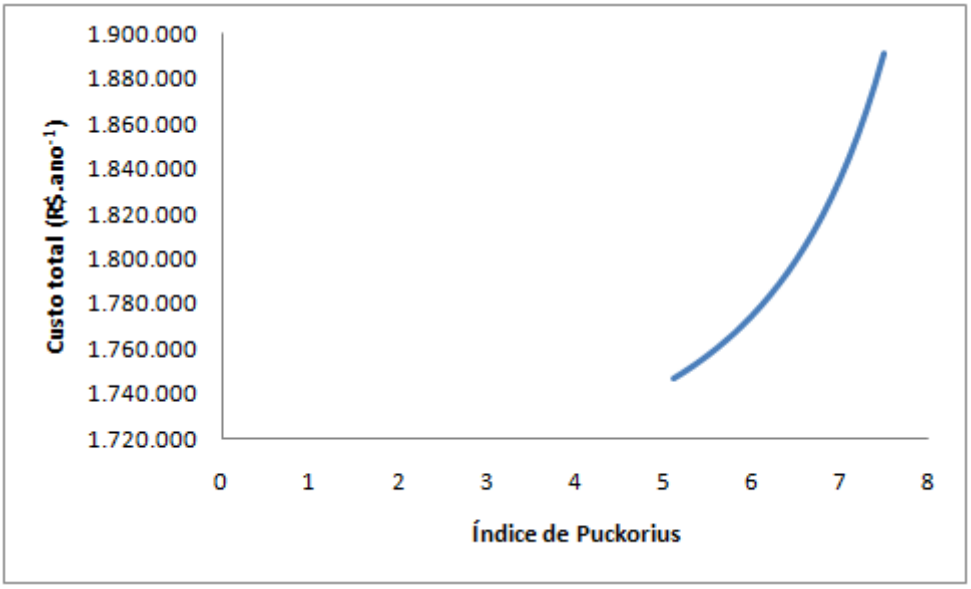

Figura 21: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando água filtrada como *make-up*.

Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius.

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos mínimos para a água de *make-up* proveniente do processo de eletrodiálise reversa, considerando as duas faixas do índice de Puckorius, assim como as outras variáveis são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando água do processo de eletrodiálise reversa como *make-up*.

Variáveis	Valor da variável otimizada (5,1≤IP≤7,5)	Valor da variável otimizada (6,1≤IP≤7)
IP	5,1	6,1
LSI	0,365	0,006
RSI	6,169	6,889
Ciclo de concentração	9,78	6,3
Vazão da água de *make-up* ($m^3 . h^{-1}$)	35,28	37,64
Custo de capital ($R\$. ano^{-1}$)	318.126,0	318.126,0
Custo de energia ($R\$. ano^{-1}$)	1.129.562,37	1.129.562,37
Custo da água de *make-up* ($R\$. ano^{-1}$)	28.229,06	301.152,41
Custo de aditivos ($R\$. ano^{-1}$)	2.359,23	0
Custo total ($R\$. ano^{-1}$)	1.732.276,65	1.748.840,77

Assim como no caso da água filtrada, os resultados da Tabela 20 mostram que o custo total do caso com índice de Puckorius entre 5,1 e 7,5 é menor.

Apesar dos diferentes valores ótimos do índice de Puckorius apresentados, os valores de LSI e de RSI nas duas situações se encontram na mesma faixa. Os valores de LSI ($0 < LSI \leq 0,5$) e RSI ($6 < RSI \leq 7$) indicam leve formação de incrustação e corrosão.

Além disso, os ciclos de concentração ideais determinados para a água de eletrodiálise reversa foram superiores aos da água filtrada. Dessa forma, a água de eletrodiálise reversa é mais vantajosa, pois o custo total do sistema é menor.

O comportamento da função objetivo em relação ao ciclo de concentração e ao índice de Puckorius está apresentado nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

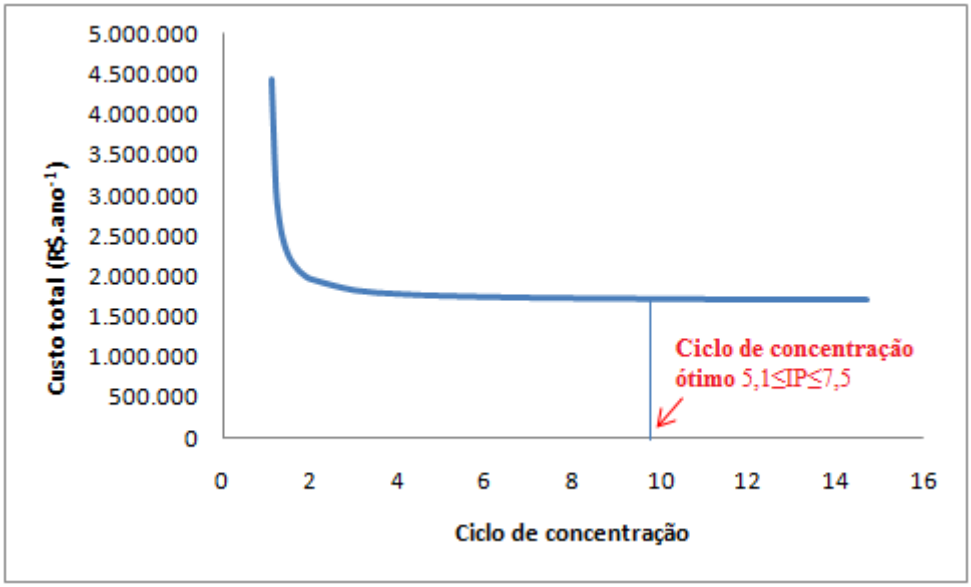

Figura 22: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando água do processo de eletrodiálise reversa como *make-up*.

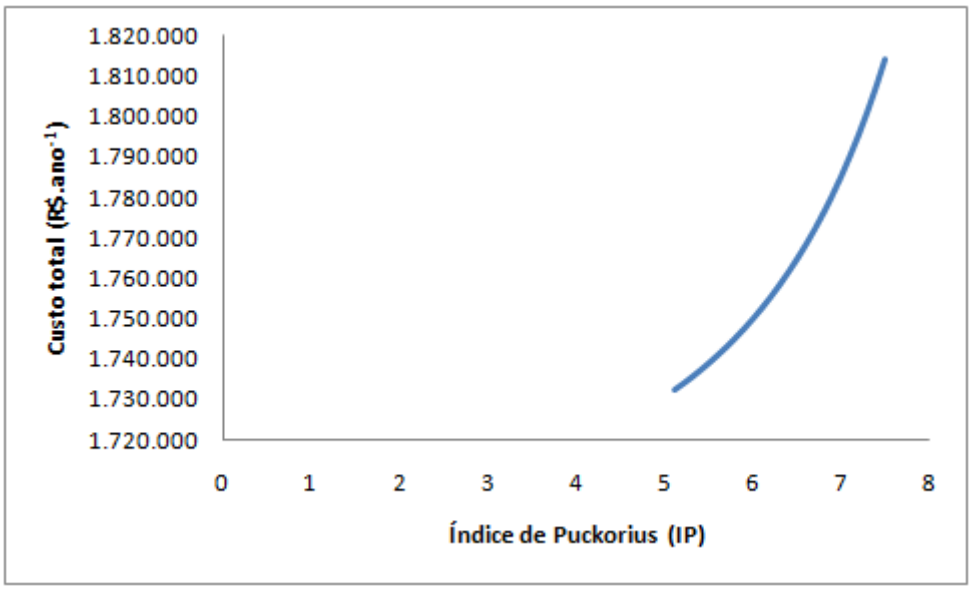

Figura 23: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando água do processo de eletrodiálise reversa como *make-up*.

Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius.

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos mínimos para a água de *make-up* "*looping* esperado", considerando as duas faixas do índice de Puckorius, assim como as outras variáveis são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água "*Looping* esperado" como make-up.

Variáveis	**Valor da variável otimizada (5,1≤IP≤7,5)**	**Valor da variável otimizada (6,1≤IP≤7)**
IP	5,1	6,1
LSI	0,297	-0,063
RSI	6,406	7,126
Ciclo de concentração	12,16	7,84
Vazão da água de *make-up* ($m^3 . h^{-1}$)	34,51	36,30
Custo de capital ($R\$. ano^{-1}$)	318.126,0	318.126,0
Custo de energia ($R\$. ano^{-1}$)	1.129.562,37	1.129.562,37
Custo da água de *make-up* ($R\$. ano^{-1}$)	276.074,67	290.432,82
Custo de aditivos ($R\$. ano^{-1}$)	1.856,15	0
Custo total ($R\$. ano^{-1}$)	1.725.619,18	1.738.121,19

Os resultados da Tabela 21 mostram que o custo da água de *make-up*, o custo de aditivos, e, consequentemente, o custo total do caso com índice de Puckorius entre 5,1 e 7,5 é menor do que no caso com índice de Puckorius entre 6,1 e 7.

No caso com índice de Puckorius igual a 5,1, há possibilidade da formação leve de depósito, e os valores de LSI e de RSI indicam leve formação de incrustação e corrosão. Portanto, o tratamento com aditivos químicos é indispensável.

Além disso, os ciclos de concentração ideais determinados para a água "*looping* esperado" foram superiores aos da água filtrada e da eletrodiálise reversa, devido à menor concentração de cálcio.

O comportamento da função objetivo em relação ao ciclo de concentração e ao índice de Puckorius está apresentado nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

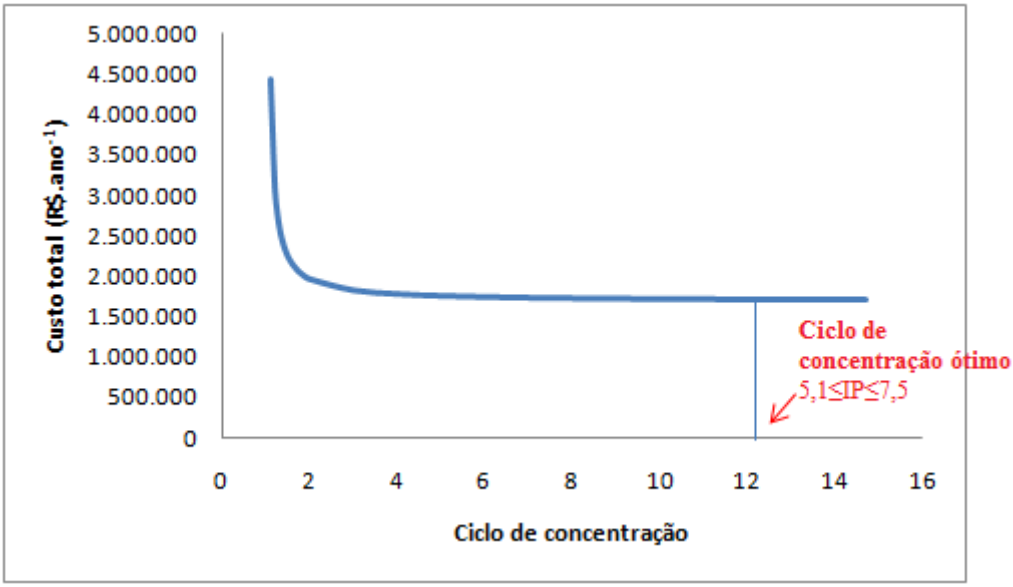

Figura 24: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* esperado" como *make-up*.

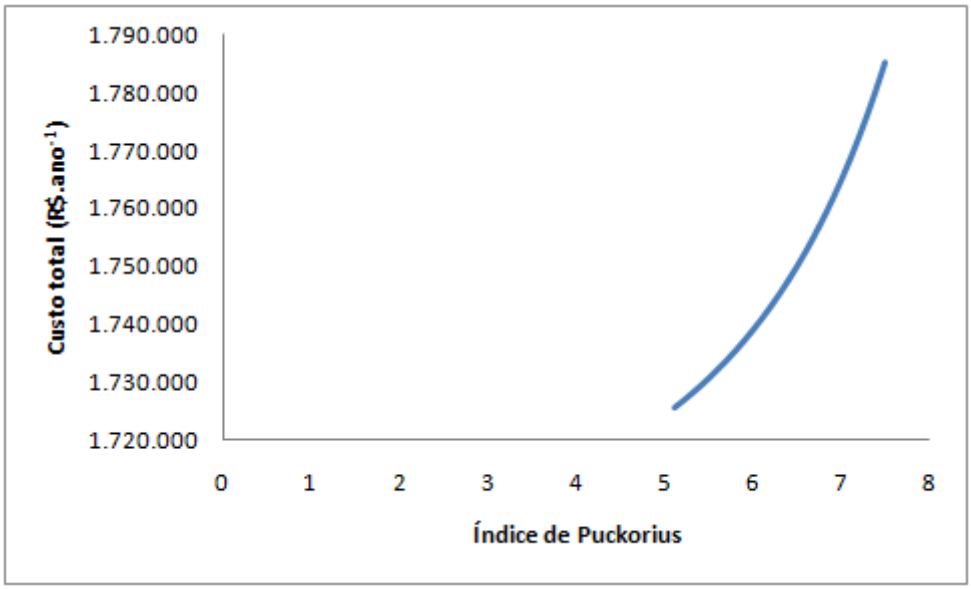

Figura 25: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* esperado" como *make-up*.

Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius.

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos mínimos para a água de *make-up* "*looping* real", considerando as duas faixas do índice de Puckorius, assim como as outras variáveis são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água "*Looping* real" como make-up.

Variáveis	**Valor da variável otimizada (5,1≤IP≤7,5)**	**Valor da variável otimizada (6,1≤IP≤7)**
IP	5,1	6,1
LSI	0,146	-0,214
RSI	6,608	7,328
Ciclo de concentração	14,261	9,191
Vazão da água de *make-up* ($m^3 . h^{-1}$)	34,06	35,54
Custo de capital ($R\$. ano^{-1}$)	318.126,0	318.126,0
Custo de energia ($R\$. ano^{-1}$)	1.129.562,37	1.129.562,37
Custo da água de *make-up* ($R\$. ano^{-1}$)	272.474,22	284.300,61
Custo de aditivos ($R\$. ano^{-1}$)	1.561,83	0
Custo total ($R\$. ano^{-1}$)	1.721.724,41	1.731.988,97

Os resultados da Tabela 22 mostram que o custo da água de *make-up*, o custo de aditivos, e, consequentemente, o custo total do caso com índice de Puckorius entre 5,1 e 7,5 é menor do que no caso com índice de Puckorius entre 6,1 e 7.

No caso com índice de Puckorius igual a 5,1, é importante utilizar dispersantes e inibidores, pois há possibilidade da formação leve de depósito, e os valores de LSI e de RSI indicam leve formação de incrustação e corrosão.

O comportamento da função objetivo em relação ao ciclo de concentração e ao índice de Puckorius está apresentado nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

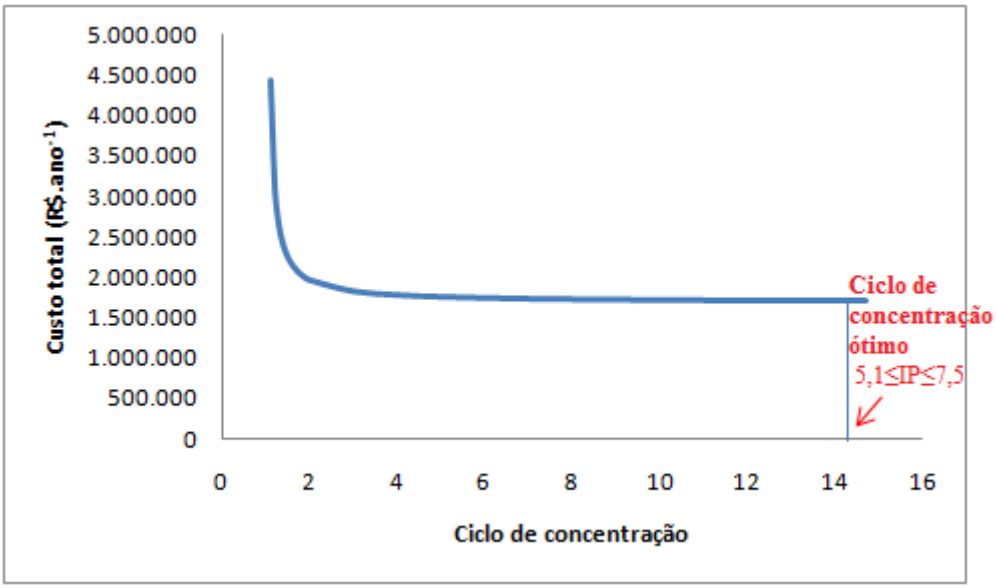

Figura 26: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* real" como *make-up*.

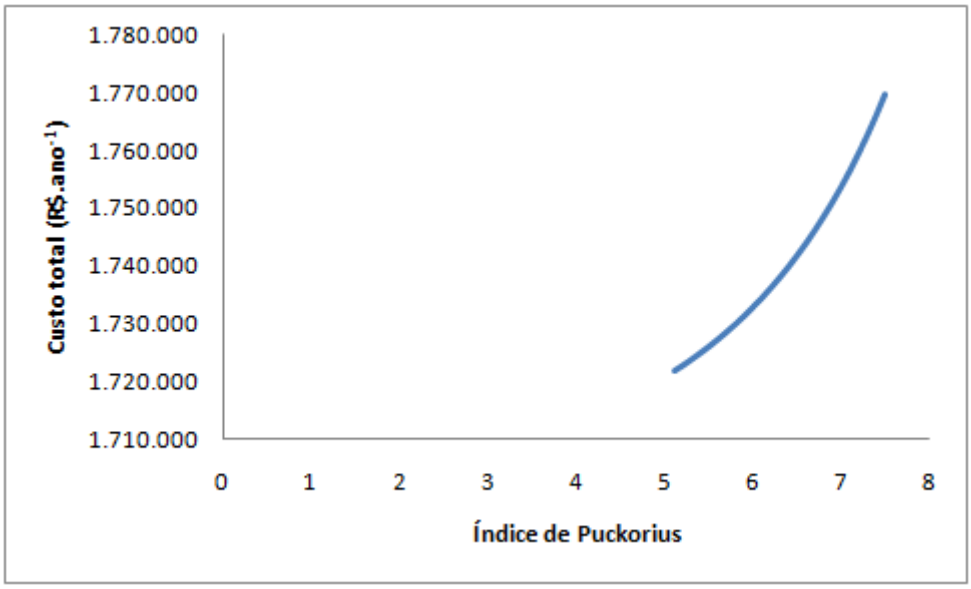

Figura 27: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando a água "*Looping* real" como *make-up*.

Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius. O ciclo de concentração ótimo obtido (14,261) foi próximo do ciclo de concentração máximo (14,711).

Dentre as possíveis águas de reposição na torre de resfriamento do Coque (REGAP), a água "*looping* real" apresentou os ciclos de concentração ideais mais elevados, devido à menor concentração de cálcio.

- **Águas subterrâneas da bacia do Rio São Domingos (RJ)**

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos mínimos para a água de *make-up* proveniente da bacia do Rio São Domingos (RJ), considerando as duas faixas do índice de Puckorius, assim como as outras variáveis são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água subterrânea da bacia do rio São Domingos como *make-up*.

Variáveis	**Valor da variável otimizada (5,1≤IP≤7,5)**	**Valor da variável otimizada (6,1≤IP≤7)**
IP	5,1	6,1
LSI	0,044	-0,306
RSI	6,992	7,711
Ciclo de concentração	5,50	3,55
Vazão da água de *make-up* ($m^3 . h^{-1}$)	38,70	44,11
Custo de capital ($R\$. ano^{-1}$)	318.126,0	318.126,0
Custo de energia ($R\$. ano^{-1}$)	1.129.562,37	1.129.562,37
Custo da água de *make-up* ($R\$. ano^{-1}$)	216.744,12	247.011,55
Custo de aditivos ($R\$. ano^{-1}$)	4.599,47	0
Custo total ($R\$. ano^{-1}$)	1.669.031,96	1.694.699,91

Os resultados mostram que o custo total do caso com índice de Puckorius entre 5,1 e 7,5 é menor, pois o ciclo de concentração é maior, e os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos são menores.

Apesar da baixa concentração de sólidos dissolvidos totais e de cálcio, as águas subterrâneas do rio São Domingos (RJ) apresentam alta concentração de alcalinidade total. Dessa maneira, os ciclos de concentração ideais não foram tão elevados quanto os obtidos pelas possíveis águas de reposição na torre de resfriamento do Coque (REGAP).

Entretanto, o custo da água de *make-up* foi menor devido ao custo de captação dessas águas (R$ 0,70/m³). Portanto, o custo total determinado foi inferior aos custos das possíveis águas de reposição na torre de resfriamento do Coque (REGAP).

O comportamento da função objetivo em relação ao ciclo de concentração e ao índice de Puckorius está apresentado nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

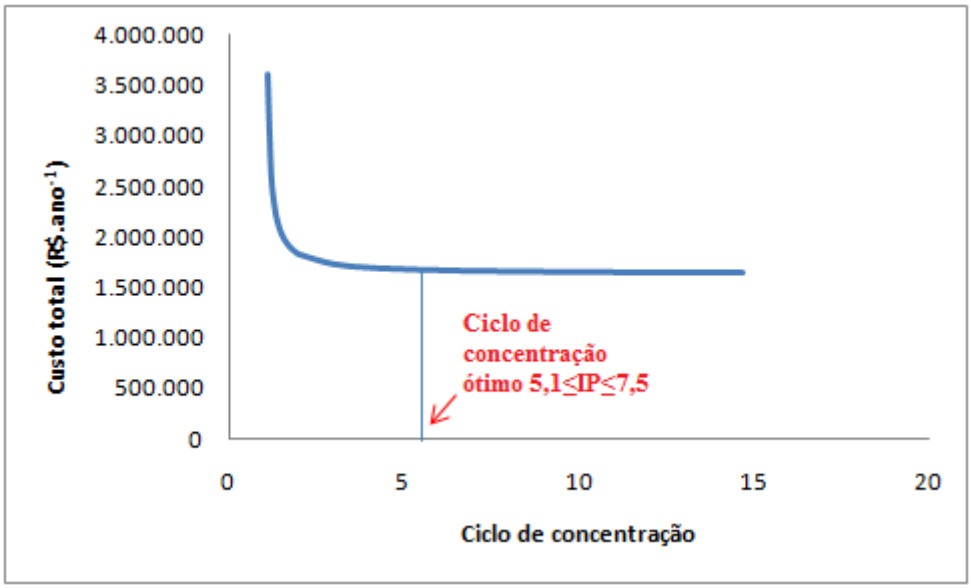

Figura 28: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando as águas subterrâneas do rio São Domingos como *make-up*.

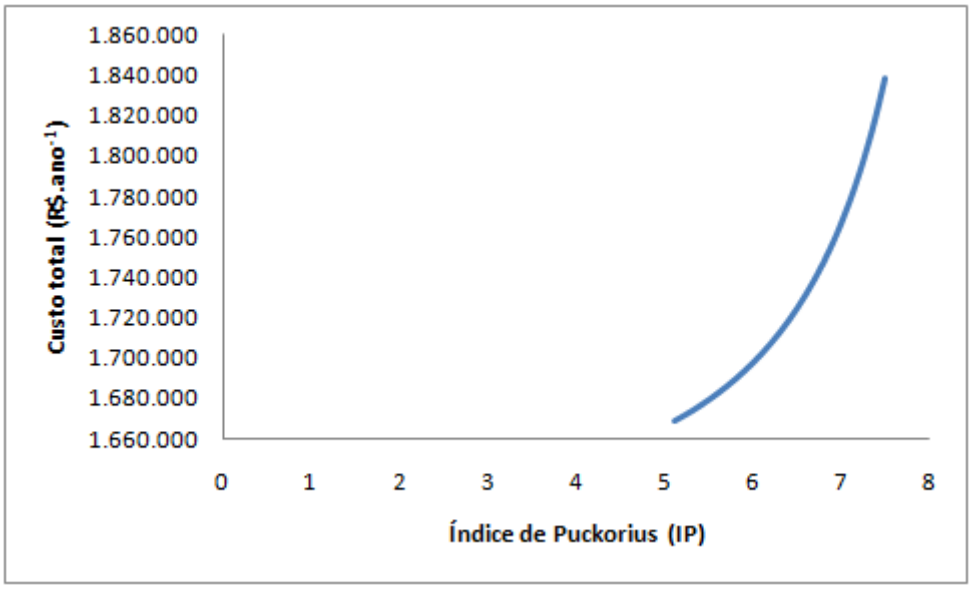

Figura 29: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando as águas subterrâneas do rio São Domingos como *make-up*.

Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius.

- **Água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro**

Os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos mínimos para a água de *make-up* com o padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, considerando as duas faixas do índice de Puckorius, assim como as outras variáveis são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Resultados obtidos com a minimização dos custos da água de *make-up* e de aditivos químicos utilizando a água com padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como *make-up*.

Variáveis	**Valor da variável otimizada (5,1≤IP≤7,5)**	**Valor da variável otimizada (6,1≤IP≤7)**
IP	5,195	6,1
LSI	0,372	0,046
RSI	6,256	6,907
Ciclo de concentração	8,57	5,76
Vazão da água de *make-up* ($m^3 . h^{-1}$)	35,85	38,33
Custo de capital ($R\$. ano^{-1}$)	318.126,0	318.126,0
Custo de energia ($R\$. ano^{-1}$)	1.129.562,37	1.129.562,37
Custo da água de *make-up* ($R\$. ano^{-1}$)	831.811,93	889.237,85
Custo de aditivos ($R\$. ano^{-1}$)	2.735,47	0
Custo total ($R\$. ano^{-1}$)	2.282.235,76	2.336.926,21

Assim como nos resultados obtidos anteriormente, os dados da Tabela 24 mostram que o custo total do caso com índice de Puckorius entre 5,1 e 7,5 é menor, pois o ciclo de concentração é maior, e os custos da água de *make-up* e de aditivos químicos são menores.

Ao contrário das águas de *make-up* anteriores, no caso do IP entre 5,1 e 7,5, o índice de Puckorius determinado não foi o mínimo, devido à concentração máxima permitida de sílica.

Neste caso, o elevado custo da água de make-up pode ser explicado pelo custo da reutilização do efluente secundário da estação de tratamento de efluentes (ETE APOIO) do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro a partir do tratamento por osmose inversa (R$ 2,90/m³). Consequentemente, o custo total foi superior aos custos calculados para as outras águas de reposição.

O comportamento da função objetivo em relação ao ciclo de concentração e ao índice de Puckorius está apresentado nas Figuras 30 e 31, respectivamente.

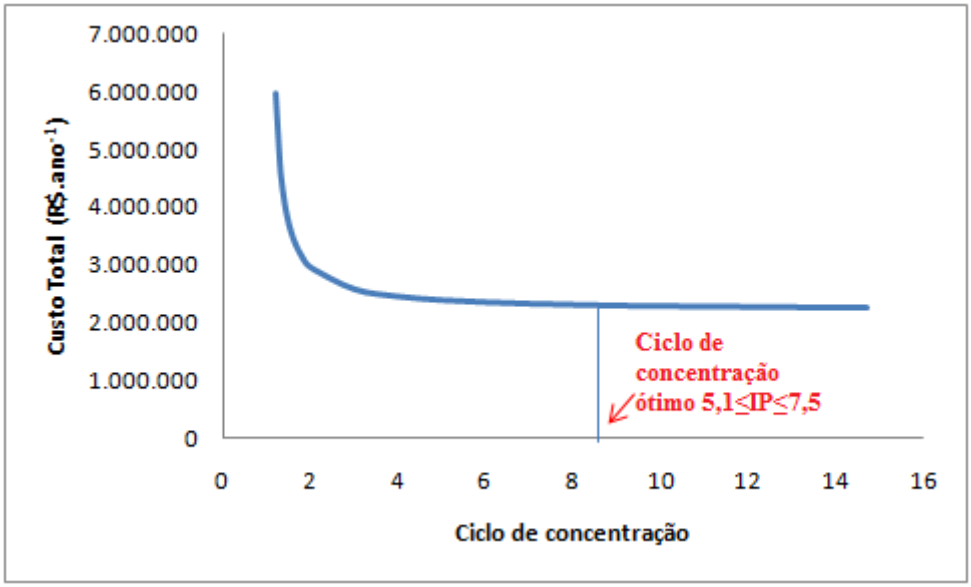

Figura 30: Gráfico do Custo total em função do ciclo de concentração para a torre de resfriamento utilizando a água com padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como *make-up*.

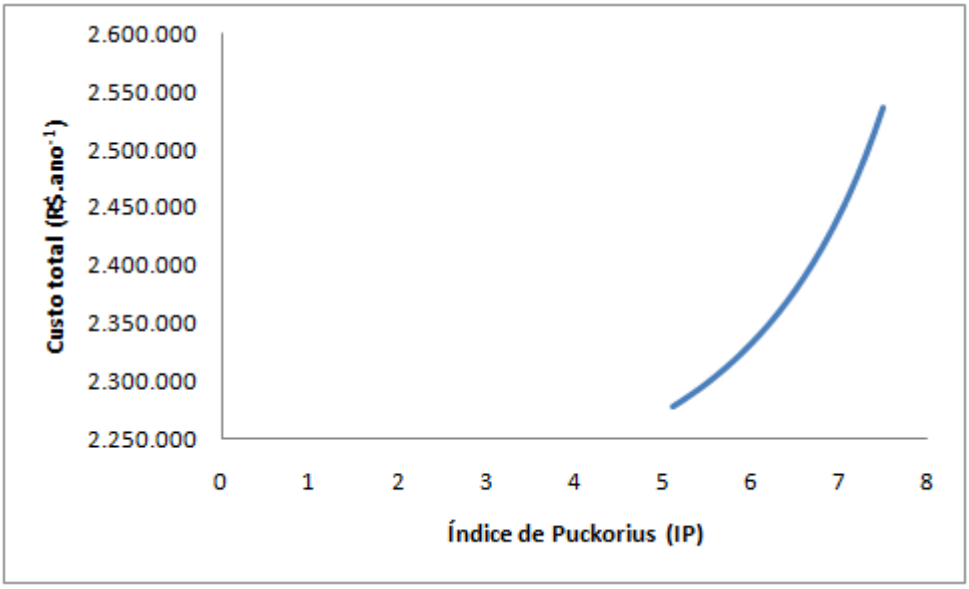

Figura 31: Gráfico do Custo total em função do índice de Puckorius para a torre de resfriamento utilizando a água com padrão de qualidade para reposição das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como *make-up*.

Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius e com a concentração máxima permitida de sílica.

- **Comparação entre todas as águas de *make-up* avaliadas**

A Tabela 25 mostra o custo total do sistema de resfriamento com todas as águas de *make-up* estudadas.

Tabela 25: Custo total dos sistemas de resfriamento com as águas de *make-up* estudadas.

Água de *make-up*	**Custo total mínimo (R$. ano^{-1})**
Água filtrada	1.746.988,02
Água EDR	1.732.276,65
***Looping* esperado**	1.725.619,18
***Looping* real**	1.721.724,41
Águas subterrâneas da bacia do Rio São Domingos (RJ)	1.669.031,96
Água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro	2.282.235,76

Dentre as possíveis águas de reposição, as águas subterrâneas da bacia do Rio São Domingos apresentaram menor custo total devido ao menor custo de captação considerado (R$ 0,70/m³). Em contrapartida, a água de *make-up* das torres de resfriamento do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro apresentou maior custo total, por causa do elevado custo da água (R$ 2,90/m³).

5. CONCLUSÃO

Como uma das principais finalidades da água em refinarias de petróleo e outros setores industriais e comerciais é o resfriamento de processos geradores de calor, modelos que minimizem os custos relacionados às torres de resfriamento são vantajosos. Dessa maneira, é fundamental avaliar todos os custos envolvidos no sistema, e a influência das variáveis operacionais da torre, como as variáveis das correntes de purga e *make-up*, o ciclo de concentração, a vazão dos produtos químicos inibidores de corrosão e incrustação, entre outros.

A partir do modelo matemático implementado no software GAMS e dos dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da REGAP, foi determinado o número de unidades de transferência requerido pelo sistema e do recheio V-Bar com altura de 36ft e distância percorrida pelo ar na direção horizontal do recheio de 14 ft (distância mínima) e 20 ft (distância máxima). Os resultados mostraram que a razão $\dot{m}_w/\dot{m}_{ar}$ operacional do caso com a distância máxima percorrida pelo ar na direção horizontal é maior, pois a transferência de calor é maior, e, consequentemente, a vazão de ar requerida é menor. Além disso, a partir do cálculo dos custos totais destes sistemas, foi verificado que o custo operacional anual da torre de resfriamento com AT=14ft é superior ao custo da torre com AT=20ft, enquanto os custos anuais de capital e total são menores. Em ambos os casos, o custo energético correspondeu à maior parte do custo operacional, e o custo de aditivos correspondeu à menor.

A partir do modelo de otimização implementado no software GAMS e dos dados operacionais da torre de resfriamento da Unidade do Coque da REGAP, foram realizados estudos de casos com diferentes composições de água de *make-up*, com o objetivo de minimizar os custos da água de *make-up* e de aditivos químico. Os resultados mostraram que o custo mínimo é obtido com o maior ciclo de concentração permitido de acordo com o intervalo do índice de Puckorius. Além disso, todos os estudos de caso apresentaram o custo total menor na situação que inclui a utilização de inibidores e biocidas. Logo, a presença de aditivos permite a aplicação de um valor de ciclo de concentração maior e, consequentemente, a minimização dos custos da água de *make-up* e de inibidores e biocidas, além da redução dos impactos ambientais gerados pela purga.

.

Dentre as possíveis águas de reposição, as águas subterrâneas da bacia do Rio São Domingos apresentaram menor custo operacional, devido ao menor custo de captação considerado.

Na função objetivo, não foram considerados o custo de tratamento da corrente de purga e o custo de uma possível substituição de equipamentos ou parada para limpeza no caso da formação de incrustações, corrosão, etc. Como sugestão para continuidade e melhoria deste estudo, uma função objetivo mais completa pode ser elaborada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, R. S. **Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo: Caso REPLAN.** 2005. Dissertação (mestrado em Meio Ambiente)- Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2005.

AQUA AMBIENTE. Curso: Tratamento de água potável. 2004. Disponível em: <http://mario rebola.com/home/wp-content/uploads/2011/09/AquaAmbiente-Tratamento-de-%C3%81gua-Pot%C3%A1vel.pdf>. Acesso em: Março de 2015.

BANCO CENTRAL. Site internet. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br /pec/conversao/conversao.asp>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

CARRIER (Carrier Air Conditioning Company). **Handbook of Air Conditioning System Design**, McGraw-Hill Books, New York, 1965.

CARVALHO, D. D.; MACHADO, B. J. F. **Reúso de efluentes em torres de resfriamento- estudo conceitual: Aeroporto Intrernacional do Rio de Janeiro.** Maringá, 32 (3), p. 295-302, 2010.

CASTRO M. M.; SONG T.W.; PINTO J.M. **Minimization of operational cost in cooling water systems.** Trans IChemE, 78(Part A):192–201, 2000.

CEDAE. Site internet. Disponível em: <http://www.cedae.com.br/>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. **Funcionamento de uma torre de resfriamento de água.** Revista de Graduação da Engenharia Química. São Paulo, 14, p. 5-10, 2005.

CORTINOVIS, G. F.; PAIVA, J. L.; SONG, T. W.; PINTO, J.M. **A systemic approach for optimal cooling tower operation.** Energy Conversion and Management, 50, p. 2200–2209, 2009.

CTI. Site internet. Disponível em: <http://www.cti.org/whatis/coolingtowerdetail.shtml>. Acesso em: Dezembro de 2013.

CTI JOURNAL. The Official Publication of The Cooling Technology Institute. Vol. 35, n° 2, 2014.

CTS. Site internet. Disponível em: <http://coolingtowersystems.com/cooling_twr_price.php>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

DANTAS, E. **Tratamento de Água de Refrigeração e Caldeiras.** Editora ECOLAB, 1988.

ELKIND, R. **Utilidades- Sistemas de Águas**. Curso de Formação de Operadores de Refinaria, PETROBRAS, 2002.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). **Guidelines for water reuse.** Technology transfer manual n. EPA/625/R-92/004. Setembro, Washington, D.C., 1992.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). **Compilation of Air Pollutant Emission Factors- Volume I: Stationary Point and Area Sources.** 5th ed., AP-42, Washington, D.C., 1995.

FACÃO, J. M. R. V. **Comportamento Térmico de Torres de Arrefecimento Indirectas para aplicação a Sistemas de Arrefecimento Ambiente.** 1999. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.

FEMP (Federal Energy Management Program). **Cooling towers: understanding key components of cooling towers and how to improve water efficiency.** 2011. Disponível em: < http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/waterfs_coolingtowers.pdf >. Acesso em: Dezembro de 2013.

FIRJAN. Site internet. Disponível em: <http://www.quantocustaenergia.com.br/quantocusta/quanto-custa/quanto-custa-quanto-custa-a-energia-eletrica-para-a-industria-no-brasil-sistema-firjan.htm>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

FISENKO, S.P.; BRIN, A.A.; PETRUCHIK, A.I. **Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, p. 165–177, 2004.

FLYNN, D. J. **The Nalco Water Handbook**. 3rd ed., McGraw Hill, Nova York, 2009.

FÓFANO, S. **Avaliação de técnicas eletroquímicas na monitoração de corrosão por sulfetos em sistemas de água de resfriamento industrial.** 2000. Dissertação (mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais)- Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2000.

FUJITA, T.; TEZUKA, S. **Calculations on thermal performance of draft cooling towers.** ASHRE Transactions, 92, p. 274-287, 1986.

FURTADO, M. **Reúso de Água - Refinarias da Petrobras mantêm planos para reaproveitar efluentes em caldeiras e torres de resfriamento.** Química e Derivados, 2013. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/pquimica/quimica-2/reuso-de-agua-refinarias-da-petrobras-mantem-planos-para-reaproveitar-efluentes-em-caldeiras-e-torres-de-resfriamento/>. Acesso em: Dezembro de 2013.

GE. Handbook of industrial water treatment. Site internet. Disponível em: <http://www.gewater.com/handbook/index.jsp>. Acesso em: Fevereiro de 2014.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ªed. Editora LTC- Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2003.

HUCHLER, L. **Cooling Towers, Part 2: Operating, Monitoring and Maintaining.** Chemical Engineering Progress, 105 (10), p. 38-41, 2009.

KIM, K., SAVULESCU, L. and SMITH, R. **Design of cooling systems for effluent temperature reduction.** Chemical Engineering Science, 56 (5), p. 1811-1830, 2001.

KINTNER-MEYER, M.; EMERY, A. F. **Cost-optimal design for cooling towers**. ASHRAE Journal, 37(4), p. 46–55, 1995.

LIMA JÚNIOR, R. C. **Modelagem Fenomenológica do desempenho de torres de resfriamento de água acopladas e estudo de casos.** 2011. Dissertação (mestrado em Engenharia Química)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5th ed., McGraw-Hill, Nova York, 1993.

MACHADO, L. P. **Reúso de esgotos sanitários tratados para fins de água de reposição em torres de resfriamento – Sistemas semi-abertos.** 2004. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental)- Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MACHADO, M. B. **Avaliação do processo de eletrodiálise reversa no tratamento de efluentes de refinaria de petróleo.** 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica, e de Materiais- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MANCUSO, P. C. S. **Reúso de água para torre de resfriamento.** Biblioteca Virtual da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MARIANO, J. B. **Impactos ambientais do refino de petróleo.** 2001. Dissertação (mestrado em Ciências em Planejamento Energético)- COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MEGANORM. Site internet. Disponível em: <http://www.ksb.com.br>. Acesso em: Maio de 2015.

MELLO, A. G. B. **Influência da Deformação Plástica na Corrosão de Aço Carbono, Aço Inoxidável e Cobre em Sistemas de Resfriamento.** 2008. Dissertação (mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)- Escola de Química da Universidade Federal do Rio de janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MIRRE, R. C. **Metodologia para o gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais por meio da integração de processos.** 2012. Dissertação (doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2012.

NASCIMENTO, J. F. **Avaliação de membranas de osmose inversa no tratamento de águas de purga de torres de refrigeração de indústria petrolífera com finalidade de reúso.** 2004. Dissertação (mestrado em Química)- Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.

NEMEROW, N. L. **Liquid waste of industry: theories, practices and treatment**. 1st ed., Addison Wesley Publishing Company, Nova York, 1971.

OIKAWA, E. H. **Avaliação de um sistema industrial de resfriamento de água.** 2012. Dissertação (mestrado em Engenharia Química)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

OMNI - Torres de resfriamento de água. Site internet. Disponível em: <http://www.omnigrupo.com.br/pdf/apostila_omni.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2013.

PEREIRA, C. A. **Tratamentos físico-químicos de água.** Volume 1, Apostila do curso de Engenharia de Produção, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Regional de Resende, Rio de Janeiro, 2001.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 7th ed., McGraw Hill, Nova York, 1997.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 8th ed., McGraw Hill, Nova York, 2008.

PETROBRAS. Site internet. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/acessoainformacao/materiaishtm/contratos_materiais/PORTAL_1000_M/Documents/Mar2012.htm>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

PINTO, B. V. **Características químicas e físico-químicas de águas subterrâneas do Estado do Rio de Janeiro.** 2006. Dissertação (mestrado em Química)- Programa de Pós-Graduação em Química da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

REVISTA MEIO FILTRANTE. Água de resfriamento, porquê mantê-la limpa? Ano II, 6ª ed., jul-set, 2003.

ROSENTHAL, R. E. **GAMS- A user's guide.** GAMS Development Corporation, Washington, D.C., 2014.

RUTHERFORD, T. F. **Applied General Equilibrium Modeling with MPSGE as a GAMS Subsystem: An Overview of the Modeling Framework and Syntax.** Computational Economics, 14, p. 1-46, 1999.

SANTOS, L. M. M. **Índice de qualidade de água subterrânea aplicado em área de aquíferos crsistalinos com uso agrícola: Bacia do rio São Domingos-RJ.** 2009. Dissertação (doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SAMPAIO, F. S. **Torre de resfriamento: modelagem, simulação e testes experimentais para apoio ao ensino de engenharia mecânica.** 2013. Projeto Final **(**graduação em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Tecnologia/ Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SILVA, J. O. M. **Tratamento químico de água de resfriamento**. Minicursos Conselho Regional de Química - IV Região, Ribeirão Preto, São Paulo, 2009.

SERNA-GONZÁLEZ, M.; PONCE-ORTEGA, J.M.; JIMÉNEZ-GUTIÉRREZ, A. **MINLP optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling towers.** Chemical Engineering Research and Design, 88: 614–625, 2010.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7ª Ed., Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, K. R. **Otimização da operação de torres de resfriamento.** I Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental - IBEAS, Bauru, São Paulo, 2010.

SOUZA, R. S. **Reúso de água em sistema de resfriamento com eletrodiálise reversa.** 2º Simpósio Internacional de reúso de água – ABES, Curitiba, Paraná, 2015.

TROVATI, J. **Tratamento de água de resfriamento**. 2004. Disponível em: < http: //www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2013.

THULUKKANAM, K. **Heat exchanger Design Handbook.** 2nd ed., Taylor & Francis Group, Flórida, 2013.

VANELLI, C. A**. Conservação de água em refinaria de petróleo: o caso da REVAP.** 2004. Dissertação (mestrado em Engenharia da Energia)- Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2004.

VEIGA, A. A. **Estudo do efeito biocida do cloro e do peróxido de hidrogênio em sistemas de resfriamento com reúso de efluente como água de reposição.** 2010. Dissertação (doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2010.

APÊNDICE A – VALORES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÂO DO pH DE SATURAÇÂO

Tabela A-1: Valores do coeficiente A da equação do pH de saturação do carbonato de cálcio na água (AQUA AMBIENTE, 2004).

Sólidos totais (ppm)	A
50-350	0,1
400-1100	0,2

Tabela A-2: Valores do coeficiente B da equação do pH de saturação do carbonato de cálcio na água (AQUA AMBIENTE, 2004).

Temperatura		B
°C	°F	
0	32	2,6
2	36	2,5
7	44	2,4
10	50	2,3
14	58	2,2
18	64	2,1
22	72	2,0
28	82	1,9
32	90	1,8
38	100	1,7
44	112	1,6
51	124	1,5
57	134	1,4
64	148	1,3
72	162	1,2
85	180	1,1

Tabela A-3: Valores dos coeficientes C e D da equação do pH de saturação do carbonato de cálcio na água (AQUA AMBIENTE, 2004).

Dureza em Ca (ppm $CaCO_3$)	**C**	**Alcalinidade total (ppm $CaCO_3$)**	**D**
10	0,6	10	1,0
12	0,7	12	1,1
14	0,8	14	1,2
18	0,9	18	1,3
23	1,0	23	1,4
28	1,1	28	1,5
35	1,2	36	1,6
44	1,3	45	1,7
56	1,4	56	1,8
70	1,5	70	1,9
88	1,6	88	2,0
111	1,7	111	2,1
139	1,8	140	2,2
175	1,9	177	2,3
230	2,0	230	2,4
280	2,1	280	2,5
350	2,2	360	2,6
440	2,3	450	2,7
560	2,4	560	2,8
700	2,5	700	2,9
870	2,6	880	3,0
1050	2,7	--	--

APÊNDICE B – CÁLCULO DO NUT REQUERIDO PELO SISTEMA

Modelo de cálculo do NUT requerido pelo sistema executado no GAMS (versão 24.3.3)

```
$title modelo cálculo NUT requerido pelo sistema

variable

razaoLG razão entre vazão mássica de água e vazão mássica de ar
NUT NUT na torre com fluxo contracorrente
NUTcr na torre com fluxo cruzado
Pv pressão parcial do vapor de água
Psbu Pressão de saturação na Tbu
Tbu Temperatura de bulbo úmido
UA umidade absoluta na Tbu
Y  constante
Tpo Temperatura do ponto de orvalho na Tbu
hlvappo entalpia de vaporização
hentrada entalpia de entrada
hsaida entalpia de saída
te temperatura de entrada
ts temperatura de saída
t1 temperatura 1
Psbu1 pressão de saturação na T1
Y1 constante
UA1 umidade absoluta  na T1 (kg água por kg de ar)
Tpo1 temperatura de orvalho na T1
hlvappo1 entalpia de vaporização na T1
hw1 entalpia de na T1
t2 temperatura 2
Psbu2 pressão de saturação na T2
Y2  constante
UA2 umidade absoluta na T2 (kg água por kg de ar)
Tpo2 Temperatura do ponto de orvalho na T2
hlvappo2 entalpia de vaporização na T2
hw2 entalpia de na T2
t3 temperatura 3
Psbu3 pressão de saturação na T3
Y3  constante
UA3 umidade absoluta na T3 (kg água por kg de ar)
Tpo3 Temperatura de orvalho na T3
hlvappo3 entalpia de vaporização na T3
hw3 entalia de na T3
t4 temperatura 4
Psbu4 pressão de saturação na T4
Y4 constante
UA4 umidade absoluta na T4 (kg água por kg de ar)
Tpo4 temperatura de orvalho na T4
hlvappo4 entalpia de vaporização na T4
```

```
hw4 entalpia de na T4
ha1 entalpia no ponto 1
ha2 entalpia no ponto 2
ha3 entalpia no ponto 3
ha4 entalpia no ponto 4
deltah1 diferença das entalpias
deltah2 diferença das entalpias
deltah3 diferença das entalpias
deltah4 diferença das entalpias


;

positive variable razaoLG;
equation

eqrazaolg
Tbulboumido
tentrada
tsaida
igualdadeNUT
Equacaodorecheio
Pdevapor
Psaturacaobu
Uabsoluta
Ycte
Torvalho
hlvaporizacaopo
entalpiaentrada
entalpiasaida
temperatura1
Psaturacaobu1
Ycte1
Uabsoluta1
Torvalho1
hlvaporizacaopo1
Entalpiaw1
temperatura2
Psaturacaobu2
Ycte2
Uabsoluta2
Torvalho2
hlvaporizacaopo2
Entalpiaw2
temperatura3
Psaturacaobu3
Ycte3
Uabsoluta3
Torvalho3
hlvaporizacaopo3
```

```
Entalpiaw3
temperatura4
Psaturacaobu4
Ycte4
Uabsoluta4
Torvalho4
hlvaporizacaopo4
Entalpiaw4
Entalpiaa1
Entalpiaa2
Entalpiaa3
Entalpiaa4
delta1
delta2
delta3
delta4


;


eqrazaolg.. razaoLG=e=0.3;
Tbulboumido.. Tbu =e= 296.45;
tentrada.. te =e= 307.15;
tsaida.. ts=e= 298.15 ;
igualdadeNUT.. NUTcr*(1-(0.106* ( (1- ((deltah1)/(deltah4)) )**(3.5) )  )) =e= NUT  ;
Equacaodorecheio.. NUT =e=  (4.2) *((te-ts)/4)*
((1/deltah1)+(1/deltah2)+(1/deltah3)+(1/deltah4)) ;
Pdevapor.. Pv =e= log(Psbu);
Psaturacaobu.. log(Y) =e= ((-27405.526 + 97.5413*Tbu - 0.146244*(Tbu**2) +
0.12558*(10**(-3))*(Tbu**3) - 0.48502*(10**(-7))*(Tbu**4))*(((4.34903*Tbu) -
0.39381*(10**(-2))*(Tbu**2))**(-1)));
Ycte..  y=e=(Psbu/(22105649.25));
Uabsoluta.. UA*((1.013*(10**5))-Psbu) =e= 0.6219*Psbu;
Torvalho.. Tpo=e=(100.45 + (33.193*log(Psbu*1.4503*(10**(-4)))) +
(2.319*(power(log(Psbu*1.4503*(10**(-4))),(2)))) +
(0.17074*(power(log(Psbu*1.4503*(10**(-4))),(3)))) + (1.2063*((Psbu*1.4503*(10**(-
4)))**(0.1984))) + (459.67)  )*(5/9);
hlvaporizacaopo..  hlvappo=e= 2502535.259 - (2385.76424*(Tpo-273.16));
entalpiaentrada..  hentrada*1000=e= (1006.92540 * (Tbu - 273.16)) + (4186.8 * UA * (Tpo-
273.16)) + (hlvappo*UA) + (1875.6864 * UA * (Tbu-Tpo));
entalpiasaida.. hsaida=e= hentrada + ( (4.2) * (razaoLG) * (te-ts) );
Temperatura1.. t1=e= ts + 0.1 * (te- ts);
Psaturacaobu1.. log(Y1) =e= ((-27405.526 + 97.5413*T1 - 0.146244*(T1**2) +
0.12558*(10**(-3))*(T1**3) - 0.48502*(10**(-7))*(T1**4))*(((4.34903*T1) -
0.39381*(10**(-2))*(T1**2))**(-1)));
Ycte1.. y1 =e= (Psbu1/(22105649.25));
Uabsoluta1..  UA1*((1.013*(10**5))-Psbu1) =e= 0.6219*Psbu1;
Torvalho1..   Tpo1=e=(100.45 + (33.193*log(Psbu1*1.4503*(10**(-4)))) +
(2.319*(power(log(Psbu1*1.4503*(10**(-4))),(2)))) +
```

```
(0.17074*(power(log(Psbu1*1.4503*(10**(-4))),(3)))) + (1.2063*((Psbu1*1.4503*(10**(-
4)))**(0.1984))) + (459.67)  )*(5/9);
hlvaporizacaopo1..  hlvappo1=e= 2502535.259 - (2385.76424*(Tpo1-273.16));
Entalpiaw1.. hw1 *1000=e= (1006.92540 * (T1 - 273.16)) + (4186.8 * UA1 * (Tpo1-273.16))
+ (hlvappo1*UA1) + (1875.6864 * UA1 * (T1-Tpo1));
Temperatura2.. t2=e= ts + 0.4 * (te- ts);
Psaturacaobu2.. log(Y2) =e= ((-27405.526 + 97.5413*T2 - 0.146244*(T2**2) +
0.12558*(10**(-3))*(T2**3) - 0.48502*(10**(-7))*(T2**4))*(((4.34903*T2) -
0.39381*(10**(-2))*(T2**2))**(-1)));
Ycte2.. y2 =e= (Psbu2/(22105649.25));
Uabsoluta2..  UA2*((1.013*(10**5))-Psbu2) =e= 0.6219*Psbu2;
Torvalho2..   Tpo2=e=(100.45 + (33.193*log(Psbu2*1.4503*(10**(-4)))) +
(2.319*(power(log(Psbu2*1.4503*(10**(-4))),(2)))) +
(0.17074*(power(log(Psbu2*1.4503*(10**(-4))),(3)))) + (1.2063*((Psbu2*1.4503*(10**(-
4)))**(0.1984))) + (459.67)  )*(5/9);
hlvaporizacaopo2..  hlvappo2=e= 2502535.259 - (2385.76424*(Tpo2-273.16));
Entalpiaw2.. hw2 *1000=e= (1006.92540 * (T2 - 273.16)) + (4186.8 * UA2 * (Tpo2-273.16))
+ (hlvappo2*UA2) + (1875.6864 * UA2 * (T2-Tpo2));
Temperatura3.. t3=e= te - (0.4 * (te- ts));
Psaturacaobu3.. log(Y3) =e= ((-27405.526 + 97.5413*T3 - 0.146244*(T3**2) +
0.12558*(10**(-3))*(T3**3) - 0.48502*(10**(-7))*(T3**4))*(((4.34903*T3) -
0.39381*(10**(-2))*(T3**2))**(-1)));
Ycte3.. y3 =e= (Psbu3/(22105649.25));
Uabsoluta3..  UA3*((1.013*(10**5))-Psbu3) =e= 0.6219*Psbu3;
Torvalho3..   Tpo3=e=(100.45 + (33.193*log(Psbu3*1.4503*(10**(-4)))) +
(2.319*(power(log(Psbu3*1.4503*(10**(-4))),(2)))) +
(0.17074*(power(log(Psbu3*1.4503*(10**(-4))),(3)))) + (1.2063*((Psbu3*1.4503*(10**(-
4)))**(0.1984))) + (459.67)  )*(5/9);
hlvaporizacaopo3..  hlvappo3=e= 2502535.259 - (2385.76424*(Tpo3-273.16));
Entalpiaw3.. hw3 *1000=e= (1006.92540 * (T3 - 273.16)) + (4186.8 * UA3 * (Tpo3-273.16))
+ (hlvappo3*UA3) + (1875.6864 * UA3 * (T3-Tpo3));
Temperatura4.. t4=e= te - (0.1 * (te- ts));
Psaturacaobu4.. log(Y4) =e= ((-27405.526 + 97.5413*T4 - 0.146244*(T4**2) +
0.12558*(10**(-3))*(T4**3) - 0.48502*(10**(-7))*(T4**4))*(((4.34903*T4) -
0.39381*(10**(-2))*(T4**2))**(-1)));
Ycte4.. y4 =e= (Psbu4/(22105649.25));
Uabsoluta4..  UA4*((1.013*(10**5))-Psbu4) =e= 0.6219*Psbu4;
Torvalho4..   Tpo4=e=(100.45 + (33.193*log(Psbu4*1.4503*(10**(-4)))) +
(2.319*(power(log(Psbu4*1.4503*(10**(-4))),(2)))) +
(0.17074*(power(log(Psbu4*1.4503*(10**(-4))),(3)))) + (1.2063*((Psbu4*1.4503*(10**(-
4)))**(0.1984))) + (459.67)  )*(5/9);
hlvaporizacaopo4..  hlvappo4=e= 2502535.259 - (2385.76424*(Tpo4-273.16));
Entalpiaw4.. hw4 *1000=e= (1006.92540 * (T4 - 273.16)) + (4186.8 * UA4 * (Tpo4-273.16))
+ (hlvappo4*UA4) + (1875.6864 * UA4 * (T4-Tpo4));
Entalpiaa1.. Ha1 =e= hentrada + (0.1 * (4.2) * (razaoLG) *(te-ts));
Entalpiaa2.. Ha2 =e= hentrada + (0.4 * (4.2) * (razaoLG) *(te-ts));
Entalpiaa3.. Ha3 =e= hsaida - (0.4 * (4.2) * (razaoLG) *(te-ts));
Entalpiaa4.. Ha4 =e= hsaida - (0.1 * (4.2) * (razaoLG) *(te-ts));
delta1.. deltah1=e= hw1-ha1;
delta2.. deltah2=e= hw2-ha2;
```

```
delta3.. deltah3=e= hw3-ha3;
delta4.. deltah4=e= hw4-ha4;


Psbu.lo=0.00001;
Y.lo=0.00001 ;
Tbu.lo=0.00001;
Psbu1.lo=0.00001;
Y1.lo=0.00001 ;
T1.lo=0.00001;
Psbu2.lo=0.00001;
Y2.lo=0.00001 ;
T2.lo=0.00001;
Psbu3.lo=0.00001;
Y3.lo=0.00001 ;
T3.lo=0.00001;
Psbu4.lo=0.00001;
Y4.lo=0.00001 ;
T4.lo=0.00001;
deltah1.lo=0.00001;
deltah2.lo=0.00001;
deltah3.lo=0.00001;
deltah4.lo=0.00001;


model modelo1 /all/

solve modelo1 using nlp minimizing NUTcr;


display razaoLG.l,Tbu.l,Pv.l,Psbu.l, UA.l, Tpo.l, hlvappo.l, hentrada.l,hsaida.l, t1.l, Psbu1.l,
UA1.l, Tpo1.l,hlvappo1.l , hw1.l,t2.l,Psbu2.l, UA2.l, Tpo2.l,hlvappo2.l , hw2.l, t3.l,Psbu3.l,
UA3.l, Tpo3.l,hlvappo3.l , hw3.l,  t4.l, Psbu4.l, UA4.l, Tpo4.l,hlvappo4.l , hw4.l,
ha1.l,ha2.l,ha3.l,ha4.l,deltah1.l, deltah2.l, deltah3.l, deltah4.l,NUT.l, NUTcr.l;
```

APÊNDICE C - CÁLCULO DO CUSTO TOTAL DO ESTUDO DE CASO 1

Modelo de cálculo do custo total dos estudos de caso executado no GAMS (versão 24.3.3)

```
$title modelo cálculo custo total (CC=5)

variable
Ctotal custo total (R$ por ano)
Ccap custo de capital da torre relacionado ao recheio (R$ por ano)
Cop custo operacional da torre (R$ por ano)
Waditivo1 dosagem contínua do aditivo 1 (kg por h)
Waditivo2 dosagem contínua do aditivo 2 (kg por h)
Waditivo3 dosagem contínua do aditivo 3 (kg por h)
Waditivo4 dosagem contínua do aditivo 4 (kg por h)
Ccir1 concentração de aditivo químico 1 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir2 concentração de aditivo químico 2 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir3 concentração de aditivo químico 3 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir4 concentração de aditivo químico 4 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir5 concentração de aditivo químico 5 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Crep1 concentração de aditivo químico 1 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep2 concentração de aditivo químico 2 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep3 concentração de aditivo químico 3 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep4 concentração de aditivo químico 4 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep5 concentração de aditivo químico 5 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Qpurga  vazão volumétrica da água de purga (m³ por h)
Qarraste vazão volumétrica da água de arraste (m³ por h)
Qvazamento vazão volumétrica da água de vazamento (m³ por h)
Qevaporacao vazão volumétrica da água de evaporação (m³ por h)
Qaguamakeup vazão da água de make-up (m³ por h)
POWp energia elétrica cosumida pelas bombas  (Kw)
POWf energia elétrica consumida pelos ventiladores (kw)
mar vazão mássica da corrente de ar  (kg por h)
mw vazão mássica de água (kg por h)
n eficiência da torre de resfriamento (%)
Q carga térmica removida na torre de resfriamento (kJ por h)
CC ciclo de concentração
razaoLG razão entre vazão mássica de água e vazão mássica de ar
Z altura do recheio da torre (ft)
AT distância percorrida pelo ar na direção horizontal (ft)
NUT NUT na torre com fluxo cruzado
te temperatura de entrada (K)
ts temperatura de saída (K)
tbu temperatura de bulbo úmido (K)
Cmakeup Custo da água de make-up (R$ por ano)
Cenergia Custo de energia (ventilador e bomba) (R$ por ano)
Caditivo Custo de aditivos (R$ por ano)

;

positive variable Waditivo1, Waditivo2, Waditivo3, Waditivo4, Waditivo5, Ccir1, Ccir2,
Ccir3, Ccir4,Ccir5, crep1, crep2, crep3, crep4,crep5, Qpurga, Qarraste, Qevaporacao,
```

Qaguamakeup, Qvazamento, POWp, POWf, mar,Q, n, mw, Z, AT, razaoLG, Cmakeup, Cenergia, Caditivo, Cop, CC, Te, Ts, Tbu;

equation

funcaoobjetivo cálculo da função objetivo
custooperacional custo operacional
customakeup custo da água de make-up
custoenergia custo de energia
custoaditivo custo de aditivos
Dcontinua1 dosagem contínua aditivo 1
Dcontinua2 dosagem contínua aditivo 2
Dcontinua3 dosagem contínua aditivo 3
Dcontinua4 dosagem contínua aditivo 4
Dcontinua5 dosagem contínua aditivo 5
balancoaditivo1 balanço de massa aditivo 1
balancoaditivo2 balanço de massa aditivo 2
balancoaditivo3 balanço de massa aditivo 3
balancoaditivo4 balanço de massa aditivo 4
balancoaditivo5 balanço de massa aditivo 5
concentracaoaditivo1cir concentração do aditivo 1 na água de circulação
concentracaoaditivo2cir concentração do aditivo 2 na água de circulação
concentracaoaditivo3cir concentração do aditivo 3 na água de circulação
concentracaoaditivo4cir concentração do aditivo 4 na água de circulação
concentracaoaditivo5cir concentração do aditivo 5 na água de circulação
balancomassa balanço de massa na torre
Cicloconc ciclo de concentração
vazaomassicaagua vazão mássica da água de circulação
potf potencia ventilador (Kw)
potp potencia bomba (Kw)
vazaoevaporacao vazão da água de evaporação
vazaoarraste vazão da água de arraste
eficiencia eficiência da torre de resfriamento
Cargat carga térmica removida da torre
razaoLsobreG razão entre vazão mássica de água e vazão mássica de ar
EquacaodorecheioVbar equação característica do recheio da torre
vazaovazamento vazão de vazamento
custocapital Custo de capital

Tbulboumido Temperatura de bulbo úmido
tentrada Temperatura de entrada
tsaida Temperatura de saída
razaoaguaar valor da razãoLG
CConcentracao ciclo de concentração
altura altura do recheio
distanciaAT distância percorrida pelo ar na direção horizontal

;
funcaoobjetivo.. Ctotal=E= Cop +Ccap;

```
custooperacional.. Cop=e=Cmakeup+Cenergia+Caditivo;
customakeup.. Cmakeup=E=8000*(1*Qaguamakeup);
custoenergia.. Cenergia=e= 8000*(0.4038*((POWp)+((POWf))));
custoaditivo.. Caditivo=e=
(8000*14.156*Waditivo1)+(8000*2.646*Waditivo2)+(8000*7.716*Waditivo3)+(8000*9.080
*Waditivo4)+(8000*0.73*Waditivo5);
Dcontinua1.. Waditivo1*1000=E=(Ccir1*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua2.. Waditivo2*1000=E=(Ccir2*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua3.. Waditivo3*1000=E=(Ccir3*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua4.. Waditivo4*1000=E=(Ccir4*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua5.. Waditivo5*1000=E=(Ccir5*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
balancoaditivo1.. Qaguamakeup*crep1=E=Ccir1*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo2.. Qaguamakeup*crep2=E=Ccir2*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo3.. Qaguamakeup*crep3=E=Ccir3*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo4.. Qaguamakeup*crep4=E=Ccir4*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo5.. Qaguamakeup*crep5=E=Ccir5*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
concentracaoaditivo1cir.. Ccir1=e=2;
concentracaoaditivo2cir.. Ccir2=e=8;
concentracaoaditivo3cir.. Ccir3=e=3;
concentracaoaditivo4cir.. Ccir4=e=1;
concentracaoaditivo5cir.. Ccir5=e=0.05;
balancomassa.. Qaguamakeup=E=Qarraste+Qpurga+Qevaporacao+Qvazamento;
Cicloconc..
(Qpurga+Qarraste+Qevaporacao+Qvazamento)=E=CC*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
vazaomassicaagua.. mw=E=2300*993 ;
potf.. POWf=E=0.0548*(mar/1.2041)*0.001;
potp.. POWp=E=0.7456999*220;
vazaoevaporacao.. Qevaporacao=E=0.00153*(mw/993)*(34-25);
vazaoarraste.. Qarraste=E=0.001*(mw/993);
eficiencia.. n*(34-23.3)=E=(34-25)*100;
Cargat.. Q=E=(0.004179*(mw)*(34-25));
razaoLsobreG.. mw=E=mar*razaoLG;
EquacaodorecheioVbar.. NUT =e= (0.08854*((razaoLG)**(-
0.5371))*(Z**(0.4629))*(AT**(0.5371)) ) ;
vazaovazamento.. Qvazamento=e=(mw/993)*4.3*(10**(-6));
custocapital.. Ccap=e=2.66* 2006.6*AT*0.3048*AT*0.3048*Z*0.3048*0.2983;

Tbulboumido.. Tbu =e= 296.45;
tentrada.. te =e= 307.15;
tsaida.. ts=e= 298.15 ;
CConcentracao.. CC=e=5;
altura.. Z=e=36;

*distanciaAT.. AT=e=14;
distanciaAT.. AT=e=20;
*razaoaguaar.. razaoLG=e=0.56;
razaoaguaar.. razaoLG=e=0.67;

Tbu.lo=0.00001;
razaoLG.lo=0.00001;
```

```
model modelo1 /all/
solve modelo1 using nlp minimizing Ctotal;
display Ctotal.l,Cop.l, Cmakeup.l,Cenergia.l,Caditivo.l,Ccap.l, Ccir1.l, Ccir2.l, Ccir3.l,
Ccir4.l,Ccir5.l, crep1.l, crep2.l, crep3.l, crep4.l,crep5.l, Waditivo1.l, Waditivo2.l, Waditivo3.l,
Waditivo4.l,Waditivo5.l, Qpurga.l, Qarraste.l,Qvazamento.l, Qevaporacao.l, Qaguamakeup.l,
POWf.l,POWp.l, mar.l, n.l,Q.l, mw.l,razaoLG.l, Z.l, AT.l, Tbu.l, NUT.l, CC.l;
```

APÊNDICE D – MODELO DE OTIMIZAÇÂO DO CUSTO TOTAL (IP entre 6,1 e 7)

Modelo de otimização do custo total (IP entre 6,1 e 7) executado no GAMS (versão 24.3.3)

```
$title otimização custo (IP entre 6,1 e 7)

variable
Ctotal custo total (R$ por ano)
Ccap custo de capital da torre relacionado ao recheio (R$ por ano)
Waditivo1 dosagem contínua do aditivo 1 (kg por h)
Waditivo2 dosagem contínua do aditivo 2 (kg por h)
Waditivo3 dosagem contínua do aditivo 3 (kg por h)
Waditivo4 dosagem contínua do aditivo 4 (kg por h)
Ccir1 concentração de aditivo químico 1 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir2 concentração de aditivo químico 2 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir3 concentração de aditivo químico 3 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir4 concentração de aditivo químico 4 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir5 concentração de aditivo químico 5 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Crep1 concentração de aditivo químico 1 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep2 concentração de aditivo químico 2 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep3 concentração de aditivo químico 3 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep4 concentração de aditivo químico 4 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep5 concentração de aditivo químico 5 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Qpurga  vazão volumétrica da água de purga (m³ por h)
Qarraste vazão volumétrica da água de arraste (m³ por h)
Qvazamento vazão volumétrica da água de vazamento (m³ por h)
Qevaporacao vazão volumétrica da água de evaporação (m³ por h)
Qaguamakeup vazão da água de make-up (m³ por h)
POWp energia elétrica cosumida pelas bombas  (Kw)
POWf energia elétrica consumida pelos ventiladores (kw)
mar vazão mássica da corrente de ar  (kg por h)
mw vazão mássica de água (kg por h)
n eficiência da torre de resfriamento (%)
Q carga térmica removida na torre de resfriamento (kJ por h)
CC ciclo de concentração
razaoLG razão L sobre G
Z altura do recheio da torre (ft)
AT distância percorrida pelo ar na direção horizontal (ft)
NUT NUT na torre com fluxo cruzado
te temperatura de entrada (K)
ts temperatura de saída (K)
tbu temperatura de bulbo úmido (K)
Cmakeup Custo da água de make-up (R$ por ano)
Cenergia Custo de energia (ventilador e bomba) (R$ por ano)
Caditivo Custo de aditivos (R$ por ano)
phs pH de saturação
pheq pH equivalente
ATcir alcalinidade total na água de circulação (ppm CaCo3)
Cacir concentração de cálcio na água de circulação (ppm CacO3)
```

SDTcir sólidos totais dissolvidos na água de circulação (ppm)
ATrep alcalinidade total na água de reposição (ppm CaCo3)
Carep concentração de cálcio na água de reposição (ppm CacO3)
SDTrep sólidos totais dissolvidos na água de reposição (ppm)
A constante
B constante
C constante
D constante
LSI índice de Langelier
IP índice de Puckorius
RSI índice de Ryznar
Trep temperatura da água de make-up (ºC)
pH pH da água de make-up
Sirep concentração de sílica na água de reposição (ppm)
Sicir concentração de sílica na água de circulação (ppm)
cagua custo da água (R$ por m³)

;

positive variable Waditivo1, Waditivo2, Waditivo3, Waditivo4, Waditivo5, Ccir1, Ccir2, Ccir3, Ccir4,Ccir5, crep1, crep2, crep3, crep4,crep5, Qpurga, Qarraste, Qevaporacao, Qaguamakeup, Qvazamento, POWp, POWf, mar,Q, n, mw, H, AT, razaoLG,Cmakeup,Cenergia,Caditivo,CC, SDTrep, Trep, Te, Ts, Tbu, pH,Sirep, Sicir, cagua;

equation

funcaoobjetivo cálculo da função objetivo
customakeup
custoenergia
balancoaditivo1 balanço de massa aditivo 1
balancoaditivo2 balanço de massa aditivo 2
balancoaditivo3 balanço de massa aditivo 3
balancoaditivo4 balanço de massa aditivo 4
balancoaditivo5 balanço de massa aditivo 5
balancomassa balanço de massa na torre
Cicloconc ciclo de concentração
vazaomassicaagua vazão mássica da água de circulação
potf potencia ventilador (Kw)
potp potencia bomba (Kw)
vazaoevaporacao vazão da água de evaporação
vazaoarraste vazão da água de arraste
eficiencia eficiência da torre de resfriamento
Cargat carga térmica removida da torre
razaoLsobreG
Tbulboumido
tentrada
tsaida
EquacaodorecheioVbar
vazaovazamento

```
custocapital
altura
distanciaAT
razaoaguaar
temperaturamakeup
phequivalente
phsaturacao
cteA cosntante A para calculo de phs
cteB cosntante B para calculo de phs
cteC cosntante C para calculo de phs
cteD cosntante D para calculo de phs
balancoCa  balanço de massa de Ca
balancoAT balanço de massa de alcalinidade total
balancoSDT balanço de massa de SDT
balancoSI balanço de massa de Si
indicelangelier índice de Langelier
indicepuckorius índice de Puckorius
indiceryznar índice de Ryznar
pHmakeup pH da água de make-up
SDTreposicao  concentração SDT na água de make-up
ATreposicao  alcalinidade total (AT) na água de make-up
Careposicao concentração de cálcio na água de make-up
Sireposicao   concentração de sílica na água de make-up
ciclomaximoSi ciclo máximo de acordo com concentração de Sílica
custoagua  custo da água

;


funcaoobjetivo.. Ctotal=E= (Cmakeup+Cenergia+Ccap);
customakeup.. Cmakeup=E=8000*(cagua*Qaguamakeup);
custoenergia.. Cenergia=e= 8000*(0.4038*((POWp)+((POWf))));
balancoaditivo1.. Qaguamakeup*crep1=E=Ccir1*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo2.. Qaguamakeup*crep2=E=Ccir2*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo3.. Qaguamakeup*crep3=E=Ccir3*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo4.. Qaguamakeup*crep4=E=Ccir4*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo5.. Qaguamakeup*crep5=E=Ccir5*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancomassa.. Qaguamakeup=E=Qarraste+Qpurga+Qevaporacao+Qvazamento;
Cicloconc..
(Qpurga+Qarraste+Qevaporacao+Qvazamento)=E=CC*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
vazaomassicaagua.. mw=E=2300*993 ;
potf.. POWf=E=0.0548*(mar/1.2041)*0.001;
potp.. POWp=E=0.7456999*220;
vazaoevaporacao.. Qevaporacao=E=0.00153*(mw/993)*(34-25);
vazaoarraste.. Qarraste=E=0.001*(mw/993);
eficiencia.. n*(34-23.3)=E=(34-25)*100;
Cargat.. Q=E=(0.004179*(mw)*(34-25));
razaoLsobreG.. mw=E=mar*razaoLG;
EquacaodorecheioVbar..          NUT          =e=          (0.08854*((razaoLG)**(-
0.5371))*(Z**(0.4629))*(AT**(0.5371)) ) ;
```

```
Tbulboumido.. Tbu =e= 296.45;
tentrada.. te =e= 307.15;
tsaida.. ts=e= 298.15 ;

vazaovazamento.. Qvazamento=e=(mw/993)*4.3*(10**(-6));
custocapital.. Ccap=e=2.66* 2006.6*AT*0.3048*AT*0.3048*Z*0.3048*0.2983;
altura.. Z=e=36;
phequivalente.. pheq=e=1.47*(log10(ATcir))+4.54;
phsaturacao.. phs=e= 9.3+A+B-C-D;
cteA.. A*10=e= (log10(SDTcir)-1);
cteB.. B=e=  - 13.12*log10(Trep+273.15)+34.55;
cteC.. C=e= log10(Cacir)-0.4;
cteD.. D=e= log10(ATcir);
balancoCa.. Carep*CC=e=Cacir;
balancoAT.. ATrep*CC=e=ATcir;
balancoSDT.. SDTrep*CC=e=SDTcir;
balancoSi.. Sirep*CC=e=Sicir;
indicelangelier.. LSI=e=pH-phs;
indicepuckorius.. IP=e=(2*phs)-pheq;
indiceryznar.. RSI=e=(2*phs)-ph;
ciclomaximoSi.. Sirep*CC=l=180;

distanciaAT.. AT=e=14;
razaoaguaar.. razaoLG=e=0.56;
custoagua.. cagua=e=0.7;
temperaturamakeup.. Trep=e=28.7;
pHmakeup.. pH=e=7.08;
SDTreposicao.. SDTrep=e=237;
ATreposicao..  ATrep=e=188;
Careposicao..  Carep=e=13.75;
Sireposicao..  Sirep=e=21.9;


Tbu.lo=0.00001;
razaoLG.lo=0.00001;
Cacir.lo=0.00001;
ATcir.lo=0.00001;
SDTcir.lo=0.00001;
CC.lo=1;
IP.lo=6.1;
IP.up=7;


model modelo1 /all/
solve modelo1 using nlp minimizing Ctotal;

display Ctotal.l,Cmakeup.l,Cenergia.l,Ccap.l, Qpurga.l, Qarraste.l,Qvazamento.l,
Qevaporacao.l, Qaguamakeup.l, POWf.l,POWp.l, mar.l, n.l,Q.l, mw.l,razaoLG.l, Z.l, AT.l,
Tbu.l, NUT.l,  phs.l, pheq.l, CC.l, A.l, B.l, C.l, D.l, LSI.l, RSI.l, IP.l;
```

APÊNDICE E – MODELO DE OTIMIZAÇÂO DO CUSTO TOTAL (IP entre 5,1 e 7,5)

Modelo de otimização do custo total (IP entre 5,1 e 7,5) executado no GAMS (versão 24.3.3)

```
$title otimização custo (IP entre 5,1 e 7,5)

variable
Ctotal custo total (R$ por ano)
Ccap custo de capital da torre relacionado ao recheio (R$ por ano)
Waditivo1 dosagem contínua do aditivo 1 (kg por h)
Waditivo2 dosagem contínua do aditivo 2 (kg por h)
Waditivo3 dosagem contínua do aditivo 3 (kg por h)
Waditivo4 dosagem contínua do aditivo 4 (kg por h)
Ccir1 concentração de aditivo químico 1 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir2 concentração de aditivo químico 2 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir3 concentração de aditivo químico 3 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir4 concentração de aditivo químico 4 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Ccir5 concentração de aditivo químico 5 na água de circulação (ppm ou g por m³)
Crep1 concentração de aditivo químico 1 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep2 concentração de aditivo químico 2 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep3 concentração de aditivo químico 3 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep4 concentração de aditivo químico 4 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Crep5 concentração de aditivo químico 5 na água de reposição (ppm ou g por m³)
Qpurga  vazão volumétrica da água de purga (m³ por h)
Qarraste vazão volumétrica da água de arraste (m³ por h)
Qvazamento vazão volumétrica da água de vazamento (m³ por h)
Qevaporacao vazão volumétrica da água de evaporação (m³ por h)
Qaguamakeup vazão da água de make-up (m³ por h)
POWp energia elétrica cosumida pelas bombas  (Kw)
POWf energia elétrica consumida pelos ventiladores (kw)
mar vazão mássica da corrente de ar  (kg por h)
mw vazão mássica de água (kg por h)
n eficiência da torre de resfriamento (%)
Q carga térmica removida na torre de resfriamento (kJ por h)
CC ciclo de concentração
razaoLG razão L sobre G
Z altura do recheio da torre (ft)
AT distância percorrida pelo ar na direção horizontal (ft)
NUT NUT na torre com fluxo cruzado
te temperatura de entrada (K)
ts temperatura de saída (K)
tbu temperatura de bulbo úmido (K)
Cmakeup Custo da água de make-up (R$ por ano)
Cenergia Custo de energia (ventilador e bomba) (R$ por ano)
Caditivo Custo de aditivos (R$ por ano)
phs pH de saturação
pheq pH equivalente
ATcir alcalinidade total na água de circulação (ppm CaCo3)
Cacir concentração de cálcio na água de circulação (ppm CacO3)
```

SDTcir sólidos totais dissolvidos na água de circulação (ppm)
ATrep alcalinidade total na água de reposição (ppm CaCo3)
Carep concentração de cálcio na água de reposição (ppm CacO3)
SDTrep sólidos totais dissolvidos na água de reposição (ppm)
A constante
B constante
C constante
D constante
LSI índice de Langelier
IP índice de Puckorius
RSI índice de Ryznar
Trep temperatura da água de make-up (ºC)
pH pH da água de make-up
Sirep concentração de sílica na água de reposição (ppm)
Sicir concentração de sílica na água de circulação (ppm)
cagua custo da água (R$ por m³)

;

positive variable Waditivo1, Waditivo2, Waditivo3, Waditivo4, Waditivo5, Ccir1, Ccir2, Ccir3, Ccir4,Ccir5, crep1, crep2, crep3, crep4,crep5, Qpurga, Qarraste, Qevaporacao, Qaguamakeup, Qvazamento, POWp, POWf, mar,Q, n, mw, Z, AT, razaoLG,Cmakeup,Cenergia,Caditivo,CC, SDTrep, Trep, Te, Ts, Tbu, pH, ATcir, ATrep, SDTcir, Cacir, Carep, Sirep, Sicir;

equation

funcaoobjetivo cálculo da função objetivo
customakeup custo da água de make-up
custoenergia custo de energia
custoaditivo custo de aditivos
Dcontinua1 dosagem contínua aditivo 1
Dcontinua2 dosagem contínua aditivo 2
Dcontinua3 dosagem contínua aditivo 3
Dcontinua4 dosagem contínua aditivo 4
Dcontinua5 dosagem contínua aditivo 5
balancoaditivo1 balanço de massa aditivo 1
balancoaditivo2 balanço de massa aditivo 2
balancoaditivo3 balanço de massa aditivo 3
balancoaditivo4 balanço de massa aditivo 4
balancoaditivo5 balanço de massa aditivo 5
concentracaoaditivo1cir concentração do aditivo 1 na água de circulação
concentracaoaditivo2cir concentração do aditivo 2 na água de circulação
concentracaoaditivo3cir concentração do aditivo 3 na água de circulação
concentracaoaditivo4cir concentração do aditivo 4 na água de circulação
concentracaoaditivo5cir concentração do aditivo 5 na água de circulação
balancomassa balanço de massa na torre
Cicloconc ciclo de concentração

```
vazaomassicaagua vazão mássica da água de circulação
potf potencia ventilador (Kw)
potp potencia bomba (Kw)
vazaoevaporacao vazão da água de evaporação
vazaoarraste vazão da água de arraste
eficiencia eficiência da torre de resfriamento
Cargat carga térmica removida da torre
razaoLsobreG  razão entre vazão de água e vazão de ar
Tbulboumido Temperatura de bulbo úmido
tentrada Temperatura de entrada
tsaida Temperatura de saída
EquacaodorecheioVbar equação característica do recheio da torre
vazaovazamento vazão de vazamento
custocapital  Custo de capital
altura  altura do recheio
distanciaAT  distância percorrida pelo ar na direção horizontal
razaoaguaar  valor da razãoLG
temperaturamakeup temperatura da água de make-up
phequivalente pH equivalente
phsaturacao pH de saturação
cteA cosntante A para calculo de pHs
cteB cosntante B para calculo de pHs
cteC cosntante C para calculo de pHs
cteD cosntante D para calculo de pHs
balancoCa  balanço de massa de Ca
balancoAT balanço de massa de alcalinidade total
balancoSDT balanço de massa de SDT
balancoSi balanço de massa Si
indicelangelier índice de Langelier
indicepuckorius índice de Puckorius
indiceryznar índice de Ryznar
pHmakeup pH da água de make-up
SDTreposicao  concentração SDT na água de make-up
ATreposicao  alcalinidade total (AT) na água de make-up
Careposicao concentração de cálcio na água de make-up
Sireposicao   concentração de sílica na água de make-up
ciclomaximoSi ciclo máximo de acordo com concentração de Sílica
custoagua  custo da água
;

funcaoobjetivo.. Ctotal=E= (Cmakeup+Cenergia+Caditivo+Ccap);
customakeup.. Cmakeup=E=8000*(cagua*Qaguamakeup);
custoenergia.. Cenergia=e= 8000*(0.4038*((POWp)+((POWf))));
custoaditivo.. Caditivo=e=
(8000*14.156*Waditivo1)+(8000*2.646*Waditivo2)+(8000*7.716*Waditivo3)+(8000*9.080
*Waditivo4)+(8000*0.73*Waditivo5);
Dcontinua1.. Waditivo1*1000=E=(Ccir1*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua2.. Waditivo2*1000=E=(Ccir2*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua3.. Waditivo3*1000=E=(Ccir3*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
Dcontinua4.. Waditivo4*1000=E=(Ccir4*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
```

```
Dcontinua5.. Waditivo5*1000=E=(Ccir5*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento));
balancoaditivo1.. Qaguamakeup*crep1=E=Ccir1*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo2.. Qaguamakeup*crep2=E=Ccir2*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo3.. Qaguamakeup*crep3=E=Ccir3*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo4.. Qaguamakeup*crep4=E=Ccir4*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
balancoaditivo5.. Qaguamakeup*crep5=E=Ccir5*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
concentracaoaditivo1cir.. Ccir1=e=2;
concentracaoaditivo2cir.. Ccir2=e=8;
concentracaoaditivo3cir.. Ccir3=e=3;
concentracaoaditivo4cir.. Ccir4=e=1;
concentracaoaditivo5cir.. Ccir5=e=0.05;
balancomassa.. Qaguamakeup=E=Qarraste+Qpurga+Qevaporacao+Qvazamento;
Cicloconc..
(Qpurga+Qarraste+Qevaporacao+Qvazamento)=E=CC*(Qpurga+Qarraste+Qvazamento);
vazaomassicaagua.. mw=E=2300*993 ;
potf.. POWf=E=0.0548*(mar/1.2041)*0.001;
potp.. POWp=E=0.7456999*220;
vazaoevaporacao.. Qevaporacao=E=0.00153*(mw/993)*(34-25);
vazaoarraste.. Qarraste=E=0.001*(mw/993);
eficiencia.. n*(34-23.3)=E=(34-25)*100;
Cargat.. Q=E=(0.004179*(mw)*(34-25));
razaoLsobreG.. mw=E=mar*razaoLG;
EquacaodorecheioVbar.. NUT =e= (0.08854*((razaoLG)**(-
0.5371))*(Z**(0.4629))*(AT**(0.5371)) ) ;
Tbulboumido.. Tbu =e= 296.45;
tentrada.. te =e= 307.15;
tsaida.. ts=e= 298.15 ;
vazaovazamento.. Qvazamento=e=(mw/993)*4.3*(10**(-6));
custocapital.. Ccap=e=2.66* 2006.6*AT*0.3048*AT*0.3048*Z*0.3048*0.2983;
altura.. Z=e=36;
phequivalente.. pheq=e=1.47*(log10(ATcir))+4.54;
phsaturacao.. phs=e= 9.3+A+B-C-D;
cteA.. A*10=e= (log10(SDTcir)-1);
cteB.. B=e=  - 13.12*log10(Trep+273)+34.55;
cteC.. C=e= log10(Cacir)-0.4;
cteD.. D=e= log10(ATcir);
balancoCa.. Carep*CC=e=Cacir;
balancoAT.. ATrep*CC=e=ATcir;
balancoSDT.. SDTrep*CC=e=SDTcir;
balancoSi.. Sirep*CC=e=Sicir;
indicelangelier.. LSI=e=pH-phs;
indicepuckorius.. IP=e=(2*phs)-pheq;
indiceryznar.. RSI=e=(2*phs)-pH;
ciclomaximoSi.. Sirep*CC=l=180;

distanciaAT.. AT=e=14;
razaoaguaar.. razaoLG=e=0.56;
custoagua.. cagua=e=0.7;
temperaturamakeup.. Trep=e=28.7;
pHmakeup.. pH=e=7.08;
```

```
SDTreposicao.. SDTrep=e=237;
ATreposicao..  ATrep=e=188;
Careposicao..  Carep=e=13.75;
Sireposicao..  Sirep=e=21.9;


Tbu.lo=0.00001;
razaoLG.lo=0.00001;
Cacir.lo=0.00001;
ATcir.lo=0.00001;
SDTcir.lo=0.00001;
CC.lo=1;
IP.lo=5.1;
IP.up=7.5;


model modelo1 /all/

solve modelo1 using nlp minimizing Ctotal;

display Ctotal.l,Cmakeup.l,Cenergia.l,Caditivo.l,Ccap.l, Ccir1.l, Ccir2.l, Ccir3.l,
Ccir4.l,Ccir5.l, crep1.l, crep2.l, crep3.l, crep4.l,crep5.l, Waditivo1.l, Waditivo2.l, Waditivo3.l,
Waditivo4.l,Waditivo5.l, Qpurga.l, Qarraste.l,Qvazamento.l, Qevaporacao.l, Qaguamakeup.l,
POWf.l,POWp.l, mar.l, n.l,Q.l, mw.l,razaoLG.l, Z.l, AT.l, Tbu.l, NUT.l,  phs.l, pheq.l, CC.l,
A.l, B.l, C.l, D.l, LSI.l, RSI.l, IP.l, ph.l;
```