

# ESTUDO TÉCNICO DO CONTROLE DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA TROCA TÉRMICA DOS SISTEMAS DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Carolina Leiro de Sá<sup>1</sup>

George de Souza Mustafa<sup>2</sup>

## Resumo

A busca pela reutilização da água em indústrias torna-se cada vez mais crescente, devido à escassez e à dificuldade de obtenção a baixo custo. Porém, para a mesma ser utilizada é necessário analisar fatores que podem interferir na troca térmica, tais como o desenvolvimento microbiológico, a corrosão e a incrustação. A fim de evitar complicações, como redução da eficiência de troca térmica e obstruções do sistema de resfriamento, é necessário o controle do crescimento dos citados fatores. Neste artigo foram avaliados, através da temperatura de parede e da presença de oxigênio dissolvido na água, nove trocadores de calor, presentes em uma unidade do refino do petróleo, concluindo, a partir da literatura, que a mistura polifosfato, zinco e fosfonato é eficaz para tal controle. A concentração necessária do polifosfato, assim como do fosfonato, é em torno de 10 ppm como  $PO_4^{3-}$  e de zinco de um a dois ppm em  $Zn^{2+}$ . A temperatura de parede máxima para os trocadores de calor é 45°C. Para isto, é indicado uma otimização energética trabalhando com trocadores de calor com fluido de processo, os quais antecedem os trocadores que utilizam água de resfriamento.

**Palavras-chaves:** Sistema de resfriamento; Corrosão; Incrustação; Microrganismo; Troca térmica.

## Abstract

The search of the industries to reuse water has been growing more and more, due to scarcity and the difficulty to obtain it at a low cost. But, in order for it to be reused, it is necessary to analyze factors which may interfere in thermic exchange, such as the microbiological development, corrosion and incrustation. In order to avoid complications such as reduction in the efficiency of thermic exchange and obstructions in the cooling system, a control of a microbiological development, corrosion and incrustation is necessary. In this article were evaluated, through the wall temperature and the presence of dissolved oxygen in the water, nine heat exchangers present in a unit of petroleum refining. Was conclude, from the literature, that the mixture of polyphosphate, zinc and phosphonate is ideal for this control. The phosphonate and zinc form a film, what inhibits the corrosion. The ideal concentration of polyphosphate and phosphonate is around 10 ppm as  $PO_4^{3-}$ , for zinc is around one to two ppm as  $Zn^{2+}$ . A maximum temperature for the walls of the heat changer is a 45°C, for that is necessary an energy optimization, what means, heat exchangers with process fluid, which precede heat exchangers using cooling water.

**Keywords:** Cooling system; Corrosion; Fouling; Microorganism; Thermic exchange.

## 1 INTRODUÇÃO

A escassez e o uso abusivo da água doce constitui hoje, uma ameaça crescente a preservação do meio ambiente. A água se presta a múltiplas utilizações da maior importância econômica e social: o abastecimento das populações e das indústrias, a irrigação das culturas, multiplicando sua produtividade, meio de transporte, com diferentes tipos de hidrovias, produção de energia, através das usinas hidroelétricas, fator de alimentação, ambiente para o esporte, o turismo e lazer (VIANNA, VIANNA JUNIOR, & VIANNA, 2005).

<sup>1</sup>Graduanda no Curso de Engenharia Química da Universidade Salvador – UNIFACS (BA).

Carolina.leiro@outlook.com

<sup>2</sup> Prof. Orientador, titular da Universidade Salvador – UNIFACS (BA). george.mustafa@unifacs.br

Em muitos processos químicos e petroquímicos, há a necessidade de remover carga térmica de um sistema (PONTREMOLEZ, 2009). Para isso, usa-se um fluido de resfriamento, geralmente a água devido às suas características físicas. Após sua utilização pode-se eliminar a água do sistema, ou então, resfriá-la e reaproveitá-la no sistema de resfriamento (MUSTAFA, 2008).

Era usual optar-se pela primeira alternativa, porém a cada dia a dificuldade de obter-se água a custos reduzidos aumenta, e com maiores rigores nas leis que regem a poluição de mananciais, o uso de circuitos semifechados de resfriamento torna-se a melhor solução (MUSTAFA, 2008). Sendo assim, para compor o sistema de resfriamento da água de resfriamento, tem-se, além da torre de resfriamento, a qual irá resfriar a água a partir de processos de evaporação e transferência de calor, trocadores de calor, bombas e sistemas de dosagens de químicos.

Em circuitos de resfriamento o crescimento exagerado, principalmente de algas, bactérias e fungos, é sem dúvida um dos grandes problemas encontrados nestes sistemas, pois os mesmos oferecem condições que favorece o crescimento microbiológico. Os prejuízos de ordem técnica e econômica são significativos. Os principais inconvenientes causados pelo excesso de crescimento microbiológico em águas de resfriamento foram relatados por Trovati (2004, p. 42), conforme descritos na sequência:

- a) Formação de depósitos sobre superfícies de troca térmica diminuindo as taxas de transferência de calor;
- b) Obstrução de tubos, bicos aspersores, válvulas, equipamentos, acessórios, entre outros, podendo diminuir a eficiência do processo, restringir a vazão, entre outros;
- c) Formação de lodo no fundo das bacias e canais de distribuição, criando muitas vezes condições propícias para o surgimento de novas espécies de microrganismos;
- d) Obstrução e crescimento exagerado em recheios e colmeias de torres, diminuindo a eficiência do resfriamento da água;
- e) Os depósitos de microrganismos sobre as superfícies metálicas aumentam a incidência de processos corrosivos, favorecendo as reações que os constituem; e
- f) Algumas classes de microrganismos são causadores diretos de corrosão, tais como as bactérias redutoras de sulfato e formadoras de ácidos.

A presença de certas substâncias, na água de resfriamento, eleva o risco de acarretar graves problemas nos trocadores de calor, por isso um dos fatores que deve ser controlado é a

qualidade da água (PONTREMOLEZ, 2009). As substâncias possivelmente presentes na água e seus problemas potenciais em sistemas de resfriamento podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Possíveis substâncias encontradas na água de resfriamento e seus respectivos problemas

Substância	Problemas potenciais
Amônia	<i>Fouling</i> biológico, corrosão de tubulações de cobre
Carbonatos e bicarbonatos	Corrosão, incrustação
Magnésio	Incrustação
Microorganismos	<i>Fouling</i> biológico
Material orgânico	<i>Fouling</i> biológico
Fosfatos	Incrustação
Silica	Incrustação
Sólidos dissolvidos totais	Corrosão, incrustação

Fonte: PONTREMOLEZ (2009, p.37).

Com o intuito de prevenir tais problemas, é desejável a utilização de água com boa qualidade para alimentação do sistema de resfriamento. No entanto, uma vez instalado o sistema, o meio empregado para combater a contaminação microbiológica é através do extermínio direto desses microrganismos, o que normalmente é feito através de produtos químicos denominados biocidas. Por se tratarem de agentes potencialmente poluidores, deve haver rigoroso critério na escolha do biocida e sua dosagem, de modo a evitar o descarte de água que poderá contaminar ou prejudicar o meio ambiente (SILVA, 2013).

## 2 METODOLOGIA

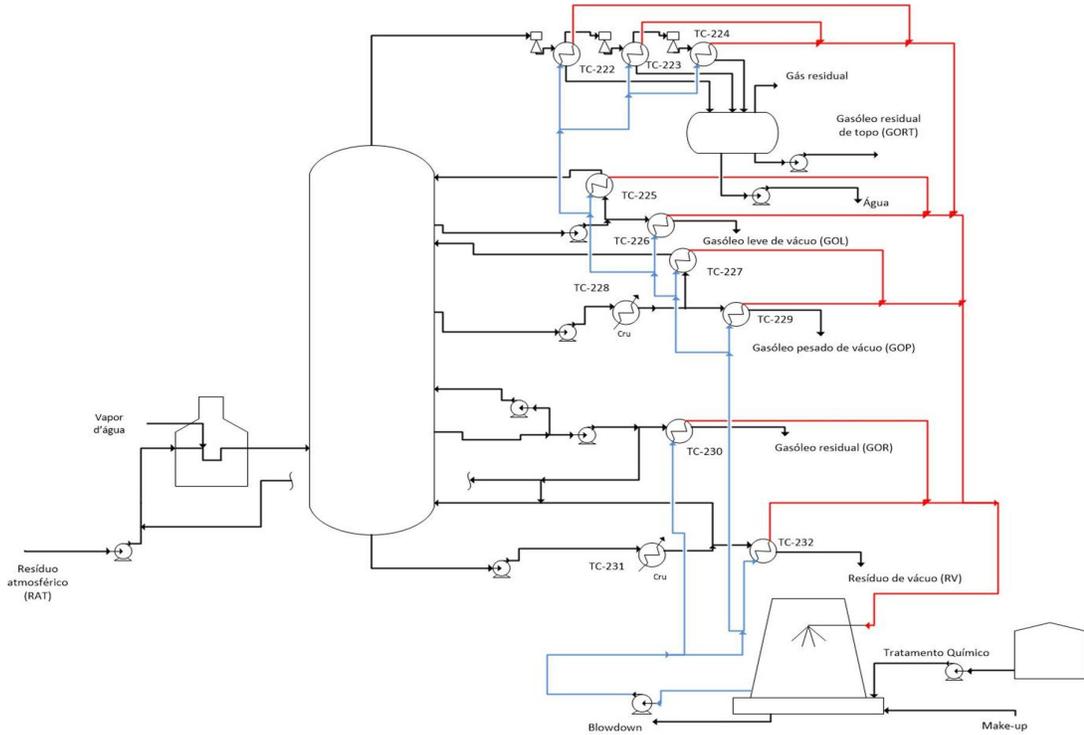
O estudo foi baseado em pesquisas bibliográficas e qualitativas, utilizando, crescimento microbiológico, corrosão, incrustações e trocadores de calor, como descritores.

Para o trabalho que segue foi utilizada como base uma unidade específicas do refino do petróleo, onde existem condensadores, resfriadores de produto final e resfriadores de produtos intermediários. Este processo foi interligado a um sistema de água de resfriamento para onde se encontra o tratamento químico com o intuito de controlar o crescimento microbiológico, a corrosão e a incrustação no processo em questão.

A Figura 2 representa o fluxograma do processo, o qual será utilizado para analisar situações vulneráveis para o crescimento microbiológico nos trocador de calor, levando em conta a corrosão e a incrustação a partir do desenvolvimento de microrganismos. Será

considerada a presença do oxigênio, temperaturas elevadas e a velocidade de escoamento da água de resfriamento.

Figura 2 - Fluxograma do processo de destilação a vácuo com torre de resfriamento



Fonte: Elaboração própria.

Legenda:

- Correntes de água de resfriamento fria
- Correntes de água de resfriamento quente
- Correntes de processo

A metodologia utilizada para este estudo foi composta das seguintes etapas:

1. Avaliar os trocadores de calor presentes no fluxograma, para identificar os quais estão susceptíveis à corrosão, incrustação e crescimento microbológico.
2. Calcular as temperaturas das paredes dos trocadores de calor, a partir do método de Kern.
3. Verificar a possível quantidade de oxigênio dissolvido na água de resfriamento.

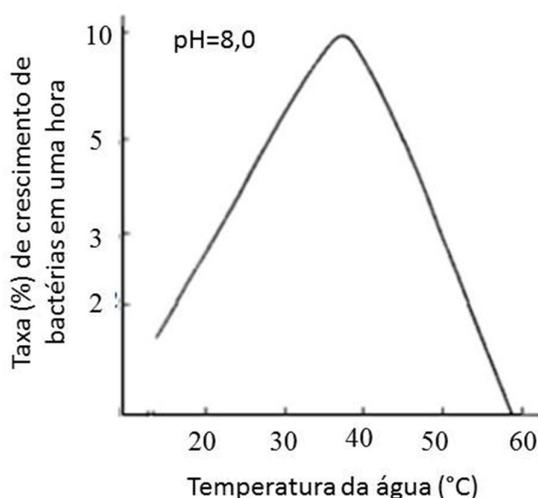
4. Melhor tratamento químico para inibir o desenvolvimento microbiológico, a corrosão e a incrustação nas condições existentes.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 TEMPERATURA

Normalmente, a temperatura ideal para a sobrevivência de qualquer organismo está entre 10 e 45°C, como pode ser observado na Figura 3. Nos processos de resfriamento, são encontrados gradientes de temperaturas ao longo das correntes do processo, o que favorece o crescimento microbiológico de certas espécies de modo localizado, os quais, a depender da velocidade de escoamento da água, sedimentam e aderem às paredes do sistema formando incrustações, de modo que, a sedimentação pode causar corrosão por aeração diferencial (TROVATI, 2004).

Figura 3 - Influência da temperatura no crescimento microbiológico



Fonte: TROVATI (2004, p.50)

A corrosão induzida por microrganismo é promovida pelo aumento da população microbiana aderida à superfície metálica, acarretando um ataque localizado no metal, sendo esta, portanto, a forma característica da corrosão microbiana em sistemas de resfriamento (VEIGA, 2010).

A temperatura a ser considerada para análise do sistema é a temperatura de parede, ou seja, será uma temperatura relacionada à temperatura da água de resfriamento e a temperatura do fluido de processo. Para estes cálculos foi utilizado o método de Kern.

A temperatura da parede do tubo pode ser calculada pelas temperaturas calóricas quando o coeficiente de película interno e externo,  $h_i$  e  $h_o$  respectivamente, são conhecidos. É usual desprezar a diferença de temperatura através do tubo metálico e considerar o tubo inteiro como estando na temperatura da superfície externa da parede  $T_w$ .

$$T_w = t_c + \frac{h_o}{h_{io} + h_o} \cdot (T_c - t_c) \quad \text{Eq. 4.1}$$

A temperatura calórica é definida como a temperatura na qual as propriedades físico-químicas devem ser determinadas para se obter o coeficiente global de transmissão de calor ( $U$ ) mais próximo do real.

$$T_c = T_2 + F_c \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$t_c = t_1 + F_c \cdot (t_2 - t_1) \quad \text{Eq. 4.3}$$

Sendo que  $T_c$  é a temperatura calórica da corrente quente e  $t_c$  da corrente fria. Da qual a fração calórica ( $F_c$ ) é representada por:

$$F_c = \frac{\frac{1}{k_c} + \frac{r}{r-1}}{1 + \frac{\ln(k_c+1)}{\ln(r)}} - \frac{1}{k_c} \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$k_c = \frac{U_q - U_f}{U_f} \quad \text{Eq. 4.5}$$

$$r = \frac{\Delta t_f}{\Delta t_q} \quad \text{Eq. 4.6}$$

O  $U$  depende dos coeficientes de película, os quais, por sua vez dependem das propriedades físico-químicas dos fluidos. Foram utilizados valores tabelados de  $U$  e  $h$  para o sistema (KERN, 1983).

O  $h_{io}$  representa o coeficiente de película interno relacionado aos diâmetros, segundo a equação 5.7. Para os cálculos da temperatura de parede foram adotados um diâmetro igual a 3/4 in e 14 BWG, sendo assim os tubos possuíram um diâmetro externo de 3/4 in e uma espessura de parede de 0,083 in.

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{DI}{DE} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Seguindo às equações descritas foram calculadas as temperaturas de parede de cada trocador de calor existente no processo estudado, Figura 2. Tais valores podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2- Temperatura nos trocadores de calor

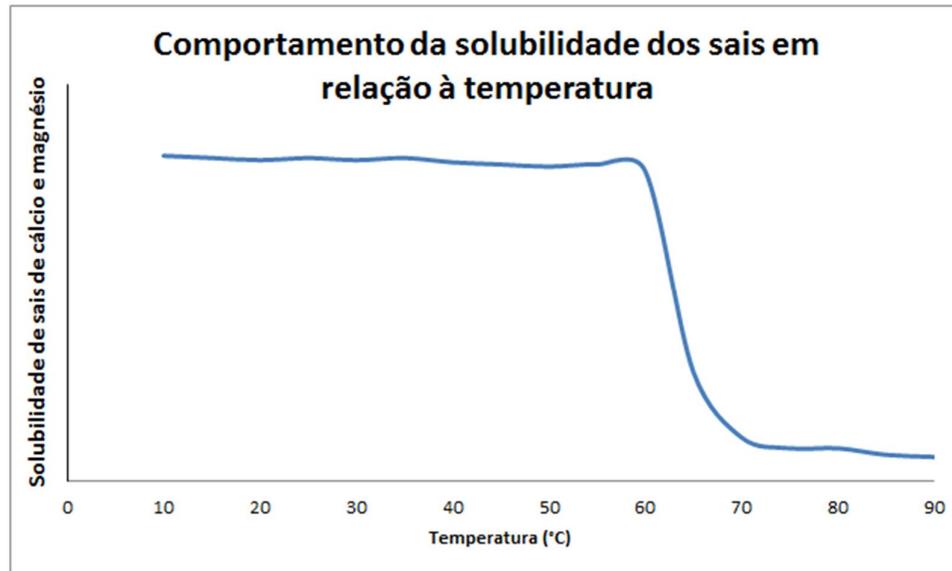
Trocador de Calor	Temperatura do fluido de Processo (°C)		Temperatura da AGR (°C)		Temperatura de Parede (°C)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
TC-222	72	43	31	45	43
TC-223	78	45	31	45	44
TC-224	85	48	31	45	44
TC-225	126	80	31	45	54
TC-226	126	52	31	45	47
TC-227	275	120	31	45	72
TC-229	275	85	31	45	63
TC-230	376	115	31	45	76
TC-232	387	235	31	45	56

Fonte: Tabela adaptada, MELLO, 2011.

Ao observar a temperatura do trocador TC-232, e compará-la com a temperatura de parede dos demais trocadores, nota-se uma não linearidade em relação aos valores da temperatura, isso ocorre devido à diminuição do valor do coeficiente de película externo, pois o mesmo depende das propriedades do fluido de processo, de modo que, no trocador TC-232 considera-se orgânicos pesados como produto, enquanto os outros trocadores operam resfriando orgânicos médios, exceto os condensadores, TC-222, TC-223 e TC-224, os quais condensam orgânicos leves. Logo, não se tem nenhuma referência para comparar as temperaturas de parede de trocadores de calor que operam com fluidos de processos distintos.

Deve-se considerar também a presença dos sais solúveis, bicarbonato de cálcio e magnésio, pois com o aquecimento se transformam em  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ , respectivamente, sendo estes insolúveis. Estes, quando dissolvidos na água, caracterizam a água dura. O comportamento da solubilidade pode ser observado na Figura 4, de modo que águas com temperaturas elevadas ao longo do circuito em sistemas de resfriamento favorecem a deposições de sais e incrustações, as quais provocam obstruções, ocasionando o aumento do consumo de energia por dificultarem a transferência térmica nos trocadores de calor (VEIGA, 2010; Gentil, 1996).

Figura 4 - Comportamento da solubilidade de sais de cálcio e magnésio em relação à temperatura



Fonte: Elaboração Própria.

Com o intuito de solucionar o problema que as elevadas temperaturas de parede, principalmente nos trocadores TC-225, TC-226, TC-227, TC-229, TC-230 e TC-232, sugere-se a otimização energética do processo, ou seja, utilizar trocadores em série, sendo que, aqueles que irão resfriar o fluido de processo com temperatura mais elevada opere com outro fluido de processo, para assim, ao ser encaminhado para o trocador que opera com AGR, o fluido de processo esteja à uma temperatura mais branda e não acarrete à sedimentação dos sólidos sedimentáveis nos trocadores de calor.

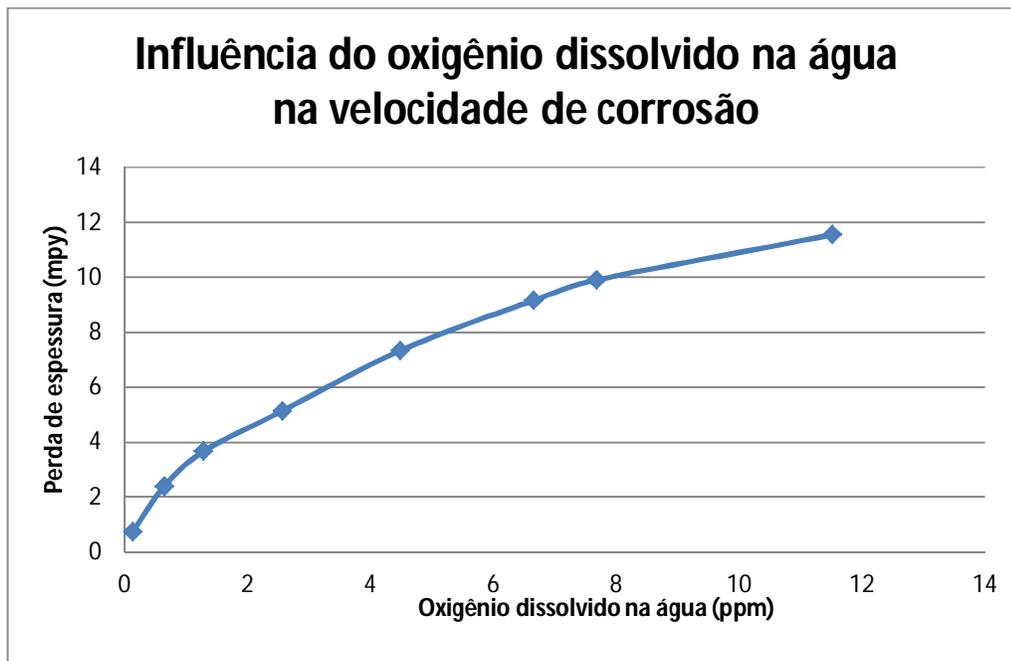
### 3.2 PRESENÇA DE OXIGÊNIO

O oxigênio dissolvido na água, devido ao contato com o ar, reage com a superfície metálica formando hidróxido, de modo que geram produtos de corrosão que são insolúveis em água, estes são acumulados nas paredes do trocador, sendo que se não houver o controle, a corrosão contunua a danificar o trocador.

Em sistemas de resfriamento existe a entrada de oxigênio na torre de resfriamento. O teor de oxigênio existente será a quantidade de oxigênio de saturação na água a 31°C, que é em torno de 7,4 ppm. Levando em conta que a água é aquecida à 45°C, a quatidade de oxigênio dissolvido na água cai para 6,8 ppm (MS, 1998).

A partir do gráfico apresentado na Figura 5, é possível observar a taxa de corrosão na ausência de inibidores de corrosão, em milésimo de penetração de polegada por ano (mpy), a partir da quantidade de oxigênio dissolvido na água de resfriamento.

Figura 5 - Influência do oxigênio na perda de espessura da parede do trocador



Fonte: Adaptado a partir do gráfico de MELLO, 2011.

Os valores da perda de espessura da parede do trocador pode ser obtido a partir da Figura 9, levando em consideração, inicialmente, a temperatura de 31°C, observa-se perda de espessura em torno de 9,7 mpy, já à 45°C, tem-se 9,2 mpy, em média, de perda de espessura.

Com o intuito de amenizar corrosões causadas devido às elevadas quantidade de oxigênio dissolvido na água de resfriamento utiliza-se inibidores de corrosão. Segundo a literatura, em sistemas de resfriamento, uma boa opção é a mistura polifosfato, zinco e fosfonato. O fosfonato e o zinco formam um filme, o qual inibe a corrosão. A concentração necessária para o polifosfato, assim como para o fosfonato, é em torno de 10 ppm como  $PO_4^{3-}$  e de zinco de um a dois ppm em  $Zn^{2+}$  (GENTIL, 1996).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que o sistema de resfriamento opere da melhor forma, com um custo aceitável de manutenção, limpeza e até mesmo troca de equipamentos, são necessárias prevenções. O

presente estudo pode avaliar, através da literatura, algumas características de um sistema de água de resfriamento, de modo que fosse possível propor metodologia para que a operação do mesmo tenha um bom rendimento, com relação à troca térmica.

A partir de estudos foi possível concluir que o tratamento químico da água de resfriamento é necessário para inibir o desenvolvimento microbiológico, a corrosão e a incrustação. Este depende de algumas variáveis do sistema como o teor de oxigênio dissolvido, a temperatura, além da velocidade de escoamento da água. Uma boa opção para sistemas com elevadas temperaturas, adicionando também proteção à incrustação, é a mistura polifosfato, zinco e fosfonato, sendo que a concentração necessária o polifosfato, assim como para o fosfonato, é em torno de 10 ppm como  $PO_4^{3-}$  e de zinco de um a dois ppm em  $Zn^{2+}$ . O acréscimo do cloro para o tratamento químico também se faz necessário, por este possuir características de biocida, o qual irá controlar o desenvolvimento microbiológico.

A velocidade de escoamento da água e a temperatura da mesma são fatores analisados no projeto do processo, de modo que em elevadas temperaturas poderá ser projetado uma otimização do processo, a qual será composta de trocadores de calor com outro fluido do processo, que não seja a água, antecedendo os trocadores de calor operando com AGR, para que nos trocadores de calor TC-225, TC-226, TC-227, TC-229, TC-230 e TC-232 a temperatura de parede dos mesmos seja em torno de 45°C.

São indicados, também, projetos visando eliminar áreas de quedas de pressão e abruptas modificações de seções além de manter a velocidade de escoamento dentro do limite desejado, de modo a evitar a erosão e a corrosão.

## REFERÊNCIAS

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996, p 177, 181.

KERN, Donald, Q. **Process Heat Transfer**. International student Edition. McGraw-Hill Book Company, Japan, 1983.

MARIANO, Jaqueline Barbosa. **Impactos Ambientais do Refino do Petróleo**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, Fevereiro de 2001. Disponível em:<<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/jbmariano.pdf>> Acesso em: 22 maio 2015.

MELLO, Livia da Silva. **Estudo de Corrosão Localizada dos Aços Inoxidáveis em Sistemas de Resfriamento Industrial**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, setembro de 2011. Disponível em:< <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003539.pdf>> Acesso em: 01 jun. 2015.

MS, **Dissolved Oxygen Transmitter**. Fevereiro de 1998. Disponível em<[http://www.tps.com.au/handbooks/93BFDOv2\\_1.PDF](http://www.tps.com.au/handbooks/93BFDOv2_1.PDF)> Acesso em: 10 jun. 2015.

MUSTAFA, George de Souza. **Operações Unitárias da Indústria Química: Equipamentos de Troca Térmica. Fornos, Caldeiras e Torres de Resfriamento**. Salvador, 2008. (v. 2).

PONTREMOLEZ, Nataska Schincariol. **Estudo de Caso: Diagnóstico de um Sistema de Reuso de Água em Torres de Resfriamento**. São Carlos, SP, 2009.

SILVA, Rafael Tobias da. **Aplicações da Teoria de Controle em uma Refinaria de Petróleo**. Dezembro de 2009. Disponível em:<<http://www.ime.usp.br/~tonelli/TCC/rafael-tobias2009.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2015.

SILVA, Viviane Nascimento da. **Biocidas Alternativos em Sistemas de Resfriamento Industrial**. Rio de Janeiro. 2013. Disponível em:<<http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli820.pdf>> Acesso em: 07 abr. 2015.

TROVATI, Joubert. **Tratamento de Água de Resfriamento**. São Paulo. 2004. Disponível em: <[http://www.snatural.com.br/PDF\\_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf](http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf)> Acesso em: 07 abr. 2015.

VEIGA, Andréa Azevedo. **Estudo do Efeito Biocida do Cloro e do Peróxido de Hidrogênio em Sistemas de Resfriamento com Reúso de Efluente como Água de Reposição**. Rio de Janeiro, 2010. UFRJ/EQ 2010.

VIANNA, Regina Cecere; VIANNA JUNIOR, Claudio Cecere; VIANNA, Rafael Marques. Os recursos de água doce no mundo – situação, normatização e perspectiva. **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, VIII, n. 23, out 2005. Disponível em: <[http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?artigo\\_id=215&n\\_link=revista\\_artigos\\_leitura](http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?artigo_id=215&n_link=revista_artigos_leitura)>. Acesso em: 21 abr. 2015.