



## XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR

# AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INCRUSTAÇÃO EM RESFRIADORES EM SISTEMAS DE AVAC-R.

### PAPER 08

#### RESUMO

Na operação de sistemas centrais de água gelada em edificações comerciais, o surgimento de incrustação nos trocadores de calor pode impactar de forma severa o desempenho destes sistemas. O mecanismo e a taxa de formação de incrustação são afetados por diversos parâmetros. Dentre estes parâmetros, estão as propriedades da água utilizada, as vazões e temperaturas de água de condensação etc. Estes parâmetros e o impacto imposto por eles no desempenho energético e na viabilidade econômica da operação destes sistemas variam também com as condições do local onde está instalado o sistema central de água gelada.

Este artigo propõe analisar o impacto da incrustação no desempenho de trocadores de calor em sistemas de AVAC. Com base nesta análise, serão propostas estratégias para mitigação da incrustação e a sua viabilidade técnica e econômica.

**Palavras-chave:** Incrustação. Desempenho Energético. Tratamento de Águas

#### ABSTRACT

In the operation of central chilled water systems in commercial buildings, the presence of fouling in the heat exchangers can severely impact the performance of these systems. The mechanism and rate of fouling formation are affected by several parameters. Among these parameters, there are the properties of the water, the flow rates, and temperatures on the condenser water loop, etc. These parameters and the impact imposed by them on the energy performance and the economic viability of the operation of these systems also vary with the conditions of the location where the central chilled water system is installed.

This article proposes to analyze the impact of fouling on the performance of heat exchangers in HVAC systems. Based on this analysis, strategies will be proposed to mitigate fouling and its technical and economic feasibility.

**Keywords:** Fouling. Energy Performance. Water treatment.

## 1 SISTEMAS CENTRAIS DE ÁGUA GELADA

Em edificações comerciais climatizadas, uma boa parte dos sistemas são do tipo central de água gelada com condensação a água (Figura 1). Neste sistema, o circuito de água de condensação combina a operação de dois componentes muito importantes para o bom desempenho deste sistema: o *chiller* e a torre de resfriamento, sendo que o primeiro pode ser considerado o componente que mais consome energia no sistema. Usualmente, o *chiller* é constituído por trocadores tipo carcaça e tubo (Figura 2) onde a água de condensação passa pelos tubos e o fluido refrigerante pela carcaça. A água de condensação deve ser reposta continuamente devido ao processo de evaporação e de arrasto de partículas que ocorre na torre de resfriamento, que é considerado um sistema semiaberto com recirculação. Nesses sistemas,

todo calor absorvido pela água é dissipado na forma de calor latente (75 a 90%) e calor sensível nas torres de resfriamento. O arraste das partículas de água promovido pelo fluxo de vapor e de ar, se dá sob a forma de respingos e corresponde a 0,01 a 0,3% da vazão de recirculação nas torres de tiragem mecânica (Mancuso Pedro 2001). Além disso, as perdas por evaporação nas torres de resfriamento dependem do diferencial de temperatura entre o ar e a água; umidade relativa do ar externo e grau de aproximação entre a temperatura da água e a temperatura de bulbo úmido do ar externo. A reposição de água é realizada pelo sistema de abastecimento público ou por reuso de água, o que permite a entrada de sais dissolvidos que podem causar o fenômeno de incrustação.

Figura 1. Esquema simplificado de central de água gelada.

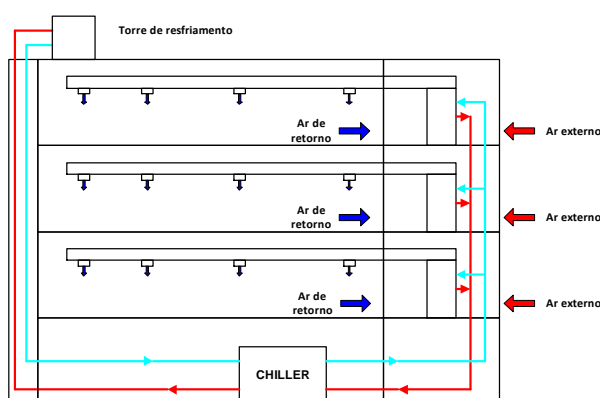
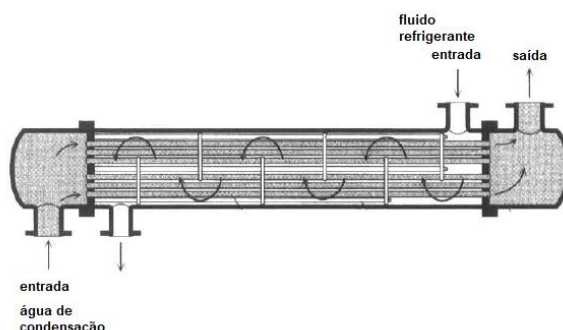


Figura 2. Esquema simplificado de condensador a água carcaça e tubo



Fonte: adaptado de Dinçer (2003)

## 2 MECANISMOS DE INCRUSTAÇÃO

Depois de um período de operação, as superfícies de transferência de calor de um trocador de calor podem ficar cobertas de partículas presentes nos escoamentos, ou sofrer um processo de corrosão resultante da interação entre os fluidos e o material utilizado na construção do trocador de calor. Em ambos os casos, isto representa uma resistência adicional ao fluxo de calor e, portanto, um decréscimo no desempenho do equipamento, sendo que este fenômeno é denominado por incrustação. Como resultado da presença da incrustação, uma resistência térmica adicional é imposta ao processo que também é denominado por fator de incrustação, resistência de incrustação

ou resistência de depósitos ( $R_d$ ), afetando o coeficiente global de transferência de calor (Essel, 2021). Entre as diversas definições do fenômeno de incrustação que podem ser encontradas na literatura destaca-se:

Incrustação (*fouling*): é qualquer tipo de depósito em escala indesejável na superfície da transmissão de calor que aumente significativamente as resistências transferência de calor e ao escoamento, aumentando, também, a perda de carga sobre o fluido e reduzindo, com o passar do tempo, o desempenho térmico e hidráulico dos trocadores (Baraldi, 2011, Kakaç, 1991).

Os principais fatores que influenciam a taxa de incrustação são (Swamee et al., 2007):

- Temperatura de superfície das tubulações
- Velocidade da água de resfriamento nas tubulações
- Qualidade da água de reposição
- Condições operacionais do sistema
- Tecnologia aplicada no programa de tratamento químico

A água de reposição (*make-up*) (quantidade de água adicionada para compensar as perdas por arraste e purgas) é necessária na operação de torres de resfriamento em sistemas centrais de água gelada e apresenta uma vasta gama de substâncias dissolvidas. Muitas destas substâncias são sais, óxidos e hidróxidos e apresentam solubilidades diferentes, sendo influenciadas basicamente pela temperatura da água, concentração e acidez (nível de pH). Com a evaporação da água na torre de resfriamento, há um aumento na concentração das substâncias dissolvidas que, muitas vezes, podem se precipitar de forma aderente nas superfícies dos equipamentos (principalmente nas regiões de troca térmica), constituindo as incrustações. Outras substâncias também podem se incrustar indesejavelmente nesses sistemas, tais como: material orgânico (óleos, graxas, resíduos), lodo e acúmulo de material microbiológico, produtos de corrosão, sólidos em suspensão (argila), etc.

A incrustação pode ser dividida em 06 categorias principais, a saber (Baraldi, (2011); Kakaç (1991), Sauders (1988)):

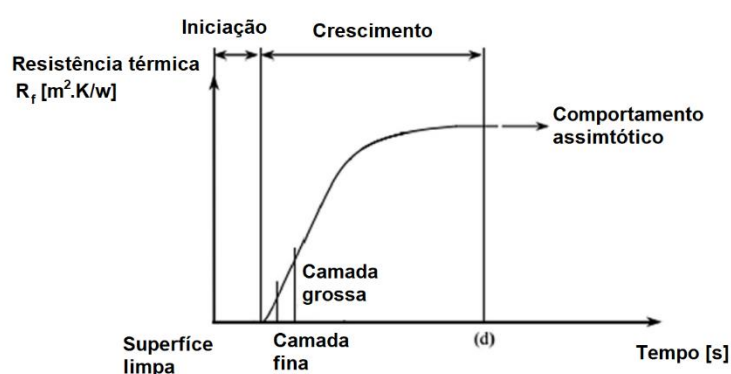
1. Particulados: nesta categoria, a incrustação é essencialmente formada de particulados que estão suspensos no escoamento do processo sendo que este tipo de incrustação é muito frequente em processos de combustão ou devido a deposição de partículas de poeira em condensadores.
2. Cristalização ou precipitação: é caracterizada pela deposição de sais inorgânicos dissolvidos no processo por ocasião da supersaturação destes sais durante um processo de resfriamento e/ou aquecimento.
3. Corrosão: partículas advindas de um processo de corrosão e que se depositam na superfície de troca de calor promovem esta categoria de incrustação.

4. Biofilme ou biológico: esta categoria de incrustação ocorre devido ao depósito e/ou crescimento de material orgânico sobre a superfície de troca de calor.
5. Reação química: incrustação originada de reações químicas que ocorrem no fluxo do processo.
6. Resfriamento: resultado da solidificação do líquido, ou algum de seus componentes, na superfície de transferência de calor.

Do ponto de vista de tempo de processo, a formação da incrustação tem como principais etapas (vide Figura 3) (Knudsen, 1984):

- Iniciação: etapa em que a superfície é preparada para formação de incrustação. Este processo pode ser induzido por fatores como temperatura superficial, material da superfície, tratamentos superficiais etc.
- Crescimento: esta etapa é subdividida em dois momentos; criação de uma camada fina com uma rugosidade média baixa, mas que já promove efeitos de redução da capacidade troca de calor e aumento do atrito no escoamento, que impõe um aumento na perda de pressão no escoamento do fluido. Com o passar do tempo, a incrustação passa a ser uma camada mais grossa com maior rugosidade, que vai aumentando a sua espessura e, conseqüentemente, seus efeitos de forma exponencial.
- Comportamento assintótico: após um certo tempo, a espessura da incrustação praticamente se estabiliza, mas atingindo valores de resistência térmica e de atrito bastante significativos.

Figura 3. Ilustração das etapas do processo de formação da incrustação.



Fonte: adaptado de Knudsen (1984)

Ishiyama et al. (2010) inclui no processo de incrustação uma outra fase que ocorre após o crescimento do material incrustado denominado de “ageing” (envelhecimento). Nesta fase, ocorrem modificações nas características dos depósitos das incrustações depois que o material foi incorporado à superfície. Durante este processo, mudanças na condutividade térmica do depósito podem ocorrer e causar mudanças significativas no comportamento do material incrustado e, conseqüentemente, afetando significativamente o

desempenho do equipamento. Na Tabela 1 são apresentados alguns valores típicos de resistência térmica de incrustação para diferentes condições de processo.

Os principais efeitos associados a incrustação em trocadores de calor são redução da transferência de calor e o aumento da perda de pressão no escoamento do fluido no processo. Na Tabela 2, Venturini (2005) apresenta o aumento de superfície que deveria ser promovido para compensar os efeitos da redução de transferência de calor imposto pela incrustação.

Em um evaporador ou condensador, pode-se calcular a sua transferência de calor em um dado processo como;

$$\dot{q}_{trocador} = UADMLT \quad (1)$$

Onde:

- $\dot{q}_{trocador}$  = troca de calor total ocorrida no processo [W];
- U = coeficiente global de troca de calor [W/m<sup>2</sup>.K];
- A = área total de transferência de calor [m<sup>2</sup>];
- DMLT = diferença média logarítmica de temperatura [K].

Tabela 1. Valores de resistência térmica de incrustação.

Temperatura do meio de aquecimento	até 115°C		115-205°C	
Temperatura da água	50°C ou menos		Acima de 50°C	
Velocidade da água	1m/s e abaixo	Acima de 1m/s	1m/s e abaixo	Acima de 1m/s
Tipos de água				
Destilada	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
do mar	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
Potável ou de poço	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004
Dura	0,0005	0,0005	0,0009	0,0009

Fonte: adaptado de Baraldi (2011)

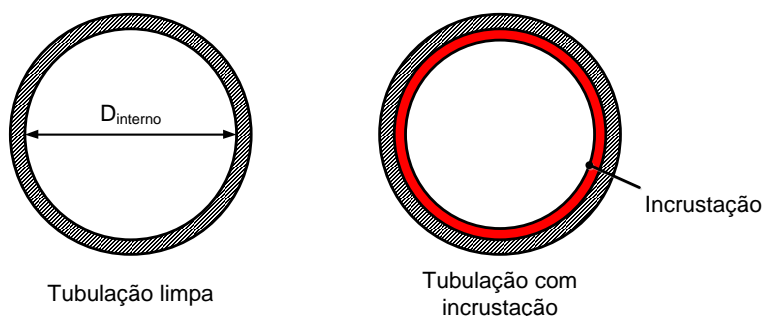
Tabela 2. Aumento da área de transferência de calor para compensação da presença de incrustação.

Resistência de incrustação [m <sup>2</sup> .K/kW]	Espessura média da incrustação [mm]	Aumento da área de transferência de calor [%]
Tubos limpos	0,0000	0
0,04	0,1524	45
0,17	0,3048	85
0,35	0,5558	170
0,52	0,9144	250

Fonte: adaptado de Venturini (2005)

A redução da transferência de calor promovida pela incrustação ocorre devido ao aumento da resistência térmica do trocador causado pela incrustação e pela redução da área de transferência de calor (produto UA na Equação 1). Observando a Figura 4, podemos modelar a incrustação como uma camada de espessura uniforme ( $e_i$ ) e que tem propriedades uniformes, em particular, a sua condutividade térmica ( $k_i$ ).

Figura 4. Ilustração de uma tubulação limpa e com incrustação.



Equacionando o coeficiente de transferência de calor de um trocador com a tubulação limpa, temos;

$$U_{limpo} = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_{parede}}{k_{parede}} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (2)$$

Onde:

- $U_{limpo}$  = coeficiente global de transferência de calor [W/m<sup>2</sup>.K];
- $h_{ext}$  = coeficiente de convecção de calor externo a tubulação [W/m<sup>2</sup>.K]
- $h_{int}$  = coeficiente de convecção de calor interno a tubulação [W/m<sup>2</sup>.K]
- $e_{parede}$  = espessura da parede da tubulação [m];
- $k_{parede}$  = condutividade térmica do material da parede da tubulação [W/m.K];

Para a tubulação com incrustação, temos:

$$U_{incrustação} = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_{parede}}{k_{parede}} + \frac{e_i}{k_i} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (3)$$

Dessa forma, o valor de  $U_{sujo}$  será sempre menor que o valor do  $U_{limpo}$ , reduzindo assim a capacidade de troca de calor do evaporador ou do condensador.

Analisando a área de troca de calor sem incrustação, temos;

$$A_{limpo} = \pi D_{interno} L \quad (4)$$

Onde:

- $A_{limpo}$  = área interna de troca de calor sem incrustação [m<sup>2</sup>];
- $D_{interno}$  = diâmetro interno da tubulação [m];
- $L$  = comprimento da tubulação [m].

Já a área de troca de calor com incrustação é dada por:

$$A_{incrustação} = \pi(D_{interno} - 2 * e_i)L \quad (5)$$

Dessa forma,  $A_{sujo}$  é menor que  $A_{limpo}$ , promovendo uma redução adicional na capacidade de transferência do trocador de calor. Assim sendo, dividindo a capacidade de troca de calor com e sem incrustação (limpo), temos:

$$\frac{\dot{q}_{trocador,incrustação}}{\dot{q}_{trocador,limpo}} = \frac{U_{incrustação} A_{incrustação} DMLT_{incrustação}}{U_{limpo} A_{limpo} DMLT_{limpo}} \quad (6)$$

Com base nas análises anteriores, pode-se inferir que a razão descrita pela Equação 6 será sempre menor que 1 e será tanto menor quanto maior for a espessura da incrustação.

O aumento da perda de pressão está associado a redução da área de seção transversal combinado com o aumento da rugosidade das paredes promovida pela incrustação. Para avaliar este efeito, deve-se analisar a equação que define a perda de pressão em escoamentos internos dada por:

$$\Delta_{p,limpo} = f_{limpo} \frac{L}{D_{interno,limpo}} \frac{\rho_{água} V_{limpo}^2}{2} \quad (7)$$

Onde:

- $\Delta_{p,limpo}$  = perda de pressão devido ao atrito das paredes [Pa];
- $f_{limpo}$  = fator de atrito devido a rugosidade das paredes na tubulação limpa [-];
- $L$  = comprimento da tubulação [m];
- $D_{interno,limpo}$  = diâmetro interno da tubulação limpa [m];
- $\rho_{água}$  = massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>];
- $V_{limpo}$  = velocidade da água na tubulação limpa [m/s];

Podemos escrever equação semelhante a Equação 7 para a situação de tubulação com incrustação, a saber:

$$\Delta_{p,incrustação} = f_{incrustação} \frac{L}{D_{interno,incrustação}} \frac{\rho_{água} V_{incrustação}^2}{2} \quad (8)$$

Onde:

- $\Delta_{p,incrustação}$  = perda de pressão devido ao atrito das paredes com incrustação [Pa];
- $f_{incrustação}$  = fator de atrito devido a rugosidade das paredes na tubulação com incrustação [-];
- L = comprimento da tubulação [m];
- $D_{interno,limpo}$  = diâmetro interno da tubulação limpa [m];
- $\rho_{água}$  = massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>];
- $V_{limpo}$  = velocidade da água na tubulação limpa [m/s];

Dividindo a Equação 8 e pela Equação 7, pode-se verificar a relação da perda de pressão na situação limpa e com incrustação, a saber:

$$\frac{\Delta_{p,incrustação}}{\Delta_{p,limpo}} = \frac{f_{incrustação}}{f_{limpo}} \frac{D_{limpo}}{D_{incrustação}} \left( \frac{V_{incrustação}}{V_{limpo}} \right)^2 \quad (9)$$

Analisando a Equação 9, pode-se inferir que haverá um aumento da perda de pressão na situação com incrustação pois haverá um aumento do atrito e da velocidade do escoamento (devido a redução da seção transversal) e a redução do diâmetro da tubulação.

### 3 ANÁLISE DO IMPACTO DA INCRUSTAÇÃO

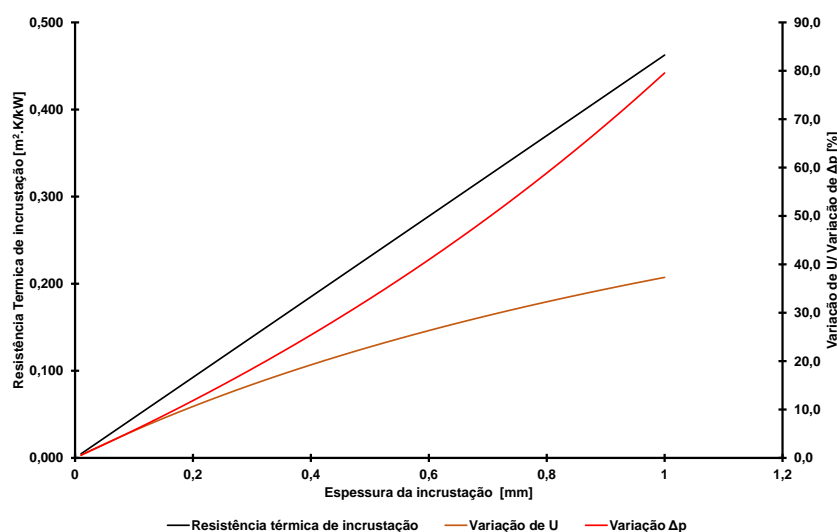
Para a avaliação do impacto da incrustação no desempenho do condensador de um sistema de água gelada de uma edificação comercial climatizada, foi construído um modelo para uma edificação comercial com 1050 m<sup>2</sup> (planta típica com 30 m de largura por 35 m de comprimento) com 20 andares localizada na cidade de São Paulo. O modelo foi construído utilizando as seguintes ferramentas de simulação: Energy Plus versão 9.0 (DOE, 2020), Sketchup 2.7 (Trimble, 2018) e o plugin Open Studio 3.0 (NREL, 2018), que são ferramentas utilizadas na simulação de desempenho de edificações climatizadas usadas em processos de certificação de edifícios sustentáveis como LEED, AQUA e Procel Edifica.

Para este caso, foi avaliado um resfriador de água gelada com condensação a água e capacidade de 400 TR com COP nominal de 6,11 (IPLV de 6,41) com vazão máxima de água de condensação de 252,2 m<sup>3</sup>/h. O condensador é do tipo casco e tubo, sendo que o feixe tubular é formado por 181 tubos de 22 mm de diâmetro interno nominal.



No modelo proposto, será verificado o impacto da formação de incrustação para diferentes níveis de espessura de material incrustado. O elemento principal de incrustação é o carbonato de cálcio (condutividade térmica: 2,941 W/m.K (Kakaç, 1991)). A espessura do material será variada de 0,01 mm a 1,00 mm sendo que para cada valor de espessura será calculada a redução da capacidade do resfriador e o aumento da perda de pressão no condensador. O impacto destas variações será verificado por meio da avaliação do consumo da variação de consumo de energia do resfriador obtido nas simulações feitas com a ferramenta Energy Plus. Para avaliação dos valores de coeficiente global de transferência foram utilizados os valores típicos apresentados por manual elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017). Na Figura 5 são apresentados o valor da resistência térmica de incrustação, a variação percentual do valor do coeficiente global de transferência de calor e a variação percentual da perda de carga nos tubos do condensador relativa à condição sem incrustação e em função da espessura de incrustação.

Figura 5. Variação da resistência térmica de incrustação, variação percentual do coeficiente global de transferência de calor e variação percentual da perda de carga nos tubos do condensador em função da espessura de incrustação de carbonato de cálcio.



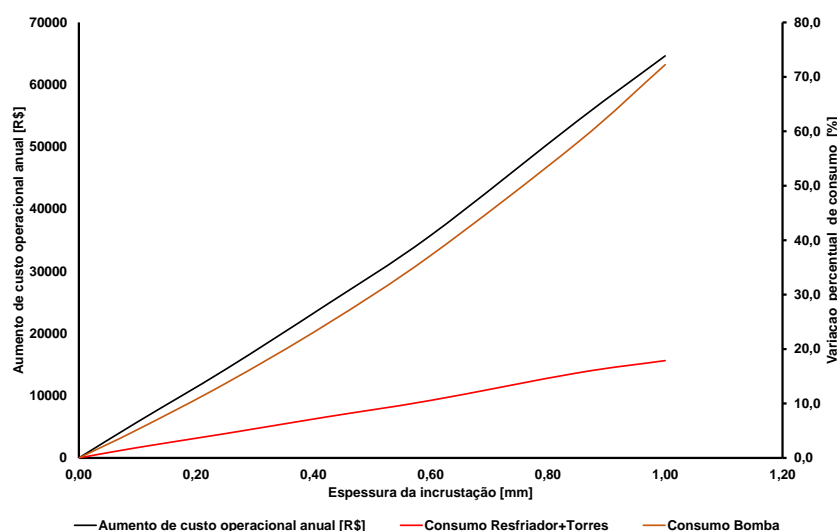
Deve-se ressaltar que a norma AHRI 551/591 (AHR, 2015) sugere que a resistência térmica de incrustação nos condensadores e evaporadores de resfriadores deve ser limitada ao valor de 0,18 m².k/kW, que corresponde para o carbonato de cálcio, a uma espessura de incrustação de 0,53 mm.

#### 4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS RESFRIADORES NA PRESENÇA DE INCRUSTAÇÃO

Utilizando a ferramenta Energy Plus, foram introduzidos os valores de redução de coeficiente global de transferência de calor e de aumento de perda de carga no sistema modelado e a Figura 6 apresenta a variação percentual de consumo de energia dos resfriadores e torres, das bombas de condensação

e variação do custo operacional anual para uma edificação submetida a estrutura tarifária horosazonal verde subgrupo A3, relativa à concessionária elétrica da cidade de São Paulo.

Figura 6. Variação percentual de consumo de energia dos resfriadores e torres, das bombas de condensação e variação do custo operacional anual em função da espessura da incrustação.



Pode-se observar que o impacto da formação de incrustação é pronunciado, impondo reduções significativas no desempenho do resfriador (até 20%), torre e bombas de condensação (aumentos de quase 70%) com aumentos de custos operacional acima de R\$60.000.

## 5 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA MITIGAÇÃO DE INCRUSTAÇÃO

Em função do exposto anteriormente, ações que promovam a redução do impacto da incrustação devem fazer parte das atividades da equipe de gestão de operação e manutenção de uma central de água gelada.

Em primeiro lugar, uma avaliação da qualidade de água de reposição (proveniente do abastecimento público ou de reuso) deve ser feita de forma a verificar quais são os níveis de sais dissolvidos e outros elementos que estejam presentes e que podem prejudicar a operação dos equipamentos.

Rozental (1999) ressalta que na implementação de tratamento químico à base de inibidores de corrosão, o ciclo de concentração é um parâmetro de extrema relevância, sendo que seu valor deve ser constantemente acompanhado e rigorosamente mantido dentro dos padrões pré-determinados antes da implantação do tratamento, usualmente referindo-se à concentração de determinado sal de referência ou íon solúvel típico, desde que seja estável tal como o cloreto. Cabe esclarecer que o ciclo de concentração que Rozental se refere é definido como a relação entre a concentração de sólidos existentes na água que circula na torre e a concentração de sólidos da água de reposição. Dessa forma, a qualidade da água em sistemas de condensação necessita ser sempre acompanhada e

seus valores determinados para que ela seja classificada adequadamente e, com isso, a seleção do tratamento de água a ser implantado seja o mais correto para as condições locais. Para condensadores carcaça e tubo, também pode ser utilizada a limpeza mecânica por varetamento.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado o impacto da presença de incrustação em condensadores carcaça e tubo usados para a rejeição em sistemas centrais de água gelada com condensação a água. Foram apresentados os principais mecanismos de formação de incrustação e o seu impacto no aumento do consumo dos *chillers*, torres e bombas de condensação bem como o aumento de custo para uma edificação comercial localizada na cidade de São Paulo.

Algumas estratégias para mitigação da formação de incrustação foram descritas e deve-se ressaltar que estas estratégias devem ser definidas com base em análises da água de reposição e com o apoio de profissional qualificado para a definição de um programa de tratamento de água.

As incrustações são sais que tem sua solubilidade inversamente proporcional a temperatura do fluido haja vista as mesmas acontecerem em feixe tubular, tampas espelhos de condensadores e em enchimentos das torres.

A concentração dos sais acontece devido ao processo de funcionamento do sistema de condensação onde as torres de resfriamento são responsáveis pela troca de calor entre o ar e a água de recirculação. Nesse momento acontece formação de vapor d'água, aumentando a concentração dos sais dissolvidos na água de circulação. Dessa forma, se faz necessário o controle da concentração desses sais, pois estes são responsáveis por vários problemas em sistema de condensação que vão desde a redução de vida útil do equipamento, deterioração do desempenho dos equipamentos e sua consequente redução da eficiência energética dos sistemas centrais de água gelada.

No sentido de mitigar os problemas aqui apresentados, sugere-se as seguintes ações:

1. Conhecer os componentes relevantes contidos na água de reposição (*make-up*)
2. Melhorar ao máximo as características físico-químicas da água de reposição (*make-up*)
3. Limitar o valor do ciclo de concentração do sistema de condensação por meio de purgas programadas (desconcentração)
4. Uso de dispersantes específicos para não permitir que os cristais incrustantes se depositem nas superfícies dos trocadores de calor.

## REFERÊNCIAS

AHRI. 2015. AHRI Standard 551/591 (SI). Standard for Performance Rating of Water-chilling and Heat Pump Water-heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 127 páginas.

Baraldi, A. 2011. Monitoramento do desempenho térmico de trocadores de calor duplo tubo de uma planta Slurry. Trabalho de conclusão de graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Disponível: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/38558>, acesso: 01/06/2021.

Dincer, I. 2003. Refrigeration systems and applications. Editora John Wiley&Sons, 595 páginas.

DOE. 2020. Department fo Energy. Energy Plus Engineering Reference, 1732 páginas. Essel. Cursos Essel Online. Capítulo 3: Trocadores de calor. Disponível em <https://essel.com.br/cursos/material/03/CAP3.pdf>, acesso em 26 de abril de 2021.

Ishiyama, E. M., Coletti, F., Macchietto, S., Paterson, W.R, Wilson, D.I. 2010. Impact of deposit ageing on thermal fouling: Lumped parameter model. AIChE Journal, Vol. 56, nº 2, fevereiro, páginas 531-545.

Kakaç, s. 1991. Boilers, Evaporators & Condensers. Editora John Willey& Sons, ISBN: 0-471-62170-6, 851 páginas.

Knudsen, J. G. 1984. Fouling of heat exchangers: Are we solving the problem? Chem. Eng. Prog., vol. 80, pags. 63-69.

Mancuso, P. C. 2001 Reúso de água para torres de resfriamento. e-Coleções FSP/USP, Disponível em: <http://colecoes.sibi.usp.br/fsp/items/show/2389>, acesso em 01/06/2021.

MMA (Ministério do Meio Ambiente).2017. Manual sobre Sistemas de Água Gelada – Vol. I, 112 páginas.

NREL. 2018. National Renewable Energy Laboratory. Disponível: <https://www.openstudio.net/>, acesso em : 20/05/2021.

Rozental, L. Y. 1999. Avaliação de Tratamentos de Água de Sistemas de Refrigeração semi-abertos por Meio de Medidas Eletroquímicas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Sauders, E. A .D ., Heat exchangers: Selection design and construcion. John Wiley & Sons, New York, 1988.

Swamee, P. K., Aggarwal, N., Aggarwal, V. 2007. Optimum design of double pipe heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, páginas 2260-2266, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.028.

Trimble. 2018. Software documentation. Disponível: <https://www.sketchup.com/pt-BR>, Acesso: 20/05/201.

Venturini, O. J. 2005. Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial comercial. Eletrobrás/Procel, 315 páginas.