

Análise da viabilidade técnica do aletamento de tubulação de água de resfriamento

Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa¹, Artur Andrade Santos², Felipe Moreira² e Silvio Magalhães Silvão²

¹Professora Doutora, Universidade São Francisco, USF, Campinas, SP, gomes.mtms@gmail.com

²Engenheiros mecânicos, minerorc@gmail.com, felipe.mmoreiral@gmail.com, silvionmagalhaes@gmail.com

Resumo – A água é um elemento essencial em muitos processos industriais. Aliando a sua escassez e alta demanda nas indústrias, as empresas empregam grandes esforços buscando consumir menores quantidades de água e assim diminuir o impacto ao meio ambiente. Torres de Resfriamento possuem um considerado consumo de água. Dentro deste contexto, este trabalho analisou o efeito do aletamento na tubulação de entrada de água quente em uma torre de resfriamento com o intuito de minimizar as perdas por evaporação e, por consequência, obter ganhos no consumo de água, na liberação para partida de novas unidades e ganhos diretos na produção de petróleo. Um estudo foi realizado com o objetivo de determinar a troca térmica da tubulação lisa e da tubulação aletada fazendo um comparativo do custo para implantação desse projeto, dos ganhos obtidos e, sobretudo, sobre o retorno financeiro (payback).

Palavras-chave: Troca térmica, torre de resfriamento, aletamento em tubulação, redução da temperatura.

Abstract – Water is an essential element in many industrial processes. Due to its scarcity and high demand in industries, companies use a lot of effort trying to reduce the water usage and the environmental impacts. Cooling Towers demands a high consumption of water. Inside this context, this work analyzed the effect of finned hot water pipe entrance of the cooling tower to minimize the losses by evaporation and, by consequence, obtain a new range to the installation of new production sites and directly produce more petroleum derivatives. A study was conducted to determine the exchange between the existence pipe and a finned pipe to determine the comparison cost to the implementation of this project, the possible financial gains and the payback.

Keywords: Heat exchange, cooling tower, finned pipes, decreasing temperature.

I. INTRODUÇÃO

Grandes esforços nas áreas da engenharia vêm sendo empregados pelas indústrias buscando processos que consumam cada vez menores quantidades de água e consecutivamente impactem menos o meio ambiente. Devido aos eventos climáticos dos últimos anos juntamente com a escassez de água, as vazões dos rios estão variando consideravelmente. Essas variações fazem com que o governo aumente o controle quanto ao consumo de água, gerando nas indústrias, impactos nos

seus processos [1]. E na medida em que os processos industriais são otimizados e apresentam maior eficiência, é latente a necessidade de se analisar as variáveis que contribuem para um melhor desempenho de seus trocadores de calor [2].

A água é essencial para a indústria de petróleo. O sistema de torre de resfriamento, que é responsável pelo maior consumo de água numa refinaria, é empregado para remoção do calor absorvido pela água nas diversas correntes produzidas nas unidades de processo de refino e para condensação de vapor. Muita atenção tem sido dada às torres de resfriamento com relação à redução do consumo de água, na conservação de energia e no tratamento de água [3].

A água quente que retorna para a torre de resfriamento é aspergida no topo da torre sobre uma grande área com o intuito de aumentar a troca térmica com o ar. Esta água desce pela força gravitacional encontrando um grande fluxo de ar succionado por ventiladores de grande porte no topo das torres. Ao entrar em contato com este ar, parte da água quente evapora saindo pelo topo do equipamento, e a outra parte já resfriada, desce sendo depositada na bacia da torre [4].

Portanto, grande parte da água que circula o sistema é reaproveitada, sendo que uma parcela se perde por evaporação e outra por respingos e arrastes pelo ar. Na Refinaria do Planalto (Replan), localizada em Paulínia-SP, a vazão de água de resfriamento que circula em toda a refinaria é estimada em aproximadamente 20.000 m³/h. Durante o processo de resfriamento ocorre uma perda aproximada de 1/5 de toda a água utilizada na planta, ou seja, dos 2.400 m³/h da outorga, aproximadamente 500 m³/h são utilizados para reposição da água perdida. Com a vaporização da água, os sais dissolvidos vão se concentrando, sendo necessária a realização da purga para manter a concentração de sais dissolvidos dentro de teores aceitáveis. O processo chamado de purga ocorre quando se retira água a uma vazão constante do reservatório das torres para controle químico. Por se tratar de água, o controle químico é necessário para proteção de todo o equipamento e suas tubulações, devido às ocorrências de incrustações, corrosões e ataques químicos [5]. Esta purga é descartada para a estação de tratamento de efluentes, que retornará ao rio, sendo necessária a reposição na bacia da torre. Por se tratar de um processo inevitável e representar apenas 10 % da vazão de perda, 50 m³/h, neste trabalho não foi realizado nenhum processo de melhoria neste quesito.

O processo de evaporação, o qual representa os outros 450 m³/h de perda de água, ocorre devido às trocas

térmicas entre o ar succionado para o interior da torre, através de ventiladores instalados no topo, em contra corrente com as gotículas de água que caem ao longo da mesma. A quantidade de água vaporizada está diretamente relacionada à temperatura da água de resfriamento que retorna à torre.

Dentre deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo identificar e avaliar alternativas para minimizar a perda de água no processo de vaporização na Torre de Resfriamento da empresa Replan.

As tubulações de água de retorno para a torre de resfriamento foram o foco deste estudo. Por estarem expostas às trocas térmicas por convecção, radiação e condução, foi quantificada a energia transferida considerando as piores condições climáticas possíveis, como alta radiação solar na região e baixas velocidades de vento, nessas tubulações lisas, atualmente existentes na entrada das torres de resfriamento. Com o intuito de melhoria de processo, foi proposto o aletamento dessas tubulações. Depois de realizados os comparativos entre os tubos não aletados e os aletados, a viabilidade financeira envolvendo desde os custos de implantação até os ganhos ambientais devido a uma possível diminuição da reposição de água na torre foi verificada.

II. METODOLOGIA

A. Torre de resfriamento

Os dados da torre de resfriamento foram obtidos através dos *datasheet* do equipamento encontrados na Replan. A Figura 1 em conjunto com as informações detalhadas na Tabela 1 apresentam a caracterização da torre de resfriamento com os respectivos fluxos de água e ar. As propriedades físicas da água e do ar foram coletados da literatura [6, 7].

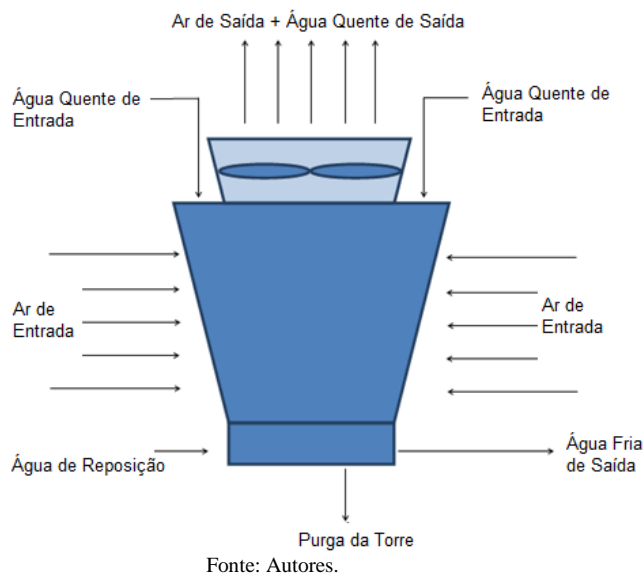
B. Tubulação

As temperaturas envolvendo a tubulação de estudo foram obtidas com o uso de um termopar móvel. Os dados técnicos da tubulação foram obtidos através das fichas técnicas padronizadas utilizadas na Replan.

Tabela 1 – Dados técnicos da tubulação.

Descrição	Simbologia	Valores
Comprimento	L_{tubo}	200 m
Temperatura Interna	$T_{int.tubo}$	45 °C
Raio Interno	$r_{int.tubo}$	0,52 m
Área Interna	$A_{int.tubo}$	648,9 m ²
Temperatura Externa	$T_{ext.tubo}$	25 °C
Raio Externo	$r_{ext.tubo}$	0,54 m
Área Externa	$A_{ext.tubo}$	672,93 m ²
Condutividade Térmica	k_{tubo}	60,5 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Temperatura na Parede	$T_{par.tubo}$	35 °C

Figura 1 – Esboço da torre de resfriamento.



A irradiação solar incidente por m² na cidade de Paulínia, onde se localiza a tubulação estudada, foi obtida pelo site da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [8], no valor de 185 W/m². Para determinar a perda de temperatura que atualmente ocorre na tubulação lisa, foram obtidos o coeficiente convectivo externo e interno (h), através da Equação 1, e a partir do conceito de resistências térmicas foi determinada a troca térmica na tubulação.

$$h = \frac{Nu k}{D}, \quad (1)$$

onde: Nu = Número de Nusselt

k = Condutividade térmica [W.m⁻¹.K⁻¹]

D = Diâmetro [m]

O número de Nusselt foi estimado através da equação de Gnielinski, que leva em consideração o fator de atrito do tubo, [8].

Sabe-se que o aumento da superfície externa de uma tubulação, permite uma maior troca térmica. Este aumento feito através de expansões metálicas é denominado de aletamento. Neste estudo, foram avaliados dois tipos de aletas, a anular e a aleta tipo pino cilíndrico. Essas aletas foram selecionadas por se tratarem de tipos comuns de aletas e de fácil aplicação prática. Aletas tipo triangular ou parabólica seriam não só de difícil instalação, mas no caso de instaladas, poderiam representar riscos aos trabalhadores devido ao final das aletas serem pontiagudas e, em caso de queda de uma pessoa, ocorrer algum tipo de perfuração. A aleta tipo anular envolve o tubo como um anel ao redor do mesmo e a aleta tipo pino cilíndrico é composta por vários cilindros soldados à superfície do tubo equidistantes entre si [9].

Para a aleta do tipo anular, o espaçamento de 3 mm foi considerado para que haja a possibilidade de solda

entre as aletas. Vale ressaltar que as aletas deverão ser instaladas na tubulação operando, pois não é possível cessar o fluxo de água de resfriamento durante o processo. Os valores encontrados para o comprimento da aleta e espessura da aleta foram obtidos para a maior eficiência com o maior ganho de troca térmica.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com o aletamento da tubulação.

Tabela 2 – Resultados dos cálculos obtidos para as aletas tipo anular e tipo pino cilíndrico.

Descrição	Simbologia	Anular	Pino cilíndrico
Espaçamento entre Aletas	D	0,03 m	0,025 m
Comprimento das Aletas	L	0,035 m	0,06 m
Raio das Aletas	R	-	0,011 m
Número de Aletas	N	6028	1.076.686
Área do Tubo não Aletada	$A_{tubo\ não\ aletado}$	608,5 m ²	263,6 m ²
Área do Tubo Aletada	$A_{tubo\ aletado}$	1.466,1 m ²	4.464,9 m ²
Coefficiente da Aleta	M	43,82	23,54
Eficiência da Aleta	η	59,40 %	62,87 %
Troca de calor	\dot{Q}	27.288.679,6 W	5.663.367,8 W
Varição de temperatura	ΔT	0,117 °C	0,244 °C

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que o aletamento tipo pino cilíndrico é o mais eficaz. A troca térmica da tubulação lisa foi de 2.317.679,5 W com uma variação de temperatura de 0,099 °C. É interessante pontuar que, quanto mais próximas as aletas do tipo anular, maior a interferência do valor do coeficiente convectivo, pois o ar encontra uma maior dificuldade de permear entre as aletas. Já nas aletas do tipo pino

cilíndrico, não existe essa barreira física criada por uma aleta que toma toda a região externa da tubulação e as interferências no coeficiente convectivo são minimizadas [6].

Para a execução dos serviços de aletamento, foi considerado o trabalho de um soldador com um ajudante. São necessárias 8 horas de trabalho da equipe de solda para a realização da solda de 20 pinos. Como o trecho de tubulação a ser soldado é muito grande e a quantidade de pinos a serem soldados é muito alta, seria interessante uma quantidade maior de equipes que pudessem trabalhar em paralelo e diminuir dessa forma o tempo de execução do serviço. Um número de 16 equipes foi levado em consideração, sendo essas equipes receberão um valor de R\$ 800,00 por dia de trabalho e levarão 1,75 anos para soldarem as 1.076.686 aletas.

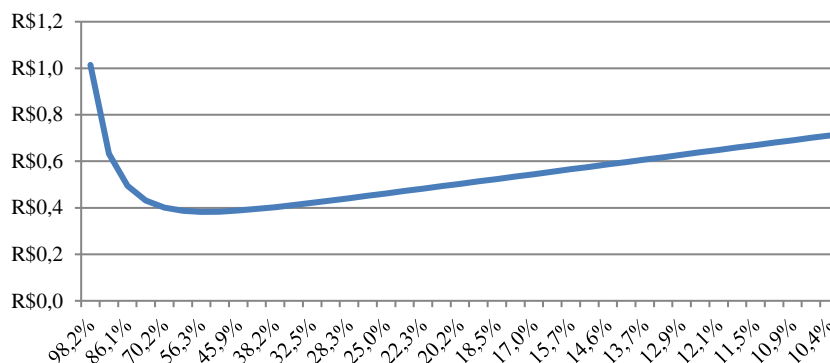
O material das aletas a ser soldado é o mesmo da tubulação, ou seja, aço 1020. Num estudo futuro será verificada a possibilidade de utilizar um material diferente do aço para que haja um maior ganho de troca térmica nas aletas. A quantidade de barras de aço necessárias para as aletas são 11.843, sendo que cada barra custa R\$ 50,00. Os custos para o aletamento da tubulação estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Custo com mão de obra e material das aletas.

Descrição	Custo
Mão de Obra	R\$ 2.691.715,00
Material das aletas	R\$ 592.150,00
Total	R\$ 3.283.865,00

Após a primeira análise de custo foi verificada a possibilidade de utilizar-se a razão custo-quantidade de Watts de troca de calor. Esse parâmetro passa a ser de extrema importância visto que ele demonstra qual o menor custo por Watt e, a partir deste valor, determinar as medidas das aletas. Este tipo de análise aumenta a precisão e diminui os custos de execução do trabalho. A Figura 2 representa variações de tamanho das aletas (eixo horizontal) e a variação do custo total de instalação das mesmas (eixo vertical).

Figura 2 – Custo da aleta (R\$/W) versus variações no tamanho da aleta.



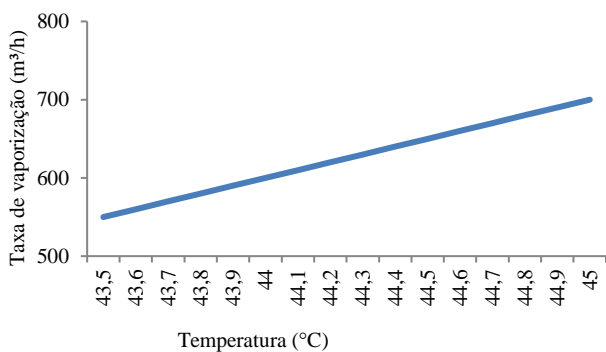
Fonte: Autores.

O menor custo observado foi de R\$/W 0,387, que representa um tamanho da aleta de 0,06 m de comprimento e 0,011 m de raio. Entretanto, é possível ter um alto ganho de troca térmica com um valor bem próximo de custo. Por exemplo, o valor de 0,09 m de comprimento da aleta aumenta o custo para R\$/W 0,388. Este aumento passa a ser significativo devido às proporções do trabalho, mas o custo benefício é alto, pois considerando este comprimento, a variação da temperatura será de 0,266 °C.

Com essa diminuição da temperatura, haverá uma diminuição da vaporização e na temperatura da bacia de água fria da torre e consequentemente um aumento da produção de derivados nas torres de destilação à vácuo.

A Replan possui um levantamento empírico de como a evaporação na torre diminui em relação à temperatura de entrada da água de resfriamento nas torres, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Eficiência da evaporação da torre em função da temperatura da água.



Fonte: Autores

Observa-se que para cada 1 °C diminuído na temperatura da água quente que chega à torre, diminui-se 100 m³/h de evaporação. Dessa forma, com a diminuição de 0,266 °C na temperatura com o aletamento, ocorrerá a diminuição de 26,6 m³/h de evaporação na torre.

Este ganho pode ser utilizado para o dimensionamento de novas unidades, pois a outorga da refinaria é limitada, ou simplesmente economizada a água de reposição que deveria ser injetada na torre para que fosse mantido o ciclo de circulação no sistema fechado. A economia por ano com a diminuição da temperatura da água quente será de R\$ 83.885,00, considerando o preço da água de R\$/m³ 0,57 de reposição da torre.

Como a água quente chega à torre mais fria, a temperatura da água fria também diminui. Um levantamento empírico realizado pela Replan mostra que os valores de diferença de temperatura entre a água quente e a água fria são bem próximos. Dessa forma, a queda de temperatura que ocorre na água quente será a mesma que ocorre na água fria.

Nas torres de destilação a vácuo, o vácuo é formado pela introdução de vapores em permutadores onde ocorre a troca de calor com a água de resfriamento. Consequentemente, quanto menor a temperatura da água de resfriamento, maior o vácuo a ser formado e maior a produção de derivados. A Replan possui um levantamento estatístico de como a temperatura da água de resfriamento interfere no vácuo. A expressão que determina o vácuo pela temperatura é dada pela Equação 2.

$$P = 2,940.T + 4,557, \quad (2)$$

onde T é a temperatura da água expressa em °C e P é o valor da pressão de vácuo em mmHg.

Outra expressão que demonstra os ganhos de derivados, em especial o Gasóleo Pesado, é a Equação 3:

$$V = 25.P \quad (3)$$

onde V é o volume específico ganho de gasóleo em m³/dia e P é a pressão do ganho de vácuo em mmHg, devido à diminuição da temperatura da água. As Equações 2 e 3 foram obtidas de dados internos.

Os valores em dólares para o ganho de derivados será de \$ 3.110.267,00. Utilizando a cotação do dólar de R\$ 2,612, o valor será de R\$ 8.124.017,00 e, somando-se aos ganhos na diminuição da vaporização, de R\$ 83.885,00 a refinaria terá a quantia de R\$ 8.207.902,00 de economia por ano.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que os ganhos com o aletamento da tubulação utilizando aletas do tipo pino cilíndrico são de grande valia, com economia de R\$ 8.207.902,00 por ano. O aletamento provocaria uma redução de 0,266 °C da temperatura da água, resultando na diminuição de 26,6 m³/h de evaporação na torre de resfriamento. Os custos totais para implementação deste projeto são R\$ 3.283.865,00. Vale ressaltar que para a realização dos serviços de solda na tubulação serão necessários 1 ano e 9 meses para a conclusão. Dessa forma o investimento deve ser feito sem o retorno imediato.

Corrigindo os valores pela inflação, utilizando os valores do IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo) de 2012 e 2013 [10], no tempo de execução do serviço, o valor sobe de R\$ 3.283.865,00 para R\$ 3.505.485,82. Os ganhos intermediários obtidos, pois as aletas assim que estão soldadas já trocam calor, não serão computadas visto que seria difícil realizar o cálculo e o mesmo dependeria de muitos fatores para quantificar.

Dessa forma, o *payback* seria aproximado em 0,4 anos, aproximadamente 5 meses. Este estudo é interessante mediante ao curto tempo de retorno do investimento. Ainda que em tempos com diferentes taxas a aplicar e com diferentes cotações de materiais

para a aleta, o procedimento para a análise seria aplicado servindo então como uma referência para cálculos atualizados.

Entretanto, temos vários empecilhos que impedem a realização do trabalho. As tubulações que retornam com a água quente para a torre são únicas e não possuem redundância. Supondo uma falha do soldador acarretando assim, em um possível furo na linha, seria necessário parar mais da metade da planta para uma possível manutenção. Caso isso ocorresse todo este curto tempo de *payback* se transformaria, sem contar ainda no desabastecimento do mercado, visto que a refinaria em questão produz 25 % de todo o diesel e 20 % de toda a gasolina do país.

Apesar disso, deve-se estudar a viabilidade de implantação, principalmente em novas unidades de Refinaria de petróleo instaladas no Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] ANA, Agência Nacional de Águas, Relatório de gestão, 2002. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/>. Acesso: Julho de 2016.
- [2] SOUZA, W. N. T.; MANZELA, M. S. A. A. Otimização de desempenho de trocadores de calor compactos, *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana*, n. 1, p. 33-44, 2015.
- [3] KIM, J.-K.; SMITH, R. Cooling water system design, *Chemical Engineering Science*, v. 56, pp. 3641-3658, 2001.
- [4] BERNIER, M. A. Cooling tower performance: theory and experiments. In: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta, GA (United States), 1994.
- [5] AMORIM, R. D. S. **Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo: Caso REPLAN**. Dissertação de mestrado em Sistema de Gestão. Universidade Federal Fluminense, 2005.
- [6] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor e de massa**, 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [7] MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., MUNSON, B. R.; DEWITT, D.P. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos**. 1ª ed, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2005.
- [8] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> Acesso: Junho de 2016.
- [9] BEJAN, A. **Transferência de Calor**. São Paulo: Edgar Blucher, 2004.
- [10] IPCA, Índice Nacional De Preços Ao Consumidor Amplo, Brasil. Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/> Acesso em: Agosto de 2016.