



TÓPICOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA PARA O ESTUDO DE UMA PLANTA A VAPOR INDUSTRIAL

Resumo: *O presente texto apresenta uma estratégia para aplicação de tópicos de Transferência de calor e massa para o estudo de uma planta a vapor industrial. Para estudos desse tipo de sistema é primordial o conhecimento de mecanismos de transferência de calor e massa. Seja nas situações em que se deseja altas taxas térmicas ou naqueles que se pretende reduzir ao máximo o fluxo de calor, se faz necessário compreender como a energia flui apenas por uma diferença de temperatura.*

Palavras-chave: *Transferência de calor e massa, Planta a vapor, diferença de temperatura.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as plantas a vapor são empregadas em diversos setores industriais, tornando-se essenciais nos principais processos de fabricação, como secagem, desidratação, cozimento e produção de reações químicas. Para estudos desse tipo de sistema é primordial o conhecimento de mecanismos de transferência de calor e massa. Seja nas situações em que se deseja altas taxas térmicas ou naqueles que se pretende reduzir ao máximo o fluxo de calor, se faz necessário compreender como a energia flui apenas por uma diferença de temperatura (NOGUEIRA, 2005).

O ramo da ciência que trata da relação da quantidade de calor transferido e as outras formas de energia é chamado de termodinâmica. Mas em engenharia, estamos mais frequentemente interessados na taxa de transferência de calor, processo pelo qual a energia é transportada devido a uma diferença de temperatura (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). Como em outras áreas da engenharia, na transferência de calor a solução bem-sucedida impõe algumas premissas e idealizações, pois propriedades físicas como a condutividade térmica ou a viscosidade variam com a temperatura, mas se forem selecionados valores médios adequados, os cálculos podem ser consideravelmente simplificados (KREITH, 2003).

Os processos que ocorrem em uma planta a vapor industrial (geração, distribuição e retorno do condensado) necessitam de idealizações para o desenvolvimento de modelos matemáticos tratáveis. Esses modelos permitem premissas de como as variações nos principais parâmetros de operação da planta afetam o desempenho real, fomentando panoramas para discussões acerca das funções e benefícios de algumas características destinadas a melhorar o desempenho global das plantas térmicas.

Em meio a esse contexto, o presente trabalho faz uso de princípios de transferência de calor e massa como ferramenta analítica para o estudo de uma planta a vapor industrial, sendo possível estimar as perdas de energia térmica e identificar os fluxos energéticos do

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





sistema. Dessa forma, nas próximas seções analisaremos as equações básicas que modelam as taxas de transferência de calor nos processos de uma planta térmica.

2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

A diferença de temperatura é a força motriz da transferência de calor, assim como a diferença de pressão é a força motriz para escoamento de fluidos. A taxa de calor transferida em uma dada direção depende da magnitude do gradiente de temperatura (taxa de variação de temperatura) na mesma direção. Quanto maior o gradiente, maior a taxa de transferência de calor (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

A literatura da transferência de calor geralmente reconhece três modos distintos de transmissão de calor: condução, radiação e convecção. Estritamente falando, somente a condução e a radiação devem ser classificadas como processos de transferência de calor, pois somente esses dois mecanismos dependem da existência de uma diferença de temperatura para operar. O último dos três modos, a convecção, não obedece puramente a definição de transferência de calor, porque sua operação também depende do transporte mecânico de massa. Porém, a convecção também realiza a transmissão de energia de regiões de temperatura mais altas para regiões de temperaturas mais baixas, o termo “transferência de calor por convecção” tornou-se aceito de forma generalizada (KREITH, 2003).

A transferência de calor não é conduzida por uma única relação, isso significa familiaridade não só com as leis e os mecanismos físicos do fluxo de calor, mas também com os da mecânica dos fluidos, da física e da matemática. O calor que está em trânsito não pode ser medido ou observado diretamente, porém produz efeitos que estão sujeitos a observação e medição. Esses efeitos podem ser observados em estudos de uma planta a vapor industrial.

2.1. Condução

Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser sólido ou um fluido, usa-se o termo condução para a transferência de calor que ocorrerá através do meio. A taxa de condução de calor por um meio depende da geometria, da espessura, do tipo de material e da diferença de temperatura a que o meio está submetido. Considerando uma camada plana, a condução é proporcional à diferença de temperatura através da camada e área da transferência de calor, mas inversamente proporcional a espessura da camada. A partir da Lei de Fourier da condução térmica, tem-se que:

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde a constante de proporcionalidade k é a condutividade térmica do material, que é a medida da capacidade do material de conduzir calor. O calor é conduzido no sentido da

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





temperatura decrescente, e o gradiente de temperatura dT/dx torna-se negativo quando a temperatura decresce com o aumento de x .

2.2. Convecção

A convecção está relacionada a transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando estiverem em diferentes temperaturas. Nos sistemas convectivos em que a velocidade do fluido é determinada por causas externas (ventilador ou bomba), tem-se a convecção forçada. Quando a convecção ocorre por diferenças de densidades provocadas pela transferência de calor, tem-se a convecção natural (INCROPERA, 2008).

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional a diferença de temperatura e expressa pela Lei de Newton do Resfriamento e está diretamente relacionada com o coeficiente de convecção h :

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser definido como a taxa de transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido por unidade de área de diferença de temperatura (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). A sua determinação é vista como um problema da convecção. O problema não é simples, pois depende de numerosas propriedades dos fluídos, tais como densidade, condutividade térmica e calor específico. Além disso, o coeficiente é função da geometria da superfície e das condições de escoamento (INCROPERA, 2008).

2.3. Coeficiente Global de Transferência de Calor

Na análise de transferência de calor, quando se tem mais de uma etapa envolvida, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de troca de calor U , que representa a contribuição de todos os efeitos na etapa de transferência de calor. Um trocador de calor normalmente envolve dois escoamentos de fluidos separados por uma parede sólida. O calor é primeiro transferido do fluido quente para a parede por convecção, através da parede por condução e, a partir da parede, para o fluido frio novamente por convecção. Qualquer efeito da radiação normalmente é incluído no coeficiente de transferência de



calor por convecção (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). Define-se o coeficiente global de troca térmica por meio da seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{total} = AU\Delta T \quad (3)$$

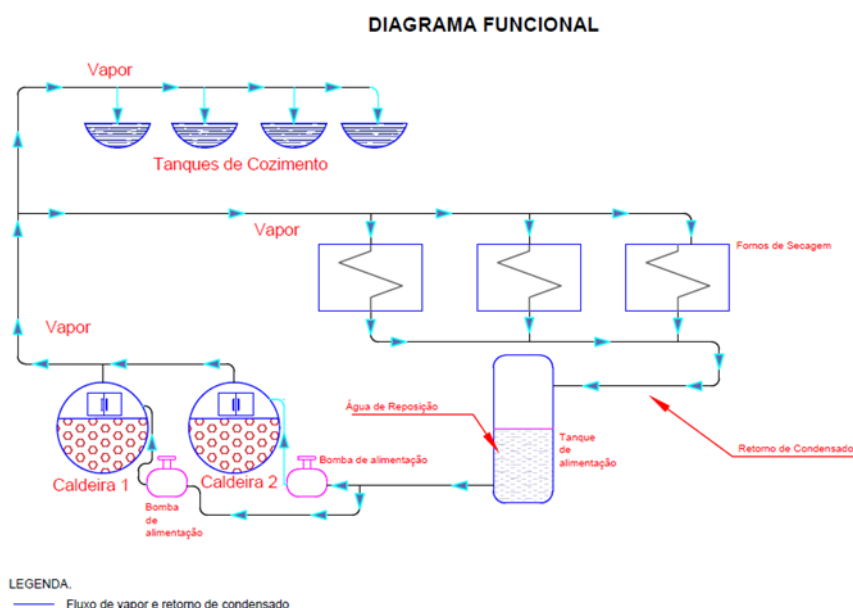
3. PLANTA A VAPOR INDUSTRIAL

O vapor tornou-se uma ferramenta flexível e versátil para a indústria quando se necessita de aquecimento. Por ter capacidade de armazenar grande quantidade de energia com pouca massa, o vapor é bastante utilizado como meio de transmissão de energia térmica de um ponto central, onde é gerado, até os pontos de uso (SPIRAX SARCO, 2011).

Em geral, uma planta a vapor industrial é constituída por etapas de geração, distribuição e retorno do condensado. Essas etapas interagem entre si, havendo qualquer problema no funcionamento de alguma das partes a eficiência do sistema ficará comprometida. A operação sistemática de uma planta a vapor envolve processos de transferência de calor, onde, o fluido aquecido troca calor com o meio externo por mecanismos de condução e convecção.

Uma planta a vapor industrial típica está representada na figura (1), onde a geração do vapor é destinada para processos de cozimento e secagem em uma indústria de beneficiamento da madeira.

Figura 1 – Diagrama funcional de uma planta a vapor industrial.



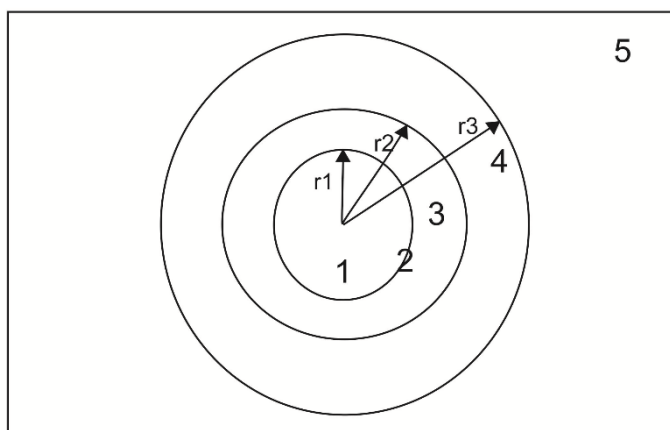


3.1. Distribuição do Vapor

O objetivo do sistema de distribuição é conduzir o vapor gerado na caldeira para os pontos de uso com menor perda térmica possível. A troca de calor na tubulação envolve dois escoamentos de fluidos separados por uma parede sólida. O calor é transferido ao meio ambiente em etapas: convecção no interior do tubo; condução através da parede do tubo e isolamento térmico e convecção natural na superfície externa do isolamento térmico.

A transferência de energia na tubulação se dará através das superfícies entre o tubo, o isolante e o ar, pelo processo de condução e convecção. A figura 2 ilustra as superfícies do tubo e do isolamento térmico através de uma visão de um corte transversal.

Figura 2 – Corte transversal de uma tubulação.



A respeito a esta figura, os sub índices referem-se:

- 1 – Região no interior do tubo;
- 2 – Face interna da parede do tubo;
- 3 – Face externa da parede do tubo e face interna do isolamento;
- 4 – Superfície externa do isolamento;
- 5 – Região onde se encontra o fluido que envolve o isolamento (ar).

Considerando que o fluido quente está contido no interior da tubulação ($T_1 > T_5$), o calor fluirá de dentro para fora. O mecanismo de transferência de calor que ocorre pela parede da tubulação é o de condução. Considerando a tubulação como um cilindro longo, cujo o comprimento (L) seja muito maior quando comparada com o seu diâmetro, pode-se supor que o calor flui de uma única direção radial (pelo raio). Considerando também o sistema em regime permanente (sem acúmulo), sem geração de calor pela parede e com condutividade térmica constante.

Fazendo uso da equação (1) e implementado a relação apropriada para a área. Para o fluxo de calor em um sistema cilíndrico, tem-se que:

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





$$q = -kA \frac{dt}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dt}{dr} \quad (4)$$

Integrando:

$$q \int_i^e \frac{dr}{r} = -k2\pi L \int_i^e dt$$

$$q \ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right) = -k2\pi L (T_e - T_i)$$

$$q = \frac{k2\pi L (T_i - T_e)}{\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right)} \quad (5)$$

Sendo assim, para quantificar a energia transferida do fluído até a superfície de isolamento:

$$q_{2,3} = \frac{2\pi L k_{2,3} (T_2 - T_3)}{\ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (6)$$

e

$$q_{3,4} = \frac{2\pi L k_{3,4} (T_3 - T_4)}{\ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right)} \quad (7)$$

A transferência de calor por convecção ocorrerá no fluido no interior do tudo e no fluido que envolve o ar. A partir da equação (2), para o sistema estudado, tem-se que:

Organização



Promoção





Fluido no interior do tubo

$$q_{1,2} = h_{1,2}A_2(T_1 - T_2) \quad (8)$$

Fluido que envolve o isolamento (ar)

$$q_{4,5} = h_{4,5}A_4(T_4 - T_5) \quad (9)$$

Para a determinação do coeficiente de convecção natural e a geometria considerada neste estudo, cilindro horizontal longo, Churchill e Chu recomendaram uma única correlação para uma ampla faixa de números de Rayleigh (INCROPERA, 2008):

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (10)$$

$$Ra_D \leq 10^{12}$$

Essa relação fornece o número de Nusselt médio ao longo de toda circunferência de um cilindro isotérmico.

$$\overline{Nu}_D = \bar{h} \frac{D}{k} \quad (11)$$

O número de Rayleigh (Ra_D) é um número adimensional definido como o produto do número de Grashof (Gr), que é a medida da razão entre as forças de empuxo e forças viscosas, é o número de Prandtl (Pr), que descreve as razões entre difusividade de momento e térmica.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} \quad (12)$$

Organização



Promoção





e

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (13)$$

Quando se tem mais de uma etapa de calor envolvida, é instrumento facilitador dos cálculos empregar-se um coeficiente de transferência dito global ou integral. Fazendo uso da Equação (3) tem-se que a taxa de transferência de calor fica sendo dada por:

$$q = A_4 U_4 (T_1 - T_5) \quad (14)$$

$$q = \frac{2\pi L (T_1 - T_5)}{\frac{1}{h_{1,2} r_2} + \frac{1}{k_{2,3}} \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \frac{1}{k_{3,4}} \ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right) + \frac{1}{h_{4,5} r_4}} \quad (15)$$

3.2. Retorno do Condensado

O conhecimento do balanço energético característico do retorno do condensado, contribui para a identificação das perdas que reduzem a eficiência do sistema e fornecem um ponto de partida para a identificação de oportunidades e implementação de ações para melhorias da eficiência de um sistema a vapor.

A taxa de condensação do vapor por unidade de comprimento em um cilindro horizontal pode ser expressa pela seguinte relação (ÇENGEL & GHAJAR, 2012):

$$\dot{m}_{\text{condensação}} = \frac{q}{h_{lv}^*} \quad (16)$$

Onde:

q – Taxa de transferência de calor;

h_{lv}^* - Calor latente de vaporização modificado.

Organização



Promoção





Para determinar a taxa de transferência de calor, faz-se uso da Equação (2). Porém, deve-se primeiramente determinar o coeficiente de transferência de calor por condensação, que pode ser calculado a partir da relação de Labuntsov (1975):

$$h = 0,729 \left[\frac{g \rho_l^2 h_{lv}^* k_l^3}{\mu_l (T_s - T_\infty) D} \right]^{1/4} \quad (17)$$

O calor latente de vaporização (h_{lv}) é liberado quando a unidade de massa do vapor condensa e normalmente representa a transferência de calor por unidade de massa do condensado formado durante a condensação. No entanto, o condensado no processo real de condensação é resfriado até próximo da temperatura média entre T e T_s , liberando mais calor no processo. Portanto, a transferência de calor efetiva será maior. Rohsenow demonstrou, em 1956, que o resfriamento do líquido abaixo da temperatura de saturação pode ser contabilizado pela substituição de h_{lv} pelo calor latente de vaporização modificado h_{lv}^* , definido como (ÇENGEL & GHAJAR, 2012):

$$h_{lv}^* = h_{lv} + 0,68 c_p (T_{sat} - T_s) \quad (18)$$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma abordagem sistêmica de uma planta a vapor industrial onde sejam empregados princípios da transferência de calor e massa apresenta-se como um estudo de caso e auxilia no processo de ensino aprendizagem em engenharia. Pois, essa prática mostra-se como uma ferramenta metodológica que aproxima o estudante a casos reais da indústria. Onde seria possível aplicar de forma prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula analisando a demanda, o fornecimento das etapas de geração, distribuição, uso final e o modo como interagem, possivelmente comprovaria o potencial de ganhos que podem ser obtidos com a implantação de estudos e planos de ações que avaliem o sistema de forma global, para determinar como as necessidades de uso final podem ser mais eficientemente servidas. Isso constitui uma prática comum da engenharia que consiste em subdividir o sistema em seus componentes, fazendo análises a partir de modelos matemáticos e/ou simulações que otimizem a escolha ou projeto desses componentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Yunnus A., GHAJAR, Afshin J. Transferência de Calor e Massa – Uma Abordagem Prática. 4.ed. Nova York: Bookman, 2012. 865 p.

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





INCROPERA, Frank P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 639 p.

KREITH, Frank. Princípios de Transferência de Calor. São Paulo: Thomson Learning, 2003. 623 p.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Eficiência Energética no Uso de Vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196 p.

SPIRAX SARCO. Design of Fluid Systems: Hook-ups. South Carolina: Blythewood, 2011.

TOPICS OF HEAT AND MASS TRANSFER FOR THE STUDY OF AN INDUSTRIAL STEAM PLANT

Abstract: *The present paper presents a strategy for the application of Heat transfer and mass topics for the study of an industrial steam plant. For studies of this type of system, the knowledge of heat and mass transfer mechanisms is of paramount importance. In situations where high thermal rates are desired or in those where heat flow is to be minimized, it is necessary to understand how energy flows only through a temperature difference.*

Key-words: *Heat transfer and mass, Steam plant, temperature difference.*

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



UNISOCIESC
Educação e Tecnologia

Promoção



ABENGE
Associação Brasileira de Educação em Engenharia