



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



PROJETO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA RESFRIAMENTO DE FLUIDO EM UM CIRCUITO HIDRÁULICO UTILIZADO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Clovis Adelar Mattjie (FAHOR) cm000627@fahor.com.br

Renato Ristof (FAHOR) rr000875@fahor.com.br

Ademar Michels (FAHOR) michels@fahor.com.br

Resumo

O projeto de trocadores de calor pode ser dividido em três etapas: análise térmica, projeto mecânico preliminar e projeto de fabricação. O foco deste artigo é a análise térmica, que consiste na determinação da área de troca de calor requerida, dadas as condições de escoamento e temperaturas dos fluidos. Com base no exposto acima buscou-se realizar uma análise de trocadores de calor de correntes cruzadas utilizados para refrigeração e controle da temperatura do fluido hidráulico, considerando superfícies aletadas e não aletadas, determinando o coeficiente global de transferência térmica das superfícies para cada caso. O dimensionamento está estruturado em um conjunto de equações utilizando o método DTML (Diferença da Temperatura Média Logarítmica). Os dados utilizados como parâmetros de entrada e saída dos fluidos quente e frio são fornecidos por uma empresa fabricante de máquinas agrícolas, através de registros e acompanhamento de campo. Os resultados obtidos comparando os trocadores de calor a partir da superfície de troca térmica mostram que apesar do nível de incertezas envolvido, trocadores de calor com tubos aletados apresentam o coeficiente global de transferência de calor maior, comparado a tubos não aletados, resultando em taxas mais elevadas de transferência de calor e tamanhos mais compactos.

Palavras-chave: Trocador de calor; Análise térmica; Coeficiente global de transferência térmica.

1. Introdução

Na agricultura, a utilização de circuitos hidráulicos complexos acaba influenciando significativamente na temperatura do fluido hidráulico, gerado pelo atrito em partes mecânicas e pela pressão exercida no sistema, gerando alterações nas propriedades do mesmo, reduzindo drasticamente a vida útil do fluido e dos componentes hidráulicos, principalmente eletroválvulas e motores hidráulicos.

O objetivo deste artigo é projetar um trocador de calor com aplicação em circuitos hidráulicos referente a um sistema de agricultura de precisão, para evitar o aquecimento do fluido utilizado nos mecanismos.

Para o equacionamento do trocador de calor será utilizado o método DTML, pois é o mais indicado quando se conhece as temperaturas de alimentação e saída



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



dos fluidos quentes e frios, uma vez que o valor de ΔT_{ml} pode ser calculado.

O projeto justifica-se pela necessidade de manter o fluido hidráulico ISO 68 dentro das condições normais de trabalho especificadas pelo fabricante, garantindo assim maior vida útil dos componentes hidráulicos. O projeto do trocador de calor abordará como ponto principal a taxa de transferência de calor necessária para manter a temperatura do fluido hidráulico dentro das condições estipuladas. Evitando que o mesmo venha atingir níveis indesejado de aquecimento, comprometendo a sua viscosidade tornando à muito baixa ou, até mesmo, a deterioração do fluido, causando falha na lubrificação e conseqüentes danos mecânicos aos equipamentos.

2. Revisão da Literatura

2.1 Transferencia de calor

Em situações onde existe diferença de temperatura no interior de um sistema, ou que dois sistemas a diferentes temperaturas forem colocados em contato, ocorrem alterações das temperaturas entre os mesmos, tendendo ao equilíbrio, este processo é chamado de transferência de calor.

2.2 Trocador de calor

Quanto ao conceito de trocador de calor, pode ser definido como sendo um dispositivo utilizado para a realização da troca térmica entre dois ou mais fluidos de temperaturas diferentes. Em processos industriais são encontrados várias formas para a transferência de calor. O trocador de calor aquece ou esfria um determinado fluido e isso é de suma importância para a eficiência do processo como um todo.

A utilização de trocadores de calor faz-se necessário, sempre que houver um gradiente de temperatura entre dois fluidos, por exemplo, sendo que a transferência de calor faz com que a temperatura destes fluidos seja alterada, de forma geral um dos fluidos é resfriado enquanto o outro é aquecido.

Para Çengel e Ghajar (2012), a transferência de calor em um trocador geralmente envolve convecção em cada fluido e condução através da parede que separa os dois fluidos. Na análise de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor U , que representa a contribuição de todos estes efeitos sobre a transferência de calor. A taxa de transferência de calor entre os dois fluidos em um local de um trocador de calor depende da magnitude da diferença de temperatura no local, que varia ao longo do trocador de calor.

2.3 Classificação dos trocadores de calor

A seleção de um determinado trocador de calor requer uma análise térmica para determinar o tamanho e a geometria necessária para satisfazer os requisitos de aquecimento ou resfriamento de um dado fluido, enfatizando a necessidade do conhecimento dos modelos e conceitos de trocadores de calor existentes para definir o mais adequado ou correto.

Basicamente os trocadores de calor são classificados segundo o processo de transferência de calor, grau de compactação da superfície, tipo de construção e da disposição das correntes dos fluidos (INCROPERA; DEWITT 1998).

De acordo com o processo de transferência de calor, os trocadores de calor são classificados em contato indireto e direto. Quanto ao grau de compactação, representa alta razão entre a área de transferência de calor e o volume do trocador. Considerando o tipo de construção, são classificados em tubulares, de placas, de superfície estendida e regenerativa.

2.3.1 Trocadores Tubulares

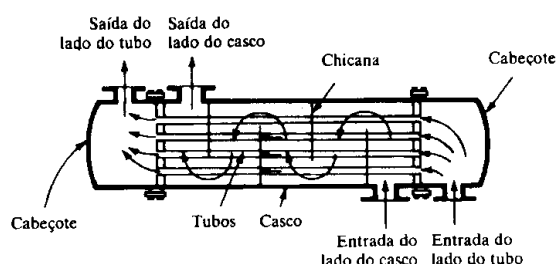


Figura 1 – Trocadores casco e tubo com um passe no casco e tubo. Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Os trocadores de casco e tubos são os mais comuns em aplicações industriais, constituídos de pequenos tubos dispostos “lado a lado” no interior de uma carcaça. Um fluido percorre o interior dos tubos enquanto o outro fluido é forçado a escoar através da carcaça, como pode observar na figura 1.

2.3.2. Trocadores de calor tipo placa

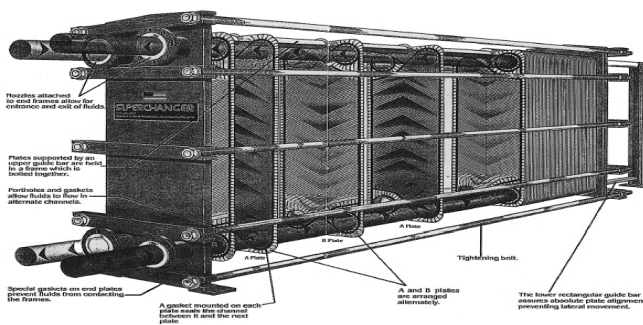


Figura 2 – Trocador de calor de placas. Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Trocadores de calor do tipo placa são geralmente construídos de placas delgadas, lisas ou onduladas. Este trocador, pela geometria da placa, não suporta pressões e diferenças de temperatura tão elevadas quanto um tubo cilíndrico, são ordinariamente projetados para temperaturas ou pressões moderadas, conforme figura 2.

2.3.3 Trocadores de calor de superfície estendida - aletas

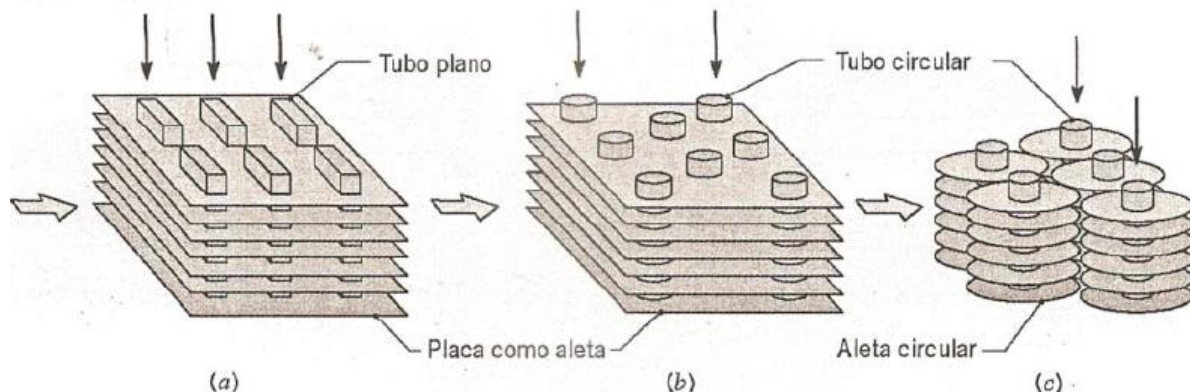


Figura 3 – Trocador de calor de aletas. Fonte: Incropera e Dewitt (1998)

Em geral são trocadores mais leves e compactos, podendo ser utilizados em um largo domínio de pressão do fluido nos tubos, não ultrapassando cerca de 30 atm, e temperaturas de aproximadamente 850 °C, porém o emprego atual não permite a ocorrência de altos valores de pressão e temperatura, simultaneamente (Godoy, 2008), conforme figura 3.

2.4 Equacionamento de trocadores de calor

2.4.1 Coeficiente global de transferência de calor

A equação básica para trocador de calor é dado pela equação (2-01).

$$Q = U A \Delta T_{ml} \quad (2-01)$$

Onde:

- Q é a taxa de transferência de calor (W);
- A é a área de troca térmica (m²);
- U é o coeficiente global de transferência de calor (W/ m²°C);
- ΔT_{ml} é diferença média de temperatura entre os fluidos (°C).

Assumindo-se também que, a transferência de calor dos fluidos do trocador e a vizinhança sejam desprezíveis e que ocorrem mudanças de fase dos fluidos é possível chegar às taxas de transferência de calor dos fluidos quente e frio, respectivamente, conforme as equações (2-02) e (2-03).

$$q = m_h c_{p,h} (T_{h,e} - T_{h,s}) \quad (2-02)$$

$$q = m_c c_{p,c} (T_{c,e} - T_{c,s}) \quad (2-03)$$

Onde:

- m_h é a vazão mássica do fluido quente (kg/s);
- $c_{p,h}$ é o calor específico a pressão constante fluido quente (W/°C);
- $T_{h,e}$ e $T_{h,s}$, são respectivamente, as temperaturas de entrada e saída, relativos ao fluido quente (°C);
- m_c é a vazão mássica do fluido frio (kg/s);
- $c_{p,c}$ é o calor específico a pressão constante do fluido frio (W/°C);
- $T_{c,e}$ e $T_{c,s}$ são respectivamente, as temperaturas de entrada e de saída, relativos ao fluido frio(°C).

2.4.2 Método DTML para análise dos trocadores de calor

A busca da solução de um problema em um trocador de calor é facilitada através da utilização de um método adequado ao problema, onde o mesmo pode ser classificado como problema de projeto e problema de desempenho.

Uma diferença de temperatura cria a força motriz que determina a transmissão de calor de uma fonte a um receptor. Sua influência sobre um sistema de transmissão de calor é o objeto para o nosso estudo.

Os tubos concêntricos, mostrados na figura 4, conduzem duas correntes, e, em cada uma destas duas, existe um coeficiente de película particular, e suas respectivas temperaturas, da entrada e saída, variam.

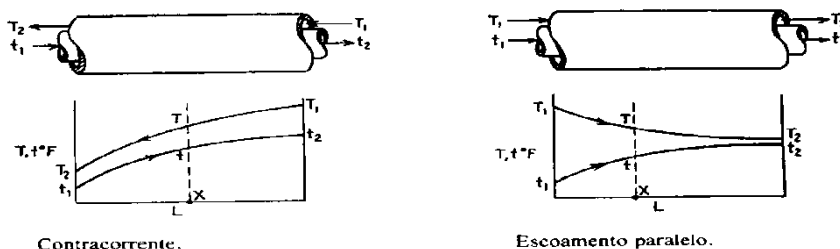


Figura 4— Perfis de temperatura em trocadores de calor. Fonte: Çengel e Ghajar (2012).

Para Çengel e Ghajar (2012), este método é mais adequado para determinar o tamanho de um trocador de calor quando todas as temperaturas de entrada e saída são conhecidas, de acordo com a equação (2-04).

$$\Delta T_{ml} = DTML = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right]} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right)} \quad (2-04)$$

3. Métodos e Técnicas

O modelo matemático do trocador de calor com e sem aletas foi obtido a partir das equações de balanço global de energia. Para obtenção deste modelo foram adotadas algumas simplificações, apresentadas na sequência:

- As propriedades de transporte de calor dos fluidos, quente e frio, não

variam com a temperatura;

- Não ha mudança de fase nos fluidos considerados;
- As variações de energia cinética e de energia potencial são desprezíveis.

Os processos de transferencia de calor considerados na representação matemática do sistema estudado são os seguintes: transferencia de calor por convecção entre o fluido quente e os tubos do lado interno; transferência de calor por condução nas paredes dos tubos e aletas; e transferencia de calor entre o fluido frio e os tubos do lado externo.

O dimensionamento do trocador de calor é efetuado levando em consideração dados de projeto fornecido por uma empresa do ramo agrícola, fabricante de equipamentos agrícolas, equipados com sistema de agricultura de precisão. Os dados fornecidos são específicos de uma plantadeira equipada com sistema de taxa variável de fertilizante, sistema pneumático de distribuição de semente e sistema de transmissão hidráulica, coletados em testes de campo.

Os cálculos foram elaborados levando em consideração os seguintes dados:

- Vazão de fluido quente do sistema de $0,003 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Temperatura de entrada do fluido quente 90°C ;
- Temperatura de saída do fluido quente no sistema entre 60°C ;
- Temperatura de entrada do fluido frio 35°C ;
- Temperatura de saída fluido frio 75°C ;
- Pressão do fluido quente 10 bar;
- Pressão fluido frio 1 atm;
- Fluido quente do sistema ISO 68;
- Fluido frio do sistema ar.

O equacionamento do trocador de calor tem como fonte de referência os trabalhos de Incropera e DeWitt (2003) e Çencel e Ghajar (2012), onde destacam-se dois procedimentos para efetuar o dimensionamento e análise do trocador de calor, sendo eles:

- O método da DTML (diferença da temperatura média logarítmica) e;
- O método ϵ -NUT (número de unidade de transferência – NUT e da efetividade- ϵ).

O procedimento aplicado a este artigo é o método DTML por ser mais indicado quando se conhece as temperaturas de alimentação e saída dos fluidos quentes e frios, uma vez que o valor de ΔT_{ml} pode ser facilmente calculado.

Através deste método estabeleceu-se o projeto térmico, capacidades e dimensões do trocador de calor, com e sem tubos aletados, determinando a taxa de

transferência global de calor. Para tanto considerou-se o tipo de trocador de calor, geometria das superfícies, disposição das correntes, vazões, temperaturas de entrada e dimensões totais do miolo.

4. Resultados e discussões

Foram analisados os dados conforme apresentados na figura 5 para enfatizar os cálculos do trocador de calor com e sem aletas.

DADOS INICIAIS			
TEMPERATURA DO FLUIDO HIDRAULICO, ENTRADA (°C)	90	VAZÃO (m³/s)	0,003
TEMPERATURA DO FLUIDO HIDRAULICO, SAIDA (°C)	60		
TEMPERATURA DE AR, ENTRADA (°C)	35	VAZÃO (m³/s)	3,744
TEMPERATURA DE AR, SAIDA (°C)	75		
CONSULTADOS EM TABELAS			
Cp DO FLUIDO HIDRAULICO (kJ/kg°C)	2,09	MASSA ESPECIF. (ρ) (kg/m³)	880
Cp DO AR (kJ/kg°C)	1,0075	MASSA ESPECIF. (ρ) (kg/m³)	1,097
Δt ln	19,58		
$\Delta T_{ln} = \frac{(\Delta T_0 - \Delta T_L)}{\ln \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L} \right)}$			
Δt ln =	19,57615 °C		

Figura 5 - dados de projeto.

Na figura 6 demonstra-se a taxa de transferencia de calor necessaria para reduzir a temperatura do fluido quente de 90 para 60°C, o coeeficeinte de transferencia de calor interno por convecção para o fluido em análise, foi obtido atraves da equação de Dittus-Boelter.

FLUIDO HIDRAULICO ISO 68 (INTERNO)			
VAZÃO MASSICA DO FLUIDO (kg/s)	2,64		
VELOCIDADE DO FLUIDO HIDRAULICO (m/s)	4,24	DIAMETRO DO TUBO (m)	0,03
REYNOLDS (ADIMENSIONAL)	1883,55 12126,45	VISCOSIDADE CINEMAT. A 20°C	cSt A 40°C 67,58 0,0000676 m²/s cSt A 100°C 10,5 0,0000105 m²/s
TAXA DE TRANSF. DE CALOR (kW) Q=m.c.Δt	165,53	Condutividade termica do fluido quente (W/m.k) (K)	0,1308
EQUAÇÃO DE DITTUS-BOELTER			
$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n$		$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{taxa difusão viscosa}}{\text{taxa de difusão térmica}} = \frac{c_p \mu}{k}$	
Nu =	313,62	PRANT	147,6422
COEFICIENTE DE TRANSF. DE CALOR POR CONVECÇÃO (h) (W/m² K)			
$Nu = hD / K$			
COEFICIENTE TRANSFERENCIA DE CALOR INTERNA (hi)	1367,368 W/m² K		

Figura 6 – cálculo da taxa e coeficiente de transferência de calor para o fluido quente.

Os dados encontrados nas figuras 5 e 6 foram utilizados para cálculos, tanto

do trocador de calor aletado quanto sem aletas, servindo de base inicial para a solução de cada modelo.

4.1 Trocador de calor sem aletas

Com base nas configurações adotadas para o trocador de calor sem aletas, figura 7, foram desenvolvidos os cálculos para determinar a taxa de transferência de calor por convecção do lado externo e o coeficiente global de transferência de calor.

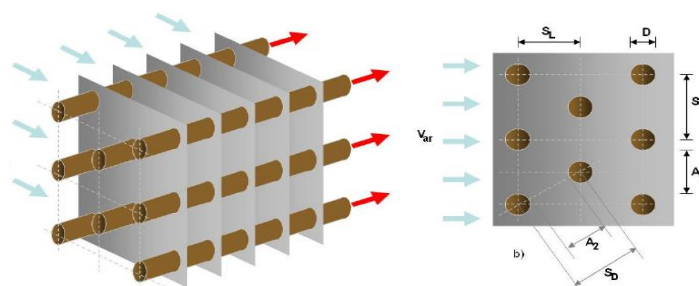


Figura 7 – Esquema de feixe alternado de tubos em escoamento cruzado. Fonte: Incropera e DeWitt, (2003).

No quadro 1 são apresentados os dados do dimensionamento do trocador de calor.

SIMBOLO	DESCRIÇÃO	VALOR
S_L	Passo longitudinal (m)	0,06
S_T	Passo transversal (m)	0,06
D	Diâmetro do tubo (m)	0,03
K	Condutividade térmica do material (W/mK)	237
$V_{max,ar}$	Velocidade máxima do ar (m/s)	23,4
L	Comprimento do tubo (m)	48
C	Comprimento do trocador de calor	0,8
H	Altura	0,8
Nl	Número de fileiras	5
Nt	Número de tubos	12
Re	Reynolds	39023,83
Pr	Prandtl	0,71
A	Área frontal (m^2)	0,64
Nu	Nusselt médio	156,57
h_e	Coef. de transf. de calor por convecção (W/m^2K)	137,3
U	Coeficiente global de transferência de calor (W/m^2K)	125,56

Quadro 1 – Valores do dimensionamento do trocador de calor sem aletas.

4.2 Trocador de calor com aletas

Foram analisadas duas formas de aumentar a taxa de transferência de calor, uma aumentando o coeficiente externo de transferência de calor por convecção do ar e outro anexando superfícies estendidas no lado externo do tubo, chamadas de

aletas, como mostra a figura 8.

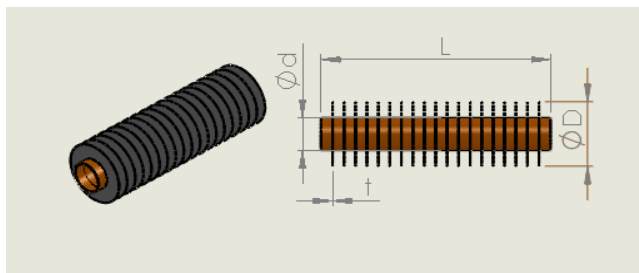


Figura 8 – Tubo com superfície estendida, aletas.

No quadro 2 são apresentados os dados do dimensionamento do trocador de calor empregando superfícies estendidas.

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	VALOR
D	Diâmetro do tubo (m)	0,03
K	Condutividade térmica do material (W/mK)	237
$V_{max,ar}$	Velocidade máxima do ar (m/s)	47,88
L	Comprimento do tubo aletado (m)	4
De	Diâmetro externo da aleta	0,06
Di	Diâmetro interno da aleta (m)	0,03
t	Espessura da aleta (m)	0,003
C	Comprimento do trocador de calor (m)	0,5
H	Altura (m)	0,5
Nl	Número de fileiras	1
Nt	Número de tubos	8
Re	Reynolds	79884,16
Pr	Prandtl	0,71
A	Área frontal (m ²)	0,25
Nu	Nusselt médio	229,5
h_e	Coef. de transf. De calor por convecção (W/m ² K)	201,2
U	Coefficiente global de transferência de calor (W/m ² K)	329,5

Quadro 2 – Valores do dimensionamento do trocador de calor com aletas.

Com os dados obtidos podemos perceber que a velocidade do ar no lado dos tubos, tem influência direta no coeficiente de transferência de calor por convecção. A convecção forçada acaba elevando o Reynolds, influenciando no tipo de escoamento do fluido, causando o aumento do coeficiente de transferência por convecção.

O material usado para o projeto e construção de trocador de calor é de suma importância para determinar sua taxa de transferência de calor, quanto maior a condutividade maior será a transferência de calor entre os fluidos, quente e frio. Neste artigo foi abordada utilização do alumínio para análise do coeficiente global de transferência de calor, sendo considerado para tanto a sua condutividade térmica e



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



a resistência a exposição a produtos químicos, como os fertilizantes utilizados no campo.

A adição de superfícies estendidas em comparação ao trocador de calor sem aletas, demonstrou que é possível intensificar a troca térmica e ao mesmo tempo elevar a compacticidade de trocadores adequando se as necessidades de projeto.

5. Conclusões

O equacionamento de trocadores de calor, enfatizado neste artigo, demonstra que a taxa de transferência de calor é o dado mais importante na seleção de trocadores de calor. Ele deve conseguir transferir calor entre dois fluidos em uma taxa especificada, a fim de atingir a temperatura desejada do fluido para uma vazão mássica especificada.

Com a realização deste artigo foi possível perceber na prática a dificuldade de abordar o fenômeno da transmissão de calor, pois, a utilização de fórmulas empíricas dificultam a modelagem deste fenômeno, resultando em erros que podem ser essenciais para a determinação do coeficiente global de transferência. Desta forma, várias medidas devem ser tomadas para garantir que esses erros não comprometam no resultado final, como as medidas citadas no decorrer deste artigo.

Os estudos apontam que os resultados obtidos através do equacionamento dos modelos de trocadores de calor, comparados com valores de trocadores de calor existentes no mercado, apresentaram boa proximidade, dado o nível de incertezas envolvido. Desta forma ambos os modelos poderiam ser utilizados para aplicação a qual foram dimensionados, o que limitará o uso do trocador sem aletas será seu tamanho relacionado ao trocador aletado. Equipamentos agrícolas, se tratando de plantadeiras, são equipamentos móveis, sendo assim quanto mais compacto o trocador de calor, menor será o peso deste sobre a estrutura, facilitando também a montagem em pontos específicos do equipamento.

Referências

- ÇENGEL, A. Y.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4º ed. Editora McGraw-Hill, 2012
- GODOY, S. M. **Eficiência térmica de trocadores de calor compactos através de simulação numérica**. 2008. Dissertação de mestrado. Disponível em <www.teses.usp.br/teses/Dissertacao/> acesso em abril de 2013.
- INCROPERA F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: 4. ed. Livros técnicas e Científicos Editora S.A, 1998.