

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA SECAGEM DE GRÃOS

Suzana Boligon (UFFS) E-mail: suzanaboligonn@gmail.com
Thalía Friedrich (UFFS) E-mail: thalia.friedrich27@gmail.com
Ana Carolina Scher (UFFS) E-mail: scheranacarolina@hotmail.com
Letícia Slodkowski (UFFS) E-mail: leticiaslodkowski@yahoo.com.br
Fabiano Cassol (UFFS) E-mail: fabiano.cassol@uffs.edu.br

RESUMO

A manutenção do processo produtivo de atividades agroindustriais exige práticas de conservação de grãos e sementes após a colheita. Um dos procedimentos fundamentais consiste na secagem dos mesmos. Para isso, mecanismos frequentemente empregados são os trocadores de calor, equipamentos capazes de realizar eficientes trocas térmicas entre dois fluidos. Este estudo objetiva avaliar as condições de operação de um trocador de calor de feixe de tubos alternados e regime de escoamento cruzado, operando com fluidos não-misturado (ar atmosférico) e misturado (ar aquecido por uma fornalha). Para realizar a modelagem matemática do secador de grãos, foi utilizando o método da Efetividade-NUT. Os resultados demonstraram que o processo depende de fatores como a demanda energética para gerar a vazão de ar necessária, as dimensões do sistema e a área de troca térmica, além das temperaturas médias dos fluidos, que influenciam na determinação do coeficiente global e na taxa de transferência de calor. A efetividade do sistema e o Número de Transferência de Calor (NUT) foram, respectivamente, 0,98 e 5,22. A taxa máxima de calor transferido nessas condições foi 465,35 kW. O ar destinado para a secagem dos grãos sai do sistema a uma temperatura de 327,5 K (54,5 °C), a qual está na faixa adequada para evitar superaquecimento. Dessa forma, é notável a viabilidade de trocadores de calor para realizar a secagem de grãos, além da percepção da importância do estudo sobre transferência de calor nas atividades agroindustriais.

Palavras-chave: Atividade Agroindustrial. Transferência de Calor. E-NUT. Escoamento Cruzado.

EVALUATION OF OPERATING CONDITIONS OF A HEAT EXCHANGER FOR GRAIN DRYING

ABSTRACT

Maintaining the productive process of agroindustrial activities requires grain and seed conservation practices after harvest. One of the fundamental procedures is drying them. For this, the mechanisms often used are heat exchangers, equipment capable of efficient heat exchanges between two fluids. This study aims to evaluate the operating conditions of an alternate pipe beam heat exchanger and cross flow regime, operating with unmixed (atmospheric air) and mixed (furnace heated air) fluids. To perform the grain drying math modelling, it was used the method called Effectiveness-NUT. The results showed that the process depends on several factors, such as the energy demand to generate the required air flow, the system dimensions and heat exchange area, as well as the average fluid temperatures, which influence the determination of the global coefficient and the heat transfer rate. The system effectiveness and the Heat Transfer Number (NUT) were, respectively, 0.98

and 5.22. The maximum heat rate obtained under these conditions was 465.35 kW. The air intended for drying the beans leaves the system at a temperature of 327.5 K (54.5 ° C), which is in the proper range to prevent overheating. Thus, the feasibility of heat exchangers to perform grain drying is remarkable, besides the perception of the importance of the study on heat transfer in agroindustrial activities.

Keywords: Agroindustrial Activity. Heat transfer. E-NUT. Cross-flow.

1 INTRODUÇÃO

No campo dos estudos térmicos, os trocadores de calor representam uma boa alternativa quando há a necessidade de realizar eficientes trocas térmicas entre dois fluidos. Estes equipamentos são empregados em processos industriais complexos e até mesmo em atividades de pequena escala. Podem ser utilizados de forma direta, em processos de aquecimento e resfriamento de produtos, ou de forma indireta, no caso de condensadores e evaporadores (GUO et al., 2002).

Entre as diversas configurações existentes de trocador de calor, a mais empregada são os trocadores de calor de feixe de tubos com fluxo contracorrente, nos quais os fluidos podem operar misturados ou não-misturados. Seu princípio de funcionamento consiste em um fluido escoando no interior de um conjunto de tubos, enquanto o outro escoava externamente ao longo dos tubos, com a transferência de calor ocorrendo por diferença de temperatura entre os dois (FAKHERI, 2007).

Entre as diversas utilizações para os trocadores de calor está a secagem de grãos e sementes em atividades agroindustriais. A necessidade de conservação dos produtos agrícolas após a colheita ocorre devido a exposição dos mesmos a condições adversas do ambiente, como fungos, insetos, contrações e expansões dos tecidos da semente devido a absorção e perda de água (TOLEDO; MARCOS FILHO, 1977). Por essa razão, faz-se necessário armazenar estes produtos para que as suas características morfológicas se mantenham constantes até seu posterior aproveitamento.

Em muitas agroindústrias, o processo de secagem de grãos é constituído por um sistema térmico composto por um trocador de calor e um aquecedor, como uma fornalha ou caldeira. O fluido utilizado normalmente é ar atmosférico, o qual é aquecido pelo ar provindo da combustão. Neste contexto, o objetivo desse estudo é analisar as condições de operação de um trocador de calor com feixe de tubos alternados e regime de escoamento cruzado,

operando com um fluido não-misturado (ar atmosférico) e outro misturado (ar aquecido por uma fornalha), aplicado na secagem de grãos em atividade agroindustriais.

2 DESENVOLVIMENTO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um trocador de calor é um equipamento destinado a efetuar eficientes trocas térmicas entre dois fluidos. Dentre as diversas configurações existentes, podem ser classificados conforme o processo de transferência de calor, geometria e disposição das correntes do fluido (MATTJIE; RISTOF, 2013).

Para Çengel e Ghajar (2012), a transferência de calor em um trocador normalmente envolve convecção em cada fluido e condução através da parede que separa os dois fluidos. Por essa razão, é apropriado trabalhar o sistema de equações considerando o coeficiente global de transferência de calor, que representa a contribuição de todos estes efeitos sobre a transferência de calor. Além disso, Incropera et al. (2008) ressalta que para projetar um trocador de calor também é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor com as temperaturas de entrada e saída dos fluidos e com a área da superfície total disponível para ocorrer a troca térmica.

2.1 PROCESSO DE SECAGEM DE GRÃOS

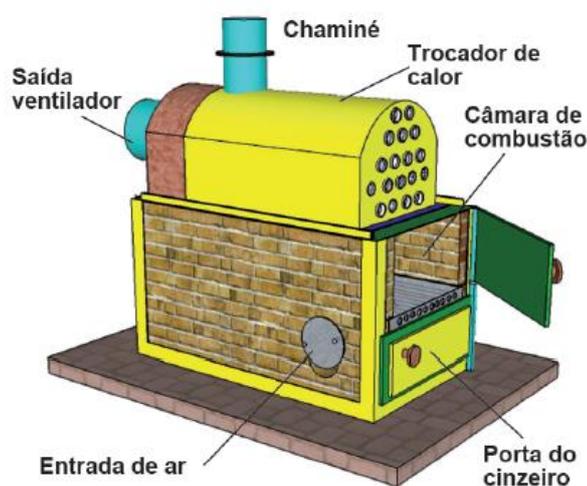
Vários processos são necessários para o tratamento, conservação e armazenamento de grãos após a colheita. A secagem consiste no procedimento com maior consumo energético, por isso, existe a necessidade de um correto faseamento e uma minuciosa atenção desta etapa, que também leva em consideração a alta sensibilidade das sementes (SANTOS, 2011).

O processo de secagem tem por finalidade a retirada parcial de umidade das sementes através da transferência simultânea de calor do ar aquecido para a água, no qual propicia a vaporização da fração de água presente na mesma. A remoção de umidade deve ser feita de modo que os grãos permaneçam em equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenado, mantendo a aparência, características nutricionais e a viabilidade do uso dos grãos para a produção de sementes (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008).

2.1.1 Sistema de aquecimento: fornalhas

Em muitas agroindústrias são utilizados trocadores de calor para realizar o processo de secagem de grãos. Em unidades sementeiras e alimentícias, é normalmente instalada uma fornalha de fogo indireto, como pode ser observado na Figura 1, onde o fluido quente utilizado no trocador de calor provém da câmara de combustão, pois além de fornecer uma temperatura de secagem ideal, não permite o contato do ar aquecido com os grãos envolvidos no processo, evitando a contaminação pelas impurezas provindas da combustão (SILVA et al., 2014).

Figura 1 - Sistema de secagem de grãos composto por fornalha e trocador de calor.

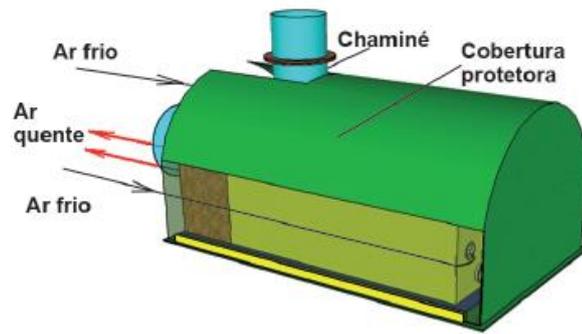


Fonte: SILVA et al., 2014.

As fornalhas são equipamentos projetados para garantir a queima completa de um combustível, de modo eficiente e contínuo, em condições que permitem o aproveitamento da energia térmica liberada da combustão, obtendo-se maior rendimento térmico possível. (OLIVEIRA, 2011).

Uma aproximação do trocador de calor pode ser visualizada na figura 2, que ilustra o escoamento dos fluidos, no qual o ar atmosférico percorre o interior dos tubos impulsionado por um ventilador, enquanto o ar provindo da combustão escoava externamente, sendo limitado pela cobertura protetora. Assim, os fluidos realizam a troca térmica entre si sem entrarem em contato. O ar comburente entra continuamente no sistema e é eliminado do processo através de uma chaminé.

Figura 2- Escoamento dos fluidos através do trocador de calor.



Fonte: SILVA et al., 2014.

2.2 MÉTODO EFETIVIDADE-NUT

Em situações de transferência de calor, quando as temperaturas de entrada e o tamanho do trocador são conhecidos, e pretende-se encontrar a taxa de transferência de calor e as temperaturas de saída, o método da efetividade-NUT é amplamente utilizado. Este pode ser definido como a razão entre a taxa de transferência de calor real do trocador em estudo e a máxima taxa de transferência que este trocador pode fornecer.

A efetividade de um trocador de calor pode ser expressa pelo número de unidades de transferência (NUT) e da razão entre as capacidades térmicas de um fluido. De acordo com o tipo de escoamento, e da geometria do trocador, há um sistema de equações específicas para a aplicação em estudo (INCROPERA et al., 2008).

2.3 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA

A realização dos cálculos foi auxiliada pelo software Scilab, por meio de programação, utilizando o sistema de equações do método Efetividade-NUT, baseando-se na bibliografia Incropera et al., 2008.

A capacidade calorífica é calculada a partir da Equação 1, onde C_p é definido como calor específico a pressão constante (J/kg.K), e \dot{m} é a vazão mássica do fluido (kg/s).

$$C = C_p \dot{m} \quad (1)$$

A taxa máxima de transferência de calor é determinada através da Equação 2, na qual C_{\min} é a capacidade calorífica mínima (W/K), T_{qe} (K) é a temperatura de entrada do fluido quente e T_{fe} (K) é a temperatura de entrada do fluido frio.

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{qe} - T_{fe}) \quad (2)$$

O número de Reynolds, necessário para o cálculo do Nusselt, é calculado com a Equação 3, em que μ é viscosidade do fluido (Ns/m²) e D é o diâmetro (m) dos tubos que compõem o trocador de calor.

$$Re = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3)$$

O número de Nusselt para o escoamento interno é determinado pela Equação 4, em que Pr é o Número de Prandt.

$$Nu_i = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (4)$$

O número de Nusselt para o escoamento externo é calculado por meio da equação 5, na qual m , C_1 e C_2 são fatores de correção para arranjo alternado e Pr_s , é o número de Prandt na superfície. O cálculo da constante C_1 é feito a partir da Equação 6, na qual ST e SL são os passos transversal e longitudinal, em metros, obtidos a partir da geometria e dimensões do trocador de calor.

$$Nu_e = C_2 C_1 (Re)^m Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$$C_1 = 0,35 \left(\frac{ST}{SL} \right)^{1/5} \quad (6)$$

O cálculo dos coeficientes convectivos é estabelecido pela equação 7, em que k é o coeficiente condutivo (W/m.K). O coeficiente global de transferência de calor (W/m².K) é calculado através da Equação 8, com h_i definido como coeficiente convectivo interno e h_e como coeficiente convectivo externo, ambos em W/m²K.

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (8)$$

O método de Efetividade-NUT é baseado inicialmente no Número de Unidades de Transferência (NUT), calculado por meio da Equação 9, onde A é a área de troca térmica (m²), obtida pela Equação 10, na qual L e N representam, respectivamente, o comprimento (m) e o número de tubos que constituem o trocador de calor.

$$NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (9)$$

$$A = \pi D L N \quad (10)$$

A efetividade do trocador de calor é uma função do NUT e da razão entre a capacidade calorífica mínima e máxima (Cr), apresentando um valor entre 0 e 1, o qual representa a

máxima efetividade. É calculada através da correlação apresentada na Equação 11, com C_{\min} (misturado) decorrente do fluido quente e C_{\max} (não-misturado) associada ao fluido frio.

$$\varepsilon = 1 - \exp(-Cr^{-1} \{1 - \exp[-Cr(NUT)]\}) \quad (11)$$

As temperaturas de saídas dos fluidos quente e frio são obtidas a partir das Equações 12 e 13, respectivamente.

$$T_{qs} = T_{qe} - \frac{(\varepsilon q_{\max})}{C_p \dot{m}} \quad (12)$$

$$T_{fs} = \frac{(\varepsilon q_{\max})}{C_p \dot{m}} + T_{fe} \quad (13)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O equacionamento do trocador de calor tem como referência o manual técnico *Fornalha a Lenha para Secagem de Café e Grãos*, da EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (SILVA et al., 2014). As dimensões do trocador de calor podem ser visualizadas na Tabela 1, com 17 tubos alternados em 5 fileiras. Para a resolução dos cálculos, é necessário conhecer as propriedades termofísicas referentes a cada um dos fluidos. Assim, os valores presentes na Tabela 2 foram obtidos de Incropera et al. (2008).

Tabela 1 - Dimensões do trocador de calor.

Diâmetro dos tubos (D)	0.05 m
Comprimento dos tubos (L)	1.0 m
Passo transversal (ST)	0.108 m
Passo longitudinal (SL)	0.091 m
Número de tubos (N)	17
Área de troca térmica (A)	2,67 m ²

Fonte: Autores, 2019.

Tabela 2 - Caracterização dos fluidos.

Parâmetro	Fluido frio	Fluido quente
Temperatura de entrada (K)	298	800
Temperatura de saída estimada (K)	328	300

Vazão mássica (kg/s)	1,55	0,09
Massa específica (kg/m ³)	1,1614	0,6964
Viscosidade dinâmica (N.s/m ²)	184,6.10 ⁻⁷	270,1.10 ⁻⁷
Calor específico (J/kg.K)	1007	1030
Coefficiente condutivo (W/m.K)	26,3.10 ⁻³	40,7.10 ⁻³
Número de Prandt	0,707	0,684

Fonte: Autores, 2019.

Com as condições estabelecidas, obteve-se os valores de capacidade calorífica mínima e máxima de 92,7 W/K e 1560,85 W/K, respectivamente. Em decorrência da diferença de temperatura de entrada entre os fluidos e da capacidade calorífica mínima, relacionada ao fluido quente, a taxa máxima de transferência de calor resultou em 465,35 kW.

O coeficiente global de transferência de calor foi obtido a partir dos coeficientes convectivos interno e externo, os quais são encontrados a partir do Número de Reynolds e do Número de Nusselt. Os resultados estão apresentados na tabela 3. Pode-se perceber que o coeficiente convectivo externo possui em valor inferior se comparado com o coeficiente convectivo interno, devido a convecção natural.

Tabela 3 - Resultados da determinação do coeficiente global de transferência de calor.

Número de Reynolds para o fluido frio	2,14.10 ⁶
Número de Reynolds para o fluido quente	8,49.10 ⁴
Número de Nusselt para o fluido frio	2,32.10 ³
Número de Nusselt para o fluido quente	261,19
Coefficiente convectivo interno (W/m ² .K)	1220,43
Coefficiente convectivo externo (W/m ² .K)	212,61
Coefficiente global de transferência de calor (W/m ² .K)	181,07

Fonte: Autores, 2019.

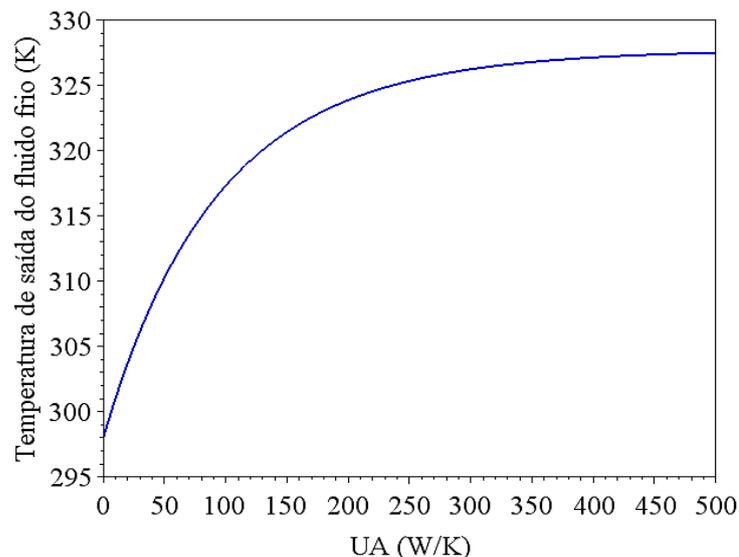
O Número de Unidades de Transferência (NUT) apresentou um valor de 5,22 e a efetividade alcançou um valor de 0,98. Considerando que estes são os principais parâmetros do método ϵ -NUT, os resultados demonstram excelente viabilidade do trocador de calor em estudo para secagem de grãos agrícolas.

Com as condições estabelecidas, o fluido frio (ar atmosférico) deixa o trocador de calor a uma temperatura de 327,5 K (54,5 °C). Na entrada do sistema, o ar encontra-se a

298 K (25 °C), assim, houve um aumento de temperatura de 29,5 °C. A temperatura do ar na saída do trocador de calor é adequada para a secagem de grãos, visto que é necessário manter a temperatura abaixo do valor máximo recomendável para preservar as características dos produtos agrícolas, normalmente em torno de 55 °C, evitando o superaquecimento que pode danificá-los. O fluido quente, provindo de uma fornalha, entra no sistema com uma temperatura na ordem de 800 K (527 °C) e sai a 303,7 K (30,7 °C) em razão da transferência de calor deste fluido para o ar atmosférico que adentra os tubos, baseado no princípio do equilíbrio térmico.

Para a geometria do trocador de calor apresentado, a temperatura de saída do fluido frio está relacionada com a sua vazão mássica. Para pequenas variações nos valores de vazão (de 0 a aproximadamente 0,09 kg/s), o coeficiente global de transferência de calor, dado pela relação UA, apresenta uma variação bastante expressiva, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Relação entre área de troca térmica e coeficiente global de transferência de calor em função da vazão mássica do fluido frio.



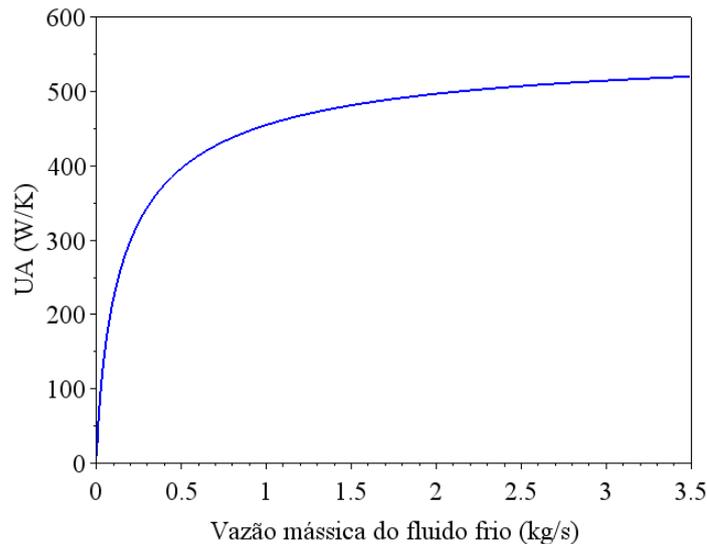
Fonte: Autores, 2019.

Com o aumento da vazão mássica do fluido frio, considerando valores acima de 1 m/s, a relação UA apresenta um comportamento crescente, porém, com uma variação menos expressiva, mantendo-se praticamente estável para valores de vazão mássica superiores a 3 m/s. Neste caso, para valores muito altos de vazão mássica, não serão observadas alterações sensíveis no processo de troca térmica.

Considerando o efeito da variação das condições de UA em relação a temperatura de saída do fluido frio, ocorre um aumento da temperatura de saída do fluido frio conforme se

processa o aumento da relação do coeficiente global de transferência de calor (U) e da área de troca térmica (A), o que pode ser observado na Figura 4. Todavia, após atingir aproximadamente 400 W/K, em uma temperatura próxima a 328 K, a mesma se estabiliza, visto que o sistema térmico já alcançou a máxima efetividade.

Figura 4 - Temperatura de saída do fluido frio em função da relação entre área de troca térmica e coeficiente global de transferência de calor.



Fonte: Autores, 2019.

Dessa maneira, no sistema apresentado é possível controlar a temperatura de saída do fluido frio (ar atmosférico), através da variação de sua vazão mássica, adaptando o sistema para a temperatura de secagem necessária. Esta temperatura pode ser encontrada através do cruzamento das informações das Figuras 3 e 4. No entanto, por se tratar de um sistema de aquecimento indireto, este é recomendado para grãos que apresentam maior sensibilidade a altas temperaturas, mantendo-se em uma faixa inferior a 55 °C, a qual é a temperatura máxima possível de ser obtida com o trocador de calor caracterizado nesse estudo.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a modelagem matemática para o dimensionamento de um trocador de calor, aplicado na secagem de grãos. A secagem de grãos e sementes em atividades agroindustriais apresenta viabilidade, operando com ar atmosférico e ar provindo da queima de combustível em uma fornalha de fogo indireto, pois as temperaturas encontram-

se dentro da normalidade, não ocorrendo superaquecimento que poderia ocasionar a perda dos produtos agrícolas.

A efetividade do projeto de secagem de grãos apresentou-se adequado para o modelo de trocador de calor descrito, com uma taxa máxima de transferência de calor de 465,35 kW através do conjunto de tubos, que possibilita o aquecimento do ar atmosférico a uma temperatura de 54,5 °C, muito próxima a ideal (55 °C) para aquecimento dos grãos, garantindo sua correta conservação até um posterior aproveitamento.

O estudo, dimensionamento, equacionamento e análise das condições de operação de um trocador de calor com escoamento contracorrente, em configuração de feixe de tubos demonstrou que este modelo de trocador de calor pode ser utilizado para fins agroindustriais, de acordo com as características especificadas.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**, 3. ed. São Paulo: Editora McGrawHill, 2009, 923 p.

FAKHERI, A. Heat exchanger efficiency. **Journal of Heat Transfer**, v. 129, p. 1268-1276, 2007.

GUO, Z. Y.; ZHOU, S. Q.; LI, Z. X.; CHEN, L. G. Theoretical analysis and experimental confirmation of the uniformity principle of temperature difference field in heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, n. 45, p. 2119-2127, 2002.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008. 672 p.

MATTJIE, C. A.; RISTOF, R. Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira. 2013. 63 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade Horizontina, Horizontina, 2013.

OLIVEIRA, D. G. Dimensionamento e análise de uma fornalha de fogo indireto. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2011.

SILVA, J. S.; LOPES, R. P.; VITOR, D. G.; DONZELES, S. M. L. **Fornalha a lenha para secagem de café e grãos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Comunicado Técnico nº 6, Brasília, 2014.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**, 2. ed. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2008, cap. 5 - Secagem e Secadores, p. 107-138.

TOLEDO, F. F.; MARCOS FILHO, J. **Manual das sementes: tecnologia da produção**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1977. 224 p.