

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES EXTERNOS DE

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PROCESSOS TÉRMICOS

LUIZA G. VAZ¹; ALFREDO A. VITALI²; MARIA ISABEL BERTO³

Nº 11249

RESUMO

Devido ao fato de dados da literatura serem muito dispersos, e ser de grande importância que estes sejam mais consistentes para a otimização de processos industriais, o projeto objetiva a determinação dos coeficientes externos de transferência de calor, utilizando a técnica de variação de temperatura em estado não-estacionário em um corpo de resistência interna desprezível e no desenvolvimento de metodologia para sua aplicação em indústrias a fim de auxiliar no diagnóstico de problemas de aquecimento e refrigeração.

O estudo da transferência de calor na indústria de alimentos tem como objetivos principais, o controle das taxas de reações biológicas e bioquímicas, inativação de enzimas e microorganismos indesejáveis, alteração de propriedades físicas e químicas.

Exemplos de processos que envolvem transferência de calor são: cozimento, branqueamento, fritura, resfriamento, secagem, evaporação, entre outros. O conhecimento desse fenômeno deve ser associado a outros, tais como transferência de massa, reações químicas, bioquímicas e leis físicas.

É importante ressaltar que, para a otimização destes processos que envolvem transferência de calor, o conhecimento das leis físicas permite o tratamento matemático desta operação unitária, o que demanda o conhecimento quantitativo dos coeficientes externos de transferência de calor. Este coeficiente irá subsidiar informações relevantes sobre o funcionamento dos equipamentos e para os cálculos de como a energia está sendo transferida do meio de aquecimento/resfriamento para a superfície do produto tratado termicamente

¹ Bolsista CNPq: Graduação em Eng. de Alimentos, UNICAMP, Campinas-SP, lugvaz@gmail.com.

² Orientador: Pesquisador, GEPC/ITAL, Campinas-SP.

³ Colaboradora: Pesquisadora, GEPC/ITAL, Campinas-SP.

A transferência de calor pode ocorrer em dois regimes: estacionário e não-estacionário. Para o presente estudo, foram consideradas as transferências de calor em regime não-estacionário.

ABSTRACT

Due to the fact that external heat transfer data in literature be very dispersed, and that more consistent figures are needed for industrial processes optimization, the objective of this project was the determination of these coefficients using the technique of variation of temperature in non-steady state in a body of negligible internal resistance is specific environments in order to develop a methodology for its application in industries to assist in the diagnosis of problems of heating and refrigeration.

The study of the transference of heat in the food industry has a main objective: the control of rates of biological, biochemical physical and chemical reactions expressed in inactivation of enzymes and undesirable microorganisms and alterations of sensorial/functional properties.

Examples of processes that involve heat transference are: baking, blanching, frying, cooling, drying, evaporation, among others. The knowledge of this phenomenon must be associated with others, such as mass transfer and chemical reactions. It is important to stand out that, for the optimization of these processes that involve heat transfer, the knowledge of the physical laws allows the mathematical treatment of these unit-operations. This coefficient will also subsidize information on the functioning of the equipments and the calculations of energy being transferred to the surface of the products being treated thermally. The heat transference can occur in two regimes: stationary and non-stationary. For the present study, the transferences of heat in non-stationary regimen had been considered.

INTRODUÇÃO

Um problema comum de fluxo de calor em regime não-estacionário, encontrado em engenharia, envolve variações transitórias de temperatura e fluxo de calor.

Apesar de não existir qualquer material, na natureza, que possua uma condutibilidade térmica infinita, muitos problemas de fluxo de calor transitório podem ser resolvidos, com precisão aceitável, ao se admitir que a resistência térmica interna à transmissão de calor por condução do sistema é tão pequena que a temperatura dentro do sistema é praticamente uniforme em qualquer instante.

Uma medida da importância relativa da resistência térmica, dentro de um corpo sólido, é a razão entre as resistências interna e externa. Essa razão pode ser escrita na forma adimensional $Bi = \frac{hL}{k}$, (Eq. 1) o número de Biot, onde h é o coeficiente

médio de transmissão de calor, L é uma dimensão característica de comprimento do corpo e k é a condutibilidade térmica do corpo sólido. No caso de corpos cilíndricos ou esféricos, o comprimento característico é o raio R. O Número de Biot (Bi) fornece um índice simples de relação entre o coeficiente de transferência convectiva de calor na superfície do sólido e a condutância específica do sólido, a razão das resistências dentro de e na superfície de um corpo.

Esta razão determina se as temperaturas dentro de um corpo variam significativamente no espaço, ou não, enquanto o corpo se aquece ou esfria ao longo do tempo, a partir de um gradiente térmico aplicado à sua superfície.

Um exemplo típico desse tipo de fluxo de calor transitório é o resfriamento súbito que acontece em uma barra de ferro depois de sua remoção de um forno quente, e imediata introdução em um banho de imersão frio. O tempo onde começa o resfriamento deve ser marcado como $\Theta=0$, admitindo que o coeficiente de transmissão de calor h se mantém constante durante o processo, e que a temperatura do banho T_{∞} , a uma grande distância da barra, não varia com o tempo. Então, de acordo com a suposição de que a temperatura dentro do corpo é substancialmente constante em qualquer instante, um balanço da energia para a barra sobre um pequeno intervalo de tempo d Θ é:

$$-(C_p \rho V)dT = hA(T - T_{\infty})d\Theta, \quad (\text{Eq. 2})$$

C_p = calor específico da barra, em $\frac{kcal}{kg^{\circ}C}$,

ρ = densidade da barra em $\frac{kg}{m^3}$,

V = volume da barra, em m^3 ,

T = temperatura média da barra, em $^{\circ}C$,

Θ = tempo,

h = U = coeficiente de transmissão de calor, em $\frac{kcal}{hm^2^{\circ}C}$,

A = área da barra, em m^2 ,

T_{∞} = Temperatura do meio de aquecimento ou resfriamento, no caso, do banho

dT = mudança de temperatura durante $d\Theta$

α = difusividade térmica (m^2/s), sendo

O sinal negativo na Equação 2 indica que a energia interna diminui quando $T > T_{\infty}$.

As variáveis T e Θ podem ser separadas e, para um intervalo de tempo diferencial $d\Theta$, a Eq. 2 se torna

$$\frac{dT}{T - T_{\infty}} = \frac{d(T - T_{\infty})}{T - T_{\infty}} = \frac{hA}{\rho C_p V} d\Theta \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde se observa que $d(T - T_{\infty}) = dT$, desde que T_{∞} seja constante. Com a temperatura inicial de T_0 e uma temperatura, no instante Θ , de T como limites, a integração da Eq. 3 leva a:

$$\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) = - \frac{hA}{\rho C_p V} \Theta$$

Utilizando o a relação de densidade ($\rho = m/V$), a equação fica:

$$\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) = - \frac{hA}{C_p m} \Theta \quad (\text{Eq. 4})$$

Isto é uma equação linear, onde $hA/C_p m$ é o coeficiente angular e, quando os valores de calor específico (C_p), densidade (ρ) e a Área (A) e massa do corpo (m), são conhecidos se obtém o valor do coeficiente de transferência de calor h .

MATERIAL E MÉTODOS

Corpos de prova

Foram utilizados quatro corpos de prova, em forma cilíndrica, cujas dimensões estão mostradas na Tabela 1.

Todos os blocos são de alumínio, sendo três polidos e um pintado de preto, para que se aproxime de um corpo negro de alta absorvância, no qual a radiação térmica influi. (PERRY & GREEN, 1984)

Para cada um dos corpos de prova, um termopar foi posicionado no seu centro geométrico.

TABELA 1: Dimensões dos corpos de provas

	Massa (kg)	Diâmetro (m)	Altura (m)	Área total (m ²)	Área lateral (m)	Área base (m ²)	Volume (cm ³)
Bloco Negro (N)	0,303	0,075	0,025	0,0147	0,0058	0,0044	110,44
Bloco Pequeno (P)	0,303	0,075	0,025	0,0147	0,0058	0,0044	110,44
Bloco Médio (MD)	0,909	0,075	0,075	0,0264	0,0176	0,0044	331,33
Bloco Grande (GD)	1,212	0,075	0,1	0,0323	0,0235	0,0044	441,78

Além das dimensões, também foram consideradas as propriedades físicas do alumínio, para posteriores cálculos e obtenção dos resultados.

TABELA 2 – Propriedades físicas do Alumínio: Calor específico (C) e densidade (ρ)

C alumínio (kJ/Kg°C)	C alumínio (kcal/Kg°C)	ρ (kg/m ³)
0,92	0,22	2743,4

Fonte: Frank Kreith, 1973

Sistema de aquecimento, resfriamento e medição de velocidade do ar

O aquecimento dos blocos pequeno polido (P) e negro (N), para análise das curvas de temperatura, foi feito em um secador (Proctor & Schwartz Inc. EUA), onde foram variadas as temperaturas e velocidades do ar.

O sistema composto dos corpos de prova e termopares foi montado em uma haste e os termopares foi inicialmente mantido a temperatura ambiente, para início da aquisição de dados e posteriormente introduzido no secador, cuja velocidade do ar foi medida através de um anemômetro (Georg Rosenmüller, Dresden, Alemanha), e apoiado a uma das prateleiras contidas no mesmo. Passado o tempo necessário para que as temperaturas de estabilizassem, a monitoração seguiu, com o conseqüente resfriamento do sistema, após retirada deste, do secador. O processo de resfriamento foi feito de duas maneiras, sendo uma delas, com auxílio de um ventilador doméstico (Mytek), cuja velocidade do ar também foi medida, e a outra, com convecção natural a temperatura ambiente.

Água estagnada e sob agitação

Os corpos foram apoiados em cestas e imersos em água estagnada ou sob agitação. Os corpos foram apoiados em cestas e imersos em água, estagnada ou sob agitação, contida em um tanque de dimensões 40cm , 48,5cm, 51cm e capacidade de aproximadamente 100L de água. A Agitação foi promovida através de ar comprimido.

Spray (Spray Sistem)

Os corpos foram apoiados em escovas rotativas, posicionadas abaixo do spray a uma distância da saída do jato de água ao centro dos blocos de 12 cm. A vazão de saída da água foi 37,7mL/seg, na pressão de 1 bar, promovendo o contato da água quente e corpos de prova. Foram coletados dados de temperatura do centro dos corpos de prova e do meio (água), com as escovas e corpos parados, assim como, com escovas e corpos em rotação.

Determinação dos coeficientes de transferência de calor

No secador

Confeccionou-se um gráfico contendo todas as curvas de temperatura para o intervalo de tempo de cada aquisição, realizadas em diversos valores de set-points (75°C, 95°C, 100°C, 124°C e 150°C) e a diferentes frequências de rotação do ventilador do secador (30Hz, 45 Hz e 60 Hz), para os ensaios com os blocos pequeno e negro, no secador.

Na água

Para os ensaios com água, os gráficos foram construídos utilizando as temperaturas obtidas dos corpos de prova polidos maiores. Para o ensaio com spray, foram calculados dois valores de h, para cada caso, um para as escovas em repouso e outro para estas em rotação. Considerando que, com as escovas em repouso, o spray atinge apenas parte da área dos corpos, realizou-se o cálculo, também, levando em conta apenas a metade da área lateral do corpo grande.

Com base nos valores dos gráficos, referentes às temperaturas lidas pelos termopares que do meio (ar, água, dependendo do ensaio), foram feitos ajustes nos valores das temperaturas infinitas (T_{∞}) de cada bloco, assim como, lidas as temperaturas iniciais (T_0) de cada um. Estes dados foram utilizados nos cálculos para determinação do coeficiente h.

Processamento dos dados

Após adquiridos e armazenados em planilha MS - Excel, os dados foram processados para obtenção dos resultados.

A forma clássica do processamento dos dados é a integração do balanço de energia (Eq. 2), que resulta em um modelo linear semi-logarítmico do adimensional de temperatura ($\ln(T - T_{\infty})/(T_0 - T_{\infty})$) em função do tempo este, onde o coeficiente angular pode ser expresso por hA/Cm (Equação 4).

Este tratamento dos dados permite a obtenção do coeficiente externo de transferência de calor h , expresso em energia/(tempo.área. ΔT) (TOLEDO, 1991) (SINGH & HELDMAN, 1993). A linearização dos dados foi processada por modo interativo para melhoria do ajuste dos dados experimentais (BERTO et al., 2006). Este modo interativo consiste no ajuste da T_{∞} , na Eq. 4, e também da maximização de R^2 , por análise visual do gráfico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cálculos dos coeficientes de transferência de calor foram feitos tanto para as curvas obtidas de aquecimento, quanto para resfriamento, no caso do secador, e aquecimento para os dados obtidos com água.

Experimentos no Secador

Os gráficos e tabela elaborados seguem como exemplo do aquecimento para a temperatura correspondente a 75°C e velocidade do ar de 79m/min, referentes aos dados do secador.

O gráfico, que contém as curvas de temperatura de todos os termopares e dos blocos negro e pequeno nos ensaios realizados no secador, está apresentado na Figura 1.

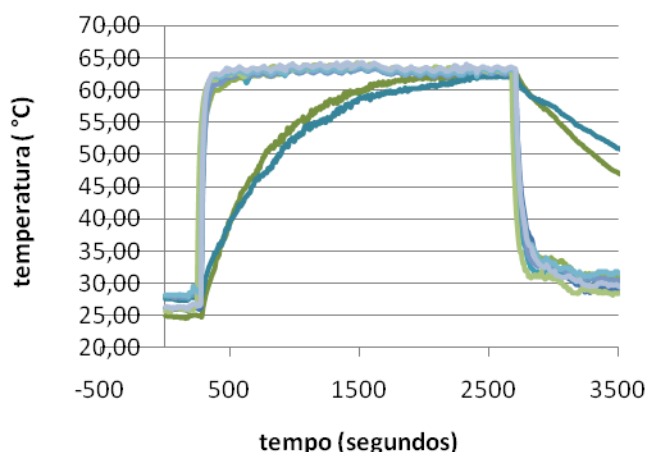


Figura 1 – Histórico de temperatura para aquecimento em secador a 75°C

Com base no histórico das temperaturas dos termopares, com exceção dos corpos de prova, e utilizando os valores de temperatura, obtidos no tempo em cada aquisição, assim como no tempo inicial (igual a 0), foram testadas as temperaturas o ajuste fino da temperatura do meio (T_{∞}) foi feito de modo a melhorar o alinhamento da reta do logaritmo (\ln) do adimensional de temperatura.

Os valores de cada T_{∞} ajustados foram: 65,6°C e 63,5°C, para os blocos pequeno e negro, respectivamente.

Ambos seguem abaixo, nas Figuras 2 e 3, referentes aos blocos P (pequeno) e N (negro), respectivamente, para o experimento realizado no secador, a 75°C e velocidade do ar 79m/min, obtida com uma rotação de 60Hz.

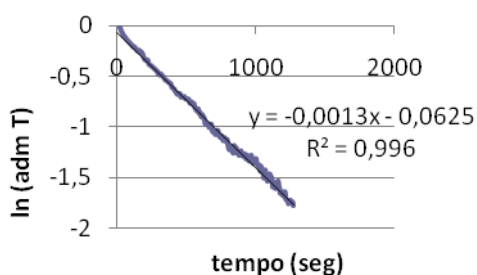


Figura 2 – logaritmo natural do adimensional de tempo para o bloco pequeno

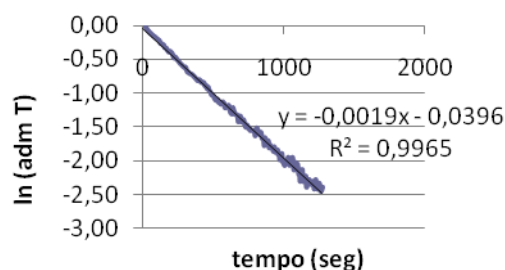


Figura 3 – logaritmo natural do adimensional de tempo para bloco polido

A inclinação de cada reta acima foi calculada, para posterior uso na determinação do coeficiente de transferência de calor, e os valores seguem abaixo, na Tabela 3.

TABELA 3 – Inclinação das retas e h – Experimento no Secador

	Bloco P	Bloco P
Inclinação	-0,0013	-0,0019
h(kcal/h.m².°C)	21,77	31,35

Experimentos com água

Segue na Figura 4, exemplo da curva de um dos aquecimentos dos corpos de prova médio e grande em água. Neste caso, trata-se do experimento feito em Spray, com as escovas em repouso.

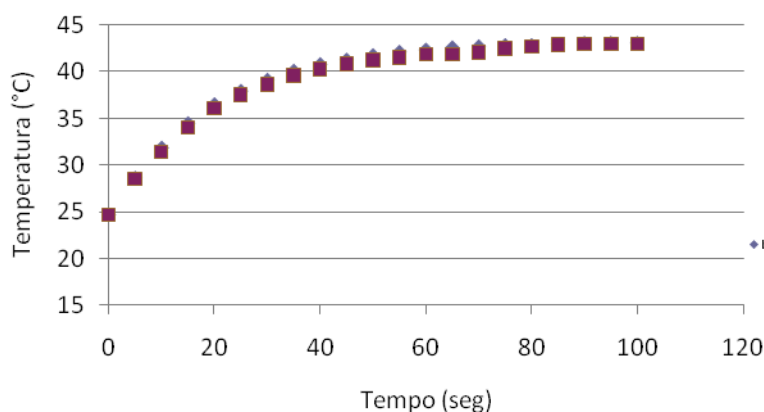


Figura 4 – Curva de aquecimento no Spray em repouso

Para o caso do spray, foram feitos experimentos tanto com as escovas em repouso, quanto com estas, em rotação. Para cálculos do adimensional de temperatura, foi usado o mesmo método já anteriormente citado, para os experimentos no secador.

Os gráficos seguem abaixo.

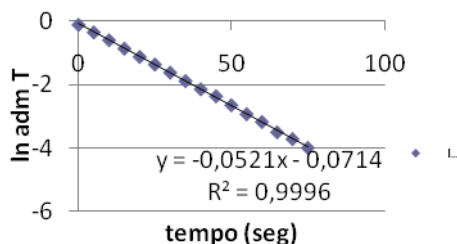


Figura 5 – ln adimensional de T para o bloco grande

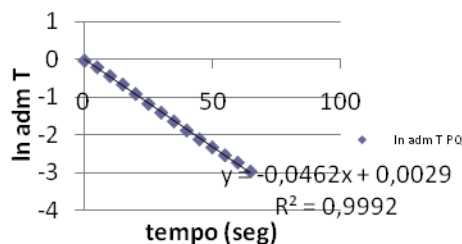


Figura 6 – ln adimensional de T para o bloco médio

Considerando que no spray em repouso apenas metade da área lateral dos blocos recebem o calor da água, foi feito o cálculo de h , também para a área lateral dividida por 2. Levando em conta o fato de que o bloco médio recebe água por sua extensão toda e também dos lados, este cálculo foi desprezado para o corpo de prova em questão.

A inclinação de cada reta acima foi calculada, para posterior uso na determinação do coeficiente de transferência de calor, e os valores seguem abaixo, na Tabela 4.

TABELA 4 – Inclinação das retas e h – Experimento com Spray

	Bloco GD	Bloco MD
Inclinação	-0,0521	-0,0462
$h(\text{kcal/h.m}^2.\text{°C})$	1544,9	1255,75
$h(\text{área lateral}/2)$	4249,06	-

Cálculo do coeficiente de transferência de calor

O valor da inclinação destas retas, pode ser igualado a expressão $\frac{h \cdot A}{C_p \cdot m}$, onde h é o coeficiente de transferência de calor, que se deseja obter.

O cálculo do coeficiente h foi feito usando os dados da tabela acima, a inclinação previamente calculada e, estes, substituídos na expressão já citada anteriormente.

O valor obtido de h , para $T=75^\circ\text{C}$ foi 21,77 kcal/h.m².°C para o bloco pequeno e 31,35 kcal/h.m².°C para o bloco negro.

No caso do experimento com água, os valores de h para o bloco médio foi 1255,75 kcal/h.m².°C e 1544,9 kcal/h.m².°C para o bloco grande, em ambos os casos, os cálculos foram realizados considerando a área total dos blocos.

CONCLUSÃO

Observou-se que independentemente do meio de aquecimento/resfriamento, existe uma relação entre os coeficientes de transferência de calor obtidos e a velocidade meio.

Quanto maior a velocidade do meio, maior é a turbulência e conseqüentemente, maior é o coeficiente de transferência de calor.

A confecção de distintos corpos de prova com diferentes massas e relações A/m , foi necessária para adequar a precisão da aquisição dos dados experimentais aos valores de h do meio de aquecimento/resfriamento estudados.

Além disto, existe uma grande diferença entre os valores de h para o ar, obtidos para os experimentos no secador, comparados aos experimentos com água, sendo estes, notavelmente maiores.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ – PIBIC, pela bolsa concedida.

Ao GEPC – ITAL, pela oportunidade de estágio.

REFERÊNCIAS

Berto, M. I.; Atala, D. I. P. e Vitali, A. A. Simulação on-line do perfil de temperatura de produtos durante o processo de esterilização. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2006, 2006, Santos, SP, Brazil, Anais em Cd.

Perry, R. H. e Green, D. Perry's Chemical Engineers Handbook sixth edition. 50th.ed. New York: McGraw Hill, 1984.

Singh, R. P. e Heldman, D. R. Introduction to food engineering. 2.ed. California: Academic Press Inc., 1993. 499p.

Toledo, R. T. Fundamentals of food process engineering. 2.ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 602p.