

USO DE TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR NO ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ALIMENTOS EMBALADOS¹

B. CARCIOFI², S. GÜTHS³, J. B. LAURINDO^{2,*}

RESUMO

A densidade de fluxo de calor que atravessa uma superfície é classicamente determinada mediante a medição das temperaturas apropriadas e da aplicação da Lei de Fourier. Uma alternativa a esse procedimento é a utilização de transdutores de fluxo de calor, os quais geram um sinal elétrico proporcional ao fluxo térmico que os atravessa. Neste trabalho, processos de aquecimento e de resfriamento de alimentos foram estudados em laboratório, utilizando-se um recipiente de vidro cilíndrico para simular uma embalagem. Dois transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial foram previamente instalados no recipiente, revestindo completamente a superfície lateral do mesmo. O recipiente contendo a amostra foi inserido em banho de água circulante à temperatura constante. Os sinais fornecidos pelos transdutores e por termopares inseridos no interior do recipiente foram registrados por um sistema de aquisição de dados computadorizado. Os resultados obtidos com o uso dos transdutores foram comparados com aqueles obtidos através de balanços de energia realizados a partir dos dados experimentais de evolução temporal das temperaturas da amostra junto à superfície interna da embalagem e no centro da mesma. A comparação mostrou que os transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial puderam determinar os fluxos de calor, com tempo de resposta característico dos termopares. Os resultados apresentados mostraram a viabilidade de utilização desses fluxímetros no estudo não destrutivo e não invasivo dos processos de aquecimento e de resfriamento de alimentos, fornecendo informações complementares àquelas obtidas pelo uso de termopares instalados no interior da embalagem.

Palavras-chave: tratamento térmico; alimentos; fluxímetros de calor.

SUMMARY

THE USE OF HEAT FLUX TRANSDUCERS TO STUDY HEAT TRANSFER IN CANNED FOODS. Heat flux determination in thermal processes is classically carried out by appropriate temperature measurements and the application of the Fourier Law. An alternative to this procedure is to determine the heat flux that crosses a surface using heat flux transducers, thus producing heat flux dependent signals. In this work, heating and cooling processes of foods were studied in the laboratory using a cylindrical glass container with the external surface covered by two heat flux meters. Water, maintained at a constant temperature by a thermostatically controlled bath, was circulated within an external jacket to promote heating or cooling of the sample-container system. The signals provided by the transducers and thermocouples placed inside the container were registered by an on-line data acquisition system. Comparison of the results from the heat flux meters with those calculated by using the sample temperature histories and energy balances in the container-sample system showed to be in good agreement with each other. The time-response of the heat flux meters had the same magnitude as those obtained by the thermocouples. The results showed that heat transducers could be used to carry out non-destructive heat flux measurements in heating and cooling processes of foods, supplying additional information to those obtained by thermocouples installed inside the container.

Keywords: thermal processing; heat transducer; experimental study.

1 - INTRODUÇÃO

No projeto e análise de desempenho de equipamentos e processos térmicos industriais, os engenheiros se deparam com a necessidade de determinar as taxas de transferência de calor associadas a cada etapa do processo. A densidade de fluxo de calor que atravessa uma superfície pode ser determinada experimentalmente pela utilização de transdutores de fluxo de calor, os quais geram um sinal elétrico proporcional ao fluxo térmico [4, 5, 7]. Fisicamente, esses transdutores são placas planas de espessura reduzida, que podem ser colocadas junto à superfície onde se deseja efetuar a medida do fluxo de calor transferido. Neste trabalho foram utilizados transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial, construídos no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Físicas de Materiais – UFSC, os quais possuem

espessura reduzida, boa sensibilidade, são flexíveis, podendo tomar a forma cilíndrica, caso desejado.

Os fluxímetros de calor têm sido utilizados para a medição da carga térmica em edificações, medição da eficiência de aletas, da condutividade térmica de materiais, do coeficiente de troca de calor e na determinação das perdas de calor em fornos e estufas [3]. A utilização direta de transdutores de fluxo de calor para medir a perda de calor do corpo humano para o ambiente externo foi publicada por ADAMS, GILL, NELSON [1] e SILVA [7]. KARCZ [2] realizou estudos experimentais sobre a distribuição espacial dos coeficientes convectivos de transferência de calor na parede de um tanque contendo um líquido sob agitação mecânica. A utilização dos fluxímetros de calor permitiu a determinação das distribuições dos coeficientes de transferência de calor para diferentes condições hidrodinâmicas do sistema.

O princípio de funcionamento desses transdutores consiste em desviar as linhas de fluxo de calor de modo a gerar um gradiente de temperatura num plano tangencial ao plano de medição. Os desvios das linhas de fluxo são causados pelo contato pontual entre a superfície isotérmica superior e uma parede auxiliar, segundo o esquema mostrado na *Figura 1*.

¹ Recebido para publicação em 20/09/2001. Aceito para publicação em 05/03/2002.

² Depto. de Eng. Química de Alimentos – Universidade Federal de Santa Catarina. CEP 88040-900. Florianópolis/SC. Brasil.

³ Depto. de Eng. Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina. CEP 88040-900. Florianópolis/SC. Brasil.

* A quem a correspondência deve ser enviada.

Os gradientes de temperatura são medidos por termopares planares a eletrodos depositados (realizados a partir de técnicas de fotogravura), ligados em série. Cada um dos termopares converte a diferença de temperatura em força eletromotriz (f.e.m.) Seebeck. A f.e.m. produzida é diretamente proporcional ao número de termoelementos distribuídos sobre a superfície útil do sensor [4, 7].

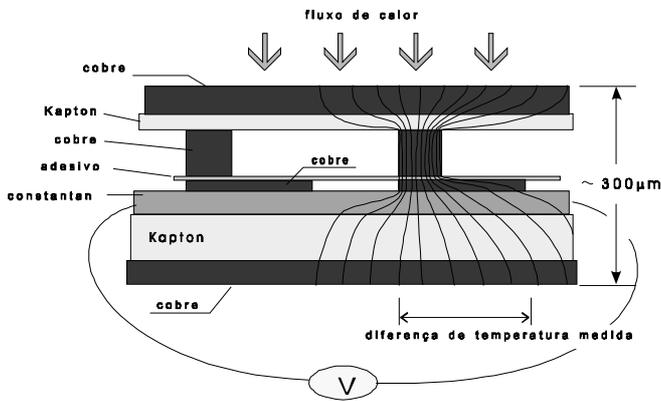


FIGURA 1. Princípio de funcionamento de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial.

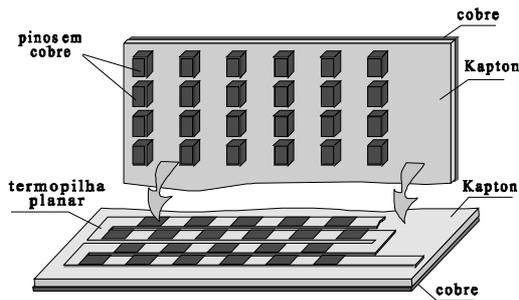


FIGURA 2. Vista aberta do transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial.

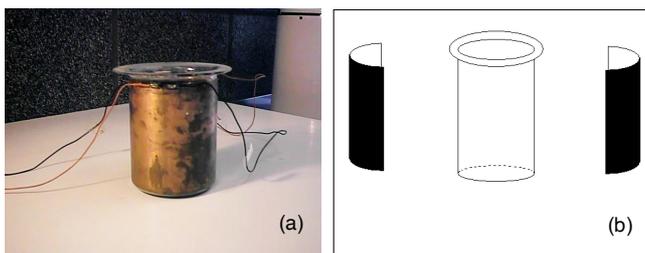


FIGURA 3. (a) Fotografia do recipiente de vidro recoberto pelos fluxímetros de calor. O fundo do recipiente foi isolado termicamente; (b) Ilustração do procedimento de instalação dos dois transdutores no recipiente de vidro.

Os transdutores são construídos através de técnicas utilizadas na fabricação de circuitos eletrônicos por fotogravura. O material de base para a construção dos termopares diferenciais é uma folha de constantan (25µm de espessura) aplicada sobre um suporte de kapton (80µm de espessura). Após a aplicação de um filme

fotossensível à radiação ultravioleta, as pistas são recortadas por pulverização de uma solução ácida de perclorato de ferro. Os termopares são formados por uma segunda máscara, precedida de uma deposição eletrolítica de cobre.

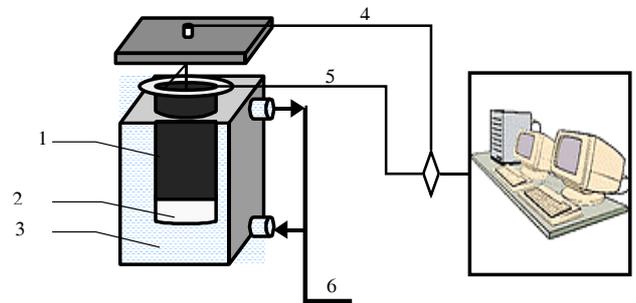


FIGURA 4. Esquema do dispositivo experimental utilizado (1- recipiente de vidro contendo a amostra, 2- isolante térmico na parte inferior do recipiente, 3- Camisa de água a temperatura constante, 4 e 5- Fios de ligação dos termopares e dos transdutores de fluxo de calor ao sistema de aquisição de dados, 6- Circulação de água entre o banho termostatizado e a camisa de água a temperatura constante).

A parte responsável pelo desvio das linhas de fluxo é realizada de maneira similar, onde um sanduiche formado por duas folhas de cobre de 80µm de espessura e uma película de isolante recebe o filme fotossensível. Um ataque químico recorta os pinos que desviarão as linhas de fluxo. A Figura 2 mostra o conjunto antes da montagem final.

Essa técnica permite a realização de termopares desprovidos de soldas, facilitando a fabricação de transdutores com grande superfície de medição, alta sensibilidade e espessura reduzida, situando-se em uma posição privilegiada em comparação com outras técnicas de construção de transdutores de fluxo de calor.

O objetivo principal deste trabalho foi o estudo da aplicabilidade desses transdutores em situações onde a densidade de fluxo de calor precisa ser determinada experimentalmente, de modo não invasivo. Como objetivo específico, estudou-se a aplicação dos transdutores de fluxo de calor na análise de processos dinâmicos de transferência de calor em laboratório, simulando experimentalmente o tratamento térmico de alimentos embalados.

2 - MATERIAIS E MÉTODO

2.1 - Dispositivo experimental

Foram realizados experimentos utilizando transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial para se estudar a transferência de calor nos processos de aquecimento e de resfriamento de alimentos embalados. Para isso, dois fluxímetros de calor foram instalados na superfície lateral de um recipiente de vidro utilizado para simular uma embalagem, conforme ilustrado pela Figura 3.

Os dois fluxímetros cobriram perfeitamente a lateral do recipiente e a superfície inferior do mesmo foi isolada termicamente. O dispositivo utilizado para realizar os experimentos de aquecimento e de resfriamento do conjunto recipiente-amostra é ilustrado pela *Figura 4*. O recipiente troca calor com água de aquecimento (ou de resfriamento, conforme o caso), que circula na camisa, proveniente de um banho termostatizado. Todo o conjunto foi acondicionado no interior de um bloco de material isolante (poliestireno expandido).

Três termopares tipo T foram utilizados para a determinação das temperaturas importantes para o processo estudado. Um termopar foi utilizado para medir a temperatura da água circulante, um termopar foi instalado no centro da embalagem e outro junto à parede interna da embalagem. A junta de referência dos termopares foi mantida a 0°C através de um banho de gelo fundente.

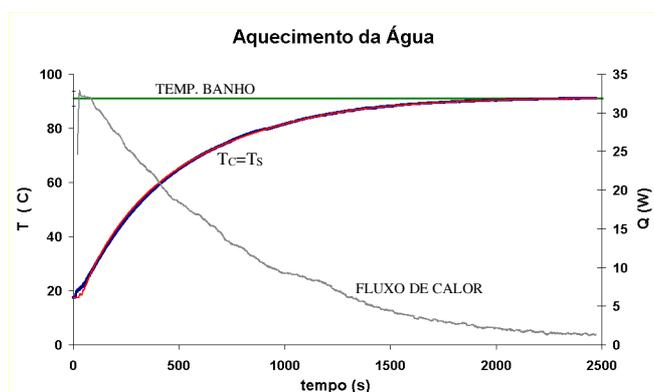


FIGURA 5. Curvas experimentais das evoluções temporais do fluxo de calor e das temperaturas do centro (T_c) e da superfície interna do recipiente (T_s) contendo água com temperatura inicial igual a 20°C. Água quente à temperatura constante (95°C) circula na camisa do sistema ilustrado pela *Figura 4*.

Três tipos de alimentos foram escolhidos para a realização dos experimentos, ou seja: água, para calibrar o dispositivo, doce de leite comercial (31% de sólidos totais) e pasta de tomate (17% de sólidos totais). Nos experimentos de aquecimento, o recipiente de vidro contendo a amostra a ser estudada foi colocado no banho de água, o qual foi previamente aquecido até uma temperatura pré-determinada. Os dados foram registrados através de um sistema de aquisição de dados computadorizados, obtendo-se as respostas temporais (voltagens) para o fluxímetro de calor e para os termopares. Nos experimentos de resfriamento, o sistema recipiente-amostra foi previamente aquecido e mantido em banho de água quente até que a temperatura da amostra fosse homogênea. Essa condição foi assumida quando não havia diferença entre as temperaturas indicadas pelos termopares colocados no centro e junto à parede interna da amostra.

2.2 – Calibração dos transdutores

A exatidão de um transdutor de fluxo de calor depende diretamente da confiabilidade de sua calibração.

O método de calibração usando um transdutor auxiliar é o mais simples e direto, consistindo em posicionar uma resistência elétrica entre o transdutor a calibrar e um transdutor auxiliar, medindo-se a potência térmica dissipada pela resistência elétrica [4, 6, 8].

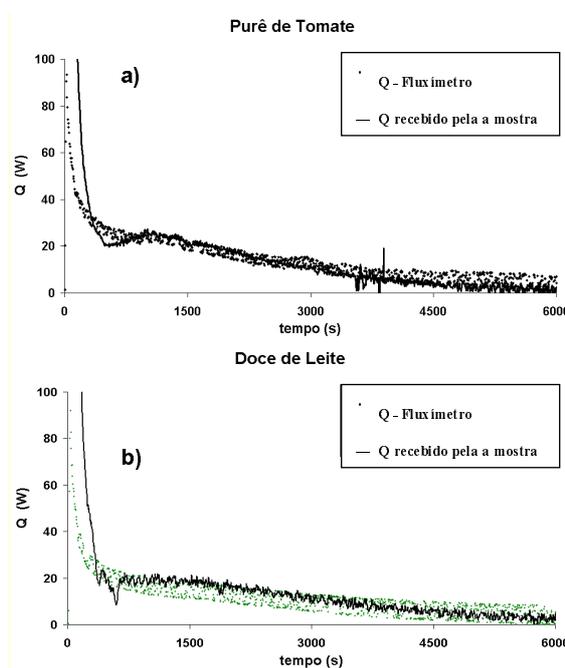


FIGURA 6. Comparação entre os fluxos de calor determinados através do fluxímetro de calor e através da equação 1, para as amostras de purê de tomate e de doce de leite comercial.

Neste trabalho, realizou-se a calibração do dispositivo de medição através da realização de experimentos de aquecimento utilizando água no interior do recipiente com os fluxímetros de calor instalados. Quando a água é aquecida, o mecanismo de transferência de calor por convecção controla completamente o processo de aquecimento no interior do recipiente. Assim, as temperaturas da água no centro e na superfície interna do recipiente são praticamente as mesmas, durante todo o processo, comportamento característico de sistemas com resistência térmica desprezível, o qual está ilustrado na *Figura 5*.

Na ausência de mudança de fase, a inexistência de gradientes de temperatura no seio do líquido permite a determinação do calor acumulado no sistema amostra-embalagem no intervalo de tempo ($t, t + \Delta t$), através da equação (1).

$$Q_{(t,t+\Delta t)}^{ac} = m_w c_{pw} (T_{t+\Delta t} - T_t) + m_v c_{pv} (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (1)$$

onde m_w e m_v são as massas da água e do recipiente de vidro, c_{pw} e c_{pv} são os calores específicos a pressão constante da água e do vidro, considerados constantes na faixa de temperaturas estudada. As temperaturas do sistema nos instantes $t + \Delta t$ e t são denotadas por $T_{(t+\Delta t)}$ e T_t . A energia térmica acumulada no sistema nesse inter-

valo de tempo é igual à quantidade de calor que atravessa os fluxímetros de calor. Assim, as voltagens fornecidas pelos transdutores foram correlacionadas com os

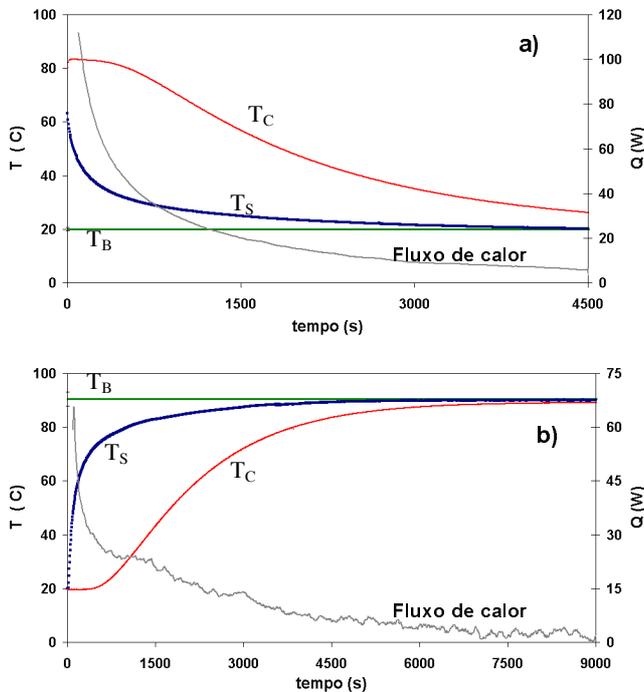


FIGURA 7. Representação das evoluções dos fluxos de calor e das temperaturas do centro (T_c) e da superfície (T_s) das amostras de purê de tomate, para os processos de (a) resfriamento e de (b) aquecimento.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6a e 6b representam as evoluções temporais das taxas de transferência de calor do banho para o sistema amostra-embalagem.

As taxas de transferência de calor foram obtidas experimentalmente, através do uso dos transdutores de fluxo de calor e através do cálculo aproximado da energia térmica acumulada no sistema amostra-embalagem, em um intervalo de tempo definido. Esse cálculo aproximado é efetuado através da equação 1, utilizando-se as temperaturas médias da amostra, calculadas pela equação 2, ou seja:

$$T = \frac{T_{(r=R)} + T_{(r=0)}}{2} \quad (2)$$

onde $T_{(r=R)}$ e $T_{(r=0)}$ são as temperaturas da amostra na superfície interna e no centro geométrico da embalagem, respectivamente. Os calores específicos das amostras de pasta de tomate e de doce de leite foram calculados utilizando a equação 3, proposta por SIEBEL [6].

$$c_p = 0,837 + 3,349 \times w \quad (3)$$

onde c_p é o calor específico [kJ/kg °C] e w é o teor de umidade da amostra [g/g]. Assim, os valores dos calores específicos calculados para a pasta de tomate e para o doce de leite foram 3,62 kJ/kg °C e 3,14 kJ/kg °C, respectivamente.

Os dois métodos de determinação do comportamento do processo de transferência de calor com o tempo forneceram resultados que estão muito próximos numericamente, o que valida os resultados obtidos pelos transdutores.

As evoluções temporais dos fluxos de calor e das temperaturas durante os experimentos de aquecimento e de resfriamento do purê de tomate são apresentadas na Figura 7.

O futuro da utilização dos transdutores no estudo do processamento térmico de alimentos depende da capacidade de reproduzirmos as evoluções temporais das temperaturas apresentadas na Figura 7 a partir do conhecimento dos fluxos de calor e de modelos de transferência de calor. Para alimentos onde a transferência de calor é fortemente controlada pelo mecanismo de condução ou da convecção térmica, exclusivamente, fica clara a factibilidade de utilização dos transdutores de fluxo de calor nos estudos experimentais não invasivos de transferência de calor em alimentos embalados. Para isso, as propriedades físicas dos alimentos de interesse devem ser cuidadosamente determinadas. Para os alimentos onde os mecanismos de condução e convecção térmica são importantes, essa utilização dependerá da capacidade de predição dos modelos de transferência de calor.

4 – CONCLUSÕES

A comparação dos resultados experimentais de fluxos e temperaturas mostrou que os transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial puderam determinar os fluxos de calor com boa exatidão e com tempo de resposta característico dos termopares. No entanto, a oscilação dos sinais fornecidos pelos transdutores é considerável e deverá ser minimizada para aumentar a exatidão dos resultados.

Os resultados apresentados mostraram a viabilidade de utilização desses fluxímetros no estudo não destrutivo e não invasivo dos processos de aquecimento e de resfriamento de alimentos, fornecendo informações complementares àquelas obtidas pelo uso de termopares instalados no interior da embalagem. Os resultados obtidos com os fluxímetros de calor poderão ser utilizados juntamente com modelos matemáticos de transferência de calor para a predição de curvas de penetração de calor em alimentos condutivos. Esse assunto será tratado em um próximo artigo.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ADAMS A.K., GILL, A.S., EK.R., NELSON, R. Contribution of conduction to total infant energy

- expenditure. **Journal Thermal Biology**, v. 23, n. 5, 1998, p. 267-273.
- [2] KARCZ, J. Studies of local heat transfer in a gas-liquid system agitated by double disc turbines in a slender vessel, **Chemical Engineering Journal**, v. 72, p. 217-227, 1999.
- [3] GÜTHS, S., Anémomètre a Effet Peltier et Fluxmètre Thermique: Conception et Réalisation. Application à l'Etude de la Convection Naturelle, 1994, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, França.
- [4] GÜTHS S., P.C PHILIPPI, E. GAVIOT AND P. THERY, Um Transdutor de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial, 1995, *Anais do XI COBEM*, CDROM, Belo Horizonte, Brasil.
- [5] PHILIP J.R. The Theory of Heat flux Meters, **J. of Geophysical Research**, n. 66, p. 571-579, 1961.
- [6] SIEBEL, J.E. Specific Heat of various products. *Ice Refrig.*, n. 2, p. 256-257 (citado no livro "Engineering Properties of Foods", 1986, editado por M.A. Rao e S.S.H. Rizvi, Marcel Dekker, Inc., pg.77).
- [7] SILVA, J. G. Desenvolvimento, validação e aplicação de um transdutor de fluxo de calor poroso em desconforto térmico, 1999. (Dissertação de Mestrado-Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [8] SILVEIRA, R. Uso de transdutores de fluxo de calor para o estudo de processos térmicos industriais, 2000. (Dissertação de Mestrado-Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa do acadêmico B. Carciofi.