

## EFEITO DA GERAÇÃO DE CALOR DENTRO DO GRÃO DE CAFÉ NA EVOLUÇÃO DA SUA TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE TORREFAÇÃO

**BUSTOS-VANEGAS, J. D.<sup>1</sup>, CORREA, P. C.<sup>2</sup>, MARTINS, M. A.<sup>3</sup>, BAPTESTINI, M. F.<sup>4</sup>; CAMPOS, C. R.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doutorando em Eng. Agrícola, Departamento de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG, Fone: 31-3899-1922, daniel.bustos@ufv.br

<sup>2</sup>Engº Agrônomo, Prof. Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa – MG.

<sup>3</sup>Engº Químico, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa – MG.

<sup>4</sup>Doutora em Engenharia Agrícola, Pesquisadora do Departamento de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG.

<sup>5</sup>Doutorando em Eng. Agrícola, Departamento de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG.

Apresentado no  
XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016  
24 a 28 de julho de 2016 - Florianópolis - SC, Brasil

**RESUMO:** Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito do calor gerado pelas reações de evaporação e oxidação no incremento de temperatura dentro do grão de café durante a torrefação. Considerou-se uma análise concentrada no desenvolvimento de um modelo físico para estimar a temperatura do grão de café durante o processo de torrefação considerando a variação das propriedades termofísicas e os termos fontes de geração de calor. Grãos individuais de café arábica com teor de água inicial de  $0,129 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$  foram torrados em um equipamento de queima de gás direto com cilindro rotativo a 45 rpm. A temperatura de torra foi constante a 240 °C. A temperatura do grão foi registrada a cada 5 s por um termopar inserido no centro de cada grão. Quando a evaporação é desprezada, o modelo superestima a temperatura durante o período de reação exotérmica, começando em 150 °C e até consumir os reagentes. Em oposição, quando as reações exotérmicas são ignoradas, o modelo subestima a temperatura do grão devido ao resfriamento evaporativo. Quando nenhum dos termos fonte é levado em conta, o modelo tende a atingir a temperatura de torrefação rapidamente caindo em um erro por superestimação.  
**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem, aquecimento, reações

### EFFECT OF HEAT GENERATION WITHIN THE COFFEE BEANS ON THE EVOLUTION OF ITS TEMPERATURE DURING THE ROASTING PROCESS

**ABSTRACT:** The aim of this study was to evaluate the effect of heat generated by evaporation and oxidation reactions in the temperature increase inside the coffee bean during roasting. It was considered a lumped analysis on developing a physical model for predict the temperature of the coffee beans during the roasting process taking into account the change in thermophysical properties and source terms of heat generation. Individual grains of Arabica coffee with an initial moisture content of  $0.129 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$  were roasted in a direct gas burning equipment with rotating cylinder at 45 rpm. The roasting temperature was constant at 240 °C. The grain temperature was recorded every 5 sec by a thermocouple inserted into the center of each grain. When the evaporation is neglected, this model overestimates the temperature during the exothermic reaction period, starting at 150 °C and up to consume the reagents. On the contrary, when exothermic reactions are ignored, the model underestimates the temperature of the grain due to evaporative cooling. When any of the terms source is taken into account, the model tends to reach the roasting temperature quickly, falling into an error by overestimating.

**KEYWORDS:** modeling, heating, reactions

**INTRODUÇÃO:** A temperatura atingida pelo grão de café, consequência do acúmulo de calor transferido, representa o parâmetro mais importante do processo de torra e pode ser determinado a partir do tempo de torrefação (BONNLANDER et al., 2005). A evolução desta temperatura durante a torra determinará a qualidade sensorial e nutricional da bebida, pois afetará a velocidade e intensidade das reações que gerarão os compostos responsáveis pela cor e aroma do café, assim como a capacidade antioxidante da bebida, devido principalmente aos ácidos clorogênicos (WIELAND et al., 2012; GLOESS et al., 2014; WANG & LIM, 2014). O processo de torrefação de café pode ser dividido em três estágios consecutivos: secagem, torra ou pirólise, e resfriamento. A evaporação de água é entendida como uma reação endotérmica, enquanto as reações de oxidação durante o segundo estágio são do tipo exotérmico. Usando análise térmico diferencial, RAEMY (1981) e SCHWARTZBERG (2002) observaram o início das reações exotérmicas quando o grão atinge 150 °C e o final das reações entre 230 e 240 °C. Objetivou-se com este trabalho simular e avaliar o efeito dos termos fonte de geração de calor no incremento da temperatura do grão de café durante a torrefação.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Para o desenvolvimento e formulação matemática do modelo, foi feita uma análise concentrada considerando: fluxo de calor proporcional ao coeficiente global de transferência de calor, envolvendo os mecanismos de convecção e radiação; propriedades termofísicas do grão variando com o conteúdo de umidade; condutividade térmica constante. Os parâmetros usados na simulação estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros usados na simulação

Volume do grão	Proposto por BUSTOS-VANEGAS (2015)
Volume inicial do grão	1,436x10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> (BUSTOS-VANEGAS, 2015)
Área superficial do grão	Proposto por BUSTOS-VANEGAS (2015)
Área superficial inicial do grão	1,63022x10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> (BUSTOS-VANEGAS, 2015)
Longitude característica inicial	8,8056x10 <sup>-4</sup> m (BUSTOS-VANEGAS, 2015)
Massa específica do grão	Proposto por BUSTOS-VANEGAS (2015)
Condutividade térmica do grão	0,11 W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> (FABBRI et al. 2011)
Capacidade calorífica do grão	Proposto por SCHWARTZBERG 2002
Umidade inicial do grão	0,1296 kg <sub>a</sub> kg <sub>ms</sub> <sup>-1</sup> (BUSTOS-VANEGAS, 2015)
Taxa de perda de umidade	Proposto por SCHWARTZBERG 2002
Propriedades termofísicas do ar	INCROPERA et al. 2011
Velocidade do ar	0,02 m s <sup>-1</sup> (FABBRI et al. 2011)
Temperatura de torrefação	240 °C
Tempo de torrefação	300 s
Taxa de geração de calor exotérmico	Proposto por SCHWARTZBERG (2002)

Assim, a equação governante foi estabelecida:

$$\rho V C_p \frac{dT_b}{dt} = -hA(T_b - T_a) - \rho V \lambda \frac{dX}{dt} + \rho V Q_r \quad (1)$$

em que:

$\rho$  - massa específica do grão, kg m<sup>-3</sup>;

$V$  - volume do grão, m<sup>3</sup>;

$\lambda$  - calor latente de vaporização de água, J kg<sup>-1</sup>;

$dX/dt$  - taxa de perda de umidade, kg<sub>a</sub> kg<sub>ss</sub><sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>;

$h$  - coeficiente global de transferência de calor, W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>;

$A$  - área de transferência de calor, m<sup>2</sup>;

$T_b$  - temperatura do grão, °C;

$T_a$  - temperatura no interior do torrador, °C;  
 $C_{pb}$  - calor específico do grão,  $J\ kg\ s^{-1}\ °C^{-1}$ ;  
 $Q_r$  - taxa de calor gerado pelas reações exotérmicas,  $W\ kg^{-1}$ .  
 $dT_b/dt$  - taxa de aquecimento do grão,  $°C\ s^{-1}$ .

A solução numérica da equação 1 foi efetuada pelo método das diferenças finitas de forma explícita, calculando-se a temperatura, umidade do grão e propriedades físicas do grão para cada instante de tempo posterior usando a planilha de cálculo do Microsoft Excel. O tamanho do passo para a discretização no tempo ( $\Delta t$ ) foi determinado pela seguinte relação:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{L_c^2} \leq \frac{1}{4} \quad (\text{INCROPERA, 2011}) \quad (2)$$

em que:

$Fo$  - número de Fourier (tempo adimensional);

Considerou-se  $Fo = 0,2$  e valores médios e constantes de  $k$ ,  $C_p$  e  $\rho$  (apenas para o cálculo de  $\Delta t$ , pois no modelo estas propriedades são variáveis):

$$0,2 = \frac{0,11 \cdot \Delta t}{1500 \cdot 800 \cdot (8,8056 \times 10^{-4})^2}$$

Determinando assim:  $\Delta t \leq 1,69$  s. Para facilitar os cálculos numéricos se estabeleceu  $\Delta t = 1$  s. O valor do coeficiente global de transferência de calor ( $h$ ) foi calculado usando a ferramenta solver de Microsoft Excel, minimizando o erro quadrado entre as temperaturas experimentais observadas por BUSTOS-VANEGAS (2015) e as temperaturas estimadas pelo modelo.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Figura 1 se apresenta o perfil de aquecimento do grão de café durante a torrefação. Um comportamento similar foi observado por FABBRI et al. (2011) e ALONSO-TORRES et al. (2013) usando a fluidodinâmica computacional. O calor endotérmico devido a evaporação de água, influência de forma mais acentuada a resposta do modelo. Quando esse termo é desprezado, o modelo superestima até em 30 °C a temperatura do grão durante o período de reação exotérmica, começando em 150 °C e até consumir os reagentes. SCHWARTZBERG (2002) estabeleceu o fim das reações quando se atinge o calor de reação total  $H_{et}$ . Em oposição, quando as reações exotérmicas são ignoradas, o modelo subestima a temperatura do grão em aproximadamente 15 °C devido ao resfriamento evaporativo iniciado quando o grão atinge 100 °C prolongando-se decrescentemente até o final do processo. SCHENKER (2000) avaliou o efeito da umidade inicial do grão (desde 5 até 18% b.u.) na taxa de aquecimento observando um rápido incremento da temperatura dos grãos com umidades iniciais baixas, o que é esperado pelo menor requerimento energético para a evaporação em benefício do calor sensível (aquecimento do grão). Ao final do processo de torrefação, quando os reagentes são consumidos nas reações, o modelo se ajusta novamente aos dados experimentais.

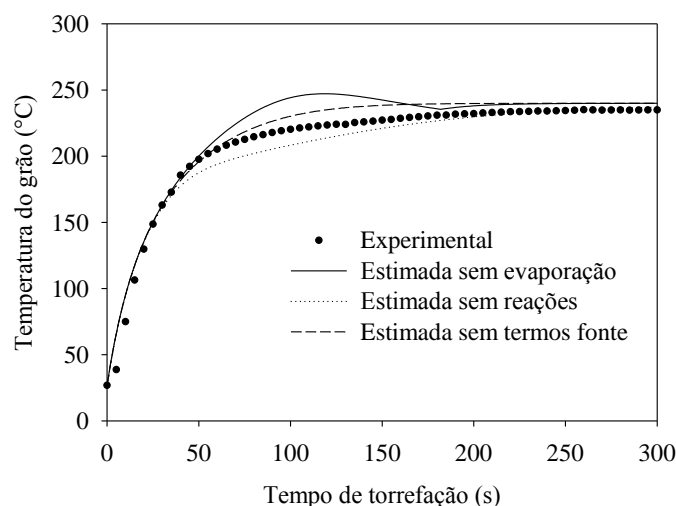


Figura 1. Efeito dos termos fonte no aquecimento do grão de café durante a torra a 240 °C.

**CONCLUSÕES:** Foi desenvolvido um modelo físico para estimar a temperatura do grão de café durante o processo de torrefação. O modelo está baseado nos fenômenos de transporte conjugado de transferência de calor e massa, e foi desenvolvido considerando a variação das propriedades físicas do grão (capacidade calorífica, massa específica, volume e área superficial) e os termos fonte de geração de calor, o que garante sua versatilidade. O modelo foi ajustado a dados experimentais.

Embora os dois termos fonte, tenham que ser considerados para conseguir um melhor ajuste aos dados experimentais, a evaporação tem um maior efeito sobre a temperatura estimada pelo modelo quando comparado com o efeito das reações exotérmicas. Sendo assim, pode-se reafirmar que para facilitar o controle do processo de torrefação é recomendável um baixo teor de umidade inicial do grão.

Sabendo que o binômio tempo-temperatura afeta sensivelmente a qualidade do grão torrado, os modelos que pretendem simular a transferência de calor e massa durante o processo de torrefação, devem considerar o efeito acoplado dos termos fonte de geração de calor para evitar erros de sub ou superestimação de temperatura durante o processo.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO-TORRES, B., HERNÁNDEZ-PÉREZ, J. A., SIERRA-ESPINOZA, F., SCHENKER, S., E YERETZIAN, C. Modeling and validation of heat and mass transfer in individual coffee beans during the coffee roasting process using computational fluid dynamics (CFD). **CHIMIA International Journal for Chemistry**, v.67, n.4, p.291–94. 2013.
- BONNLANDER, B., EGGERS, R., ENGELHARDT, U. H., MAIER, H. G. **Roasting**. In: ILLY, A.; VIANI, R. Espresso Coffee: The Science of Quality. Elsevier Academic Press, 2005. Second edition, p.179-209.
- BUSTOS-VANEGAS, J. D. **Modelagem das propriedades físicas e da transferência de calor e massa dos grãos de café durante a torrefação**. 2015. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, 2015.
- FABBRI, A., CEVOLI, C., ALESSANDRINI, L., E ROMANI, S. Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process. **Journal of Food Engineering**, v.105, n.2, p.264–269, 2011.
- GLOESS, A.; VIETRI, A.; WIELAND, F.; SMRKE, S.; SCHONBACHLER, B.; SÁNCHEZ, J.; PETROZZI, S.; BONGERS, S.; KOZIOROWSKI, T; YERETZIAN, C. Evidence of different flavour formation dynamics by roasting coffee from different origins: On-line analysis with PTR-ToF-MS. **International Journal of Mass Spectrometry**, v.365-366, p.324-337, 2014.
- RAEMY, A. "Differential thermal analysis and heat flow calorimetry of coffee and chicory products". **Thermochimica Acta** 43, 229 - 236. 1981.
- SCHWARTZBERG, H. G. **Modeling Bean Heating during Batch Roasting of Coffee Beans**. In: WELTI-CHANES, J.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.; AGUILERA, J. Engineering and Food for the 21st Century, 2002. p. 863 - 882.
- WIELAND, F.; GLOESS, A.; KELLER, M.; WETZEL, A.; SCHENKER, S.; YERETZIAN, C. On-line process control of the roast degree of coffee. **CHIMIA International Journal for Chemistry**, v.66, n.6, p.443-443. 2012.
- WANG, X., LIM, L.T. Effect of roasting conditions on carbon dioxide degassing behavior in coffee. **Food Research International**, v.61, p.144 -151, 2014.