

MODELAGEM DE FOGÕES SOLARES

F. A. Pinto¹; J. P. Moura²; S. M. F. Rocha³.

¹(Graduanda em Bacharelado em Química)- Departamento de Química-Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Caixa Postal, 1524,Lagoa Nova - Natal/RN - CEP 59.072-970 – Brasil.

Telefone:(0XX84)-32343997. Fax: (0XX84)-32082249. Email: fabian2006qui@gmail.com

²(Doutorando em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química- Universidade Federal de Campina Grande,Centro de Ciência e Tecnologia, Campus I - Bloco CM, rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó.Campina Grande - PB. CEP: 58109-970.

Telefone:(0XX84)-32343997. Fax: (0XX84)-32082249. Email: johnsonmoura@gmail.com

³(Mestranda em Ciência e Engenharia de Petróleo,Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Natal-RN – Brasil.CEP: 59078-970.

Telefone:(0XX84)-36411907. Fax: (0XX84)-32082249. Email: shirleyrocha028@yahoo.com

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma contribuição no estudo de modelagens de transferência de calor para os alimentos submetidos aos testes experimentais no forno solar proposto, onde foi avaliada a melhor modelagem para o bife de frango em estudo, comparando os resultados, considerando este alimento como um objeto semi-infinito (1º modelo proposto) e, em seguida, considerou o bife de frango como uma placa plana em regime transiente em duas condições distintas: não considerando e outro modelo considerando a contribuição do termo de geração, através do Critério de Pomerantsev. O Sol, além de fonte de vida, é a origem de todas as formas de energia que o homem vem utilizando durante sua história e pode ser a resposta para a questão do abastecimento energético no futuro, uma vez que aprendamos a aproveitar de maneira racional a luz que esta estrela constantemente derrama sobre nosso planeta. Brilhando a mais de cinco bilhões de anos, calcula-se que o Sol ainda nos privilegiará por outros seis bilhões de anos, ou seja, ele está apenas na metade de sua existência e lançará sobre a Terra, só neste ano, 4000 vezes mais energia que consumiremos. Frente a esta realidade, seria irracional não buscar, por todos os meios tecnicamente possíveis, aproveitar esta fonte de energia limpa, ecológica e gratuita. Na presente dissertação avalia-se o desempenho de um fogão solar do tipo caixa. Foi construído pelo grupo (LES) Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN um modelo de fogão solar do tipo caixa e foi testada a sua viabilidade técnica, propondo modelagens para alimentos submetidos ao assamento no forno solar o fogão tem características principais a facilidade de fabricação e montagem, o baixo custo (foi utilizada material compósito acessível às comunidades de baixa renda) e a simplicidade no mecanismo de movimentação do protótipo para incidência da luz solar direta. Foram propostas modelagens para cálculos do tempo mínimo de cozimentos de alimentos, considerando os seguintes modelos de transferência de calor no estado transiente: objeto semi-infinito, placa plana e o modelo da esfera para estudar a temperatura necessária para o assamento de pão (considerando geometria esférica). Após avaliação dos modelos de transmissão de calor para os alimentos submetidos aos processos de assamento, foram comparados os tempos obtidos pelas modelagens com os tempos experimentais de assamento no forno solar, explicitando a modelagem que melhor retrata a acurácia dos resultados do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem; Energia Solar; Transferência de Calor; Fogões Solares.

ABSTRACT-The present work presents a contribution in the study of modelings of transference of heat for foods submitted to the experimental tests in the considered solar oven, where the best modeling for the beefburger of chicken in study was evaluated, comparing the results, considering this food as a half-infinite (1st object considered model) and, after that, considered the chicken beef burger as a plain plate in transient

regimen in two distinct conditions: not considering and another model considering the contribution of the generation term, through the Criterion of Pomerantsev. The Sun, beyond life source, is the origin of all the energy forms that the man comes using during its history and can be the reply for the question of the energy supplying in the future, a time that learns to use to advantage in rational way the light that this star constantly special tax on our planet. Shining more than the 5 billion years, it is calculated that the Sun still in them will privilege for others 6 billion years, or either, it is only in the half of its existence and will launch on the Earth, only in this year, 4000 times more energy that we will consume. Front to this reality, would be irrational not to search, by all means technical possible, to use to advantage this clean, ecological and gratuitous power plant. In this dissertation evaluate the performance of solar cooker of the type box. Laboratory of Solar Energy of the Federal University of the Great River of North - UFRN was constructed by the group (LES) a model of solar stove of the type box and was tested its viability technique, considering modeling foods submitted when baking in the solar oven, the cooker has main characteristic the easiness of manufacture and assembly, the low cost (was used material accessible composition to the low income communities) and simplicity in the mechanism of movement of the archetype for incidence of the direct solar light. They had been proposals modeling for calculations of food the minimum baking time, considering the following models of transference of heat in the transient state: object the half-infinite, plain plate and the model of the sphere to study the necessary temperature for the it bakes of bread (considering spherical geometry). After evaluate the models of transmission of heat will be foods submitted you the processes of to it bakes of, the times gotten for the modeling with the experimental times of it bakes in the solar oven had been compared, demonstrating the modeling that more good that it portraies the accuracies of the results of the model.

KEYWORDS: Modeling; Solar Energy; Heat Transference; Solar Stoves.

1. INTRODUÇÃO.

O uso de concentradores para captar a energia solar, remonta pelo menos dois séculos antes de Cristo, quando Arquimedes havia repellido um ataque romano a Siracusa mas somente a partir da década passada se intensificaram os estudos e o desenvolvimento de tecnologias para cozinhas solares segundo Beyer *et al.* 2004.

A idéia de um fogão alimentado por energia solar não é novidade. Nem mesmo a utilização de parábolas para aquecer é uma descoberta: os vikings ateavam fogo às velas das embarcações inimigas utilizando um equipamento semelhante Beyer *et al.* (2004).

Segundo Beyer *et al.* 2004 os primeiros experimentos relacionados com fornos solares tipo caixa (fogões solares tipo caixa) para a preparação de alimentos foram descritos por Nicholas de Saussure, a mais de 200 anos, por volta de 1770. Saussure desenhou um fogão que consistia numa caixa retangular isolada e com a parte de cima envidraçada. A tampa da caixa, refletora, encarrega-se de concentrar a radiação dentro da caixa. Quando essa radiação entra na caixa, é absorvida pelo seu fundo que é pintado de preto mate, quando é libertada por este, já tem um comprimento de onda infravermelho, o que não permite que volte a passar pelo vidro (este é opaco aos infravermelhos). Este aparelho atinge cerca de 160 °C, conseguindo cozer ou assar qualquer alimento.

Em 1837, o astrônomo inglês John Herschel, filho do famoso astrônomo Sir William Herschel, construiu um pequeno dispositivo para seu próprio uso durante uma expedição que realizou no Cabo da Boa Esperança. Consistia também numa caixa negra que era enterrada na areia, para isolá-la termicamente, e era coberta com dupla chapa de vidro para permitir a entrada da luz solar e evitar que o calor escape. Herschel registrou uma temperatura de 116 °C nesse fogão, que era utilizado para cozinhar alimentos à base de carne e vegetais durante a expedição (Beyer et al., 2004). Também C. G. Abbot, outro astrônomo nascido em 1873, usou um fogão solar ao sul do Monte Wilson, onde tinha o seu observatório, e lhe serviu durante muitos anos para preparar seus alimentos. O presente trabalho visa da uma visão mais específica aos fornos solares tipo caixa, mostrando através de modelos matemáticos a relação entre tempo e temperatura, como diversos alimentos com geometrias diferentes são assados.

1.1 OBJETIVOS.

Construir um modelo de fogão solar e testar sua viabilidade técnica, que tenha como características principais a facilidade de fabricação e montagem, o baixo custo (utilizando material compósito acessível às comunidades de baixa renda).

Utilizar matérias-primas das regiões implantadas, adquiridas até mesmo em sucatas promovendo, assim, um estímulo à reciclagem de matérias e a preservação do meio ambiente.

Demonstrar o uso do fogão ecológico. Estudar modelos de transferência de calor para calcular o tempo de cozimento em um fogão solar tipo caixa. Implementar um programa para a modelagem e simulação do processo de cozimento.

1.2 METODOLOGIA

Foram colocados pães de queijo dentro do fogão solar e observado todos os aspectos químicos e físicos de acordo com a figura 1. Segundo dados de (Kowalski, 2001), a densidade aparente para pães foram calculadas, da relação entre massa e volume medidos, resultando nos seguintes valores médios experimentais:

- Densidade aparente (ρ_{ap}) = 0,174 g/cm³
- Conteúdo de água médio ($C_{p\grave{a}o}$) \equiv 30,85 %

A análise de regressão do modelo polinomial para ajuste dos valores de condutividade térmica foi aplicada em função do conteúdo de água e da densidade aparente.

2 EQUAÇÕES

- A equação do modelo ajustado por Kowalski (2001) foi:

$$R^2 = 0,9895$$

$$\ln k = - 0134165.C_A - 0,00205149.\rho_{ap} + 0,00248243.C_A^2 + 2,295917.10^{-6}.\rho_{ap}^2$$

$$28,25 \% \leq C_A \leq 45,70 \%$$

$$0,174 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{ap} \leq 0,657 \text{ g/cm}^3$$

Onde:

k é a condutividade térmica [**W/(mK)**];

C_A é o conteúdo de água (%);

ρ_{ap} é uma densidade aparente (**g/cm³**).

- Utilizando os valores médios da densidade aparente (ρ_{ap}) e do conteúdo de água pôde-se avaliar a condutividade térmica do ($C_{p\grave{a}o}$), térmica do pão, utilizando a equação de regressão:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\rho_{ap}) = 0,174 \text{ g/cm}^3 \\ (C_{p\grave{a}o}) = 30,85 \% \end{array} \right.$$

Com os dados, obtém-se:

$$\ln k = - 0,134165(30,85) - 0,00205149(0,174) + 0,00248243(30,85)^2 + 2,295917.10^{-6}.(0,174)^2$$

Resolvendo, obtém-se a condutividade térmica do pão:

$$k_{\text{pão}} \equiv 0,169 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Conforme já foi exposto, para propor a modelagem da temperatura de assamento no centro do pão de queijo considera-se o pão como uma esfera, de 2 cm de diâmetro, de condutividade térmica [$k \equiv 0,169 \text{ W/(mK)}$], estava inicialmente à temperatura $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, e foi submetida a um ambiente dentro do forno, com $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, estabelecendo-se um número de $Bi = h_{\text{global}} R/k$.

Sendo:

$h_{\text{global}} = 16 \text{ Wm}^{-2}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$: Coeficiente convectivo de transferência de calor + coeficiente referente à radiação = $h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}$;

$k_{\text{pão}} (\text{Wm}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$: Condutividade térmica do material constituinte da esfera (pão); R (m) = Raio da esfera (ou raio do pão = 0,01 m);

$\alpha_{\text{médio, pão}} = 3,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, difusividade térmica (Rahman, 1995)

Onde :

$$\alpha_{\text{pão}} = \frac{k_{\text{pão}}}{\rho_{\text{pão}} \cdot C_p_{\text{pão}}} = 3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Para o cálculo da temperatura de assamento do pão (T_c , no centro do pão) nestas condições experimentais, será calculada a temperatura no centro da esfera ou do pão, para número de Fourier ($F_{oc} = \alpha \cdot t / R^2$), usando dois termos da série-solução.

- Usando a condição de simetria radial para a condução de calor, com convecção na superfície da esfera, sem o termo de geração, resultam as equações básicas de cálculo da temperatura em uma esfera, T , em função do tempo, t , e da posição radial, r , que são:

$$\frac{T - T_a}{T_1 - T_a} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \frac{\text{sen}\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R}\right)}{\mu_n \cdot \frac{r}{R}} \cdot \exp\left(-\mu_n^2 \cdot \frac{\alpha \cdot t}{R^2}\right) \quad [\text{Temperatura } T = f(r, t)]$$

$$C_n = \frac{4 \cdot [\text{sen}(\mu_n) - \mu_n \cdot \cos(\mu_n)]}{2 \cdot \mu_n - \text{sen}(2\mu_n)} \quad [\text{Parâmetro}]$$

$$1 - \mu_n \cdot \cot g(\mu_n) = Bi \quad [\text{Equação de Autovalores}]$$

Cálculo dos números de Biot Bi_c e de Fourier F_{oc} para o pão, para $t_{\text{exper}} = 32 \text{ min} = 1920 \text{ s}$:

$$Bi_c = \frac{h_{\text{global}} \cdot R_{\text{pão}}}{k_{\text{pão}}};$$

Onde:

$$h_{\text{global}} = h_{\text{radiação}} + h_{\text{convecção}}$$

$$Bi_c = \frac{16 \frac{W}{m^2 \cdot k} \cdot 0,01m}{0,169 \frac{W}{m \cdot k}}$$

$$Bi_c \cong 0,947$$

$$F_{oc} = \left(\frac{\alpha_{\text{pão}} \cdot t_{\text{experimental}}}{R_{\text{pão}}^2} \right)$$

$$F_{oc} = \left(\frac{3,0 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s} \cdot 1920 \text{seg}}{(0,01m)^2} \right)$$

$$F_{oc} \cong 5,76$$

Portanto, nestas condições experimentais, para $0,1 < Bi_c < 100$, tem-se um número de Biot intermediário, ou seja, o processo de assamento do alimento, é regido pelas resistências interna e externa de transferência de energia.

3 FIGURAS

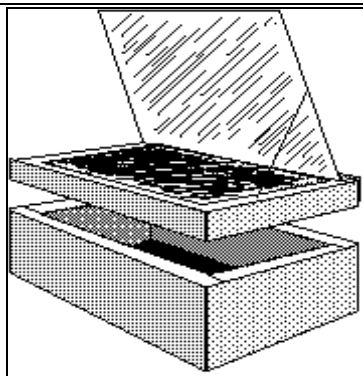


Figura 1 Caixa solar com cobertura, janela e refletor.

4 TABELA

Os principais dados usados na modelagem são:

Início do experimento: 11: 35'

Final do experimento: 12 : 07'

$$k_{\text{pão}} \equiv 0,169 \text{ W/(mK)}$$

$$\rho_{\text{ap}} = 0,174 \text{ g/cm}^3 = 174 \text{ kg/m}^3$$

$$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{cfinal}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{(experimental de assamento do pão de queijo)}} = 32 \text{ min.} \rightarrow t = 1920 \text{ s.}$$

$T_c = ?$ (temperatura no centro do pão de queijo, considerando como uma esfera)

$$Bi_c = \frac{h \cdot R}{k}$$

$$F_{oc} = \frac{\alpha \cdot t}{R^2} = 5,76$$

$$\alpha_{\text{pão}} = \frac{k_{\text{pão}}}{\rho_{\text{pão}} \cdot Cp_{\text{pão}}} \quad \therefore \quad \alpha_{\text{médio, pão}} = 3,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Cp_{\text{pão}} = \frac{k_{\text{pão}}}{(\alpha_{\text{pão}} \times \rho_{\text{pão}})} = \frac{0,169}{174 \times 30 \times 10^{-7}} \cong 3.237,55 \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

5 CONCLUSÕES.

Foi realizado um procedimento para testar um fogão solar tipo caixa, obtendo como resultados distribuições de temperatura dentro do fogão, assim como temperatura na superfície de “chapas” dispostas dentro dele e também foi possível avaliar o tempo para assar pão de queijo, bife de frango etc.

Obtiveram-se resultados satisfatórios experimentais compatíveis com os resultados da literatura usando uma modelagem do processo de cozimento de alimentos do fogão solar do tipo caixa.

Utilizando os resultados dos experimentos, estes proporcionarão comparações quanto ao tamanho do fogão a ser usado, visando uma determinada eficiência e obtenção de parâmetros de engenharia para a construção de futuros fogões solares do tipo caixa. Os experimentos também proporcionarão a criação de um banco de dados experimentais dos tempos de cozimento de alguns alimentos testados no fogão proposto.

No presente trabalho, foram descritas modelagens de transferência de calor para alimentos submetidos aos processos de cocção no fogão solar proposto, cujo protótipo de energia alternativa (forno solar em estudo) apresentou viabilidades técnicas, econômicas e térmicas que viabilizaram a construção deste equipamento de energia limpa.

De acordo com os resultados experimentais obtidos, verificou-se que o modelo da placa plana em regime transiente (considerando o termo de geração, ou seja, o Critério de Pomerantsev) apresentou resultados mais consistentes, para o bife de frango, onde foram estudadas as suas propriedades termofísicas e também, calculadas as temperaturas médias e no centro deste alimento (erro experimental em torno de 13 por cento), ao passo que, para o mesmo alimento, mas considerando o bife de frango como modelo semi-infinito, os resultados apresentaram uma margem maior de erro (em torno de 37 por cento), haja vista que partindo de conceitos fenomenológicos, o bife é um sistema finito. Para o pão de

queijo, foram realizadas modelagens em regime transiente, considerando a geometria mais favorável para o modelo físico proposto para este alimento, como esférica, explicitando a contribuição do termo de geração (Critério de Pomerantsev) que melhor retratou os resultados obtidos pela modelagem proposta com os resultados experimentais, obtidos neste forno solar que apresentou viabilidades técnicas, térmicas e econômicas para seu estudo.

Este trabalho de pesquisa além de apresentar relevância no contexto energético de inclusão social para as comunidades carentes, apresenta uma contribuição acadêmica no que tange à modelagem de processos de assamento dos alimentos estudados neste trabalho de pesquisa para o fogão solar proposto.

6 REFERÊNCIAS

- AMOROSO, N., BALLADIN, D.A., HEADLEY, O.St.C., MCDOOM, I.A., Parasram, A., Rampersad, K., Shakeer, S., 1998. *Introduction of solar energy devices to secondary schools as teaching aids*. Solar Energy 64 (1–3), 79–86.
- BEYER, H. G., PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., COLLE, S., PEREZ, R., SCHILLINGS, C., MANNSTEIN, H., MEYER, R.. Assessing satellite derived irradiance information for South America within the UNEP resource assessment project SWERA. *Proceedings of 5th ISES European Solar Conference* in Freiburg, Germany, September, 2004.
- EDWARDS, D., IVANCATON, *Radiation Characteristics of Rough an Oxidized Metals*, 1965, Advan. Thermophysical Properties Temp. Presures. ASME. Elsasser, W., (1942), Harvard Meteorologic Studies no 6.
- GIOIELLI, L.A.; LANNES, S.C.S., *Análise do perfil de textura de chocolates comerciais tipo cobertura*, Anais do Congresso Y Exposicion Latinoamericano sobre Procesamiento de Grasas Y Aceite, 6, Campinas, p.235-9, 1995.
- MURAKAMI, E. G.; SWEAT, V. E.; SASTRY, S. K.; KOLBE, E. (1996) *Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials*. Journal of Food Engineering, v. 27, n. 2, p. 109-123.
- QUEIROZ, G. M. *Determinação de propriedades termofísicas do pão tipo francês durante o processo de assamento*. São Paulo, 2001. 152p. + Apêndices. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. www.teses.usp.br