Determinación Computacional del Coeficiente de Transferencia de Calor y Propiedades Termofísicas de Alimentos

Diego F. Tirado^{(1)*}, Diofanor Acevedo⁽¹⁾ y Plinio Puello⁽²⁾

(1) Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Programa de ingeniería de Alimentos, Avenida el Consulado, Calle 30 No. 48-152. Cartagena, Bolívar-Colombia (e-mail: dtiradoa@unicartagena.edu.co)

(2) Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Programa de ingeniería de Sistemas, Avenida el Consulado, Calle 30 No. 48-152. Cartagena, Bolívar-Colombia (e-mail: ppuellom@unicartagena.edu.co)

* autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Dic. 11, 2013; Aceptado Feb. 6, 2014; Versión final recibida Feb. 10, 2014

Resumen

Se describe la elaboración de un software para la determinación de propiedades termofísicas y coeficientes convectivos de transferencia de calor en alimentos y que se ha denominado CTCIA (Coeficientes de Transferencia de Calor en Ingeniería de Alimentos). Para validar los modelos incluidos en el software, se usaron datos experimentales de tilapia frescas y procesadas, a diferentes temperaturas y tiempos de proceso. Los datos experimentales fueron procesados automáticamente por el software, generando las propiedades termofísicas y el coeficiente de transferencia de calor. Se concluye que la metodología descrita sirve para el cálculo de propiedades termofísicas y el coeficiente convectivo cuando no hay resistencia interna a la transferencia de calor.

Palabras clave: coeficiente de transferencia de calor, propiedades termofísicas, modelado computacional, resistencia interna.

Computational Determination of Heat Transfer Coefficient and Thermophysical Properties of Food

Abstract

The development of a computer program for the determination of thermophysical properties and convective heat transfer coefficients in foods is presented. The software has been named CTCIA (Heat Transfer Coefficients in Food Engineering). To validate the models included in the software, experimental data of fresh and processed tilapia at different temperatures and process times. The experimental data were processed automatically by the software, thereby generating values for the thermophysical properties and the heat transfer coefficient. It is concluded that the method described in this study is useful for calculating the thermophysical properties and the convective heat transfer coefficient when there is no internal resistance to heat transfer.

Keywords: heat transfer coefficient, thermophysical properties, computational modeling, internal resistance.

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos proporcionan una de las herramientas básicas para describir procesos físicos y para explicar y predecir el comportamiento en condiciones variadas (Alvis *et al.*, 2010). A través de su uso es posible el diseño y mejor entendimiento de procesos en la ingeniería de alimentos (Fereshteh *et al.*, 2011; Yildiz *et al.*, 2007). Una simulación fiable del proceso utilizando un modelo matemático es esencial para la optimización y el control de procesos. El éxito de un modelo, sin embargo, depende de la precisión de los conocimientos de las variables críticas de procesamiento, es decir, el coeficiente de transferencia de calor y propiedades involucradas del alimento durante el proceso en el caso de la fritura (Yildiz *et al.*, 2007). El modelo seleccionado para la determinación de las propiedades termofísicas fue el de Choi y Okos (1985) debido a su simplicidad, ya que involucra la composición del producto y la temperatura. Además este modelo ha sido seleccionado por otros autores (Tirado *et al.*, 2013; Alvis *et al.*, 2012; 2009). El modelo elegido para describir la transferencia de calor (Análisis de parámetros concentrados) fue seleccionado por su sencillez frente a otros modelos, como las diferencias finitas o elementos finitos. El modelo es validado cuando la resistencia a la conducción de calor al interior del sólido es pequeña o despreciable en relación a la resistencia térmica a la transferencia de calor de conversión entre el sólido y el medio, es decir, el modelo es validado para números de Biot menores a 0,1 (Alvis *et al.*, 2010). Este modelo se expresa por la ley de enfriamiento de Newton como se presenta en la Ecuación (1). No obstante, el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) fue calculado para el freído de la tilapia teniendo en cuenta el estado de cuasi equilibrio entre la temperatura del interior de la muestra y el balance de calor, empleando la Ecuación (2), que resolviéndola con las condiciones iniciales ($T = T_i$ cuando $t = 0$ y $T = T_s$ cuando $t = t$) y linealizándola, queda expresada como se indica en la Ecuación (3):

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

$$hA(T_s - T_b) = \rho VC_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\ln \frac{T_s - T_e}{T_o - T_e} = \frac{-hA}{\rho VC_p} t \quad (3)$$

Finalmente, de la pendiente resultante de la gráfica $\ln[(T_s - T_e)/(T_o - T_e)]$ -vs- tiempo (t) y conocidos el área de transferencia de calor, la densidad, el calor específico y el volumen de la lámina de tilapia, se determinó h mediante la Ecuación (4) así:

$$h = \frac{m\rho C_p}{A} \quad (4)$$

En pasadas investigaciones Alvis *et al.*, (2010) describieron un software llamado DCAL cuyo funcionalidad es la estimación del coeficiente de transferencia de calor, y en el 2012 otro denominado DEPROT, para la estimación de algunas propiedades termofísicas. Debido a que las propiedades termofísicas y los coeficientes convectivos de transferencia de calor se relacionan de manera conjunta, ya que los coeficientes convectivos necesitan de las propiedades termofísicas para ser calculados (Tirado *et al.*, 2012; Yildiz *et al.*, 2007), los autores decidimos elaborar y describir un software cuyo nombre es CTCIA (Coeficientes de Transferencia de Calor en Ingeniería de Alimentos) para la determinación de propiedades termofísicas y coeficientes convectivos de transferencia de calor en alimentos siempre y cuando no haya resistencia interna a la transferencia de calor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del software se utilizó JAVA como lenguaje de programación orientado a objetos y como entorno de desarrollo NetBeans (versión 7). Además, la interfaz de usuario se implementó utilizando la interfaz de programación denominada Swing la cual fue incluida por primera vez en la versión 1.2 de JAVA para mejorar el paquete anterior denominado AWT (abstract Windows Tools), ambas son un conjunto de clases orientadas al desarrollo de interfaces gráficas y componentes multimedia contenidas dentro de JFC (Java Foundation Classes) utilizadas para crear programas atractivos y muy versátiles (Sánchez, 2004). En lo concerniente a la metodología de desarrollo de software se dirigió por casos de uso (Ver Figura 1). En la cual se describe los casos de uso que se tuvieron en cuenta para el cálculo de propiedades térmicas (Conductividad, densidad y calor específico) y coeficiente convectivo.

Fig. 1: Diagrama de casos de uso

Con base en dicha especificación, se realizaron las estructuras de código detallando las diferentes clases e instancias que participan.

```
public void CalcularH() {

    int indiceInicial=0 , indicefinal=0;

    indiceInicial= (coordenadas.size()/3);
    indicefinal= (coordenadas.size()/3)*2;

    ArrayList<Coordenadas> segmento= new ArrayList<>();
    for (int j = indiceInicial; j <= indicefinal; j++)
    {
        segmento.add(coordenadas.get(j));
    }

    m =minimosCuadrados(segmento);

    System.out.println("m= " + m);
    h = (-m) * densidad * volumen * calorEspecifico) / area;
    System.out.println("h = " + h);
}
```

Fig. 2: Estructura de código para el cálculo del Coeficiente Convectivo

Para el cálculo de las Propiedades térmicas se invocan los métodos de la clase PropiedadesTérmicas a través del controlador, el cual se encarga de pasar los datos a la clase anterior y formatear la salida como se muestra en la Figura 3. Igualmente se desarrollaron dos interfaces para cada caso de uso, que incluían funcionalidades para el cargado de datos, temperaturas, respaldo de la información, generación de reportes por medio de tablas y gráficas. La interfaz general permite seleccionar la funcionalidad deseada (Ver Figura 4), permitiendo cargar e ingresar los datos generando las propiedades térmicas o ingresar los datos y cargando las temperaturas para calcular el Coeficiente Convectivo para luego mostrar las gráficas y reportes en tablas.

```

public PropiedadesTermicas() {
}
public String resultados() {
    String res = "conductividad (proteinas)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica(0);
    res += "\nconductividad (grasa)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica(1);
    res += "\nconductividad (carbohidrato)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica(2);
    res += "\nconductividad (fibra)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica(3);
    res += "\nconductividad (ceniza)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica(4);
    res += "\nconductividad (agua)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica(5);
    res += "\nDensidad (proteinas)\t\t" + Cpt.densidad(0);
    res += "\nDensidad (grasa)\t\t" + Cpt.densidad(1);
    res += "\nDensidad (carbohidrato)\t\t" + Cpt.densidad(2);
    res += "\nDensidad (fibra)\t\t" + Cpt.densidad(3);
    res += "\nDensidad (ceniza)\t\t" + Cpt.densidad(4);
    res += "\nDensidad (agua)\t\t" + Cpt.densidad(5);
    res += "\nCalor especifico (proteinas)\t\t" +
    Cpt.calorEspecifico(0);
    res += "\nCalor especifico (grasa)\t\t" +
    Cpt.calorEspecifico(1);
    res += "\nCalor especifico (carbohidrato)\t\t" +
    Cpt.calorEspecifico(2);
    res += "\nCalor especifico (fibra)\t\t" +
    Cpt.calorEspecifico(3);
    res += "\nCalor especifico (ceniza)\t\t" +
    Cpt.calorEspecifico(4);
    res += "\nCalor especifico (agua)\t\t" +
    Cpt.calorEspecifico(5);
    res += "\n\nConductividad (W/m2°C)\t\t" +
    Cpt.conductividadTermica();
    res += "\nDensidad (kg/m3) \t\t" + Cpt.densidad();
    res += "\nCalor especifico (J/kg2°C) \t\t" +
    Cpt.calorEspecifico();
    return res;
}

```

Fig. 3: Cálculo de Propiedades Térmicas

Fig. 4: Interfaz gráfica del Programa

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El software se usa en primera instancia para calcular las propiedades termofísicas necesarias para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor (Ver Figura 7). Para el cálculo de este último se necesitan los datos de la temperatura inicial (T_0), la temperatura del medio (T_e) y las temperaturas a medida que avanza el tiempo de procesamiento (T_s). Estas últimas son adjuntas desde la computadora en formato .txt (Bloc de notas). También es necesario ingresar al programa el área y volumen del producto, además de la densidad y calor

específico, los cuales son otorgados por el mismo programa, como ya se mencionó, para finalmente solicitar la determinación del coeficiente en pantalla (Ver Figura 8). El software además visualiza la gráfica de temperatura T_s en función del tiempo (Figura 9) y la gráfica $\ln[(T_s - T_e)/(T_o - T_e)]$ -vs- tiempo (t) (Ver Figura 10) de cuya linealización se obtiene la ecuación de regresión para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor. En la Figura 9 se muestra la variación de la temperatura de las láminas de tilapia con el tiempo. Se observa que en el interior del producto la temperatura aumentó rápidamente al comienzo del proceso, estabilizándose aproximadamente en 85,74 °C a partir de 392 segundos.

Coeficiente de Transferencia de Calor Ingeniería de Alimentos CTCIA

Archivo Aplicación Opciones Ayuda

% en masa de proteína: 18.5
 % en masa de grasa: 5
 % en masa de los carbohidratos: 0.5
 % en masa de la fibra: 0
 % en masa de la ceniza: 1
 % en masa de la humedad: 75

Temperatura: 130

Calcular propiedades térmicas

conductividad (proteínas): 0.28832317999999996
 conductividad (grasa): -0.181151581
 conductividad (carbohidrato): 0.30856472
 conductividad (fibra): 0.29222673000000005
 conductividad (ceniza): 0.46260339
 conductividad (agua): 0.68634956
 Densidad (proteínas): 1262.5418
 Densidad (grasa): 871.3059000000001
 Densidad (carbohidrato): 1558.7402
 Densidad (fibra): 1263.9343
 Densidad (ceniza): 2387.3181000000004
 Densidad (agua): 934.088647
 Calor específico (proteínas): 2143.16899
 Calor específico (grasa): 2094.5954800000004
 Calor específico (carbohidrato): 1703.54069
 Calor específico (fibra): 2018.27779
 Calor específico (ceniza): 1276.0272699999998
 Calor específico (agua): 4083.6927979399998

Conductividad (W/m°C): 0.56521323675
 Densidad (kg/m3): 985.966637015844
 Calor específico (J/kg°C): 3585.263611755

Fig. 7: Determinación de propiedades termofísicas

Coeficiente de Transferencia de Calor Ingeniería de Alimentos CTCIA

Archivo Aplicación Opciones Ayuda

Área: 0.0047
 Densidad: 985.9666
 Volumen: 0.00001875
 Temperatura del medio: 130
 Calor Específico: 3715.16
 Intervalo de Tiempo: 1

Selecionar archivo

t	T(t)	$\ln [(T(t) - T_e)/(T_o - T_e)]$
0.0	30.0	0.0
1.0	30.0	0.0
2.0	30.0	0.0
3.0	30.0	0.0
4.0	30.0	0.0
5.0	30.0	0.0
6.0	30.0	0.0
7.0	30.0	0.0
8.0	30.1	-0.001000500335834233
9.0	30.1	-0.001000500335834233
10.0	30.1	-0.001000500335834233
11.0	30.1	-0.001000500335834233
12.0	30.1	-0.001000500335834233
13.0	30.1	-0.001000500335834233
14.0	30.1	-0.001000500335834233
15.0	30.1	-0.001000500335834233
16.0	30.1	-0.001000500335834233
17.0	30.1	-0.001000500335834233
18.0	30.1	-0.001000500335834233
19.0	30.1	-0.001000500335834233
20.0	30.2	-0.0020020026706730793
21.0	30.2	-0.0020020026706730793

Determinar Coeficientes

Temperatura: 130
 m: -0.004025196419337547
 ρ (kg/m3): 985.9666
 V (m3): 0.00001875
 Cp (J/kg°C): 3715.16
 A (m2): 0.0047
 h (W/m2 °C): 58.82070389022127

Mostrar Grafica In
Mostrar Grafica T(t)

Fig. 8: Determinación de coeficiente convectivo de transferencia de calor

Fig. 9: Temperatura en función del tiempo

Fig. 10: Grafica de linealización

CONCLUSIONES

Mediante esta investigación se evidenció que mediante el uso del software computarizado se hace mucho más fácil el entendimiento de fenómenos involucrados en la ingeniería de alimentos, haciendo uso de datos experimentales. Es así como los autores concluyen que estas herramientas deben ir de la mano en la investigación de otros fenómenos, para así poder avanzar de manera conjunta e interdisciplinar en los conocimientos de procesos de ingeniería.

REFERENCIAS

- Alvis, A., I. Caicedo y P. Peña, Determinación de Propiedades Termofísicas de Alimentos en Función de la Concentración y la Temperatura empleando un Programa Computacional, *Información Tecnológica*: 23(1), 111-116 (2012).
- Alvis, A., I. Caicedo y P. Peña, Determinación del coeficiente de transferencia de calor a través de una aplicación de computadoras, *Información Tecnológica*: 21(5), 13-20 (2010).
- Alvis, A., L. Cortés y M. Páez, Transferencia de Calor y Materia durante la Fritura de Trozos de Ñame (*Dioscórea alata*), *Información Tecnológica*: 20(1), 99-109 (2009).
- Choi, Y. y M.R. Okos, Thermal properties in liquid foods-Review. In: *Physical and Chemical properties of food*. Ed. M.R. Okos, American Society of Agricultural Engineering, p.p. 93-101 (1985).
- Fereshteh, D.N. y otros tres autores, Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step, *Food and Bioproducts Processing*: 89(3), 241-247 (2011).
- Sánchez, J., JAVA 2 (2004), <http://www.jorgesanchez.net/programacion/manuales/Java.pdf>. Acceso: 6 de Febrero (2014).
- Tirado, D., D. Acevedo y L. Guzmán, Coeficientes convectivos de transferencia de calor durante el freído de láminas de tilapia "*Oreochromis niloticus*", *Información Tecnológica*: 24(6), 41-46 (2013).
- Yildiz, A.T., K. Palazoglu y F. Erdogan, Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices, *Journal of Food Engineering*: 79(1), 11-17 (2007).