

## Determinación del Coeficiente de Transferencia de Calor a Través de una Aplicación de Computadoras

Armando Alvis<sup>(1)</sup>, Isaac Caicedo<sup>(2)</sup> y Pierre Peña<sup>(2)</sup>

(1) Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Agrícolas, Depto. de Ingeniería de Alimentos, Carrera 6 No 76-103, Córdoba-Colombia (e-mail: aalvis2@hotmail.com)

(2) Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Depto. de Ingeniería de Sistemas, Carrera 6 No 76-103, Córdoba-Colombia

*Recibido Sept. 23, 2009; Aceptado Nov. 20, 2009; Versión Final recibida Ene. 15, 2010*

---

### Resumen

Se describe un procedimiento de evaluación del coeficiente de transferencia de calor en operaciones industriales. Se presenta un modelo matemático sencillo de determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor usando el software DCAL (Determinación de Coeficiente de Transferencia de Calor durante un Calentamiento). Para validar el modelo se usaron datos experimentales de muestras procesadas por tratamiento térmico, utilizando diferentes temperaturas y tiempos de proceso. Los datos experimentales fueron procesados automáticamente por el software, para la generación de gráficas y determinación de un coeficiente de transferencia de calor optimizado. Se concluye que la metodología descrita sirve para el cálculo del coeficiente convectivo cuando no hay resistencia interna a la transferencia de calor.

*Palabras claves: coeficiente de transferencia de calor, tratamiento térmico, coeficiente convectivo*

## Determination of Heat Transfer Coefficient through Computer Application

### Abstract

The evaluation of the heat transfer coefficient for its use in industrial operations is described. A simple mathematical model to determine the heat transfer convective coefficient using the DCAL software (Determination of Heat Transfer Coefficient during a Heating). To validate the model experimental data of samples processed by thermal treatment using different temperatures and process time were used. The experimental data was automatically processed by the software, to generate graphs and to determine an optimum heat transfer coefficient. The main conclusion was that the methodology described is useful to the compute of convective coefficient when there is no inside heat transfer resistance.

*Keywords: heat transfer coefficient, heat treatment, convective coefficient*

## INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos proporcionan una de las herramientas básicas para describir procesos físicos y para explicar y predecir el comportamiento en condiciones variadas. Recientemente, la informática ha estimulado un mayor interés en la elaboración de modelos matemáticos de transferencia de calor en los procesos de alimentos como (esterilización, escaldado, congelación, refrigeración y fritura) (Schwartzberg y Chao, 1982; Daudin, 1983; Califano y Calvelo, 1983; Pelegrina et al., 2000, Ban et al., 2001 y Sosa-Morales et al., 2006). El modelo escogido para describir la transferencia de calor durante el proceso térmico fue seleccionado por simplicidad sobre otros modelos tales como diferencias finitas o elemento finito, esta aproximación ha sido usada en otros estudios de procesos térmicos donde los mecanismos conveccionales están controlando la transferencia de calor (Moreira et al., 1995; Vélez-Ruiz et al., 2003). La transferencia de calor puede ser expresada por la ley de Enfriamiento de Newton, ecuación (1)

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

El coeficiente de transferencia de calor no es una propiedad de los alimentos, pero es un parámetro importante y necesario para diseñar y controlar el procesamiento de los alimentos donde los fluidos están sujetos a calentamiento, enfriamiento o medio de fritura (Rahman, 1995). Por lo tanto el coeficiente de transferencia de calor se determinará en un tratamiento térmico, considerando el estado cuasi-estacionario cuando la temperatura en el interior del sólido es uniforme, y se describe en la ecuación (2).

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

La ecuación diferencial se resolverá con las condiciones iniciales adecuadas y es expresada como en la ecuación (3).

$$\frac{T_t - T_e}{T_o - T_e} = \exp\left(\frac{-hA}{\rho VCp} t\right) \quad (3)$$

Para éste caso, el sólido son los alimentos en forma de placa, esfera, cilindro y el medio puede ser agua fría, agua caliente, aire frío, aire caliente, aceite, entre otros. Así que el coeficiente de transferencia de calor  $h$  puede ser calculado mediante regresión lineal usando los datos experimentales. 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 que tienden a cero  $Bi < 0.1$ . El presente trabajo describe un software elaborado por los autores cuyo nombre es DCAL (Determinación de coeficiente de transferencia de calor durante un calentamiento) cuyo funcionalidad es la estimación del coeficiente de transferencia de calor en diversas operaciones a fin de que los procesos puedan ser optimizados y automatizados a partir de un punto de vista de ingeniería conforme al modelo propuesto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de la aplicación se utilizó, por un lado, el lenguaje de programación *Java* en la versión 5, el entorno de desarrollo integrado denominado *NetBeans* en la versión 6, y el API llamado *Swing* para la programación de interfaces gráficas. Por otro lado, en lo concerniente a la metodología, se utilizó la orientada a objetos para la programación, y el modelo en cascada para la construcción del software. Respecto a lo mencionado anteriormente, la metodología de construcción de software tuvo cinco fases descritas por (Pressman, 2005; Booch, 2004), y fueron: 1) *Comunicación*: En esta fase inició el proyecto con la recopilación de requisitos; 2) *Planeación*: Después de recolectar los requisitos, se realizó un estimativo del tiempo empleado para fabricar el

software, así se estableció una planeación; 3) *Modelado*: Posteriormente a la planeación, se realizó un análisis y modelo basados en el paradigma orientado a objetos, en el que se diseñó en la vista estática, un diagrama de casos de uso con base en los requisitos (ver figura 1), y un diagrama de clases (ver figura 2); en la vista dinámica se elaboraron los diagramas de secuencia y estado como se aprecia en las figuras 3, 4 y 5 (Rumbaugh et al., 2000; Hamilton et al., 2006; Pilone et al., 2005; Gomaa, 2004); 4) *Construcción*: Terminado el diseño, se codificó una aplicación en el lenguaje de programación Java, y se probó cada requisito funcional una vez implementado; y 5) *Despliegue*: Finalmente, el software fue empaquetado (en un fichero de extensión .jar) y entregado para enseñar la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Con relación a los requisitos funcionales, el diagrama de casos de uso se muestra en la figura 1. En la figura 2 se muestra el modelo estático de la aplicación en el diagrama de clases.

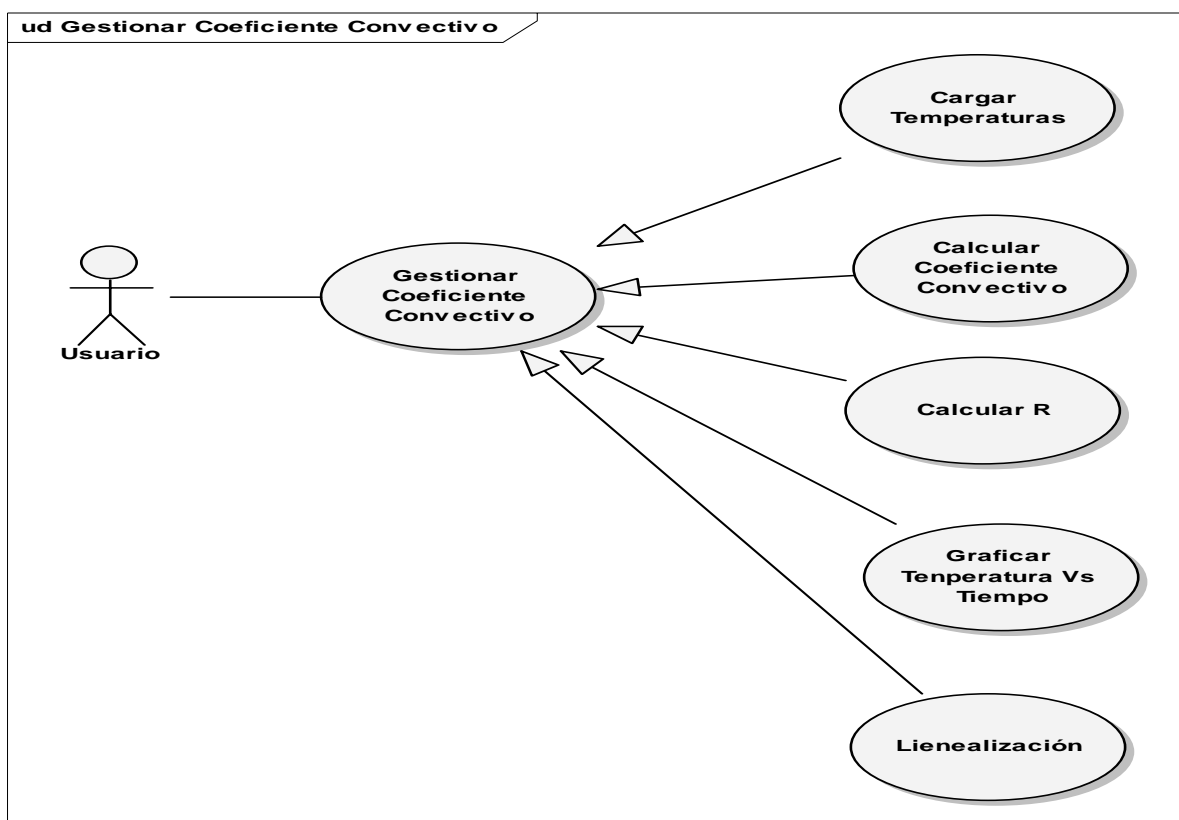


Fig. 1: Diagrama de casos de uso.

Las clases de objetos diseñadas son las siguientes: 1) *Utilerías*: Contiene los métodos necesarios para la realización de cálculos generales, como el que calcula el coeficiente convectivo de transferencia de calor (figura 6), y generales como la sumatoria de un arreglo de números (figura 7); 2) *CargadorDatosFichero*: Permite cargar la serie de datos desde un fichero; 3) *PanelGraficadorLineal*: Se despliega la linealización de los datos; 4) *PanelGraficadorConvectivo*: Utilizada para la graficación de las temperaturas contra el tiempo, cargadas desde un fichero con objetos de la clase previamente descrita, y de la temperatura del medio; 5) *DialogGraficador*: Representa un cuadro de dialogo que está compuesto por los objetos de las dos clases previas; y 6) *FrameGraficador*: Finalmente, esta es la clase de objetos con el método main implementado, el cual es invocado por la propia maquina virtual de Java. Los objetos de esta clase están compuestos por los de la clase previa.

Por otro lado, las figuras 3, 4 y 5 describen de manera gráfica el comportamiento de la aplicación en tiempo de ejecución, dicho de otro modo, expresan la vista dinámica del software mediante las interacciones de los objetos de las clases previamente mencionadas, sin embargo, en el caso específico del diagrama de estados, se muestra el desarrollo general de la ejecución de la aplicación.

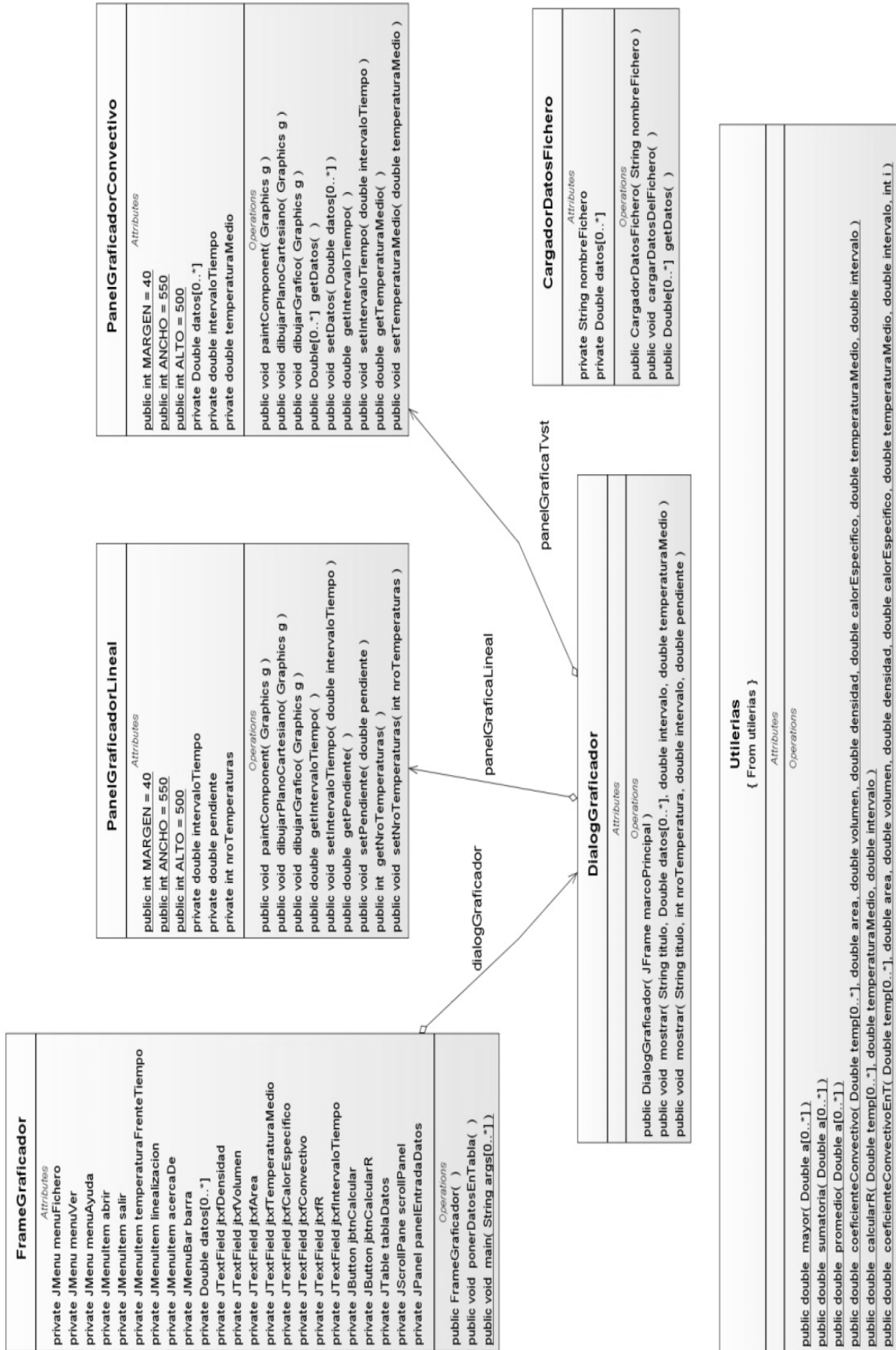


Fig. 2 Diagrama de clases del diseño del software.

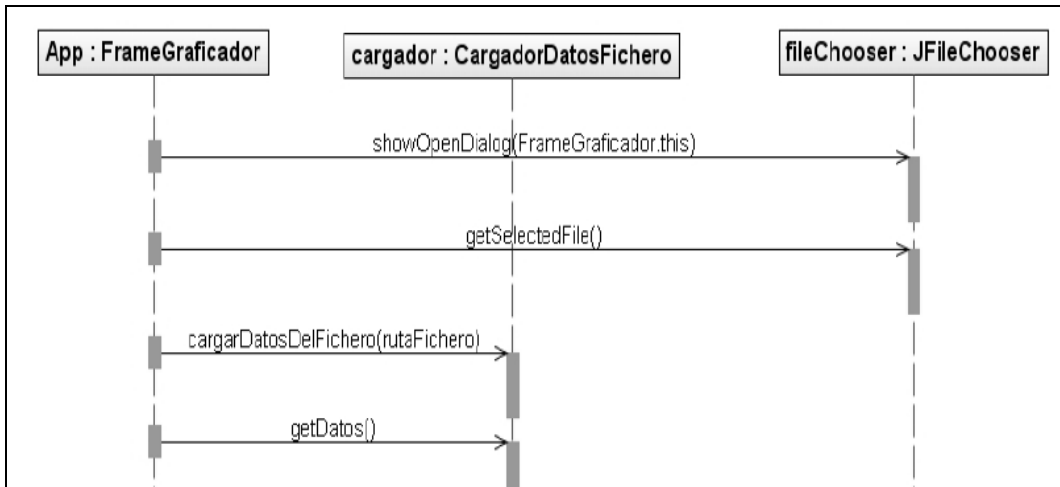


Fig. 3: Diagrama de secuencias para la carga de datos de proveniente de un fichero

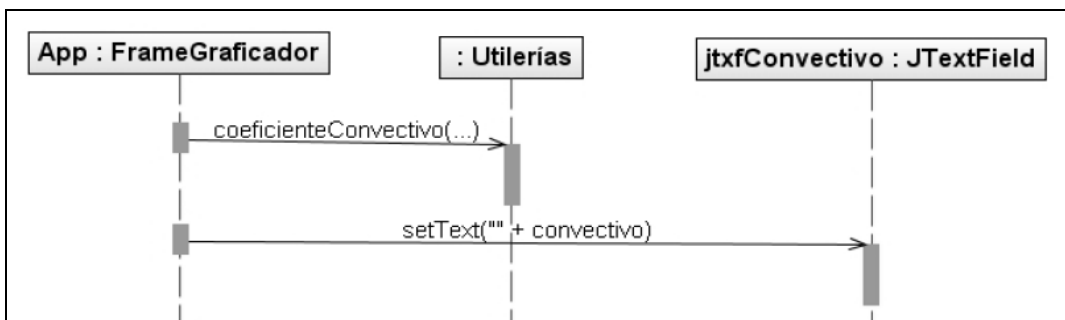


Fig. 4: Diagrama de secuencias para el cálculo del coeficiente convectivo

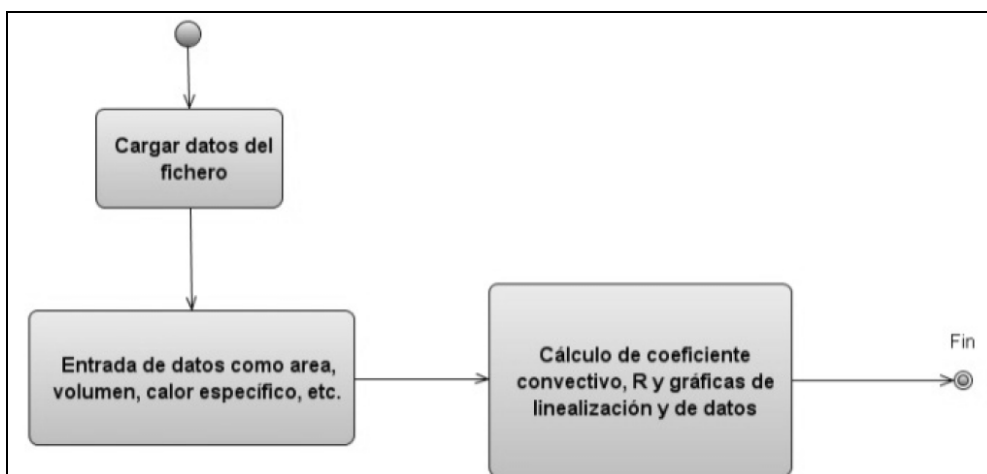


Fig. 5: Diagrama de estados de la aplicación

**RESULTADOS**

Después de diseñar el software para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) se desarrolló una aplicación en Java, cuya implementación necesita como insumos los datos de las temperaturas inicial  $T_o$ , del medio  $T_e$  y al tiempo  $t T_t$  (figura 9), como también el calor específico  $C_p$ , densidad  $\rho$ , área y volumen del producto cargadas inicialmente desde un archivo plano, sin embargo las temperaturas pueden ser tomadas directamente desde el sistema de adquisición de datos conectado a un refrigerador, escaldador o freidora. Automáticamente el software hará los cálculos de  $ln [(T_t - T_e)/(T_o - T_e)]$ , y h al momento de cargar los datos.

Así mismo el usuario al presionar el botón etiquetado Calcular R (botón 2 en la figura 9) el software calculará R y al presionar el botón etiquetado Calcular coeficiente convectivo (botón 1 en la figura 9) dicho software mostrará el resultado del cálculo de: coeficiente convectivo.

```

00 public static double coeficienteConvectivo(ArrayList<Double> temp,
double area,
01     double volumen, double densidad, double calorEspecifico,
02     double temperaturaMedio,
03     double intervalo) {
04     double sumYs = 0.0, tiempo = 0;
05     int i = 0;
06
07     for (double val : temp) {
08         sumYs += Math.log((val - temperaturaMedio) /
09             (temp.get(0) - temperaturaMedio));
10         tiempo += intervalo * i++;
11     }
12
13     double b = sumYs / (tiempo * intervalo);
14
15     return densidad * calorEspecifico * volumen * b / area;
16 }
    
```

Fig. 6: Código fuente del método que calcula el coeficiente convectivo.

```

00 public static double
sumatoria(ArrayList<Double> a) {
01     double sum = 0;
02
03     for (double val : a)
04         sum += val;
05
06     return sum;
07 }
    
```

Fig. 7: Método que calcula la sumatoria de varios datos.

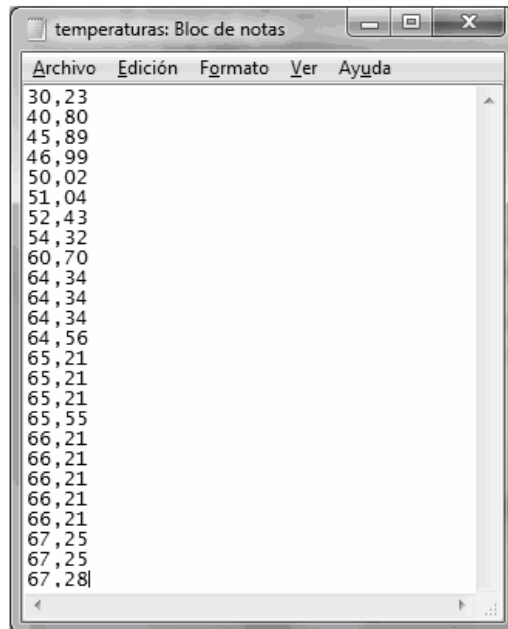


Fig. 8. Sistema de adquisición de datos

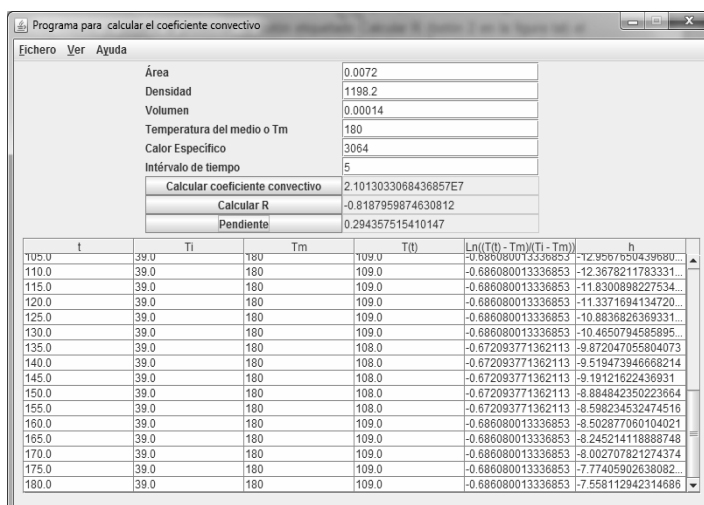


Fig. 9. Capa de presentación del programa

Igualmente, como resultado el software nos arroja la gráfica de temperatura  $T_t$  en función del tiempo (figura 10), y la gráfica del  $\ln [(T_t - T_e)/(T_o - T_e)]$  vs  $t$ , de cuya linealización se obtiene la ecuación de regresión y de ahí se determina el coeficiente convectivo de transferencia de calor (figura 11).

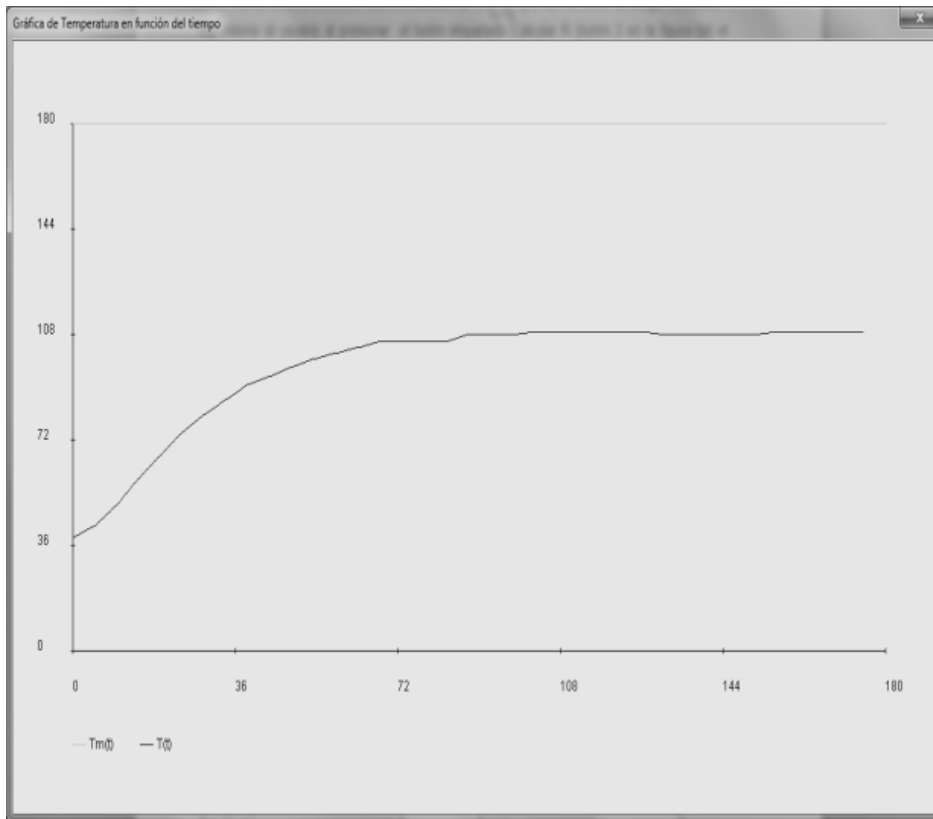


Fig. 10. Temperatura en función del tiempo

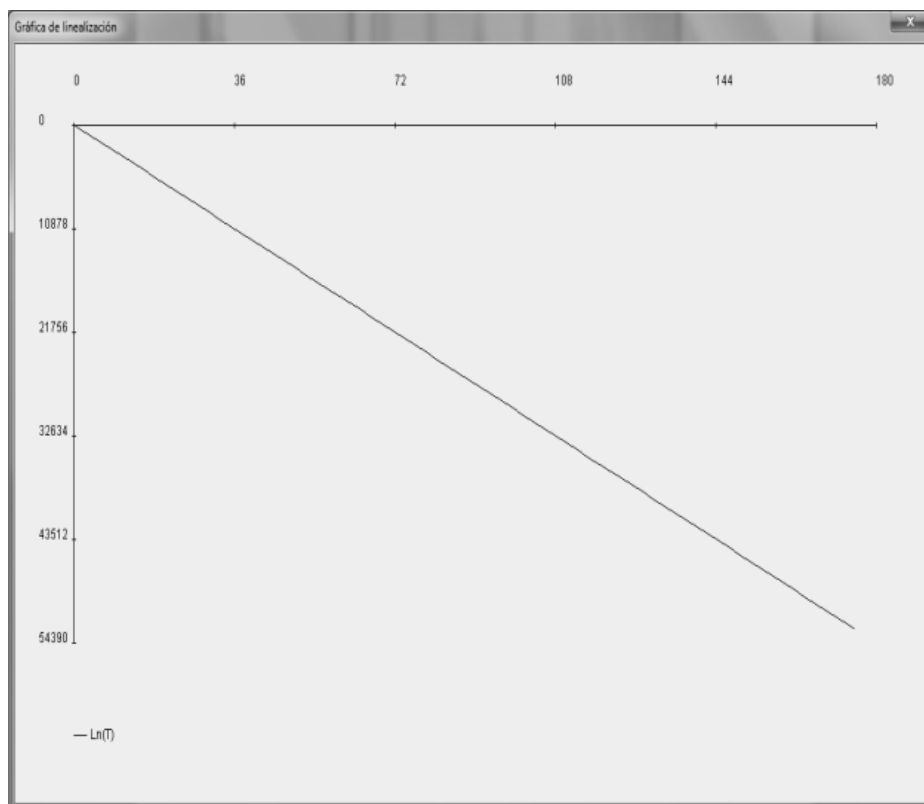


Fig. 11. Grafica de linealización y Temperatura del medio

## CONCLUSIONES

El presente estudio revela que las aplicaciones computarizadas facilitan la investigación y comprensión de fenómenos ingenieriles concernientes a la transferencia de calor en procesos térmicos aplicados a la ingeniería de alimentos; partiendo de una serie de datos, los cuales son procesados automáticamente por un programa de computadora elaborado con base en un modelo matemático propuesto, que además, genera gráficas y determina el coeficiente de transferencia de calor.

## REFERENCIAS

- Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I.; *El lenguaje unificado de modelado*; Editorial Pearson, España, p.p 28 - 29 (2004).
- Gomaa, H.; *Designing Software Products Lines with UML: From Use Cases to Pattern - Based Software Architecture*; Editorial Addison Wesley, United States of America (2006).
- Hamilton, K., Miles R.; *Learning UML 2.0*; Editorial O'Reilly, United States of America (2006).
- Pilone, D., Pitman N.; *UML in a Nutshell*; Editorial O'Reilly, United States of America (2005).
- Pressman, R.; *Ingeniería de software, un enfoque práctico*; 6ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, p.p 50 - 51 (2005).
- Rumbaugh, J., Jacobson, I., Booch, G.; *El lenguaje unificado de modelado, manual de referencia*; Editorial Pearson, España p.p 37 (2000).
- Schwartzberg, H. G. y R. Y. Chao; *Solute diffusivities in leaching process*. Food Technology 3(2), 73-86 (1982).
- Califano, A.N. y A. Calvelo.; *Heat and mass transfer during the warm water blanching of potatoes*. Journal of food Science. 48(3), 220-225 (1983).
- Pelegriña, A.H., R.E. Echarte, y G.H Sherwood; *Cálculo de las propiedades de aire húmedo y su aplicación en la simulación de procesos*. p.p 7-23., en Mulet, A., C. Ordorica, J. Benedito y J. Martínez-Monzó, Herramientas de cálculo en Ingeniería de Alimentos, V. VI. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. (2000).
- Bon, J., J. Benedito, N. Sanjuán, y A. Mulet; *Simulación del efecto de la resistencia externa en el secado de alimentos*, pp. 37-54., en Fito. P., A. Mulet, C. Ordorica y J. Bon, Herramientas de cálculo en Ingeniería de Alimentos, V. VI Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. (1999).
- Bon, J., J. Benedito, J. Carcel, y A. Mulet; *Transferencia de calor en geometría cilíndrica considerando resistencia externa: método analítico*. Herramientas de cálculo en Ingeniería de Alimentos. pp 5-13 (2001).
- Sosa-Morales, M.E., R. Orzuna-Espiritu y J.F., Velez-Ruiz; *Mass, Thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat*. Journal of Food Engineering 77(3) 731-738 (2006).
- Moreira, R. G.; J.K., Palau, V.E. Sweat y X. Sun; *Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time*. Journal of Food Processing and Preservation 19(4), 175-189 (1995).
- Vélez, R. J. F. y M.E. Sosa-Morales; *Heat and mass transfer during the frying process of donuts*, by CRC Press LLC. (2003).
- Vélez-Ruiz, J. F.; F.T. Vergara-Balderas, M.E. Sosa-Morales y J. Xique-Hernández; *Effect of temperature on the physical properties of chicken strips during deep-fat frying*. International Journal of Food Properties 5(1), 127-144 (2002).
- Rahman, S.; *Food properties handbook*. ((pp. 34) 239). Boca Ratón, FL; CRC Press. (1995).