

Simulación físico-matemática del secado de la zeolita con microondas.

G. Quesada Ramos* O. Herrera Martínez* K. Heinen**

*Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables. 127 s/n Marianao. CUJAE, Ciudad Habana, Cuba.

**University of Applied Sciences of Cologne. Germany

e-mail: gquesada@ceter.cujae.edu.cu

(Recibido el 15 de Marzo del 2002, aceptado el 6 de Mayo del 2003).

Resumen.

Se realiza una simulación físico-matemática del secado de la zeolita sometida a radiaciones de microondas utilizando la ley de Lambert. Las ecuaciones se expresan en un esquema implícito unidimensional, y se emplea el método numérico de diferencias finitas. La solución del sistema de ecuaciones se realiza por medio del método iterativo de Gauss-Seidel. Los resultados teóricos se comparan con los obtenidos experimentalmente.

Palabras claves: Simulación, secado, zeolita, microondas.

1. Introducción.

El par zeolita/agua ha ganado gran aceptación en el desarrollo de los llamados sistemas de refrigeración por adsorción, los que se presentan como una alternativa ecológica para los sistemas de refrigeración que emplean los dañinos freones como sustancia de trabajo.

Pero la baja eficiencia y el carácter intermitente del funcionamiento de estos sistemas, entre otros, hace que los mismos aún se encuentren en fase de perfeccionamiento para mejorar su competitividad con respecto a los sistemas de refrigeración convencionales.

En los sistemas de refrigeración por adsorción se sustituye el compresor por un reactor relleno con un material microporoso o adsorbente. Para garantizar la continuidad del ciclo de refrigeración este material tiene que ser activado, o sea, calentado, y para ello se emplean radiaciones solares, fluidos térmicos o resistencias eléctricas, como fuentes de calor. Dichas fuentes transfieren el calor, principalmente, por conducción y convección al material adsorbente, lo que en ocasiones requiere de tiempos considerables de calentamiento y elevados consumos de energía. Las causas fundamentales son:

- Baja conductividad térmica del material adsorbente.
- Calentamiento de la masa metálica del intercambiador de calor.

- Existencia de resistencia de contacto entre la superficie de intercambio de calor y el material adsorbente.

Las ventajas y aplicaciones reportadas en la literatura sobre el uso de las microondas para el calentamiento y secado de materiales, indican la posibilidad de usar las mismas como una nueva fuente de calor para estos sistemas.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio teórico del proceso de desorción utilizando las microondas y comparar los resultados del modelo teórico con los obtenidos experimentalmente.

2. Fundamentación teórica.

El principio del calentamiento con microondas puede explicarse utilizando el esquema mostrado en la figura 1.

Al introducir un material dieléctrico que contiene agua en un campo eléctrico alterno los dipolos moleculares o dipolos naturales, como es el caso del agua, tratan de seguir la orientación del campo, y en dicho intento ocurre un rozamiento intermolecular, también denominado pérdidas dieléctricas, lo cual trae como consecuencia que la energía de fricción se transforme en calor.

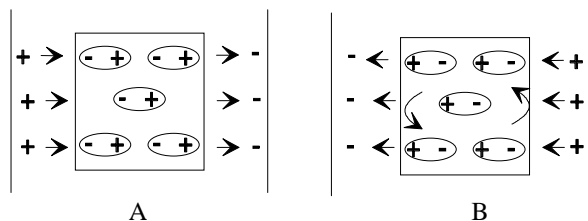


Figura. 1: A-Polarización de una molécula dipolar; B-Polarización de una molécula dipolar en un campo eléctrico alterno.

Muchos autores consideran que la distribución de la potencia transmitida en un material homogéneo e **isótropo** sigue la siguiente ley exponencial de Lambert [1][2]:

$$P_{\text{trans}(z)} = P_{\text{trans}(z=0)} \cdot e^{-2a \cdot z} \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Donde:

a: Coeficiente de atenuación de la onda

z: Punto dentro del material, cuya superficie es atravesada por la onda electromagnética [m]

$P_{\text{trans},(z=0)}$: Potencia que atraviesa la superficie en el punto $z=0$.

Según Pehl [3], el coeficiente de atenuación “a” para un material dieléctrico de bajo factor de pérdida se obtiene mediante:

$$a = \frac{\pi \epsilon_r''}{\lambda \sqrt{\epsilon_r'}} \quad (2)$$

Donde:

λ : Longitud de la onda incidente [m]

ϵ_r'' : Parte imaginaria de la constante dieléctrica relativa compleja (ϵ_r)

ϵ_r' : Componente real de la constante dieléctrica relativa compleja

Los valores de ϵ_r'' y ϵ_r' correspondientes al par zeolita/agua fueron experimentalmente obtenidos por Thiebaut [4] a una frecuencia de 2,33GHz. La recta para la parte real se puede aproximar a través de la ecuación:

$$\epsilon_r' = 0,03x + 2,53 \quad (3)$$

La curva para la parte imaginaria se aproximó mediante un polinomio de tercer grado. La función se expresa como:

$$\epsilon_r'' = 9 \cdot 10^{-6} x^3 - 1 \cdot 10^{-4} x^2 + 1,4 \cdot 10^{-3} x + 0,1891$$

Donde:

x: Contenido de humedad de la zeolita en %.

3. Simulación físico-matemática del proceso de desorción con microondas.

Para un sistema con una geometría determinada sería muy difícil de ejecutar un modelo matemático con conducción de calor y masa tridimensional, provocando también enormes gastos de tiempo y de memoria para su simulación en una computadora. Debido a esto, para el análisis del proceso de desorción las ecuaciones se expresan en un esquema implícito unidimensional, y se emplea el método numérico de diferencias finitas, el cual se adecua muy bien para procesos de conducción del calor. La solución del sistema de ecuaciones se realiza por medio del método iterativo de Gauss-Seidel. Todos los cálculos se desarrollan en un programa de computación diseñado en Pascal 7.0.

Comentario [GQR1]: Buscar en libro de química

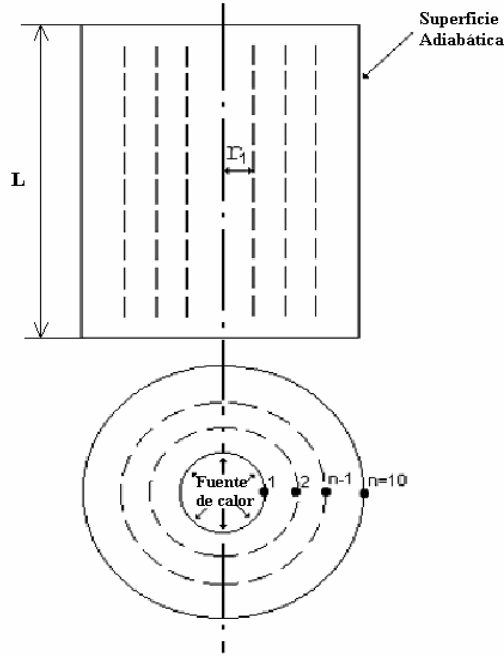


Figura. 2: Modelo físico cilíndrico utilizado para la simulación del proceso de desorción

El modelo físico escogido, que representa la geometría del reactor, tiene forma cilíndrica (Figura 2).

El espacio anular dentro del reactor, donde se encuentra ubicada la cama empaquetada de zeolita, se

divide en 9 secciones, y en él se ubican 10 puntos o nodos igualmente espaciados a una distancia Δr .

Las ecuaciones que se utilizarán en el proceso de simulación se expresan a continuación

Nodo 1

$$Q_{micro.(1)} + k_z 2\pi \left(r_1 + \frac{\Delta r}{2} \right) L \left(\frac{T_2^{\tau+1} - T_1^{\tau+1}}{\Delta r} \right) = \rho_z 2\pi r_1 L \frac{\Delta r}{2} (Cp_z - q_{iso} w) \left(\frac{T_1^{\tau+1} - T_1^{\tau}}{\Delta \tau} \right) \quad (5)$$

Nodos del 2 al 9

$$Q_{micro.(n)} + k_z 2\pi \left(r_{n-1} + \frac{\Delta r}{2} \right) L \left(\frac{T_{n-1}^{\tau+1} - T_n^{\tau+1}}{\Delta r} \right) + k_z 2\pi \left(r_n + \frac{\Delta r}{2} \right) L \left(\frac{T_{n+1}^{\tau+1} - T_n^{\tau+1}}{\Delta r} \right) = \rho_z 2\pi r_1 L \Delta r (Cp_z - q_{iso} w) \left(\frac{T_n^{\tau+1} - T_n^{\tau}}{\Delta \tau} \right) \quad (6)$$

Nodo10

$$Q_{micro,(10)} + k_z 2\pi \left(r_9 + \frac{\Delta r}{2} \right) L \left(\frac{T_9^{\tau+1} - T_{10}^{\tau+1}}{\Delta r} \right) = \rho_z 2\pi r_{10} L \frac{\Delta r}{2} (Cp_z - q_{iso} w) \left(\frac{T_{10}^{\tau+1} - T_{10}^{\tau}}{\Delta \tau} \right) \quad (7)$$

Donde:

$$Q_{mic(1 \rightarrow 10)} = P_{trans(entr. vol. fin.)} - P_{trans(sal. vol. fin.)} \quad [W]$$

k_z : Conductividad térmica de la cama empaquetada de zeolita [W/mK]

r : radios donde se encuentran los nodos [m]

Δr : Distancia entre nodos [m]

L : Altura de la cama empaquetada de zeolita [m]

T : Temperatura en los nodos [°C]

ρ_z : Densidad relativa de la cama empaquetada de zeolita [kg/m³]

Cp_z : calor específico de la zeolita [J/kgK]

q_{iso} : Calor isóterico [J/kg_{agua}K]

w : Contenido de humedad en la zeolita [kg_{agua}/kg zeolita seca]

Para el cálculo del calor específico en la zeolita Rothmeyer [5] propuso la siguiente fórmula:

$$C_Z(x, T) = 0,761 + 0,002T + Cp_a(T) \frac{x}{100\%} \quad (8)$$

Siendo:

$C_Z(x, T)$: Calor específico de la zeolita [kJ/kgK]

$Cp_a(T)$: Calor específico del agua adsorbida [kJ/kgK]

T : Temperatura de la zeolita [°C]

El calor isostérico, como su nombre lo indica, se determina para un contenido de humedad constante (isostera) y mediante la siguiente expresión:

$$q_{iso} = -L - RT \ln \left(\frac{P_0}{P} \right) - \frac{2,3\alpha R}{2D} \ln \left(\frac{P_0}{P} \right)^{-1} \quad [J/kg] \quad (9)$$

Donde:

L : Calor latente de cambio de fase líquido-vapor de agua [J/kg]

α : Coeficiente de dilatación térmica de la fase adsorbida [1/K]

R : Constante universal de los gases [J/molK]

Para calcular el contenido de humedad en la zeolita, para una presión de equilibrio y temperatura de la misma, se emplea la siguiente relación de Dubinin [6]:

$$\ln w = \ln w_0 - \frac{D}{2,3} \left[T \ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \right]^2 \quad (10)$$

Donde:

w : Contenido de humedad del cuerpo microporoso [kg_{agua}/kg zeolita seca]

w_0 : Contenido de humedad máximo del cuerpo microporoso [kg_{agua}/kg zeolita seca]

D : Coeficiente de Dubinin

T : Temperatura en el cuerpo microporoso [K]

P_0 : Presión de saturación del gas a la temperatura del cuerpo microporoso [Pa]

P : Presión del gas en la fase adsorbida [Pa]

Para la realización de los cálculos se tendrán en cuenta las siguientes condiciones:

Suposiciones:

- Se considera al reactor aislado térmicamente en su superficie exterior.
- Todas las fases permanecen en equilibrio termodinámico local para cada instante de tiempo.
- Las propiedades termofísicas, excepto el calor específico de la zeolita, permanecen invariables con la temperatura y el contenido de humedad.
- La superficie entre la cama empaquetada de zeolita y el espacio de vapor de agua se considera adiabática.
- Se considera la cama empaquetada de zeolita como un medio homogéneo e isótropo.

Condiciones iniciales (t=0):

$T|_{1 \rightarrow 10} = \text{Temperatura ambiente}$

$w|_{1 \rightarrow 10} = w_0$

$P_{\text{espacio de vapor}} = P_{\text{evap.}}$

Condiciones de frontera (t>0):

$r=r_1 \quad P_{\text{espacio de vapor}} = P_{\text{cond.}}$

$r=r_1 \text{ y } r=r_{10} \quad \partial T / \partial r = 0$

$r=r_{10} \quad \partial w / \partial r = 0$

4. Análisis de los resultados de la simulación numérica.

Los datos generales tomados para el proceso de simulación fueron los siguientes:

Condiciones iniciales ($t=0$)

$T_{amb.}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ {Temperatura ambiente}

$T_{cond.}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ {Temperatura en el condensador}

$P_{evap.}=0.006223\text{ mbar}$ {Presión del vapor de agua en el evaporador a 0°C }

$P_{cond.}=0.07520\text{ mbar}$ {Presión del vapor de agua en el condensador a 40°C }

Otros datos de interés

$L=0.22\text{ m}$ {Altura de la cama empaquetada de zeolita}

$\delta=0.05\text{ m}$ {Espesor de la cama empaquetada de zeolita}

$r_1=0.05\text{ m}$ {Radio interior de la cama empaquetada de zeolita}

$P_0=1200\text{ W}$ {Potencia de las microondas incidente en la superficie de radio r_1 }

$\Delta\tau=60\text{ s}$ {Intervalo de tiempo}

$C_{p_a}=4000\text{ J/kgK}$ {Calor específico del agua}

$w_0=0.21\text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{zeolita seca}}$ {Contenido de humedad máximo}

$D=3\text{e-}07$ {Coeficiente de Dubinin}

$\alpha=4.75\text{e-}04\text{ K}^{-1}$ {Coeficiente de expansión térmica del agua}

$\rho_z=580\text{ kg/m}^3$ {Densidad relativa de la cama empaquetada de zeolita}

$k_z=0.1\text{ W/mK}$ {Conductividad térmica de la cama empaquetada}

$\lambda=0.12\text{ m}$ {Longitud de onda de la microonda incidente}

En la figura 3 se representa el comportamiento de la velocidad promedio del calentamiento con microondas. El valor inicial de dicha velocidad es de 4°C/min , y, más tarde, disminuye hasta los 2°C/min , para mantenerse casi constante en ese valor. Esta disminución se relaciona con el comienzo del proceso de desorción, donde la mayor parte de la energía se consume en separar las moléculas de agua de la estructura zeolítica.

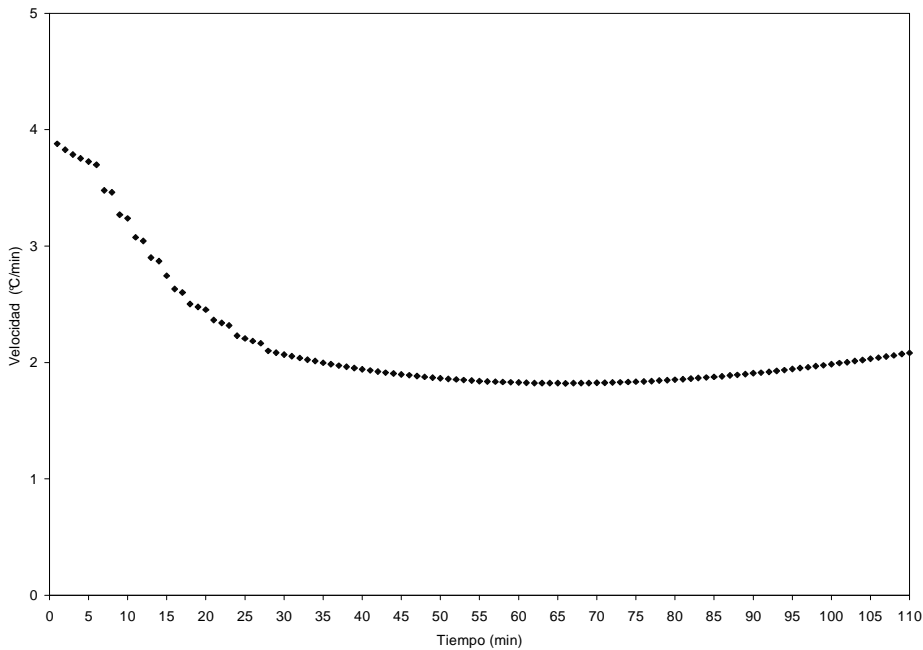


Figura. 3: Velocidad de calentamiento.

Para analizar la homogeneidad del calentamiento se analizan los resultados del comportamiento de la temperatura con el tiempo. En la figura 4 aparece un perfil de temperatura homogéneo, lo que en gran medida se debe a una distribución equitativa de la energía dentro del volumen del material. En la esquina superior izquierda se puede observar cómo el calentamiento superficial se incrementa con el tiempo, más su aumento no produce un gradiente de temperatura tan grande, y casi con la misma razón de crecimiento aumenta la temperatura en los otros puntos.

También es notable la acción instantánea de las microondas, porque la temperatura aumenta en todo el material desde el mismo comienzo del calentamiento.

La cantidad de zeolita seca presente en el volumen que ocupa la cama empaquetada se estima en 3,01kg, y la cantidad de zeolita saturada en 3,602kg. Este último parámetro representa la condición inicial para el proceso de desorción, cuyo valor dado en porciento de saturación alcanza el 20%.

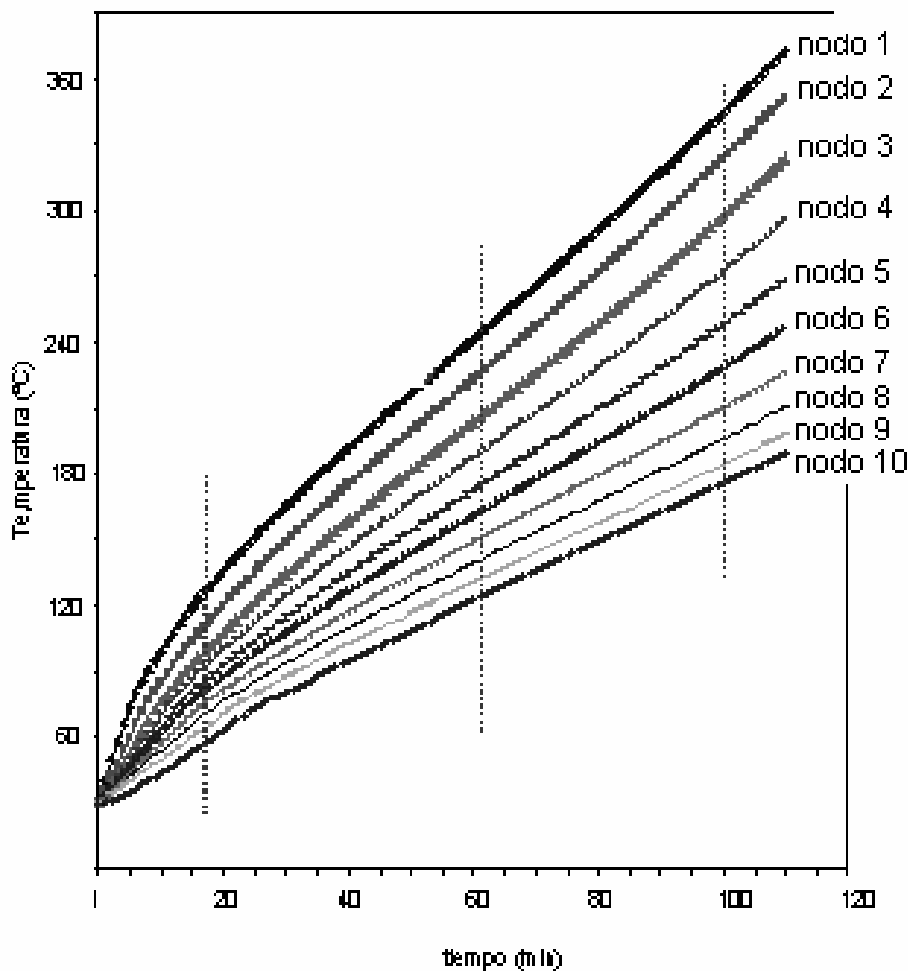


Figura. 4: Perfil de temperatura

La variación del contenido de humedad de la zeolita en el tiempo se indica en la figura 5.

Las microondas ofrecen una desorción bastante homogénea en todo el material, y al final se desorbió una cantidad de vapor de agua de 437,11g, garantizando un bajo porcentaje de saturación de la zeolita (5,1%), lo que indica un secado satisfactorio.

En la figura 6 se superponen los resultados experimentales [7] sobre los teóricos.

Los resultados experimentales, según el análisis de errores, pueden moverse en el rango entre la desviación máxima y mínima.

Al comienzo los resultados teóricos coinciden con la desviación máxima, mas adelante se nota la entrada de estos resultados teóricos en el área de valores posibles a nivel experimental. De forma general se puede considerar que, para las condiciones aquí establecidas, la simulación realizada reproduce suficientemente los experimentos.

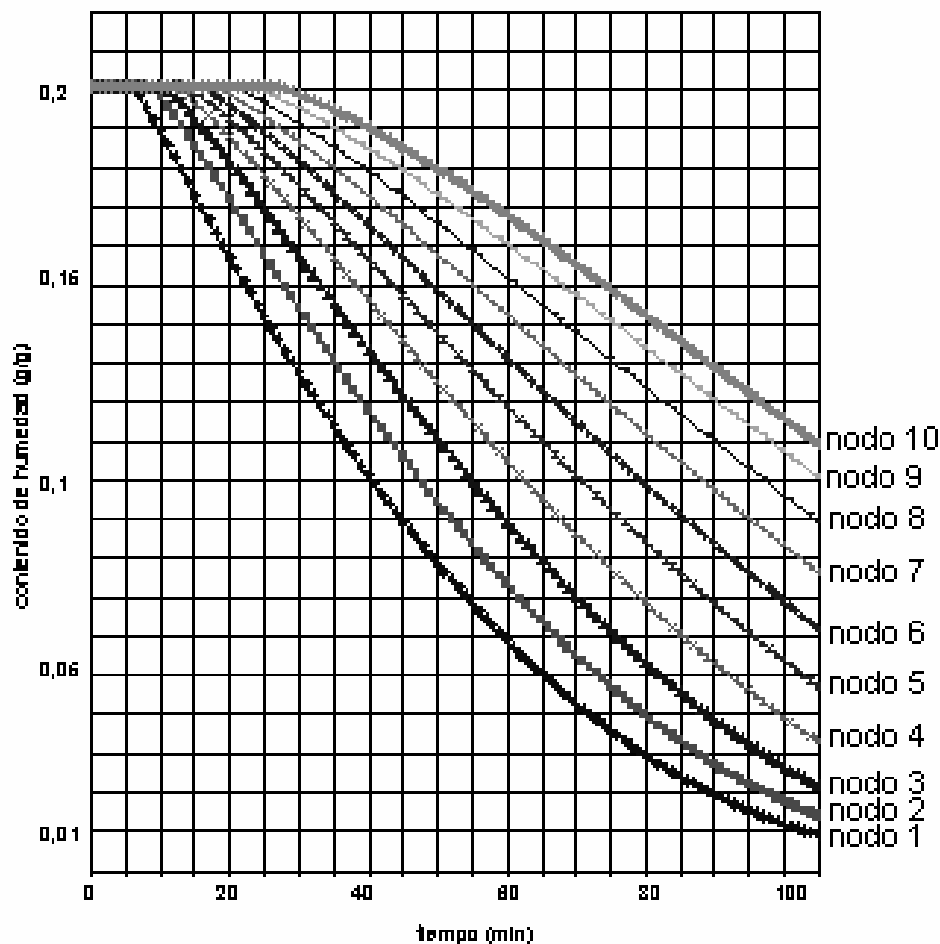


Figura. 5: Variación del contenido de humedad

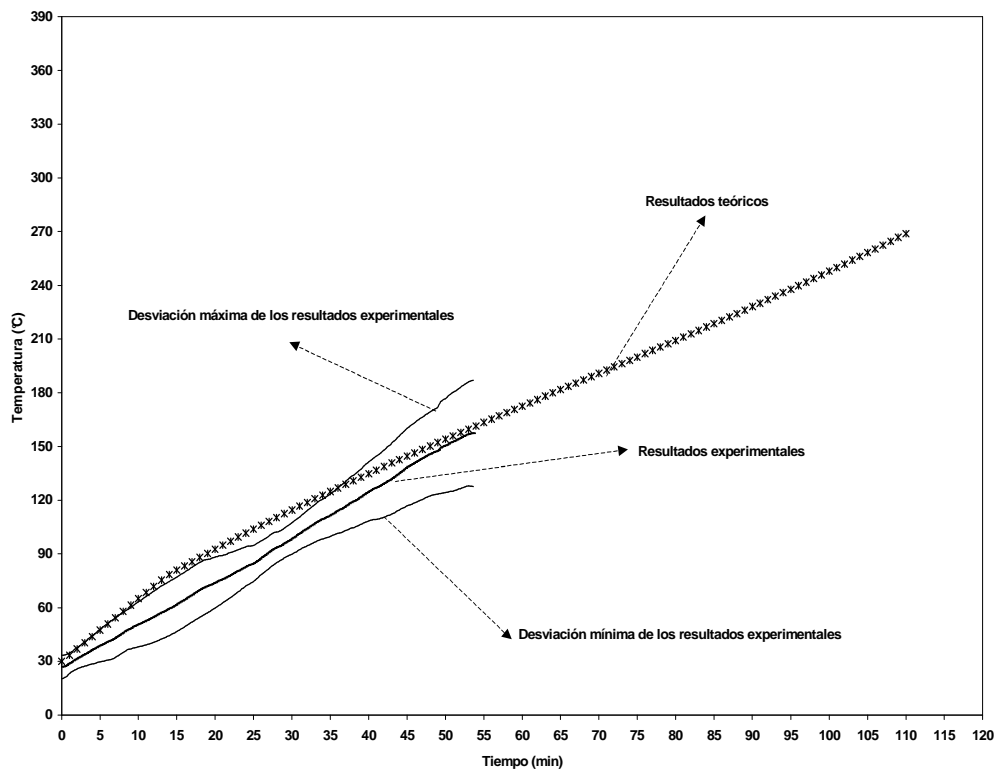


Figura. 6: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

5. Conclusiones.

Sí se considera que la potencia de las microondas se disipa exponencialmente en el medio siguiendo la ley de Lambert, esto permite distribuir la energía en todo el material según las propiedades dieléctricas presentes en cada sección. Debido a que el espesor de la cama empacada es menor que la profundidad de penetración de la onda, la distribución de la energía no produce concentraciones excesivas de energía en la superficie, y todos los puntos se calientan casi a la misma velocidad. Para el calentamiento con microondas las propiedades dieléctricas del material deciden la intensidad y distribución del calentamiento, y la influencia de la conductividad térmica del material pasa a ser de un orden de importancia inferior.

Los resultados del modelo físico-matemático empleado indicaron una homogeneidad del calentamiento y un secado bien distribuido en todo el

volumen, producto del calentamiento volumétrico del material.

El modelo aquí presentado refleja en un grado satisfactorio los resultados experimentales, no obstante sí se requiere profundizar en el estudio del proceso de desorción con microondas, donde se tengan en cuenta las características ondulatorias del campo electromagnético actuante, el proceso de simulación debe darle solución a las llamadas ecuaciones de Maxwell [8][9].

6. Bibliografía.

1. STUCHLY, S. S.: "Physical Parameters in Microwave Heating Processes", J.Microwave Power 7, No.2, pp. 117-137, 1972.
2. ZHOU, L.: "Effect of temperature gradient on moisture migration during microwave

- heating", *Drying Technology*, Vol.12, No.4, pp.777-798, 1994.
3. PEHL E.: "Mikrowellen in der Anwendung, Funk, Radar, Erwärmung", Hültig Buch Verlag Heidelberg, pp. 110, 1993, Germany.
 4. THIEBAUT, J.M.; et al.: "Dehydration and Dielectric Permittivity Measurements of a Porous, Inorganic Material (13X Zeolite) Heated with Microwave Power", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, Vol.37, No. 1, pp. 114-120, 1988.
 5. ROTHMEYER, M.: "Wärmetransformation mit dem Stoffpaar Zeolith-Wasser", Tesis de Doctorado, 1985.
 6. DUBININ, M. M.; ASTAKHOV, V. A.: "Description of adsorption equilibria of vapors on zeolites over wide ranges of temperature and pressure", *Molecular Sieve Zeolites II*, No. 44, pp. 69-85, 1970.
 7. RAMOS; G. Q.: "Aplicación de la tecnología de microondas en el proceso de desorción de un sistema de refrigeración por adsorción", Tesis de Doctorado, 2000.
 8. DE WAGTER, C.: "Computer Simulation Predicting Temperature Distributions Generated by Microwave Absorption in Multilayered Media", *J.Microwave Power* 19, pp.97-105, 1984.
 9. BORUP, D.T.: "Comparison of FFT Conjugate Gradient Method and the Finite-Difference Time-Domain Method for the 2-D Absorption", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 35, pp.383-395, 1987.

Physical-mathematical simulation of the zeolite drying with microwaves.

Abstract

A physical-mathematical simulation of the zeolite drying with microwaves using the Lambert's law is made. The equations are expressed in an unidimensional implicit scheme, and the finite differences numeric method is used. The solution of the equations system is carried out by using the Gauss-Seidel's iterative method. The theoretical results are compared with those experimentally obtained.

Key words: Physical-mathematical simulation, drying, zeolite, microwaves.