



## DISEÑO DE UN HORNO DISCONTINUO PARA EL PRE TRATAMIENTO DE ARCILLAS POROSAS

**MSc. Norlem Liaño Abascal<sup>1</sup>, Dr. C. Luis Beltrán Ramos Sánchez<sup>1</sup> y Dr. C. Alicia Rodríguez Gregorich<sup>1</sup>**

1. Facultad de Química, Universidad de Camagüey, Carretera Circunvalación Norte km 5½, Cuba. E-mail: [norlem.liano@reduc.edu.cu](mailto:norlem.liano@reduc.edu.cu); [luis.ramos@reduc.edu.cu](mailto:luis.ramos@reduc.edu.cu); [alicia.rodriguez@reduc.edu.cu](mailto:alicia.rodriguez@reduc.edu.cu)

### RESUMEN

El presente trabajo se realiza en la Planta Piloto de Reactores de la Facultad de Química, de la Universidad Ignacio Agramonte y Loynaz, de Camagüey. El objetivo es diseñar un horno, con controlador de temperatura, que alcance 500 °C, utilizando herramientas de ingeniería, para el tratamiento de materiales sólidos no metálicos.

Partiendo de un análisis de la bibliografía más actualizada se selecciona una metodología experimental planteada por U. Gross, Catedrático alemán, que permite la determinación simultánea de las propiedades termo-físicas de los materiales, en un sistema cilíndrico de cama fija.

Al aplicar el método experimental seleccionado se logra la determinación de la conductividad térmica, la difusividad térmica, la densidad real y aparente del carbonato de calcio, zeolita, arcilla paligorskita y magnesita; materiales procedentes de yacimientos naturales del territorio, así como de un sólido compuesto por una mezcla de tres sustancias con composición conocida, y ladrillo refractario (molido y entero). Los resultados obtenidos son comparables con valores reportados por la literatura técnica.

Se presentan las características y dimensiones del horno que se quiere construir sobre la base de un balance térmico, y finalmente se presenta una evaluación económica del costo de fabricación más la instalación y montaje de 564,47 USD.

### ABSTRACT

This work is done in the Pilot Plant Reactors, Faculty of Chemistry, University Ignacio Agramonte in Camaguey. The goal is to design an oven with temperature controller, which reach 500 ° C, using engineering tools for the treatment of non-metallic solid materials. It requires a temperature of 500 ° C for the treatment of solid non-metallic such as calcium carbonate, magnesite, zeolite and palygorskite since at this temperature calcinate these minerals and therefore burn the carbonaceous material entrapped therein. It aims to introduce each of these minerals in four trays that have the capacity for treatment is desired. The heating elements are distributed in the sides of the flask in order to achieve better distribution of temperature in the thermal zone. The resistors will NiCr wire. For the same thermal insulation ceramic fiber was used to support up to 1500°C temperature.

We present the characteristics and dimensions of the furnace to be built on the basis of heat balance, and finally present an economic assessment of the manufacturing cost of installation and assembly of \$564.47.

### INTRODUCCION

Las calizas tienen un amplio uso en nuestro país, como materia prima para la industria de procesos, la obtención de cementos, áridos y cal fundamentalmente. Los yacimientos de calizas para áridos suman más de cien en todo el país. En el caso de la provincia de Camagüey, existen más de quince yacimientos de calizas de ellos se explotan tres para áridos y uno para la obtención de la cal (Y Suárez, 2007).



Dentro de los recursos naturales disponibles, las arcillas constituyen unos de los minerales industriales más importantes. Las arcillas han llegado a ser una parte importante de la tecnología industrial, jugando diversos papeles en los procesos de fabricación, siendo constituyentes principales de productos tales como los plásticos y algunas sustancias alimenticias, así como interviniendo en áreas tan sofisticadas como la de la catálisis heterogénea, lo que ilustra el alcance de la utilidad de estos minerales y la conservación del medio ambiente ya que es un punto importante en la actualidad que se vive hoy.

Un momento importante en el diseño y la síntesis de todo tipo de materiales catalíticos, es sin dudas, la caracterización. El conocimiento de la composición y estructura del catalizador es definitorio para la comprensión de lo que realmente ocurre en los procesos de catálisis. A partir de esta información es posible determinar con precisión cuál es la porción activa del catalizador y cómo los cambios que tienen lugar en la estructura y composición catalítica afectan las propiedades de los sitios activos en su superficie (Rodríguez, 2010).

En el caso de la provincia de Camagüey, rica en yacimientos minerales, no existen instalaciones probadas que permitan determinar propiedades físicas y de transporte, siendo de interés abordar en el presente trabajo cómo llevar a cabo la determinación de algunas de éstas en materiales sólidos que se proyectan para la industria de procesos y de la construcción, tales como la conductividad y difusividad térmicas, densidad específica, densidad aparente y porosidad del mineral molido.

Para llevar a cabo este procedimiento se requiere de instalaciones muy costosas, tales como estufas, hornos, etc. Básicamente, un horno puede ser descrito como una cámara aislada, a alta temperatura, donde el calor se transfiere desde una fuente hacia un receptor o sumidero, principalmente por radiación. Las altas temperaturas dentro del horno se consiguen mediante el quemado de combustibles líquidos o gaseosos.

Los hornos alimentados con energía eléctrica son de un uso muy extendido por su comodidad y fácil manejo. En la actualidad con los sistemas de programación que se incorporan son muy útiles y fiables. Las cámaras de estos hornos van alojadas, en unos surcos o vías de las paredes, unos espirales de hilo conductor de energía eléctrica que actúan, de resistencia formadas por aleaciones de cromo-níquel y de otros metales cuya característica es la buena conductibilidad, según las temperaturas que se quiera alcanzar.

## **MATERIALES Y METODOS**

### **Determinación de las propiedades termofísicas y de transporte**

Para la determinación de las propiedades termofísicas y de transporte de los minerales sólidos que se están analizando se utilizó la instalación experimental diseñada y construida por (Marín, 2007).

La instalación es un horno tubular, consta de un tubo, en su interior se colocan las muestras pulverizadas objeto al análisis las cuales se pueden descargar por una tapa sin necesidad de desarmar el equipo. Para medir los gradientes de temperatura tanto en la dirección axial o radial, cada 6 cm se instalan tomas. Para obtener un flujo de calor en el rango de temperatura deseado en las muestras se utiliza como fuente una resistencia eléctrica enrollada en el exterior del equipo, utilizando canutillos de cerámicas como aislante eléctrico y así evitar accidentes y deterioro de la instalación. El control de temperatura se logra mediante un lazo de regulación automática compuesta por una termo resistencia, un controlador proporcional integral y un magnético. Para evitar pérdidas de calor, la instalación se aísla térmicamente utilizando asbesto como material aislante.



Modificación de la instalación para la medición de las propiedades termo-físicas:

El método simultáneo definido por (Gross, 1999), seleccionado en nuestro trabajo se fundamenta en el balance de energía radial en un rango muy pequeño cosa que se logra en la instalación realizándole algunas modificaciones.

Para que no exista discrepancia entre el modelo matemático y las mediciones reales deben de existir las siguientes condiciones:

1.  $TSA = TFA = TSB$

2.  $\frac{L}{R} \geq 10$

Para lograr la primera condición se cambia el material aislante de asbesto ( $k = 0.226 \text{ W/moC}$ ) por uno de mayor resistencia a la conductividad térmica, lana mineral ( $k = 0.0323 \text{ W/moC}$ ) que reduce considerablemente las pérdidas calóricas, además de construir las tapas inferior y superior del instrumento con material de cerámicas. Con esto se logran condiciones casi adiabáticas y aproximar la igualdad planteada.

La segunda condición se logra por la forma constructiva del horno:

$$L \text{ horno} = 350 \text{ mm} \quad R \text{ horno} = 52.4 / 2 \quad \frac{L}{R} = 12.34$$

La instalación modificada se muestra en la figura 1.

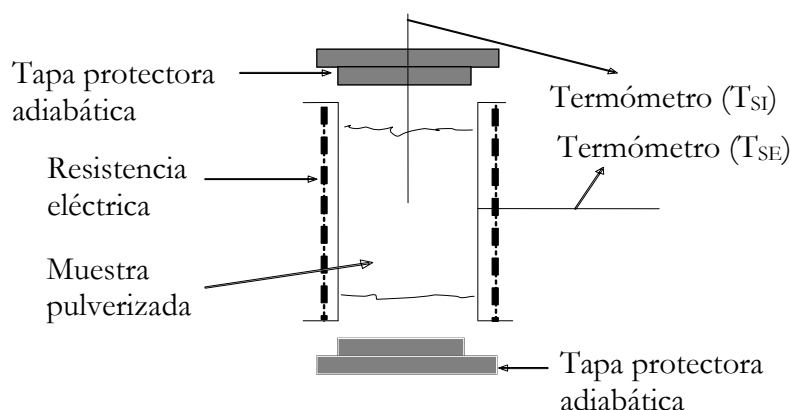


Figura 1. Instalación modificada

### Metodología para la determinación de la densidad aparente

#### Determinación de la densidad aparente

Por la importancia que reviste tener conocimientos de otras propiedades de estos minerales como es la porosidad, se necesita la densidad aparente de estas sustancias. Para la realización de esta determinación se enfoca el trabajo de laboratorio (Normalización., 2007).



Se aplica la técnica operatoria con varios cambios, entre ellos las dimensiones de los equipos utilizados y la diferencia de distancia que hay entre el embudo y el cilindro. Se utilizan dos recipientes cilíndricos para ganar confiabilidad en las determinaciones y analizar si en la técnica que se está desarrollando no se introducen errores de otra índole. Los volúmenes de estos recipientes se calcularon de dos formas:

1- El primer volumen fue determinado mediante la fórmula utilizada en el método Checo referenciado en la literatura (Ordoñez, 2008).

Con formato: Numeración y viñetas

$$V = \frac{M_2 - M_1}{\rho_{H_2O}} \quad (1)$$

Donde:

M2: Peso del picnómetro con agua (kg).

M1: Peso del picnómetro vacío (kg).

$\rho_{H_2O}$ : Densidad del agua que depende de la temperatura en °C según Tabla 3-28 (Perry y Green, 2001).

V: Volumen del Cilindro (m<sup>3</sup>).

2- El segundo volumen se estableció de forma experimental mediante el llenado del cilindro por medio de una pipeta, en la cual se midió el volumen de agua utilizado por los frascos.

Con formato: Numeración y viñetas

Estas determinaciones se realizaron en reiteradas ocasiones con el propósito de realizar un análisis estadístico y reportar el valor medio de estas densidades aparentes.

Luego, para determinar las densidades aparentes se emplea el criterio:

$$\rho(Aparente) = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (2)$$

Donde:

M2: Peso del cilindro con la muestra (kg).

M1: Peso del cilindro sin la muestra (kg).

V: Volumen del cilindro (m<sup>3</sup>).

Para el cálculo de la Porosidad se realiza según:

La porosidad total se calculó a partir de la densidad de partícula y la densidad del conjunto (Ordoñez, 2008).

$$\varepsilon = \frac{\rho_R - \rho_A}{\rho_R} \quad (3)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Porosidad

$\rho_R$ : Densidad Real

$\rho_A$ : Densidad Aparente

### Determinación de la densidad real

Para la determinación de la densidad específica se utilizó la metodología descrita por el Centro Cubano de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM), certificada por la ISO/ICE Guía 25.

El peso específico puede determinarse así:

$$\rho(Muestras) = \frac{M_2 - M_1}{V \rho_{H_2O} + M_2 - M_3} \rho_{H_2O} \quad (4)$$



Donde:

M1- Picnómetro vacío (kg).

M2- Picnómetro + muestra (kg).

M3- Picnómetro + muestra + agua (kg).

V- Volumen del picnómetro calculado (m<sup>3</sup>).

$\rho_{H_2O}$ : Densidad del agua según la temperatura en °C que tiene ésta.

Para que el ensayo esté bien, no puede existir una diferencia entre los duplicados de 0,02 g.

La exactitud fue determinada aplicando el método a muestras simples o mezclas, en las cuales se conoce la cantidad de analito añadido en defecto o en exceso con respecto a los niveles normales en las muestras. Se calcula el resultado de las pruebas como % de analito recuperado.

La precisión se determinó ensayando un número suficiente de alícuotas para una muestra homogénea y calculando la desviación estándar relativa ("The United States Pharmacopeia the National Formulary By authority of the United States Pharmacopeial Convention," 1995).

### Planteamiento del modelo del calentamiento en el dispositivo

$$Q_s = Q_M + Q_E + Q_P \quad (5)$$

$$Q_M = Q_s - (Q_E + Q_P) \quad (6)$$

Dividiendo todo por la masa del horno:

$$\frac{Q_M}{M_H} = \frac{Q_s}{M_H} - \left( \frac{Q_E}{M_H} + \frac{Q_P}{M_H} \right) \quad (7)$$

$$q_M = q_s - (q_E + q_P) \quad (8)$$

$$Q_s = I E \quad (9)$$

$$q_s = \frac{I E}{M_H} \quad (10)$$

$$Q_M = \frac{\partial(M_m C_{p_m} T_m)}{\partial t} = M_m C_{p_m} \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (11)$$

$$q_m = \frac{Q_M}{M_H} = \frac{M_m C_{p_m}}{M_H} \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (12)$$

$$Q_P = M_H \bar{C}_{p_R} \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (13)$$

$$q_P = \frac{Q_P}{M_H} = \bar{C}_{p_R} \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (14)$$

Si  $T_F = T_C = T_B = T_A = T_i$  y  $\frac{L}{R} = \frac{L}{h} \geq 10$ , entonces existen condiciones adiabáticas y  $T(t=r)$  = 0

Luego,



$$Q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (15)$$

para  $T > 0$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{2\alpha t}{R^2} + \frac{0.5r^2}{R^2} - 0.25 \right) \quad (16)$$

Para la diferencia de temperatura entre dos posiciones radiales se tiene:

$$T_r - T_0 = \frac{qr^2}{2\lambda R} \quad (17)$$

Y se puede plantear:

$$\lambda = \frac{qr^2}{2R(T_r - T_0)} \quad \text{conductividad térmica}$$

$$\alpha = \frac{Tr}{4R(T_r - T_0)} \quad \text{difusividad térmica}$$

## Diseño de experimentos

Para el desarrollo del experimento se utilizan las sustancias que se incorporan como componentes del catalizador en estudio, en la investigación para la obtención de acetona a partir de materias primas cubanas, y de materiales de la industria de la construcción.

Al interior del horno se le añade 600 cm<sup>3</sup> (volumen efectivo de la instalación) de cada una de las muestras a estudiar y se hermetiza el fondo y tope con dos tapas cerámicas. Se energiza la fuente y haciendo uso de un multímetro se determina la potencia generada por la fuente de calor (Q). Midiendo el consumo de corriente y dividiendo por el área de transferencia de calor del equipo se determina el flujo de calor específico (q) que circula en dirección radial sobre la muestra desde R hasta r(0).

En las corridas experimentales, para cada una de las sustancias sólidas, se determina cada 1 min, la temperatura interior  $T_0$  y la temperatura en la pared externa  $T_r$ ; con ambos parámetros se grafica la curva de calentamiento cuya pendiente es la velocidad de calentamiento (T). El rango de temperatura estudiado se encuentra entre 36 y 420 °C, siendo esta última la temperatura máxima de diseño del horno.

Se estudian las propiedades termo-físicas: conductividad térmica y difusividad térmica del Carbonato de Calcio, Paligorskita, Zeolita, Magnesita, una mezcla ternaria en composición conocida, y ladrillo refractario (molido y entero).

## Resultados y discusión

### Determinación de las propiedades de los materiales

Para todos los materiales sólidos independientes estudiados, así como para la mezcla catalítica de composición conocida, se construyen las curvas de enfriamiento y calentamiento a partir de las datas experimentales ver la figura 2.

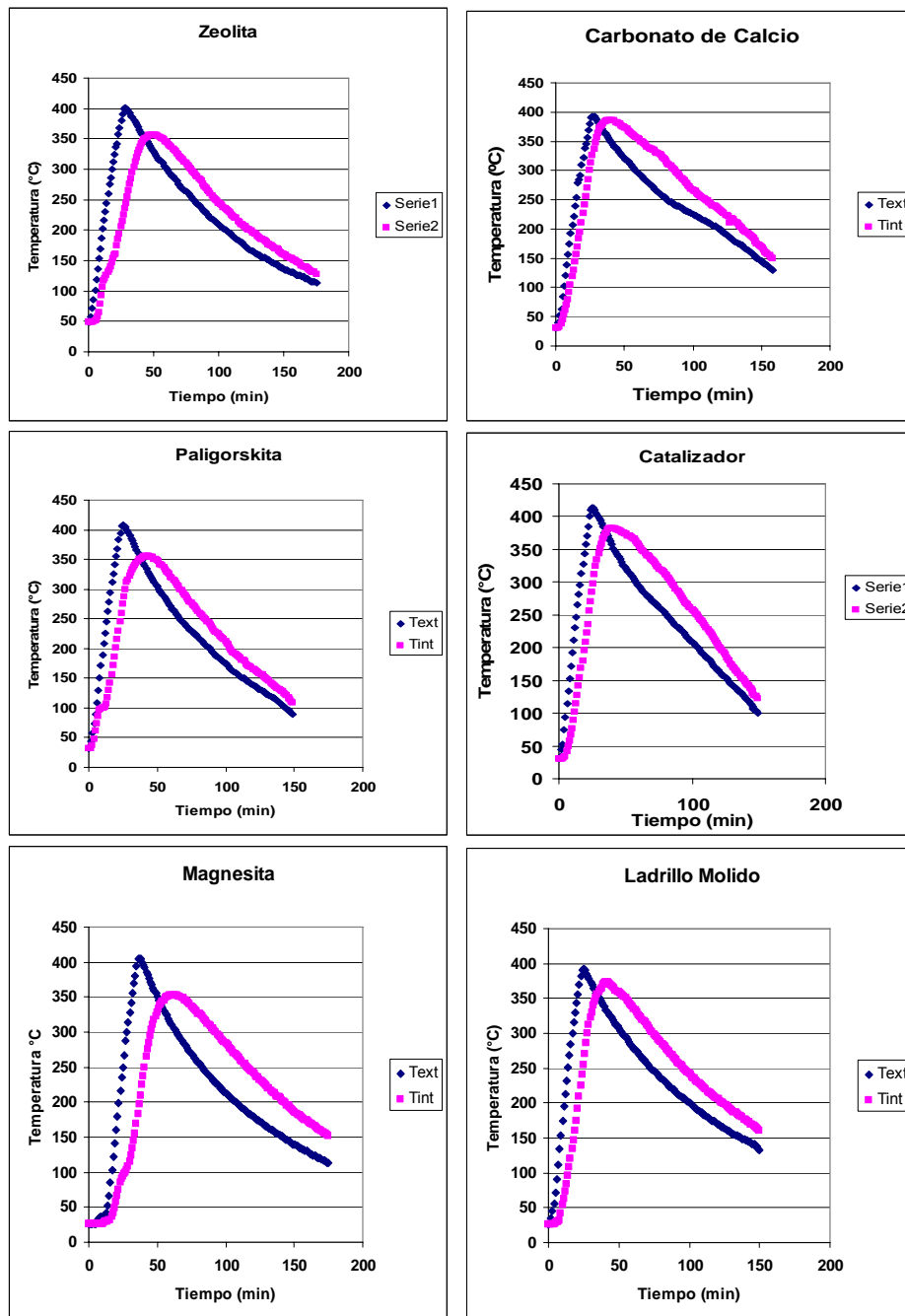


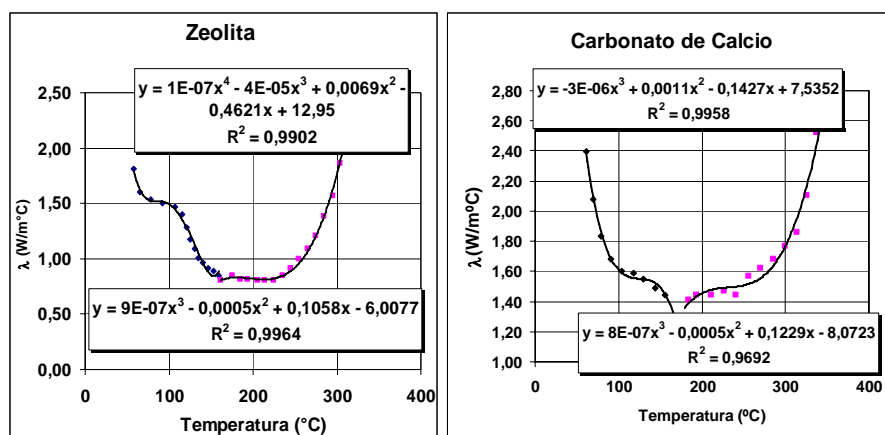
Figura 2. Curvas de calentamiento-enfriamiento de los sólidos



En todos los materiales estudiados, en la etapa de calentamiento se observa que, en los primeros 8 a 10 minutos, las curvas son casi paralelas al eje de las X ya que las muestras sólidas aún no se calientan porque el flujo de calor, o su fuerza impulsora, está calentando las paredes del horno.

Las curvas de paligorskita y zeolita muestran un cambio brusco de pendiente con respecto a las del carbonato de calcio, magnesita, las muestras de ladrillos y la mezcla ternaria, alrededor de los 100 °C, lo que puede explicarse en correspondencia con las características de estas sustancias, pues ambas son muy porosas, absorben aire y agua, y ésta última debe comenzar a evaporar justo a esa temperatura, provocando que parte de la energía térmica sea empleada en el proceso de evaporación.

Para los materiales sólidos, se determina la conductividad y la difusividad térmicas, reales empleando los datos de las curvas de calentamiento-enfriamiento y las ecuaciones del modelo planteado, obteniéndose las curvas de conductividad térmica vs temperatura y difusividad térmica vs temperatura como se muestra en las figuras 3 y 4 respectivamente, y en los que se observa un ajuste muy cercano con los valores reportados por la literatura para estas sustancias.





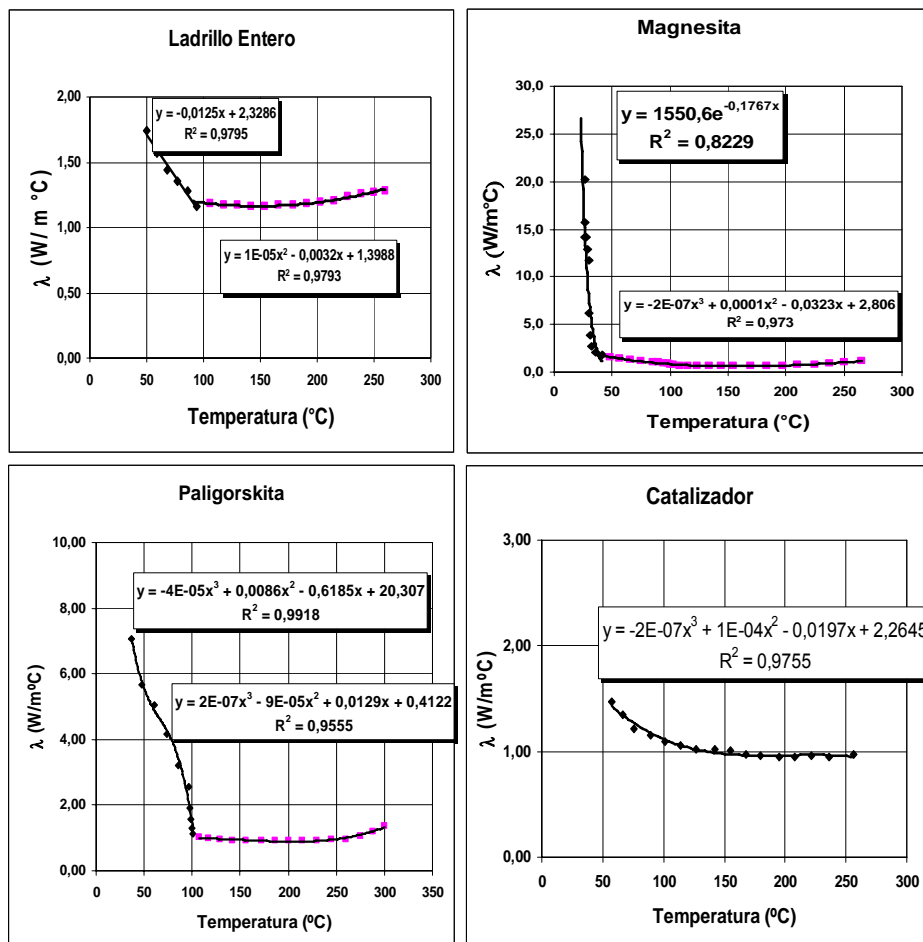


Figura 3 Curvas resultados de conductividad térmica

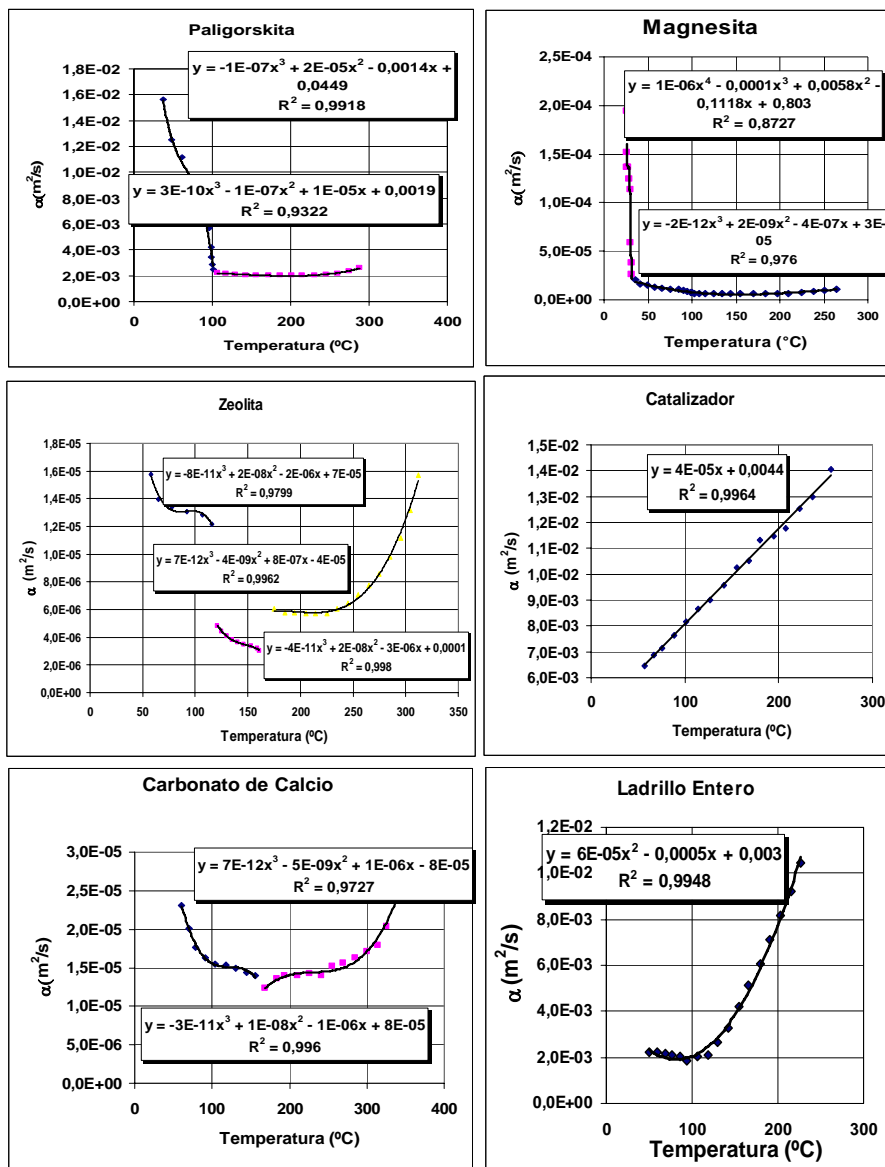


Figura 4 Curvas resultados de difusividad térmica

### Determinación de las densidades

Los resultados encontrados para la variable densidad aparente están representados en la siguiente tabla:



Tabla I Resultados experimentales obtenidos durante la determinación de la densidad aparente.

Corridas	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )				
	CaCO <sub>3</sub>	Paligorskita	Magnesita	Zeolita	Ladrillo
1	1115,82	581,33	896,69	803,01	1295,99
2	1116,02	582,65	896,72	803,6	1296,9
3	1115,94	584,26	896,5	804,2	1296,83
4	1116,26	581,87	895,99	803,9	1298,1
5	1114,97	583,66	896,04	804,8	1297,6
6	1116,65	584,33	896,398	805,2	1298,03
MEDIA	1116,24	583,02	896,39	804,12	1297,24
DS	0,5600238	1,26322867	0,31418572	0,79825852	0,81724945
CV	0,05%	0,22%	0,04%	0,10%	0,06%

Fuente: Elaboración propia

La densidad específica o real arrojó los siguientes resultados:

Tabla II Resultados experimentales obtenidos durante la determinación de la densidad específica.

Corridas	Densidad específica (kg/m <sup>3</sup> )				
	CaCO <sub>3</sub>	Paligorskita	Magnesita	Zeolita	Ladrillo
1	2810,82	1908,85	3010,14	2678,31	2918,69
2	2810,64	1908,99	3010,14	2678,29	2918,87
3	2810,27	1908,79	3010,92	2678,02	2918,57
4	2810,20	1908,83	3010,96	2678,07	2918,63
5	2810,23	1908,85	3010,98	2678,10	2918,66
6	2810,42	1908,84	3010,97	2678,08	2918,65
MEDIA	2810,43	1908,86	3010,69	2678,14	2918,68
DS	0,2514	0,0663	0,4250	0,1222	0,1009
CV	0,0089%	0,0035%	0,0141%	0,0046%	0,0035%
Intervalo (95,0%)	± 0,26386	± 0,26387	± 0,26388	± 0,26389	± 0,26390
Porosidad	60,28 %	69,46 %	70,23 %	69,97 %	55,55 %

Fuente: Elaboración propia

## Diseño del horno

Para el diseño del horno se dispone de los siguientes datos del CaCO<sub>3</sub>:Tabla III Propiedades del CaCO<sub>3</sub>

Conductividad Media (W/m°C)	1,44
Porosidad de la Cama (%)	60
Volumen del Sólido (kg)	50
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2810,4337

## Consideraciones

- Las partículas alcanzan una temperatura uniforme en cualquier instante dado
- La velocidad de transferencia de calor estará dada por la diferencia de temperatura entre el sólido y el aire caliente en el interior de la cámara



-Los cambios de volúmenes del sólido y el aire son despreciables con los cambios de temperatura

-El horno funcionará adiabáticamente

-Se calculó el volumen que ocupaba el sólido, que es aproximadamente de 18 L.

-El largo de la cámara es tres veces mayor que el ancho, y se contempla que  $a = 0,30$  m, por lo que  $l = 0,90$  m.

-En el horno se realizó una distribución de cuatro bandejas con un espesor de 0,001 m con una altura de 0,02 m, ahora con estas dimensiones se calculó el volumen real de sólido a tratar por horneada.

Para determinar la altura real de la cámara interna se determinó por la siguiente ecuación:

$$H_{ci} = N h_b + \sum \text{NúmeroEspacios} + e_b N \quad (18)$$

Donde:

$H_{ci}$ : altura interna de la cámara

$N$ : número de bandejas

$h_b$ : altura de la bandeja

$e_b$ : espesor de la bandeja

Para la determinación del ancho y del largo real se le sumó los valores de la holgura lateral y la del fondo y de esa forma se tienen los valores reales de la cámara interior y de las bandejas que estarán en su interior.

### Área de la mufla

Es el área que constituye el espacio que será calentado por las resistencias eléctricas y almacenará la carga a calentar.

De acuerdo a las dimensiones antes mencionadas, se tiene que esta área será de:

$$A = 2(al) + 2(ah) + 2(lh) \quad (19)$$

$A$ = Área de la cama interior

$A_b = (al)$

$A_b$ = Área de la bandeja

### Ancho de las paredes.

Las paredes están formadas de 3 capas de material cerámico refractario con las siguientes especificaciones:

Con estos materiales se obtendrá una pared con un espesor de 5 pulgadas, además de llevar fibra cerámica tipo colchoneta en las paredes del gabinete.

Tabla IV: Espesor y conductividad de los materiales

	Material	Espesor (cm)	Conductividad Térmica (W/mK)
<b>Primer Material</b>	Tabla de Fibra Cerámica Refractaria	5,08	0,17
<b>Segundo Material</b>	Colchoneta de Fibra Cerámica Refractaria	5,08	0,18
<b>Tercero Material</b>	Tabla de Fibra Cerámica Refractaria	2,54	0,17

Fuente: (Buelna y Zúñiga, 2009)



Balance de calor en las paredes.

Resistencia térmica que ofrecen las paredes

$$R_T = \frac{C_1}{K_1 A} + \frac{C_2}{K_2 A} + \frac{C_3}{K_3 A} \quad (20)$$

Donde:

Cx: espesores de los materiales utilizados

Kx: conductividades de los materiales utilizados

A: Área de la cámara interior del horno

Con esta fórmula se obtendrá la potencia que necesitarán disipar las resistencias eléctricas para obtener la temperatura deseada.

$$q_p = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\alpha_i A} + R_T + \frac{1}{\alpha_e A}} \quad (21)$$

$\alpha_e$ : es el coeficiente por convección y radiación al ambiente, y por las consideraciones que existen este coeficiente se desprecia.

$q_p$ : calor consumido por las paredes del horno

$\alpha_i$ : es el coeficiente interno por convección y radiación que según (Pavlov, Romankov, y Noskov, 1981).

$$\alpha_i = 9.79 + 0.07 \Delta T \quad (22)$$

Balance de calor consumido por las muestras que están en las bandejas

Resistencia térmica que ofrecen las muestras en las bandejas

$$R_T = \frac{4C_m}{K_m A_b} \quad (23)$$

$$A_b = al \quad (24)$$

Donde:

$C_m$ : es el espesor de la muestra que estará en la bandeja

$K_m$ : es la conductividad de la muestra que se obtuvieron con los análisis experimentales

$A_b$ : es el área de la bandeja

$q_b$ : calor consumido por las muestras que están en las bandejas

La resistencia que ofrecen las bandejas al paso del flujo de calor se desprecian debido a que presentan una alta conductividad térmica

$$q_b = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (25)$$

Balance de calor total consumido en el horno

$$q_t = q_p + q_b \quad (26)$$

### Selección del material aislante para el horno:

Para las paredes del horno se eligió por sus características la fibra cerámica, en forma de tablas y colchoneta (EXPODIME, 2009).

Las fibras cerámicas son resistentes, livianas y flexibles, y presentan una excelente resistencia al manipuleo y a la erosión; no contiene ligante alguno debido al proceso por la que es elaborada, en el cual se utilizan fibras cerámicas de primerísima calidad.

Las mantas cerámicas no son afectadas por la mayor parte de los ácidos o agentes corrosivos, exceptuando a los ácidos hidrofluorhídricos, fosfóricos, y álcalis concentrados.



Se comporta bien tanto en atmósferas reductoras como oxidantes. Si resultara mojada por aceites, agua o vapor, sus propiedades térmicas y físicas se restablecen en su totalidad al secarse.

La temperatura límite de uso continuo de las mantas cerámicas es de 1500 °C, el punto de fusión es a los 1760 °C, el color es blanco, y las densidades disponibles son de 64, 96, 128, 160 y 192 kg/m<sup>3</sup>.

### Selección de la resistencia eléctrica:

Para las resistencias eléctricas se utilizará un material especial para hornos de alta temperatura llamado Nicromo, el cual es una aleación de níquel-cromo y está diseñado para trabajar con temperaturas de hasta 1260 °C, el cual se implementó en forma de espirales a través de tubos cerámicos, ubicados en las paredes laterales de la cabina. Estas están conectadas a un circuito eléctrico que, a su vez, es controlado por un pirómetro que manda una señal a través de un termopar, ubicado dentro de la cabina hacia un relevador de estado sólido, con la finalidad de controlar la temperatura requerida.

Los hornos alimentados con energía eléctrica son de un uso muy extendido, por su comodidad y fácil manejo. En la actualidad, con los sistemas de programación que se incorporan son muy útiles y fiables. En las cámaras de estos hornos van alojadas, en unos surcos o vías de las paredes, unos espirales de hilo conductor de energía eléctrica, que actúan de resistencia formadas por aleaciones de cromo-níquel y de otros metales cuya característica es la buena conductibilidad, según las temperaturas que se quiera alcanzar.

Hay que tener en cuenta que un kilovatio hora desarrolla, aproximadamente, 850 Cal/kg. Aunque parezca que el uso de esta energía eléctrica resulta demasiado cara, si contamos todas las ventajas que puede proporcionarnos, todos estos inconvenientes se ven reducidos e incluso resultar ventajosos.

La cochura eléctrica tiene lugar en aire puro, o sea, en atmósfera oxidante, aunque existen algún tipo de horno, especialmente los de silla y de hilo de níquel-cromo, que toleran se introduzcan en la cámara medios reductores, con el fin de provocar una reducción de oxígeno y cambiar los efectos colorantes de los distintos óxidos. (Buelna y Zúñiga, 2009).

### Cálculo de la resistencia eléctrica

Con la potencia obtenida anteriormente se puede calcular el valor de la resistencia necesario para el funcionamiento óptimo del horno, también se puede obtener un dato necesario, que es la corriente con la que se alimentará el circuito eléctrico (Astigarraga).

Las resistencias que se utilizarán serán del tipo arrollado en espiral sobre tubos cerámicos. Esta resistencia será calculada con el coeficiente de resistividad, este coeficiente nos sirve para saber cuánto cambia la resistencia con los cambios de temperatura, y todo esto es a la temperatura de trabajo (Molina, 1993).

$$R_T = C_T R_{TM} \quad (27)$$

La longitud necesaria del material a utilizar

$$L = \frac{R}{R_T} \quad (28)$$

Para comprobar si esa longitud del material es capaz de resistir la carga se despeja en la siguiente ecuación:

$$P = k \pi d L \quad (29)$$

$$k = \frac{P}{\pi d L} \quad (30)$$



Donde:

P: potencia suministrada

K: carga que resiste el material

d: calibre

L: longitud del nicromo



## Resultados y discusión

Tabla V: Dimensiones del horno

	Bandejas	Cámara Interna
Ancho (a) m	0,30	0,32
Largo (l) m	0,90	0,92
Altura (h) m	0,02	0,42
Área (m <sup>2</sup> )	0,27	1,6304
Cantidad	4	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla VI: Características eléctricas del horno

Potencia	3500 W
Voltaje	220 V
Intensidad	15,91 Ampere
Resistencia	13,83 $\Omega$
Resistencia térmica	0,68 $\Omega$ /m
Longitud del nicromo	20,34 m
Carga que resiste el nicromo	3,779 W/cm <sup>2</sup>

Tabla VII: Resultados del cálculo de las resistencias y la energía

	Paredes	Bandejas con Muestras
Resistencias térmicas (K/ W)	0,448	0,2057
Balances de Calores (W)	1027,56	2309,19
Balance de Calor Total (W)	3336,74	

Fuente: Elaboración propia

Por tanto la potencia del horno será de 3336,74 Watts. Tomando en cuenta las pérdidas en las puertas del horno y para efecto de los cálculos, se tomará como la potencia del horno con un valor de 3500 W (3,5 kW).

## Análisis económico del horno

### Costo del material de construcción

Se utilizaron para el primer aislante dos tablas de 2 pulgada de espesor (0,0508m), de 24 pulgada por 48 pulgada (0,609m x 1,218m) de largo por ancho, con un precio cada una de 56,32 USD y una tabla de 2 pulgada de espesor, de 24 pulgada x 36 pulgada (0,609m x 0,9135m) de ancho por largo con un precio cada una de 42,44 USD ("Ceramic Fiber Board," 2011).

Para el segundo aislante se utilizó un rollo de 2 pulgada de espesor (0,058m), de 48 pulgada (1,218m) de largo por 12,5 pie (3,81m) de ancho con un precio de 101,5 USD ("Ceramic Fiber Blanket," 2011).

Para el tercer aislante se utilizaron cuatro tablas de 1 pulgada (0,0254m) de espesor, de 24 pulgada x 48 pulgada (0,609m x 1,218m) de largo por ancho, con un precio cada una de 28,48 USD y dos tablas de 1 pulgada (0,0254m) de espesor, de 24 pulgada x 36 pulgada (0,609m x 0,9135m) de largo por ancho, con un precio cada una de 21,36 USD ("Ceramic Fiber Board," 2011).

Por lo que se puede decir que el costo total del aislante a utilizar en la fabricación del horno es de 413,22 USD





#### ▪ Costo del elemento calefactor.

Según ("Cynebar - Nichrome wire N80 price list - December 2009,") el costo de la resistencia eléctrica (Ni-Cr) es de 2 USD/m lineal. Teniendo en cuenta la información de la tabla 10, de este capítulo, y que el largo de la resistencia a utilizar es de 20,34 m, entonces el costo de este elemento asciende a 42 USD.

Por tanto el costo de fabricación del horno se estima como la sumatoria de los costos determinados para los elementos antes tratados, estableciéndose en 455,22 USD.

#### ▪ Costo de instalación y montaje.

Se estima este costo con un 10 % del costo de fabricación del horno, equivalente a 45,52 USD.

Por otra parte, se estima el costo de materiales eléctricos como un 5 % del costo de fabricación del horno, equivalente a 22,76 USD.

Para la instrumentación y el sistema de control se valora un 6 %, por lo que se estima en 27,31 USD.

Y por último se consideró un 3 % para ingeniería y supervisión, lo que se estima en 13,66 USD.

Finalmente el costo total de la instalación de este nuevo equipo se valora como la suma de su costo de fabricación más la instalación y montaje, por lo que ascienda a 564,47 USD.

Este valor comparado con los precios internacionales, ubica los resultados obtenidos en este trabajo en una posición competitiva, ya que un horno con características similares en tecnología y tamaño, el país lo tiene que adquirir en el mercado internacional a un precio de 5985 USD (FOB) (Emison, 2011).

## CONCLUSIONES

Se determinan las propiedades tales como la densidad real y aparente, la conductividad térmica y la difusividad térmica, en cuatro minerales sólidos no metálicos de origen cubano, estableciéndose un comportamiento semejante a la literatura, con gran valor práctico para la comercialización y aplicación de estos productos en la industria de procesos.

La técnica experimental utilizada para estos minerales es generalizable para otros materiales por lo cual constituye un aporte muy importante a la industria química cubana.

Se dimensionó un horno con una capacidad de 50 kg con un valor de 564,47 USD, que comparado con otros de igual capacidad y características en el mercado internacional con un valor de 5985 USD ahorra al país una suma de 5420,53 USD.

## BIBLIOGRAFÍA

- Astigarraga, J. Hornos Industriales de resistencias.
- Buelna, V. H., & Zúñiga, F. (2009). Horno eléctrico para tratamientos térmicos 10. Retrieved from <http://expodime.cucei.udg.mx/sep2009/memorias/hornoelectrico.pdf>
- Ceramic Fiber Blanket. (2011). Retrieved 22 de octubre, 2011, from <http://www.ceramaterials.com/ceramicfiberblanket.html>
- Ceramic Fiber Board. (2011). Retrieved 22 septiembre, 2011, from <http://www.ceramaterials.com/ceramicfiberboards.html>
- Cynebar - Nichrome wire N80 price list - December 2009. Retrieved 2011
- Emison. (2011). HORNOS ELÉCTRICOS SERIES TM y TL. Retrieved 15 de septiembre, 2011
- EXPODIME, M. D. L. X. (2009). Horno Eléctrico Para Tratamientos Térmicos. Retrieved from <http://www.fac-gk.com.ar/index.php>
- Gross, U. (1999). Folleto Método Simultaneo para la determinación de propiedades termofísicas y de transporte: Institut Fürwarme Tecchnik and Termodinamik Freiberg University.
- Marín, C. M. (2007). Diseño, construcción y montaje de una instalación piloto con fines docentes e investigativos. Unpublished Tesis presentada en opción al Título de Máster en Análisis de Procesos, Universidad Ignacio Agramante y Loynaz, Camagüey.
- Molina, A. (1993). *Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria*. Valencia.



- Mortero Seco en Polvo-Determinación de la Densidad Aparente, 567:2007 C.F.R. (2007).
- Ordoñez, S. (2008). Técnicas Experimentales en Metalurgia Retrieved 11 de Julio, 2011, from [www.metalurgia.uda.cl](http://www.metalurgia.uda.cl)
- Pavlov, K. F., Romankov, P. G., & Noskov, A. (1981). *Problemas y Ejemplos para el curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química*. Moscú.
- Perry, R., & Green, D. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* (Cuarta ed.). Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Rodríguez, A. (2010). Diseño tecnológico de una planta para la producción de acetona a partir de materias primas nacionales. Unpublished Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte y Loynaz Camagüey.
- Suárez, Y. (2007). *Diseño de un catalizador sólido para la deshidratación del ácido acético*. Unpublished Tesis en opción al Grado de Master en Análisis de Procesos, Universidad de Camagüey, Camagüey.
- Suárez, Y., Rodríguez, A., Ramos, L., & Marín, C. (2008). Non-metallic minerals supported calcium carbonate catalysts for acetic acid dehydration. *11º Congreso Mediterráneo de Ingeniería Química*.
- The United States Pharmacopeia the National Formulary By authority of the United States Pharmacopeial Convention. (1995). Washintong DC.