



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **HORNO SEMICONTINUO PARA COCCIÓN DE CERAMICA**

**Luis Alejandro Piraban**, [luis\\_apira@hotmail.com](mailto:luis_apira@hotmail.com). Universidad Nacional de Colombia. Diagonal 84 82-22, Bogotá, Colombia.

**Fabio Emiro Sierra**, [fesierrav@unal.edu.co](mailto:fesierrav@unal.edu.co). Universidad Nacional de Colombia. Carrera 30 #45 -20, edificio 453, Oficina 401. Bogotá Colombia

**Javier Alejandro Vargas Jiménez**, [javargasj@unal.edu.co](mailto:javargasj@unal.edu.co). Universidad Nacional de Colombia. Calle 144 # 12-31 apto 102, Bogotá, Colombia.

***Resumen:** Se presenta el diseño de un horno desarrollado para la cocción de artesanías cerámicas, enmarcado dentro del uso racional y eficiente de la energía térmica. El equipo ataca la problemática de un municipio Colombiano que basa su economía en la producción de artesanías y dicha actividad va en detrimento de la salud de sus habitantes. La meta es conseguir una solución factible, que reduzca el impacto ambiental producto de la alfarería. De esta manera partiendo de un estudio de los requerimientos del proceso de curado de la arcilla surge todo el diseño del horno y su respectivo funcionamiento. Por último se presentan los resultados de las pruebas realizadas hasta el momento, estableciendo desde luego parámetros de comparación a nivel energético entre el equipo desarrollado y un horno típico artesanal. Lo cual lo ubican en una condición mucho más favorable frente a los hornos de la región.*

***Palabras claves:** Ciclos, radiación, recirculación de gases, periódico, semicontinuo.*

### **1. INTRODUCCION**

Teniendo en cuenta la dependencia mundial a nivel energético de los combustibles fósiles y el impacto ambiental que estos generan, el mundo entero se ve obligado a estar en continuo avance frente al uso adecuado de la energía, con el fin de disminuir el calentamiento global. Una radiografía de este fenómeno es el municipio Colombiano de Ráquira donde es 75% de la población, de un total de 12.800 deriva su sustento económico de la producción de artesanías cerámicas, mediante la utilización de hornos a carbón. El censo total de los talleres existentes indica que hay cerca de 273, de los cuales solo el 9.8% funcionan con gas natural o propano, debido a la baja capacidad de suministro de la red de gas, los restantes emplean carbón. El uso del carbón causa un impacto ambiental negativo, como lo indican las cifras que, en 2007 registraron 839 casos de niños menores de cuatro años con enfermedades respiratorias, en 2009 el 90% de las consultas durante el mes de septiembre fueron por la misma afección anteriormente mencionada.

Teniendo en cuenta la importancia del desarrollo de la alfarería para la economía de sus habitantes y que el ejercicio de la misma genera un deterioro de la salud de los habitantes del municipio, el presente proyecto pretende darle solución a tal situación mediante el desarrollo de un horno eficiente energéticamente, cuyo objeto es la reducción del impacto ambiental, a través de la disminución de los índices de consumo energético, sin ir en detrimento de la productividad de los talleres.

Para abordar la problemática, inicialmente se realizaron pruebas y estudios sobre las características y comportamiento térmico de la arcilla usada por los artesanos, las cuales sirvieron de base para el diseño y posterior validación del mismo.

### **2. CARACTERIZACION DE LA ARCILLA**

Previo al desarrollo del equipo se hizo necesario caracterizar la arcilla y conocer sus propiedades físico-químicas y térmicas, para ajustar el diseño a las necesidades de proceso requeridas.

#### **2.1 Prueba química**

Los mayores componentes son sílice y alúmina el primero de estos, es apreciable porque contribuye a mejorar la resistencia, plasticidad y fusibilidad del material, por su parte la alúmina contribuye a la refractariedad y resistencia de la arcilla. Se plantea que el porcentaje mínimo de alúmina para tener una buena resistencia mecánica es de 20%. Por su parte componentes como el  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  actúan como fundentes en el material. Y el óxido de hierro le da la pigmentación rojiza a la arcilla.

**Tabla 1. Análisis químico de la arcilla**

Compuesto	Porcentaje en volumen (%)
SiO <sub>2</sub>	55.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.77
FeO	0.94
MgO	0.33
CaO	0.28
Na <sub>2</sub> O	1.64
K <sub>2</sub> O	1.47
TiO <sub>2</sub>	1.03

## 2.2 Análisis térmico diferencial (ATD)

Se basa en el cambio de temperatura de la muestra debido a procesos endotérmicos y exotérmicos, producto de las reacciones químicas y cambios de fase asociados al proceso de cocción. La temperatura de la muestra se compara con la temperatura de una masa inerte (que no sufre transformaciones químicas) una disminución de temperatura indica un proceso endotérmico y viceversa. De acuerdo con esto estos son los minerales detectados en el análisis. Velocidad de calentamiento: 10°C/min. Peso de las muestras: 20 mg

**Tabla 2. Análisis térmico diferencial**

Temperatura (°C)	Mineral	Proceso
0-100	Agua	Endotérmico
210-230	Vermiculita	Endotérmico
235-270	Gibbsite	Endotérmico
300-320	Goetite	Endotérmico
460-520	Caolinite	Endotérmico
565-570	Quartz	Endotérmico
600-740	Pyrophyllite	Endotérmico
980-1000	Caolinite	Exotérmico

Se presenta un pico endotérmico debido al agua adsorbida alrededor de 60-70°C, tiene otro pico endotérmico entre 460-520°C producido por la caolinita debido a su deshidroxilación (agua contenida químicamente), además entre 980 y 1000°C aparece un pico exotérmico debido a la formación de una nueva fase mineral denominada mullita. Entre 210-230°C hay un pequeño pico endotérmico, asociado a la pérdida de agua entre capas de la vermiculita.

## 2.3 Análisis Termo gravimétrico

Consta en medir la pérdida de peso de la arcilla en función de la temperatura asociada a la pérdida de agua y a pérdida por calcinación. La siguiente tabla contiene información del análisis gravimétrico (alteraciones del peso en función de la temperatura). Velocidad de calentamiento: 10°C/min. Peso de las muestras: 40 mg

**Tabla 3. Análisis Termo gravimétrico**

Temperatura(°C)	Pérdida de peso %
0-100	3.55
100-300	1.13
300-900	4.1
0-1000	8.78

## 2.4 Contracciones

Se miden las contracciones de la muestra asociadas al proceso de remoción de agua, a la ruptura del retículo cristalino, a la presencia de la fase vítrea. El tiempo de contracción al aire es de 24 horas, a 105°C es a 12h. La siguiente tabla refleja el porcentaje de contracción lineal del material bajo diferentes condiciones de secado.

**Tabla 4. Contracciones**

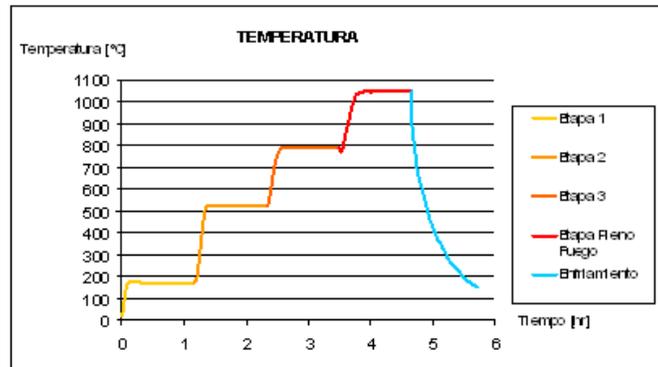
Tipo de Secado	Contracción (%)
Secado al aire	5.18
Secado a 105°C	7.71
Quemada en Ráquira	10.30
Quemada a 1000°C	11.30
Quemada a 1100°C	12
Quemada a 1200°C	12

La contracción aumenta a medida que se eleva la temperatura hasta 110°C y a partir de 1200 permanece constante lo cual indica que variaciones fisicoquímicas asociadas a cambios de volumen han cesado a esa temperatura. La contracciones son atribuidas a al caolinita principalmente ya que en la última etapa de cocción este mineral exhibe su mayor contracción

### 2.5 Curvas de cocción

Teniendo en cuenta que las curvas de cocción que se efectúan en los talleres artesanales varían de acuerdo al tipo de horno (tamaño, combustible, tiraje del horno) y oscilan entre rangos de 16 a 144 horas, es necesario determinar una curva de cocción, con mínimos tiempos de cocción y elevadas velocidades de calentamiento. Según la caracterización previa hecha de la arcilla hay que tener un calentamiento lento hasta los 100°C, debido al agua contenida intersticialmente en la arcilla, con el fin de no generar elevadas velocidades de secado que puedan fracturar las piezas a partir de allí, se puede hacer un ascenso rápido hasta los 300°C, luego hasta los 500°C debe haber un ascenso lento para evitar roturas y para por ultimo llegar hasta la temperatura de ceramización con un ascenso rápido.

Tomando como punto de referencia los puntos críticos de la arcilla, se hicieron pruebas de choque térmico para evaluar los máximos deltas de temperatura admisibles por la arcilla, esto para poder evaluar la viabilidad de utilizar un horno por etapas que hasta el momento es la solución contemplada, estas pruebas determinaran el número de etapas requeridas en el horno, de allí que las curvas presentadas registren las temperaturas ambientes de una mufla eléctrica, con probetas de 1cm de espesor.



**Figura 1. Prueba inicial de cocción con choque térmico con cuatro escalones de temperatura**

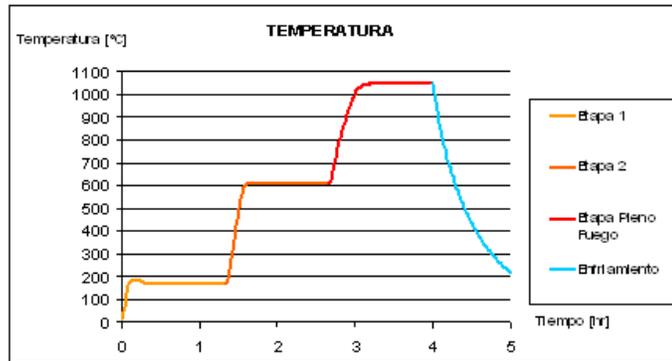


Figura 2. Prueba inicial de cocción con choque térmico con tres escalones de temperatura

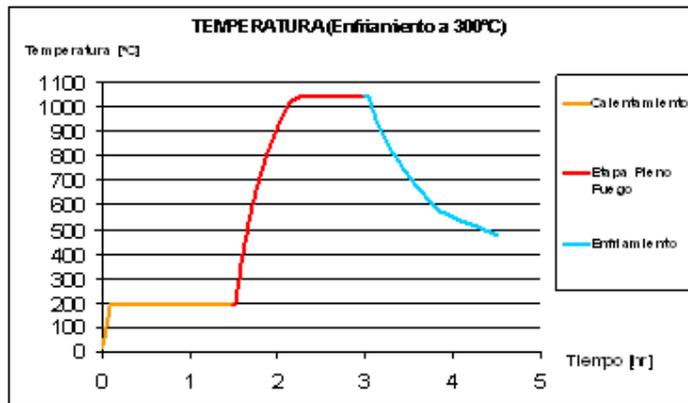


Figura 3. Prueba inicial de cocción con choque térmico con dos escalones de temperatura

Bajo métodos de ensayo y error se llegó a la primera curva presentada en la figura 1, donde se tienen cuatro escalones de temperatura sobre los 190, 510, 800 y 900°C y un enfriamiento al ambiente, sometiendo las probetas a cuatro choques térmicos, bajo los cuales no ocurrió ninguna fractura, pero sí pequeñas fisuras. Pretendiendo exigir más a la arcilla se sometió a un curado con tres choques térmicos a 190, 600 y 1050°C y un enfriamiento al aire libre, obteniendo como resultado ninguna rotura. La última prueba fue con dos escalones de temperatura 190 y 1050°C y un enfriamiento a 300°C, sin ninguna fractura persistiendo las pequeñas fisuras. De estas curvas se puede visualizar claramente, las tres etapas necesarias: secado, cocción y enfriamiento además la conclusión preponderante es que el ciclo se puede realizar en 5 horas, con un enfriamiento al aire a partir de los 300°C, sin riesgo de fractura. Adicional a esto después del secado se puede subir hasta la máxima temperatura con una velocidad de 30°C/min., con la cual se realizó la última prueba, además se decide que un enfriamiento a 300°C evita la presencia de fisuras, las cuales se asocian al enfriamiento a la temperatura ambiente.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

Teniendo en cuenta el potencial térmico presente en los gases de combustión residuales de la chimenea y de acuerdo a las pruebas realizadas, la idea general es la de un horno rotatorio con cuatro cámaras: endague, secado, cocción y enfriamiento. La dirección del fuego es la siguiente: la cámara de cocción es la única con aportación de combustible, los gases residuales de estas pasan a la cámara de enfriamiento para realizar un enfriamiento controlado y luego pasan a la cámara de secado. La siguiente figura muestra la dirección del flujo de calor.

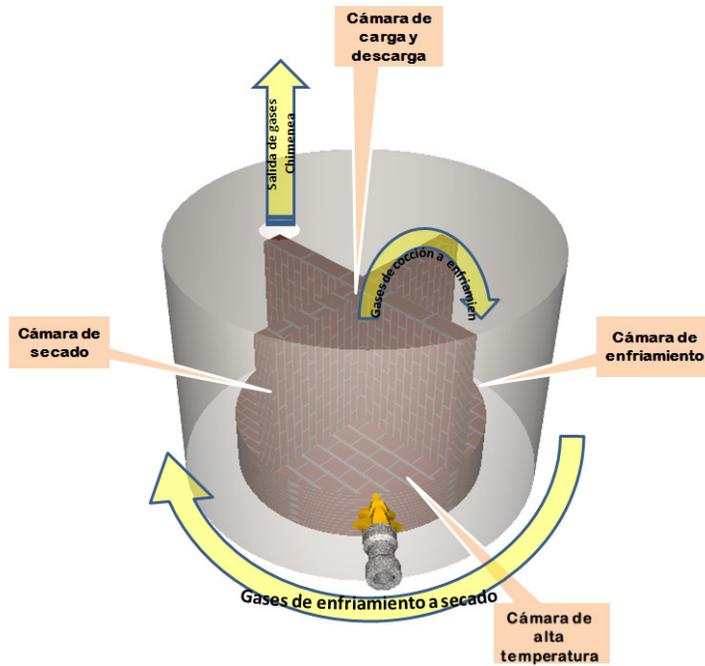


Figura 4. Esquema de funcionamiento del horno

El horno funciona con circulación de gases por tiro inducido desde la chimenea. Es cilíndrico y giratorio, consta de una pared móvil y otra fija, la pared móvil está dividida en cuatro cámaras. La pared fija rodea estas cuatro cámaras formando  $\frac{3}{4}$  de muro cilíndrico, quedando al descubierto la cámara de endague. Mientras el equipo está encendido todas las cámaras tienen piezas. A medida que se carga, ocurre el secado, cocción y enfriamiento simultáneamente, una vez se cumple la temperatura de cocción deseada se gira el horno para que se cumpla la etapa siguiente en el ciclo, de esta forma se tiene un funcionamiento semicontinuo. Bajo este funcionamiento la siguiente es la gráfica de ciclo, pasando por cada una de las etapas anteriormente mencionadas.

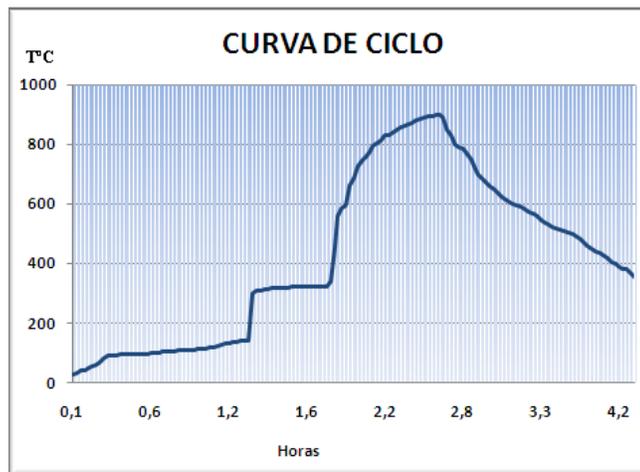


Figura 5. Curva típica de cocción del horno semicontinuo

### 3.1 Comportamiento Térmico

Un balance de energía para la eficiencia térmica sería el siguiente. La energía requerida está comprendida entre el cambio de temperatura de las piezas, la requerida para calentar el ambiente y la necesaria para retirar la humedad, la energía suministrada sería la aportada por el combustible. Para efectos del cálculo se considera un sistema cerrado, con aire contenido en el interior de la cámara y con aporte de energía como una transferencia de calor externa, adicionalmente se desprecia la eficiencia de combustión, de tal forma se evalúa solo la eficiencia térmica del proceso.

$$\eta = \frac{(m_{piezas} * C_v * \Delta T) + (m_{aire} * C * \Delta T) + (m_{agua} * C_{lat.vap})}{PC * m_{glp}} \quad (1)$$

Tabla 5. Cuadro de resumen de pruebas

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Consumo glp (L)	1348	1054	956	545
Piezas por ciclo (Kg)	6,51	6,6	7,5	6,90
T inicial (°C)	20	20	20	20
T final(°C)	889	900	880	881
Humedad ( % )	11,5	11,5	11,5	11,5
Tiempo de cocción (h)	1,24	0,92	1	0,55
Eficiencia	<b>7,67%</b>	<b>10,03%</b>	<b>12,35%</b>	<b>19,98%</b>
Indicador (MJ/Kg)	<b>14,86</b>	<b>11,46</b>	<b>9,15</b>	<b>5,66</b>
POTENCIA (KW) <sup>(1)</sup>	21,65	22,75	19,06	19,56

(1)Calculado con un PC=96 MJ/m<sup>3</sup> a 1 atm y 20°C, de glp

En la anterior tabla se incluye el peso de las piezas por ciclo, la temperatura inicial y máxima de ciclo, el tiempo de cocción que es referido al tiempo durante el cual se aporta combustible, la eficiencia del proceso, junto con un indicador del consumo de energía por masa de arcilla cocida. La disminución del consumo entre ciclos sucesivos esta del orden del 60% entre el primero y el ultimo, debido a que el horno ya está caliente. La disminución del tiempo que los quemadores permanecen encendidos (tiempo de cocción), se debe a que la pared fija, ya caliente, radia energía hacia el interior de la cámara recién comienza el proceso de cocción, consiguiendo un aumento de temperatura sin aporte de combustible del orden de 200°C, llevando la cámara de 200 a 400°C. La explicación del fenómeno de radiación y el comportamiento térmico al interior de la cámara de cocción se presenta en las siguientes graficas para los cuatro ciclos sucesivos.

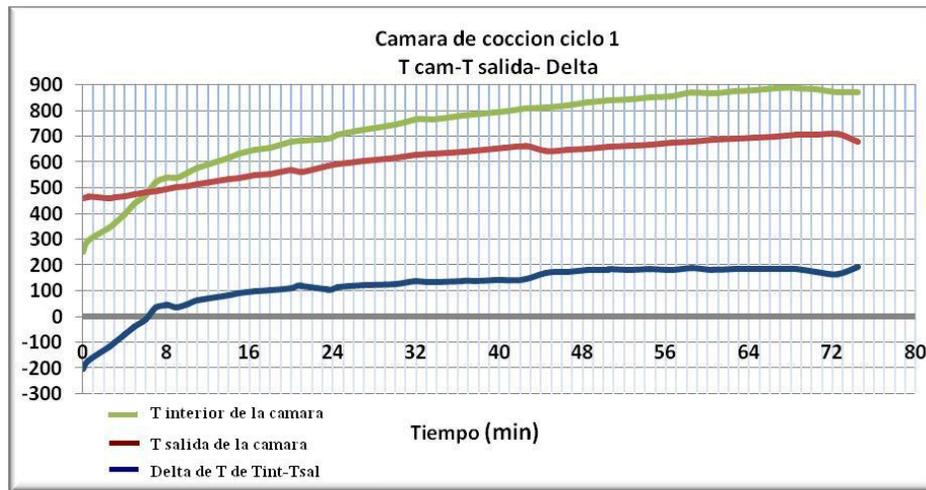


Figura 6. Curvas de temperaturas al interior de la cámara de cocción para el primer ciclo

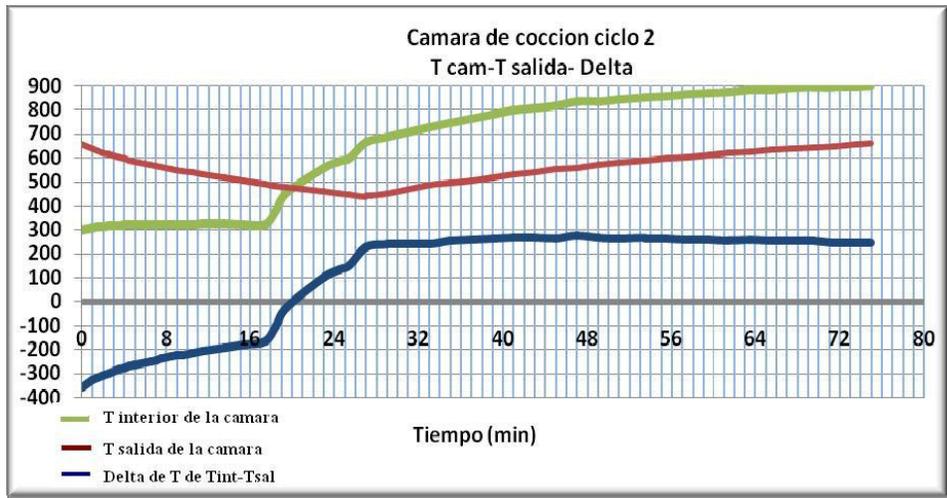


Figura 7. Curvas de temperaturas al interior de la cámara de cocción para el segundo ciclo

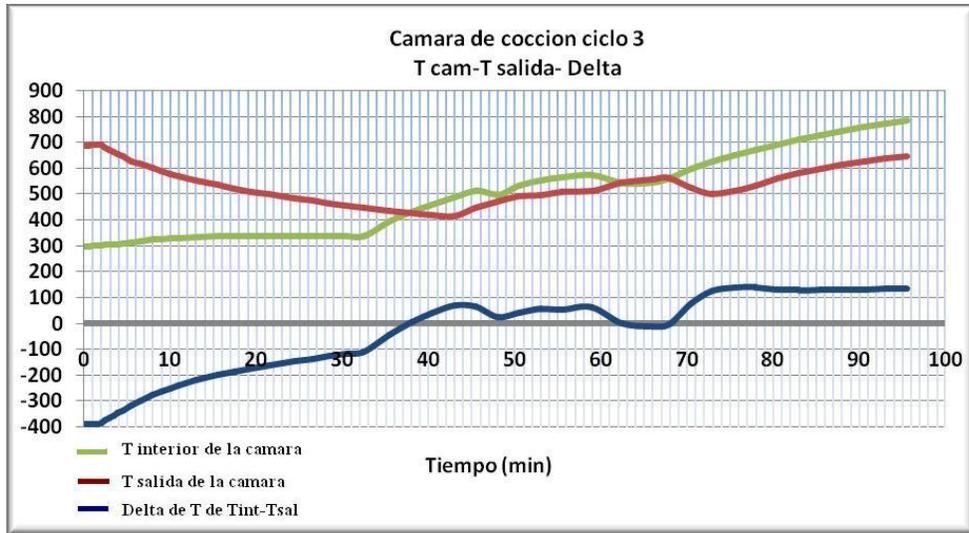


Figura 8. Curvas de temperaturas al interior de la cámara de cocción para el tercer ciclo

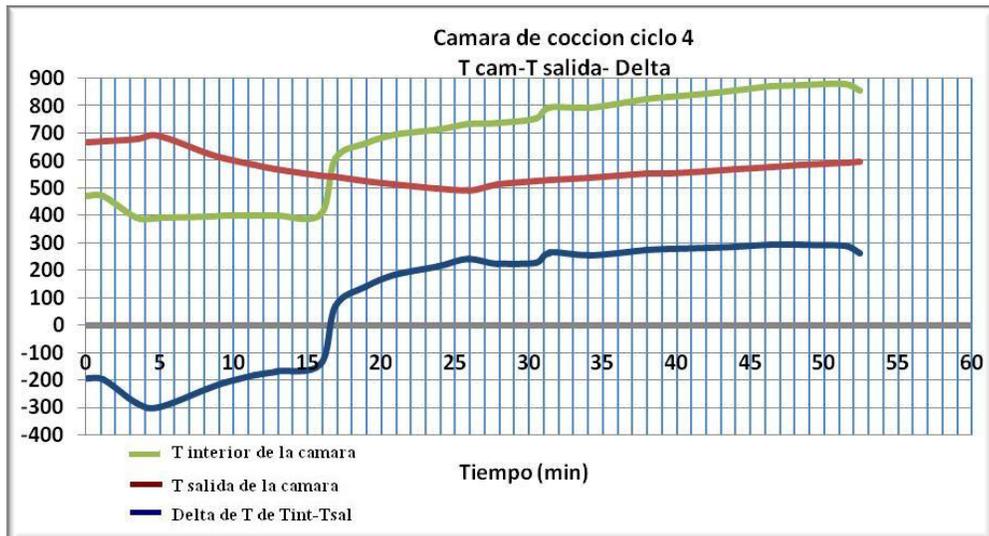


Figura 9. Curvas de temperaturas al interior de la cámara de cocción para el cuarto ciclo

En cada uno de los ciclos se puede ver el lento ascenso en la temperatura al interior de la cámara, al inicio, debido a que en esta etapa no hay aporte de combustible y el aumento de temperatura se registra debido a la radiación de la pared fija hacia el interior de la cámara con lo cual se registran diferencias de temperaturas negativas. El punto de corte de la curva de delta de temperaturas se da por el respectivo aumento de la velocidad de calentamiento en la cámara, causado por el aporte de energía de los quemadores en dicho momento y coincide con la disminución de temperatura en la salida sustentado en la reactivación de la recirculación de gases en el horno. Este comportamiento evidencia la existencia del fenómeno de radiación al interior de la cámara y justifica los ahorros de combustible entre ciclos progresivos.

Para establecer una comparación frente a la problemática abordada, se tomaron como referencia dos hornos periódicos de Ráquira, de distintas capacidades y combustible, a los cuales se les calculo el índice de energía consumida por kilogramo de arcilla producida, que comparados con el cuarto ciclo del horno semicontinuo, hay una disminución del consumo de combustible con un ahorro del 25 % frente al horno numero uno y de un 56% frente al segundo horno, dados Megajoules por Kg de arcilla producida.

**Tabla 6. Cuadro comparativo de consumo energético**

	HORNO 1	HORNO 2	HORNO SEMICONTINUO <sup>(3)</sup>
CONSUMO <sup>(2)</sup> (m <sup>3</sup> ) y (Kg)	48	6000	0,54
PESO VASIJAS (Kg)	270	15730	6,9
CAPACIDAD (m <sup>3</sup> )	0,6	78,65	0.4
INDICADOR (MJ/Kg)	<b>7,49</b>	<b>12,78</b>	<b>5,6</b>

(2) Horno 1 funciona a gas natural (m<sup>3</sup>) PC = 42113 KJ/Kg a 1Atm y 20°C, el dos con carbón (Kg) PC=33500 KJ/Kg, y el tres con glp PC=96 MJ/m<sup>3</sup> a 1 atm y 20°C. (3) Datos del cuarto ciclo.

### 3.2 Productividad

Desde el punto de vista energético el equipo propuesto tiene ahorros importantes frente a dos hornos periódicos de referencia. Ahora se establece un comparativo en términos de productividad mediante una extrapolación, de esta manera se establece la capacidad necesaria de un horno semicontinuo para igualar la productividad de los dos hornos alfareros. El cálculo se basa en la determinación del indicador de kilogramos de arcilla producida por horas de ciclo, por metros cúbicos de capacidad. Para cada horno se determina la producción semanal en kilogramos, que dividida por el indicador de productividad en semanas, da la capacidad de un horno semicontinuo requerido para igualar la producción de los hornos periódicos uno y dos.

$$Capacidad_{horno} = \frac{Produccion - semanal - periodico}{Indicador - por - semana} \quad (2)$$

**Tabla 7. Cuadro comparativo de productividad**

	HORNO 1	HORNO 2	SEMICONTINUO
CONSUMO *(m <sup>3</sup> ) y (Kg)	48	6000	0,54
PESO VASIJAS (Kg)	270	15730	6,9
CAPACIDAD (m <sup>3</sup> )	0,6	78,65	0,32
Duración de ciclo h <sup>(4)</sup>	24	144	1,262
Indicador de productividad (Kg/h* m <sup>3</sup> )	18,75	1,39	17,08
INDICADOR (MJ/Kg)	7,49	12,78	5,665
	EXTRAPOLACIÓN		
Producción semanal (Kg)	1620,0	15730,0	787,2
Consumo (MJ/ semana)	12128,5	201000,0	4459,6
Capacidad semicontinuo	<b>0,66</b>	<b>6,39</b>	x
Consumo semicontinuo (MJ/ semana)	9177,66	89113,96	x

(4) El valor de duración de ciclo para el semiconinuo es el inervalo de tiempo que tarda el horno en sacar piezas ya cocidas de distintas cámaras

De esta forma para igualar la producción frente al primer horno, se requiere un horno semicontinuo cuya capacidad sea de 0.66 m<sup>3</sup>, que representa el doble de la capacidad del prototipo y es 10% más grande que el horno en comparación. Respecto al horno de mayor capacidad se requiere un horno de 6.39 m<sup>3</sup>, con cual se obtiene una reducción del 91 % en la capacidad del horno original. Cabe aclarar que las piezas producidas en el horno periódico dos, tienen un tamaño máximo de 70 de diámetro por 120 cm de alto, las cuales cabrían perfectamente en el horno de 6.9 m<sup>3</sup> el cual tiene un radio y altura de 1.3 m.

#### **4. CONCLUSIONES**

Las pruebas realizadas sobre la arcilla arrojaron importantes reducciones en los tiempos de cocción frente a los establecidos por los artesanos y esto desemboca directamente en una reducción del consumo de combustible, al tener que aportar energía por un intervalo de tiempo menor. Esto posibilita tener un equipo de menor capacidad para sostener un nivel de productividad dado, circunstancia que lleva a ahorrar combustible al calentar un volumen menor como lo indican las extrapolaciones de capacidad frente a los dos hornos en comparación. Por último el hecho de reutilizar la energía disponible en los gases de combustión permite secar y precalentar hasta 200°C, además la característica de semicontinuo facilita los ahorros de combustible para ciclos posteriores, ya que no se requiere energía para calentar el horno al mismo tiempo que permite recuperar parte de dicha energía por mecanismos de transferencia de calor por radiación como anteriormente se mencionó. Toda esta serie de ventajas se reflejan en los indicadores de consumo de energía, haciendo énfasis en que la reducción de los mismos se logró empleando propano como combustible el cual es mucho más limpio que el carbón. Un equipo de este tipo implementado en todos los talleres artesanales reduciría significativamente los efectos nocivos actuales de la alfarería y revolucionaría la forma en la cual se lleva a cabo el proceso de producción de artesanías cerámicas en la región.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Para el desarrollo de este proyecto se contó con la colaboración de los laboratoristas del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia y desde luego con toda la información y gentileza brindada por los artesanos del municipio de Ráquira. Además la colaboración técnica de las empresas Abarephor Ltda, y Erecos S.A.

#### **6. REFERENCIAS**

- Franco, Pedro, 2000, "Aprovechamiento de la energía residual del horno de cocción continua a gas, para el secado y precalentamiento de cerámicos en ladrillera e inversiones Sila", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, pp. 129-193.
- Martínez, Jorge, 1989, "Contribución al estudio de materiales arcillosos en la alfarería en la región de Ráquira", Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, pp. 47-150.
- Cengel, Y.A. y Boles, M.A., 2003, "Termodinámica", Cuarta edición, pp. 194-200.

#### **7. RESPONSABLE DEL ARTICULO**

Luis Alejandro Piraban Rozo, Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia.

## CERAMIC FURNACE FOR POTTERY

**Luis Alejandro Piraban**, [luis\\_apira@hotmail.com](mailto:luis_apira@hotmail.com). Universidad Nacional de Colombia. Diagonal 84 82-22, Bogotá, Colombia.

**Fabio Emiro Sierra**, [fesierray@unal.edu.co](mailto:fesierray@unal.edu.co). Universidad Nacional de Colombia. Carrera 30 #45 -20, edificio 453, Oficina 401. Bogotá Colombia

**Javier Alejandro Vargas Jiménez**, [javargasj@unal.edu.co](mailto:javargasj@unal.edu.co). Universidad Nacional de Colombia. Calle 144 # 12-31 apto 102, Bogotá, Colombia.

**Abstract:** *We present the design of an oven developed for cooking ceramic crafts. It has been framed within the rational and efficient use of thermal energy. The machine attacked the problems of a Colombian town that bases its economy on the production of handicrafts and such activity is detrimental to the health of their inhabitants. The goal is to get a viable solution that reduces the impact environmental product of the pottery. In this manner, starting from a study of the requirements of the curing process of the clay, emerges the design of the oven and their respective operating system. Finally we present the results of the tests performed until now, attempting to establish parameters to compare in an energetic level between the oven developed and the typical traditional oven.*

**Keywords:** *Cycles, periodic, radiation, recirculation of gases, semicontinuo.*