

UTILIZACIÓN DIRECTA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE UN HORNO DE COCCIÓN EN EL SECADO DE LADRILLOS CERÁMICOS

Miguel Condori, Marcelo Gea
INENCO, Instituto UNSa-CONICET
Universidad Nacional de Salta,
Calle Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina
Fax: 54-387-4255489, Email: condori@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se describe el acondicionamiento térmico de una planta local de ladrillos cerámicos para adecuarla a un uso racional de la energía. Se plantea la utilización directa de los gases de combustión de un horno de cocción como fuente de energía para el secado de los ladrillos. Los gases se acondicionan para bajar su temperatura y su contenido de agua mediante la dilución con aire más seco calentado en forma indirecta por el horno. Se plantean mejoras en la planta de producción para disminuir las pérdidas térmicas y mejorar los ciclos productivos del secador utilizando la recuperación de los gases. Se describen los cambios introducidos y los cálculos para acondicionar la planta de producción. Se detalla el programa computacional elaborado para resolver los distintos procesos del aire. Los resultados muestran una mejora del 50 % respecto del consumo de gas natural que tiene actualmente la planta.

Palabras clave: secado de cerámica, mezcla de gases, horno de cocción, ahorro de energía.

INTRODUCCIÓN

En una planta de producción de ladrillos cerámicos, el secado y la cocción de los ladrillos son las dos etapas más importantes luego que se produce el moldeado. El ladrillo moldeado en pasta húmeda se seca hasta alcanzar un contenido final de agua del 3 al 5 % , para luego ser cocido en hornos especiales a altas temperaturas. El secado y el cocido de los ladrillos se realizan en lugares físicos diferentes y requieren generalmente de fuentes de calentamiento independientes. Es frecuente plantear la recuperación parcial de la energía consumida en el horno de cocción para su utilización en las cámaras de secado mediante el uso de intercambiadores de calor del tipo indirecto, donde el humo de salida del horno se utiliza para precalentar o calentar el aire que se introduce en la cámara de secado. Es posible también la utilización directa de estos gases al sustituir el calentamiento indirecto por el contacto directo. Esta aplicación tiene la ventaja de proporcionar un mayor ahorro energético y un bajo costo en infraestructura necesaria.

La utilización en forma directa de los gases originados en un proceso de combustión a cualquier proceso de secado presenta tres inconvenientes importantes: a) los gases salen a temperaturas elevadas y requieren de un acondicionamiento térmico previo, b) muchas veces existe incompatibilidad en el contacto gas-producto y c) uno de los productos de la combustión es agua, justamente el elemento que se desea eliminar en el secado. En éste sentido, un combustible como el gas natural presenta la ventaja de estar exento de contaminantes, pero la desventaja de producir gran cantidad de agua, casi dos partes de agua por una parte de combustible empleado. En el caso del secado de materiales cerámicos se hace necesario bajar la temperatura de los gases por debajo de los 150 °C para evitar cambios en la estructura interna del material, y es aconsejable también tener una etapa inicial donde se eleva gradualmente la temperatura del material desde una próxima a la ambiente hasta la temperatura de trabajo del secador, para evitar rupturas por contracciones y dilataciones bruscas.

Aunque el gran exceso de aire permite suponer que el humo caliente se comportan como si se tratara sólo de aire, éste tiene una alta humedad específica ya que la combustión le incorpora agua en estado de vapor. Además se le agrega, en el horno donde se cuecen los ladrillos, el contenido de agua residual que queda en las piezas cerámicas al final del proceso de secado, siendo su magnitud importante dado los volúmenes de carga del horno. En consecuencia, una utilización directa de los gases de combustión implica necesariamente realizar una dilución de su contenido de agua introduciendo aire más seco en el flujo principal. Para aumentar el rendimiento térmico, el aire seco se toma de la zona alta de la planta, donde se encuentra estratificado el aire más caliente en contacto indirecto con el horno y las cañerías por donde circulan los gases de combustión.

El uso de los productos de combustión, convenientemente diluidos con aire ambiente, permite sustituir el aire caliente que ingresa al secador, lo que se traduce en importantes ahorros de operación. Esto es en parte porque el gas a alta temperatura tiene altas pérdidas térmicas y requiere una mayor inversión de dinero para evitarlas, y también porque la inversión en equipos para el acondicionamiento de un aire más frío es menor.

En el presente trabajo se describe el proyecto de acondicionamiento térmico realizado en una planta de producción de ladrillos cerámicos de la ciudad de Salta, la cual operaba con dos generadores de calor a base de gas natural para alimentar el secador y el horno de cocción. Se plantea, básicamente, un ahorro importante de energía en el proceso de secado-cocción de tres formas: a) evitando las pérdidas térmicas por un correcto aislamiento térmico de las partes constitutivas, b) recuperación de la energía que sale del horno y su utilización como fuente de energía para el secador y c) optimización de los ciclos de

cocción y de secado para que sea posible secar, con un ciclo del horno que incluye la cocción y el posterior enfriamiento de las piezas, la carga completa de dos cámaras de secado.

Si bien, se utilizan metodologías conocidas para el acondicionamiento, el diseño de las mismas, su implementación y los resultados obtenidos constituyen un aporte al concepto de uso racional de la energía y ahorro energético, en este caso aplicados a unaplanta de producción local que operaba con más altos costos de producción por su falta de adecuación a estos conceptos.

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN

En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de la mitad izquierda del sistema horno-secador, en donde se han incluido las modificaciones propuestas, la mitad derecha es simétrica. A continuación se describen las partes constitutivas siguiendo la numeración indicada en el gráfico.

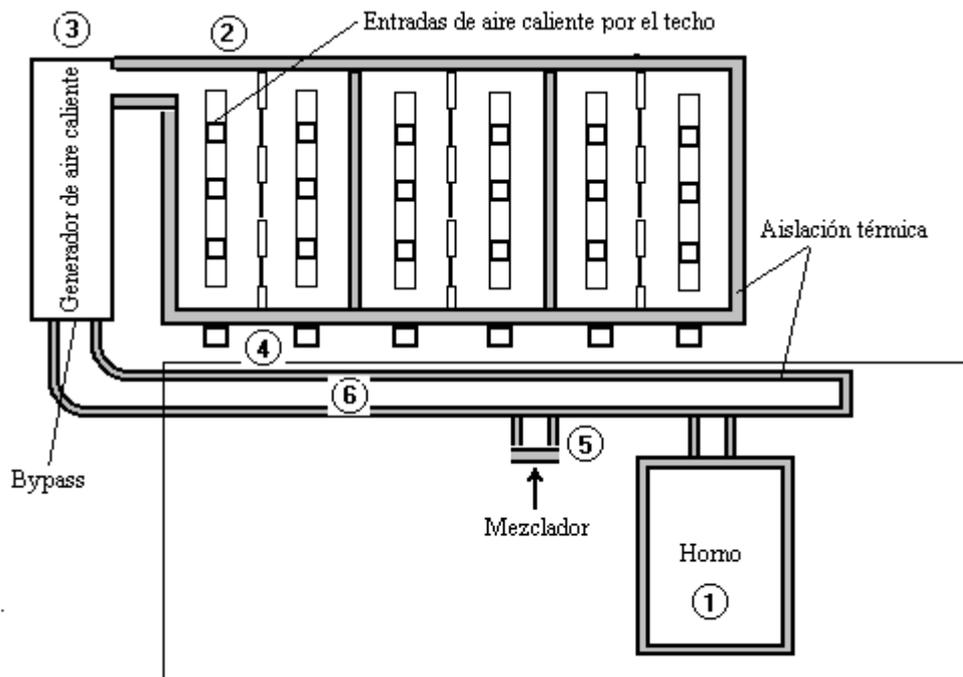


Figura 1: Esquema simplificado de la planta de secado y cocción de ladrillos cerámicos

- 1) La planta de producción se compone de dos hornos de cocción con quemadores del tipo intermitente alimentados con gas natural, los hornos tienen una carga de 60 Toneladas de piezas cerámicas cada uno. Estos hornos aumentan su temperatura de acuerdo a una rampa programada de calentamiento que demora 11 horas para ir desde la temperatura ambiente hasta una temperatura final de 900 °C. Actualmente, el producto de la combustión, que se encuentra a estas temperaturas, se tira al ambiente por las chimeneas. Lo que se propone es recuperar este calor enviándolo al secador mediante la cañería 6.
- 2) La cámara de secado es del tipo estático y tiene dos depósitos divididos por un tabique donde se ubican los ventiladores helicoidales, dispuestos en posición fija, que permiten la recirculación interna del aire. El sentido de rotación de las aspas es reversible para alternar el efecto térmico del flujo de un lado al otro del depósito del material. Estos secadores cuentan actualmente con un generador de aire caliente independiente, 3, que toma aire ambiente y lo calienta en forma sensible, es decir sin el agregado de agua. Actualmente se cuenta con seis de estas cámaras de secado, que no tienen aislamiento térmico, por lo que las pérdidas de calor son importantes. La carga de cada uno es de 36 toneladas y el ciclo de secado demora unas 20 horas.
- 3) Existen dos generadores de aire caliente para alimentar a las cámaras de secado, dotados cada uno con un ventilador centrífugo que manejan del orden de 5 m³/s de caudal. Proporcionan aire caliente a temperaturas próximas a los 200 °C que, debido a las pérdidas, caen a la mitad en el secador. En la propuesta, los generadores sólo se utilizan para conectar la cañería 6, aprovechando el ventilador centrífugo para producir la circulación del aire. El generador cuenta con una llave esclusa que permite tomar aire del exterior o de la cañería 6.
- 4) En los secadores la entrada del aire caliente se realiza a nivel del techo y la salida por unas tomas que se encuentran al nivel del piso, a lo largo de las cámaras, de allí se conectan a chimeneas de salida que expelen el aire hacia el exterior. Actualmente, debido a un mal funcionamiento de las cámaras en donde se pierde presión por fugas, las chimeneas cuentan con extractores de aire. El proyecto prevé solucionar las pérdidas de presión y eliminar el uso de extractores. La carga de ladrillos huecos se dispone en dos filas separados por la pared con los ventiladores.

- 5) La toma de aire ambiente para el mezclado se hará en la parte superior de las instalaciones en donde se encuentra aire caliente, a 50 °C aproximadamente. Para introducir este aire en el sistema de cañerías se plantea la utilización de un ventilador axial para un caudal de 10 m³/s y poca pérdida de carga ya que en la cañería el flujo se mueve en depresión debido a la ubicación del ventilador centrífugo en 3. El mezclado se realiza sólo mientras se produce la combustión en el horno. Terminada la cocción, la carga de cerámicos se encuentra a alta temperatura y demora aproximadamente 7 horas para enfriarse, proporcionando aire caliente y seco que también se envía a las cámaras de secado, por lo que el horno puede proporcionar el calor necesario para el proceso de secado por unas 18 horas aproximadamente.
- 6) El sistema de cañería se debe aislar convenientemente utilizando lana mineral debido a las altas temperaturas que se producen. También se plantea mejorar el aislamiento de las cámaras de secado, especialmente el portón de frente por donde se realiza la carga y el techo, que presentan elevadas pérdidas térmicas. En éstas se utilizará lana de vidrio convenientemente protegidas con chapa para evitar su contacto.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y DEL PROGRAMA DE CÁLCULO

Se elaboró un programa de cálculo que permite determinar las condiciones de trabajo del secadero a partir de datos medidos de la performance del horno y aplicando un modelo teórico del funcionamiento del sistema planteando los balances de masa y de energía en los procesos que ocurren en las distintas etapas del sistema.

En primer lugar se determinan las condiciones del humo que sale del horno considerando los aportes de calor y humedad que se producen en la combustión del gas natural. Para ello se tiene en cuenta el consumo medio de gas durante el período de funcionamiento del horno. Es sencillo determinar el contenido de agua a partir de la ecuación estequiométrica completa, donde los productos de combustión son los de reacción completamente oxidados (CO₂, H₂O) y los inertes (N₂). Cuando hay exceso de aire aparece además el O₂. La presencia de vapor de agua en los productos de combustión hace que exista un punto de rocío. En nuestro caso el humo de la combustión condensa por debajo de los 56 °C, por lo que el objetivo final de enfriar el humo hasta 150 °C está lejos de la posibilidad de condensación.

Para el caso de gas natural, considerando el uso de metano del tipo que se suministra para la industria en Salta, la cantidad de agua generada en la combustión es de 1,403 kg por m³ de gas natural. Como en los quemadores del horno de cocción se consume un promedio de 400 m³ de gas por hora, esto implica que se agregan alrededor de 0,156 kg de agua por segundo por generación propia de la combustión.

Para calcular la humedad y la entalpía del humo es necesario considerar la humedad que liberan los ladrillos durante las primeras horas de cocción, debido al agua ligada que permanece en el ladrillo después del proceso de secado y que se considera que se evapora durante las primeras cinco horas, de acuerdo a lo evidenciado en el funcionamiento del horno, ya que éste eleva rápidamente su temperatura después de este tiempo debido a que no necesita invertir calor para producir el cambio de fase en la evaporación. Considerando una carga completa del horno, 60 toneladas de material, con un contenido de agua del 4% respecto al peso húmedo, se considera el agregado de 2,4 toneladas de vapor de agua durante las primeras 5 horas de funcionamiento.

Se plantea el balance de masas para el agua incorporada al humo de la combustión, considerando los aportes antes mencionados, la ecuación para el balance es la siguiente:

$$W_h = W_c + W_r \quad (1)$$

donde W_h es la humedad absoluta del humo que sale del horno de cocción, W_c es la humedad producida por la combustión y W_r la humedad residual en las piezas cerámicas colocadas en el horno, todas estas humedades están expresadas en kilogramos de agua por kilogramo de aire seco.

Se midió la velocidad del humo utilizando un anemómetro del tipo punta de hilo, mezclando el humo con aire ambiente para enfriar el flujo y estar dentro del rango de protección del aparato. La velocidad medida fue de 6,5 m/s. Considerando que los caños de hierro por donde se transporta el humo tienen 1 m de diámetro, el caudal de aire que se utiliza para los cálculos es de 5,1 m³/s. Debido a que la temperatura del humo cambia a lo largo del ciclo de operación del horno, se tiene una densidad que varía fuertemente desde un valor próximo a la unidad en condiciones ambientes, hasta 0,301 kg/m³ para humo que se encuentra a 900 °C. Esto implica que el flujo másico del humo también disminuye a medida que aumenta la temperatura del horno.

Para el cálculo de las entalpías del aire se utiliza la siguiente expresión (ASHRAE):

$$h = T + W(2501 + 1,805T) \quad (2)$$

donde h es la entalpía del aire expresada en KJ/kg, W es la humedad específica del aire expresada en kg/kg y T la temperatura seca del mismo, expresada en °C.

De las mediciones efectuadas, tanto la temperatura como la humedad son datos que se conocen para el horno y para las condiciones ambientes. Con estos datos, se plantean los balances que corresponden al mezclado de dos gases para determinar las condiciones del humo que se ingresa a la cámara de secado.

El balance de conservación de los flujos másicos de los gases que intervienen en la mezcla es el siguiente:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_h + \dot{m}_a \quad (3)$$

donde \dot{m}_s es el flujo de la mezcla, \dot{m}_h es el flujo másico del humo que sale del horno y \dot{m}_a es el flujo másico del aire que se introduce para la dilución del contenido de agua, todas estas variables están expresadas en kg/s.

En el balance de conservación de la masa de agua involucrada, también se considera el contenido de agua incorporado en el aire ambiente que se utiliza para producir la dilución, el cual se considera constante e igual a 0,10 kilogramos de agua por cada kilogramo de aire seco.

$$\dot{m}_s W_s = \dot{m}_h W_h + \dot{m}_a W_a \quad (4)$$

donde W_s es la humedad absoluta de la mezcla de los gases y W_a es la humedad del aire ambiente, expresadas en kg/kg.

El balance de energía considera la entalpía de los gases que intervienen en la mezcla, los cuales son conocidos a través de su temperatura y humedad:

$$\dot{m}_s h_s = \dot{m}_h h_h + \dot{m}_a h_a \quad (5)$$

donde h_s es la entalpía específica de la mezcla a la entrada del secador, h_h es la entalpía del humo que sale del horno y h_a es la entalpía del aire ambiente, todas estas expresadas en J/kg.

Hasta llegar al secadero la mezcla fluye por un conducto de varios metros en el cual se producen pérdidas térmicas considerables, las que se calculan de la siguiente manera:

$$T_s = T_e \exp\left(-\frac{pL}{\dot{m}_s C_p R_e}\right) \quad (6)$$

donde T_e es la temperatura de la mezcla a la entrada del conducto, T_s es la temperatura de la mezcla a la salida del conducto, ambas expresadas en °C, p es el perímetro del conducto, L es la longitud del conducto para las pérdidas, ambas expresadas en metros, C_p es la capacidad calorífica de la mezcla, expresada en KJ/kg °C y R_e es la resistencia equivalente para las pérdidas del conducto que se calcula por la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{k} \quad (7)$$

donde e es el espesor del aislamiento, expresado en m, k la conductividad térmica del aislante, W/m °C y h_c el coeficiente convectivo al ambiente, W/m² °C.

El sistema de ecuaciones dado por las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) se resuelve por el método de iteración hasta la convergencia, y se obtiene las condiciones el aire que ingresa al secador.

En la cámara de secado se hace necesario plantear un balance de energía y otro de masa. Para el balance de energía se deben tener en cuenta las pérdidas térmicas del secador mismo, que se producen hacia temperatura ambiente. Estas pérdidas disminuyen la temperatura final de la cámara de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_p = A_s U_T (T_s - T_a) \quad (8)$$

donde q_p es el calor perdido en el secador, A_s es el área de perdidas térmicas y U_T es el coeficiente global de pérdidas correspondiente. A los fines de mejorar la eficiencia térmica del sistema, se considera un aislamiento de 5 cm de lana de vidrio en el portón de entrada de carga y en el techo del secador, zonas en las que se detectaron las mayores pérdidas.

En el balance de energía también se tiene en cuenta el calor que las piezas cerámicas absorben por convección y que es de la forma:

$$q_c = A_c U_c (T_m - T_c) \quad (9)$$

donde q_c es el calor utilizado en el calentamiento de las piezas cerámicas, A_c es el área de los ladrillos cerámicos expuesto a la convección, U_c el coeficiente de transferencias por convección sobre las piezas cerámicas, T_m es la temperatura media entre la temperatura inicial en la cámara de secado y la final después de producirse el enfriamiento evaporativo, y T_c es la temperatura de las piezas cerámicas, que se considera igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire en el secador.

En el balance global de energía del secador, al calor que ingresa a la cámara de secado con la mezcla se le restan las pérdidas térmicas del secador y el calor necesario para el calentamiento de las piezas. El excedente es expelido al exterior por las chimeneas, este término se denomina pérdidas por chimenea. En este balance no se ha considerado el calor acumulado en las piezas cerámicas.

$$q_{ch} = q_s - q_p - q_c \quad (10)$$

El programa determina las condiciones de salida del aire por la chimenea y de allí calcula la humedad de salida considerando un proceso de evaporación con entalpía constante.

El balance de masa para la evaporación producida en el secador es el siguiente:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_s (W_f - W_i) \quad (11)$$

donde \dot{m}_w es la masa de agua evaporada en el secador en la unidad de tiempo, W_f la humedad final del secador que coincide con la humedad del aire en la chimenea y W_i la humedad de entrada del secador que coincide con la humedad del aire luego de producido la mezcla. Esta cantidad de agua debe restarse del contenido inicial de la carga en el secador, y se continúa evaluando en cada paso de tiempo hasta que el contenido final de agua es el mínimo posible, es decir el peso seco.

El programa elaborado presenta una pantalla interactiva que permite ingresar los datos de entrada para las distintas condiciones de funcionamiento como las propiedades del aire exterior, características del horno, de los cerámicos y del secadero. Las propiedades del aire exterior a ingresar son la temperatura, la humedad y el caudal para la mezcla. Las propiedades del horno son la temperatura, el consumo de gas, el flujo de aire y la aislación. También se deben indicar el número de piezas de cerámica de la carga, el peso y el área. Los pasos que sigue el programa se esquematizan en el diagrama de flujos de la figura 2.

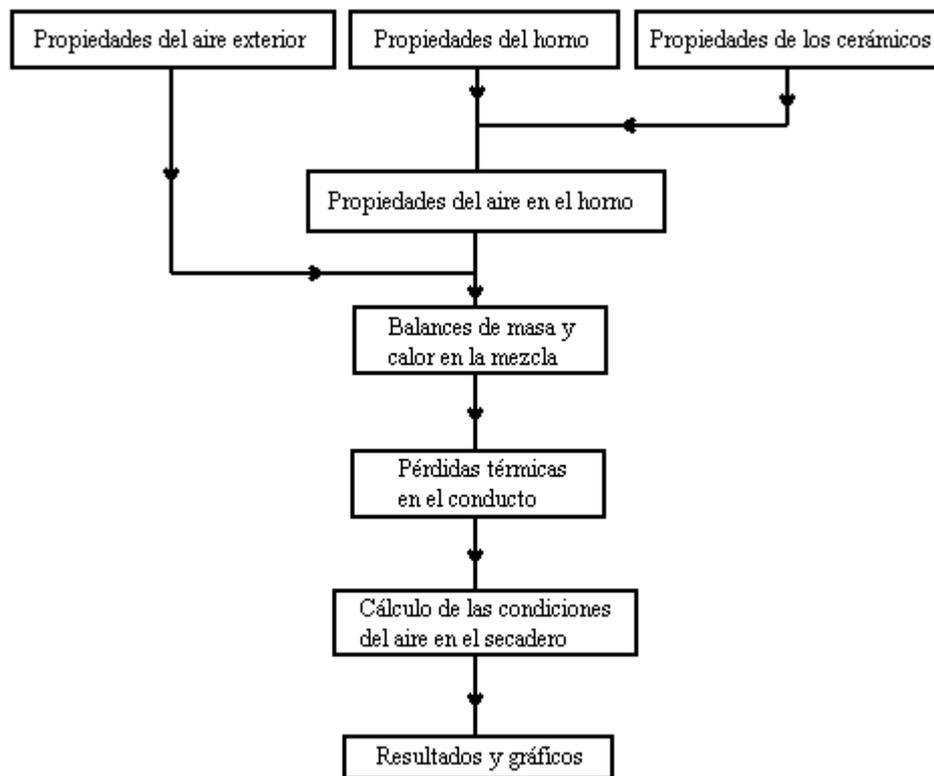


Figura 2: Diagrama de flujos del programa de cálculo

El programa permite realizar el cálculo para una determinada temperatura del horno o bien presentar en una gráfica los resultados de un ciclo completo en el cual el horno varía su temperatura entre 100 C y 900 C, en 11 horas. Un ejemplo de los resultados de la pantalla de salida se muestran en la figura 3, donde en la parte inferior, de izquierda a derecha, se grafica la temperatura de salidas, la humedad absoluta del aire en el secador y la variación del contenido de agua del material, respectivamente, en función de la temperatura del horno.

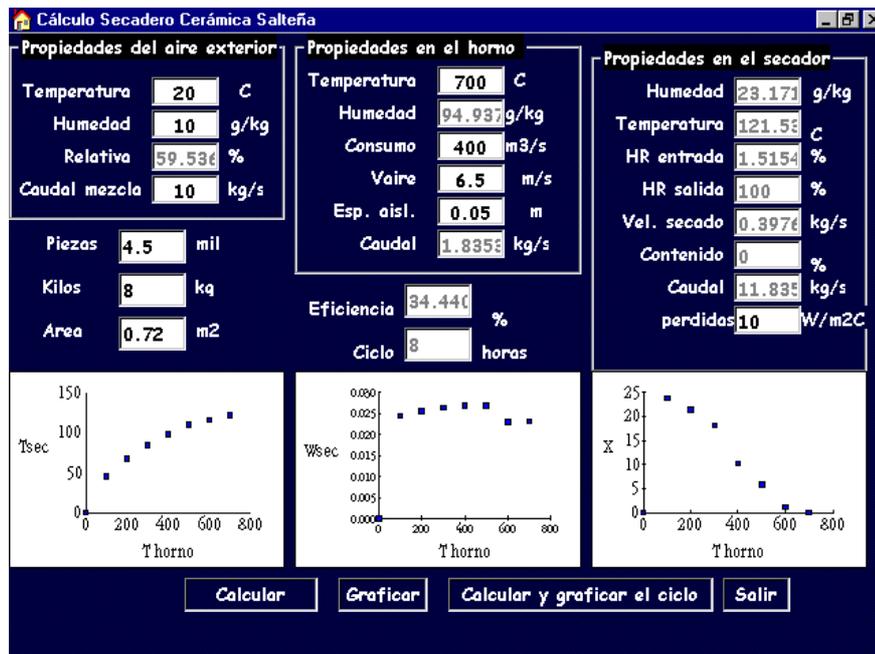


Figura 3: Presentación del programa de cálculo

CONCLUSIONES

Se ha planteado el acondicionamiento térmico de una planta de producción de ladrillos cerámicos para recuperar la energía de salida del horno, que actualmente se tira al ambiente, para utilizarlo en el secado de las piezas cerámicas. Este acondicionamiento es muy sencillo y sólo involucra el agregado de una cámara de mezclado y el correcto aislamiento de las partes constitutivas del sistema.

Se elaboró un modelo computacional que resuelve los problemas planteados por el acondicionamiento propuesto y se han medidos en planta todas las variables de entrada necesaria para correr el programa. El programa se ha elaborado para que permita el cambio de variables de entrada a fin de poder utilizarlo como una herramienta de control en la planta.

Los resultados muestran la factibilidad de mejorar el uso racional de la energía en la planta de producción, por utilizar un calentamiento directo con el humo proveniente de la combustión en el horno de cocción, a pesar de su elevado contenido de humedad, realizando una dilución con aire ambiente precalentado. Con este acondicionamiento se consigue un ahorro del 50% del consumo de gas actual, lo que representa 2400 m³ de gas natural por ciclo de cocción. También se logra colocar dos ciclos de secados por ciclo de funcionamiento del horno de cocción, lo cual representa una importante mejora en la producción.

REFERENCIAS

- ASHRAE FUNDAMENTALS (1989) *Psychrometrics*, cap. 6.
- Bejan A. (1995) *Convection heat transfer*, 2a Edición, pp. 194. Wiley Interscience, New York.
- Márquez Martínez, Manuel (1989) *Combustión y quemadores*. Mar combo, Barcelona, España.
- Facincani Ezio (1999) *Tecnología Cerámica: Los ladrillos*.

ABSTRACT.- The direct heating with combustion gases from the cooking furnace of ceramic pieces is used as energy source to perform the drying of the ceramic brick. These gases need be conditioned decreasing its temperature and water content using dilution with a more dry air, which is indirect heating in the furnace environment. Some changes in the production plant is proposed to decrease the thermal losses and improves the productive cycles of the drier, permitting to realize two full load of the drying chamber using the recovered gases. The changes introduced and the calculation performed to prepare the production plant is described. The computational program made to solve the different process of the air treatment is also detailed. The results show an improvement around 50 %, considering the natural gas actually consumed in the plant.

Keyword: drying of ceramic, mixture of two gases flow, cooking furnace.