

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN LA FABRICACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS MEDIANTE EL USO DE ACEITE TÉRMICO

**A. Mezquita⁽¹⁾, E. Monfort⁽¹⁾, E. Vaquer⁽¹⁾, S. Ferrer⁽¹⁾, M.A. Arnal⁽²⁾,
J. Toledo⁽³⁾, M.A. Cuesta⁽³⁾**

⁽¹⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾ Azulev, S.A.U. Onda. España.

⁽³⁾ Endesa Energía, S.A.U. Madrid. España.

RESUMEN

El proceso de fabricación de baldosas cerámicas consume gran cantidad de energía, mayoritariamente energía térmica, que se obtiene de la combustión de gas natural. El incremento del coste de este combustible, así como la situación económica actual, hace que este coste sea crítico para las empresas y pueda mermar su competitividad.

El proceso de cocción de las baldosas cerámicas en hornos de rodillos no destaca precisamente por el aprovechamiento de la energía utilizada, pues aproximadamente el 50 % se pierde a través de las chimeneas de humos y de enfriamiento del horno.

Con el objetivo de mejorar el aprovechamiento de la energía consumida durante la operación de cocción se han instalado, en las chimeneas de un horno, dos intercambiadores de calor, en los cuales los gases procedentes del horno ceden su calor sensible a un aceite térmico, que posteriormente lo transfiere a través de otros dos intercambiadores a los gases de secado en las conducciones de recirculación de un secadero vertical.

En este trabajo se presenta una planta industrial experimental, en fase de ensayos de puesta a punto, en la que los resultados preliminares obtenidos de eficiencia energética se sitúan en un intervalo de 60–90%, dependiendo de las condiciones de funcionamiento y materiales procesados.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de baldosas cerámicas requiere un elevado consumo de energía, principalmente de energía térmica.

Todas las fases del proceso de fabricación consumen energía eléctrica. El consumo de energía térmica se produce principalmente en tres etapas: secado de las suspensiones cerámicas por atomización, secado de los soportes, y cocción de las baldosas. La energía térmica empleada en el proceso se obtiene, principalmente, por la combustión de gas natural.

En la figura 1 se muestra esquemáticamente, el proceso de fabricación de baldosas cerámicas.



Figura 1. Proceso de fabricación de baldosas cerámicas.

La cocción de baldosas cerámicas por monococción en España se realiza en hornos de rodillos que utilizan gas natural como fuente de energía térmica. El consumo medio de energía en esta etapa del proceso se cifra en torno a 705 kWh/t producto cocido, de los cuales entre un 5 y un 20 % se aprovechan en la cocción del producto, y el resto se pierde por las chimeneas del horno, a través de las paredes y fisuras del horno y con las piezas que salen del horno. En la figura 2 se muestra un diagrama de Sankey típico de un horno de rodillos, en el cual se representa de manera esquemática el aporte porcentual de cada una de las corrientes que intervienen en el balance de energía al horno.

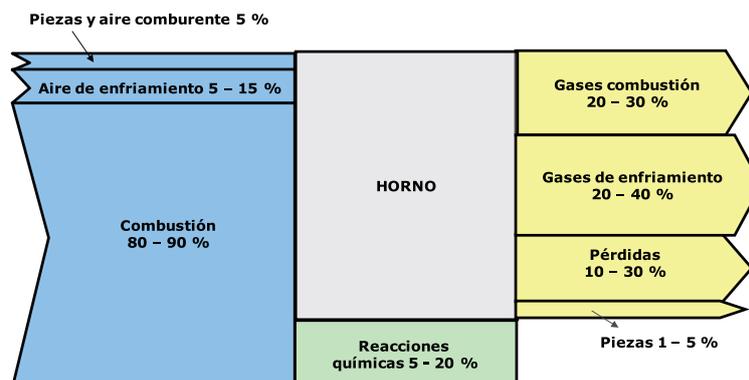


Figura 2. Diagrama de Sankey estándar de un horno de cocción de baldosas.

Se aprecia que aproximadamente el 50 % de la energía aportada al proceso de cocción se pierde a través de las chimeneas (de humos de combustión y de gases de enfriamiento)

El objeto de este trabajo es precisamente aprovechar esta energía mediante la instalación de intercambiadores de calor.

En la actualidad se aprovecha, mayoritariamente, el calor residual de los gases procedentes la chimenea de enfriamiento, debido a que éstos están compuestos por aire exento de contaminantes, ya que son los gases resultantes del contacto directo del aire utilizado para reducir la temperatura de las piezas en la zona de enfriamiento.

Sin embargo, debido a que durante la cocción de las piezas cerámicas, éstas experimentan reacciones químicas, los gases procedentes de la chimenea de humos poseen contaminantes, ya que contienen los productos derivados de la combustión del gas natural y de las reacciones químicas del material producidas durante el proceso de cocción. De modo que para poder aprovechar estos gases es necesario un tratamiento previo a su utilización

Las posibilidades para aprovechar el calor residual de los gases de combustión son:

- Instalación de un sistema de depuración

Existe la posibilidad de depurar los gases de combustión y aprovechar los mismos, junto con los de la zona de enfriamiento, en los secaderos.

Esta opción tiene como factor limitante la temperatura de los gases, ya que los filtros de mangas habitualmente no pueden sobrepasar determinadas temperaturas del orden de 180 – 200 °C, dependiendo del tipo de material de las mangas.

- Instalación de intercambiadores de calor

La opción que se plantea en el siguiente estudio es la instalación de intercambiadores de calor con un fluido intermedio que transporte el calor desde el horno hasta el secadero.

Además, puesto que tras el intercambiador de calor, la temperatura de los gases de combustión desciende, es posible instalar un sistema de depuración de los mismos.

2. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es mejorar el aprovechamiento de la energía consumida en la operación de cocción, mediante la instalación de un novedoso sistema de recuperación de calor, que permite reducir las pérdidas de calor a través de las chimeneas y aprovecharlos en la etapa de secado.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

3.1. Descripción de la instalación

La instalación consiste en una recuperación de calor desde las chimeneas de humos de combustión y de aire de enfriamiento de un horno, de forma conjunta hasta un secadero, mediante el uso de intercambiadores de calor (uno en cada chimenea) de forma que la energía se transfiere desde el horno hasta el secadero utilizando un aceite como fluido térmico. El aceite térmico calentado en los dos intercambiadores del horno se une en una única corriente hasta el secadero.

Del horno hasta el secadero este aceite térmico circula por el interior de una conducción calorifugada, para minimizar las pérdidas energéticas. El calor en los secaderos se cede al aire de recirculación del mismo a través de dos intercambiadores adicionales, uno por cada uno de los quemadores.

El aceite térmico se utiliza en un circuito cerrado, de forma que tras ceder calor a los gases del secadero vuelve hasta los intercambiadores de calor del horno para iniciar de nuevo el proceso. En este circuito existe un sistema de válvulas con bypass, que permiten mantener la temperatura del aceite hasta el valor óptimo, de forma que aumenta la eficiencia global del proceso.

En función de las necesidades del sistema los gases calientes de secado se pueden introducir en el secadero, preferente a uno o a los dos quemadores del mismo.

En la figura 3 se muestra un esquema general de la instalación.

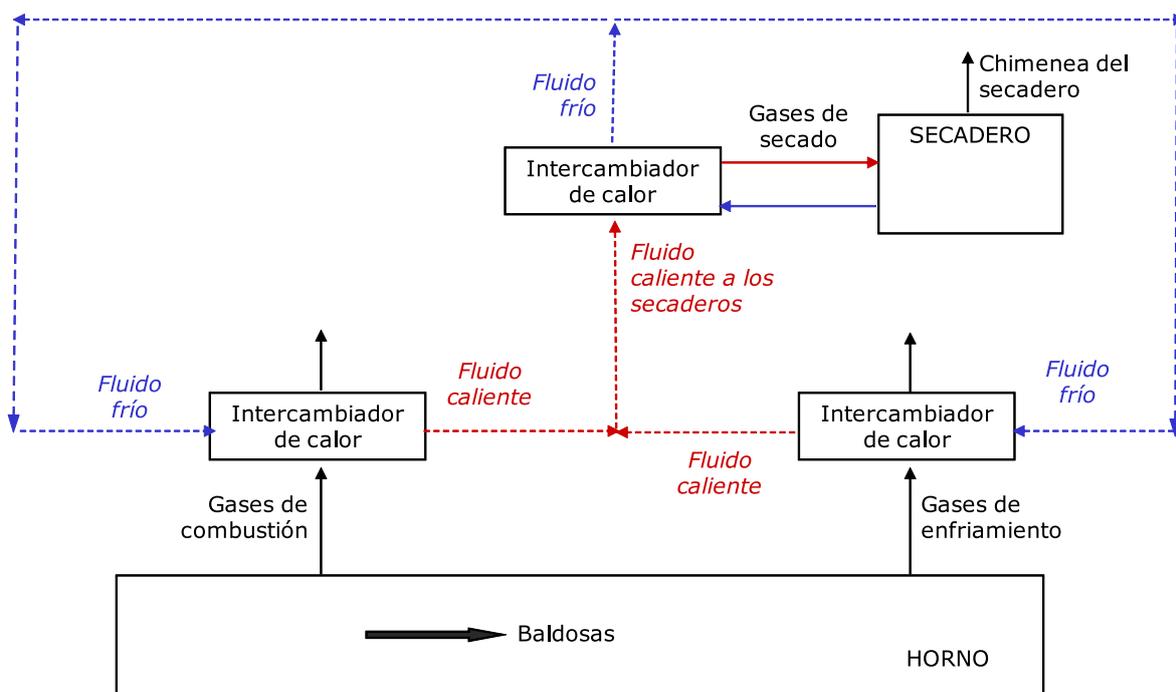


Figura 3. Esquema general de la instalación de recuperación de calor.

3.2. Descripción de los elementos principales

3.2.1. Secadero

El secadero estudiado es un secadero vertical, el aporte de calor se realiza mediante la combustión de gas natural a través de dos quemadores situados en las dos recirculaciones de aire.

En la figura 4 se ha muestra un esquema del secadero estudiado.

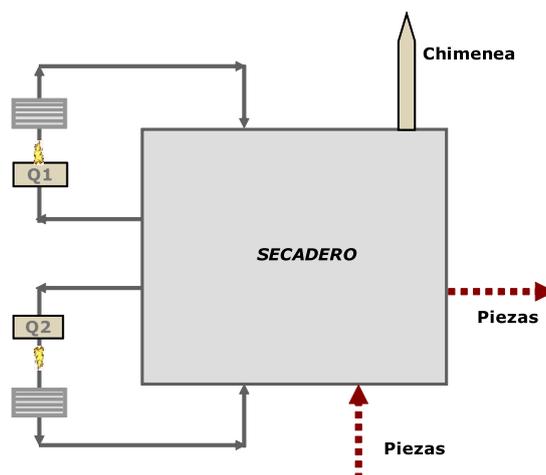


Figura 4. Esquema del secadero.

La circulación de las piezas, al entrar al secadero, es en primer lugar ascendente, y tras pasar por la zona alta del secadero, descienden hacia la zona de estabilización.

Tras entrar en contacto con las piezas, una parte de los gases de secado se recircula de nuevo hacia el secadero mediante dos recirculaciones independientes, donde están ubicados los quemadores vena de aire, y el resto se vierte a la atmósfera a través de la chimenea. En estas dos recirculaciones es donde se han ubicado los dos intercambiadores de calor de aceite que calientan los gases de secado recirculados tras los quemadores.

Las temperaturas de consigna de los quemadores se establecen para los gases de secado que salen del secadero, de modo que los elementos calefactores (intercambiador de calor y quemadores) calientan los gases que se introducen en el secadero tanto como sea necesario para que en la salida, la temperatura sea la establecida.

Los gases procedentes de la chimenea de los humos de combustión poseen una temperatura entorno a los 210 °C, al igual que los gases procedentes de las zonas de enfriamiento.

Cada una de estas corrientes se hace pasar por sendos intercambiadores de calor, en los cuales circula en contracorriente un aceite térmico, que alcanza temperaturas del orden de los 190 °C, cede parte de su calor a los gases de secado, a

través de dos intercambiadores de calor situados en las conducciones de recirculación del secadero.

3.2.2. Horno

El horno estudiado es un horno monoestrato de rodillos, dividido en tres zonas: calentamiento, cocción y enfriamiento.

El aporte de calor se realiza mediante la combustión de gas natural en quemadores de alta velocidad, distribuidos a lo largo de las paredes laterales del horno por encima y por debajo del plano que delimitan los rodillos, en las zonas de calentamiento y cocción.

Previamente a la instalación del sistema de recuperación, los gases de combustión del horno, tras diluirse con aire ambiente, se emitían directamente a la atmósfera, tras la instalación del sistema de recuperación, éstos no se diluyen con aire ambiente, y transfieren calor al fluido térmico.

Los gases de enfriamiento, inicialmente, se recogían de las zonas de enfriamiento rápido, enfriamiento indirecto y enfriamiento final. De esta chimenea, se recuperaba una parte a un secadero prehorno, otra a los quemadores del horno y el resto se vertía a la atmósfera.

El intercambiador de calor de la zona de enfriamiento se ha instalado en la conducción de los gases de enfriamiento rápido, por ser estos los que poseen mayor temperatura.

3.2.3. Intercambiadores de calor y fluido térmico

Se han instalado cuatro intercambiadores de calor en contracorriente, dos de ellos situados en el horno y los otros dos en el secadero.

El aceite refinado, formulado especialmente como fluido de intercambio térmico, aditivado convenientemente para proporcionarle estabilidad térmica y resistencia al incremento de la oxidación, para poder responder así a los aumentos de temperatura durante su utilización y al espaciado de los intervalos de cambio de aceite.

Sus bases refinadas, le proporcionan a este termo-fluido una elevada resistencia térmica así como propiedades antioxidantes, lo que hace disminuir considerablemente la formación de insolubles y depósitos sobre las tuberías asegurando así la perfecta circulación y transmisión de calor del fluido, evitando la obstrucción de los circuitos.

Además, este fluido presenta una viscosidad baja que permite el arranque inmediato a bajas temperaturas, óptima transmisión de calor y ofrece así un mayor rendimiento de la bomba. Con todo esto, permite garantizar un perfecto funcionamiento y un alto rendimiento en las instalaciones de tipo cerrado sin contacto directo con el aire y dotadas de medios mecánicos de circulación.

Las propiedades de aceite térmico se muestran en la tabla 1.

Propiedad	Norma	Valor
Temperatura máxima de operación (°C)	---	350
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	ASTM D 445	20 – 25
Índice de viscosidad	ASTM D 2270	95
Densidad a 15 °C (g/cm ³)	ASTM D 1298	0,860
Punto de inflamación (°C)	ASTM D 92	210
Punto de congelación (°C)	ASTM D 97	-14

Tabla 1. Características del aceite térmico empleado.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1. Determinación del ahorro energético

La medida y verificación del ahorro se ha realizado según la metodología descrita en el protocolo internacional de medida y verificación (IPMVP) promovido por la Efficiency Valuation Organization (EVO).

La Medida y Verificación (M&V) es un proceso que consiste en utilizar la medida para establecer de forma fiable el ahorro real generado en una instalación dentro de un programa de gestión energética.

El ahorro de energía no se puede medir de forma directa ya que representa la ausencia del consumo de energía. Por este motivo, el ahorro se determina comparando el consumo, o la demanda, antes y después de la implementación de un proyecto de eficiencia energética, al tiempo que se realizan los ajustes según la variación de las condiciones iniciales.

El consumo energético del secadero se realizó tomando la lectura del caudalímetro de gas natural instalado en el secadero. Esta lectura se realizó en pequeños intervalos de tiempo, con el fin de registrar las incidencias producidas, y siempre en intervalos de tiempo total, superiores a 3 horas.

Además de la lectura del consumo en el caudalímetro de gas se anotó la presión y temperatura del gas natural en el interior de la conducción, mediante estos datos es posible normalizar el caudal de gas, mediante la siguiente expresión:

$$Q_N = Q \cdot \left(\frac{T_0}{T_{gas}} \right) \cdot \left(\frac{P_{gas} + P_{atm}}{P_0} \right) \left(\frac{m_N^3}{h} \right)$$

Ecuación 1.

Donde:

- Q : es el caudal obtenido a partir de la lectura directa del caudalímetro (m^3/s).
- T_{gas} : es la temperatura del gas natural en la conducción (K).
- T_0 : es la temperatura de referencia (273 K).
- P_{gas} : es la presión del gas en la conducción (N/m^2).
- P_{atm} : es la presión atmosférica media (N/m^2).
- P_0 : es la presión de referencia ($1,013 \cdot 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$).

4.2. Determinación de las condiciones de operación del secadero

Con el fin de validar que el sistema de recuperación de calor no afecta a las condiciones de la operación de secado se determinó experimentalmente la distribución de temperatura en interior del secadero, en las diferentes situaciones analizadas, y los caudales de gases a la salida del secadero.

La determinación experimental del ciclo de secado se llevó a cabo mediante un dispositivo mostrado en la figura 5 que consiste en un recipiente metálico, de dimensiones 33 cm x 33 cm, 2,5 cm de espesor, recubierto externamente con fibra cerámica aislante. En su interior está situado el sistema de adquisición de datos, donde se conectan 4 termopares de tipo K. Junto a la electrónica de adquisición de datos, se sitúan dos bolsas de agua, que se congelan antes de iniciar el ensayo, para asegurar que el sistema de adquisición de datos no supera los 50 °C.

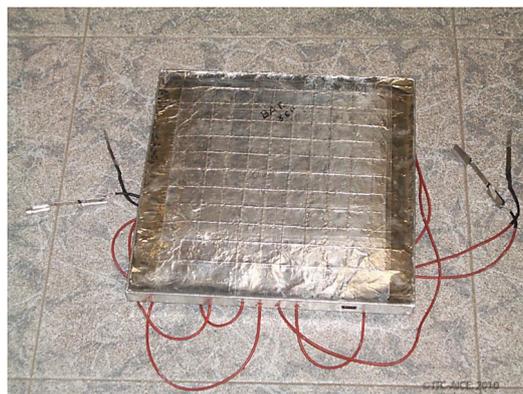


Figura 5. Dispositivo empleado para determinar el ciclo de secado.

La puesta en marcha y detención de la adquisición de datos, así como la descarga de los valores almacenados, se realiza a través de un ordenador, utilizando un software específico.

La determinación de los caudales gaseosos se realizó mediante el uso de un tubo de pitot tipo S.

Se realizó según la norma UNE 77225:2000.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Se realizó un estudio preliminar del funcionamiento de la instalación con el producto mayoritario. La toma de las mediciones con recuperación y sin recuperación de calor se ha realizado en condiciones de producción similares, con el objetivo de que la comparativa sea aceptada y se tenga en cuenta los criterios del IPMVP.

A continuación se exponen los resultados obtenidos en las dos situaciones de funcionamiento analizadas.

En la tabla 2 se muestran los parámetros de funcionamiento del secadero estudiado en las situaciones analizadas.

Parámetro		Sin recuperación	Con recuperación
Producto	Tipo de composición fabricada	Gres porcelánico	
	Formato (cm x cm)	30 x 60	
	Producción (kg ss/h)	2,30	2,36
	Humedad de entrada (% b.s.)	6,35	6,35
	Humedad de salida (% b.s.)	0,05	0,06
Secadero	Temperatura consigna quemador 1 (°C)	125	125
	Temperatura consigna quemador 2 (°C)	120	120

Tabla 2. Parámetros de funcionamiento del secadero sin y con recuperación.

Con la finalidad de validar el funcionamiento del sistema de recuperación de calor, se analizaron las propiedades de los gases de secado mientras se estaba recuperando calor desde los hornos y sin la recuperación, con el fin de comprobar si éstas se ven afectadas por el sistema de recuperación empleado.

En la tabla 3 se muestran las propiedades de los gases de chimenea del secadero en las situaciones analizadas.

Parámetro	Sin recuperación	Con recuperación
Temperatura (°C)	120	120
Humedad absoluta (kg agua/kg aire seco)	0,100	0,090
Caudal de gases (m/h)	7100	7900

Tabla 3. Caracterización de los gases de chimenea del secadero sin y con recuperación de calor.

Se observa que las condiciones de los gases de secado apenas se ven modificadas por el sistema de recuperación empleado.

La menor humedad absoluta de los gases de secado, con el sistema de recuperación de calor, se corresponde con el menor consumo de gas natural de secadero, ya uno de los productos de la combustión del gas natural es el vapor de agua.

El ciclo de secado experimental se llevó a cabo utilizando un dispositivo indicado en el apartado 4. En la figura 6 y en la figura 7 se muestran los resultados obtenidos, sin recuperación y con recuperación de calor, respectivamente.

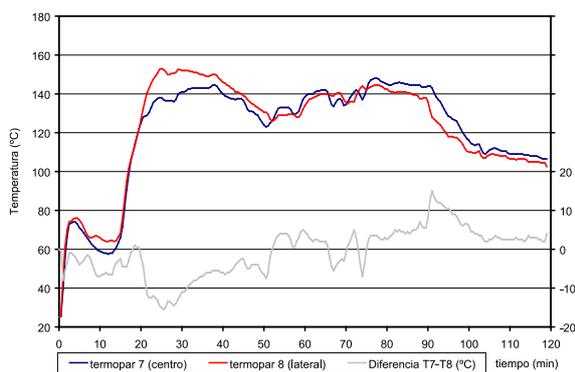


Figura 6. Temperatura de gases de secado sin recuperación.

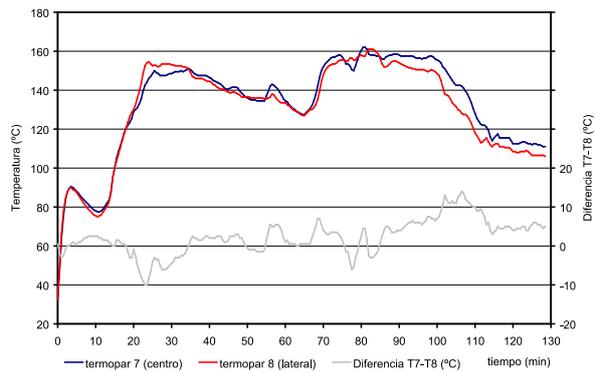


Figura 7. Temperatura de los gases con recuperación.

Los resultados obtenidos muestran que no existen diferencias de temperaturas importantes entre la zona central y lateral del secadero. Durante el tramo ascendente, la temperatura de los gases en el lateral del secadero es ligeramente superior que en el centro, en ambas situaciones, esta situación se invierte durante el tramo descendente. La máxima diferencia de temperatura observada asciende a, aproximadamente, 15 °C.

Se observa que cuando la recuperación de calor está en funcionamiento, se alcanzan temperaturas más elevadas en la segunda mitad del ciclo de secado.

El ciclo de secado es, formalmente, similar en ambas situaciones, por lo que puede concluirse que el modo de recuperación de calor procedente del horno apenas incide sobre el ciclo de secado.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio realizado son las siguientes:

- Se ha puesto a punto una instalación experimental de recuperación de calor que permite la recuperación simultánea de energía desde la chimenea de los gases de combustión y de enfriamiento en una única corriente, utilizando un aceite térmico.

- Se ha comprobado que la instalación de este sistema no modifica las condiciones de operación del secadero, de manera que no se modifican las propiedades del producto.
- Los estudios preliminares realizados en el momento de presentar este documento, muestran que es posible obtener una reducción en el consumo de gas natural entre un 60 y un 90%, en función del material procesado, y una reducción similar de las emisiones de dióxido de carbono asociadas al secadero.

AGRADECIMIENTOS

El estudio presentado ha sido financiado por el Instituto de la Mediana y Pequeña Industria Valenciana (IMPIVA) dentro del Programa de investigación y Desarrollo Tecnológico a través del proyecto IMIDTF/2010/179.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Decisión de la Comisión 2007/589/CE, de 18 de Julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con al Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
- [2] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.
- [3] Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Abril de 2009, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE, para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.
- [4] ESCARDINO, A. El esfuerzo en innovación de la industria cerámica de la Comunidad Valenciana para reducir las emisiones de dióxido de carbono. EN: *Simposio internacional sobre el cambio climático, desde la ciencia a la sociedad*. Valencia: Generalitat Valenciana, 2005. pp 121-133.
- [5] ESCARDINO, A.; JARQUE, J.C.; MORENO, A.; DE LA TORRE, J. Secado de materiales cerámicos (I). Consideraciones generales. Isotermas de equilibrio. *Técnica Cerámica*, 185, 452-462, 1990
- [6] ESCARDINO, A.; JARQUE, J.C.; MORENO, A.; DE LA TORRE, J. Secado de materiales cerámicos (II). Cinética del secado de piezas cerámicas de pavimento y revestimiento. Modelos dinámicos. *Técnica Cerámica*, 190, 34-42,1991.

- [7] ESCARDINO, A.; GALLÉGO, M^a.A.; IBÁÑEZ, M.J.; NEGRE, F. Secado de materiales cerámicos. I. Factores que afectan a la humedad de equilibrio. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 26(6), 367-373, 1987.
- [8] MALLOL, G.; MEZQUITA, A.; LLORENS, D.; JARQUE, J.C.; SAHÚN, J.; VALLE, F. Estudio de la operación de secado en los soportes de las baldosas cerámicas en secaderos verticales. *Cerámica Información*, 287, 81-93, 2002.
- [9] MEZQUITA, A.; MONFORT, E.; ZAERA, V. Sector azulejero y comercio de emisiones: reducción de emisiones de CO₂, benchmarking europeo. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 48(4), 211-222, 2009.
- [10] MONFORT, E.; MEZQUITA, A.; GRANEL, R.; VAQUER, E.; ESCRIG, A.; MIRALLES, A.; ZAERA, V. *Análisis de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas*. EN: XI Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación de Castellón, 2010.