

#### Sede UJI

Campus Universitario Riu Sec  
Av. Vicent Sos Baynat s/n  
12006 Castelló (Spain)

#### Sede Almassora

Pol. Ind SUPOI 8  
C/Cedrilas, 20  
12550 Almassora-Castelló (Spain)

[www.itc.uji.es](http://www.itc.uji.es)

info@itc.uji.es  
T. +34 964 34 24 24  
F. +34 964 34 24 25

## Análisis de las posibilidades de electrificación de la cocción de baldosas cerámicas

Informe nº C221382

Nº de páginas 65

ASCER - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE  
AZULEJOS Y PAVIMENTOS CERÁMICOS

Castellón, 25 de noviembre de 2022



**INDICE**

<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>3. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO</b> .....	<b>4</b>
3.1. CONSIDERACIONES EN LA EXPRESIÓN DE CONSUMOS ESPECÍFICOS.....	4
<b>4. CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub></b> .....	<b>5</b>
4.1. CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES DE CO <sub>2</sub> SECTORIALES .....	5
4.2. CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES DE CO <sub>2</sub> EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN .....	6
<b>5. LA ETAPA DE COCCIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS</b> .....	<b>9</b>
5.1. CONSUMO DE ENERGÍA Y BALANCE ENERGÉTICO A UN HORNO .....	10
5.2. ENERGÍA MÍNIMA NECESARIA PARA LLEVAR A CABO LA COCCIÓN .....	11
5.3. RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL HORNO .....	13
5.4. TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS HORNOS. LA IMPORTANCIA DE LA RADIACIÓN .....	15
<b>6. COCCIÓN ELÉCTRICA DE BALDOSAS CERÁMICAS. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>16</b>
6.1. NANETTI.....	18
6.2. SYSTEM CERAMICS .....	19
6.3. SACMI FORNI & FILTER.....	20
6.4. SITI B&T GROUP.....	21
6.5. KERAJET .....	22
<b>7. RESULTADOS DE LA ENERGÍA MÍNIMA PARA LA COCCIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS</b> .....	<b>24</b>
7.1. ESTUDIO DEL CALOR DE REACCIÓN .....	24
7.2. DETERMINACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA PARA LA COCCIÓN DE DIFERENTES COMPOSICIONES .....	30
<b>8. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES EN HORNOS ELÉCTRICOS</b> .....	<b>32</b>
8.1. HORNO ELÉCTRICO NANNETI ERVD-15/01 .....	33
8.2. HORNO ELÉCTRICO SYSTEM CERAMICS. LEVANTINA TECHLAM.....	42
<b>9. CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS HORNOS EN FUNCIÓN DEL ESPESOR</b> .....	<b>49</b>
9.1. CONSUMO ABSOLUTO DEL HORNO FRENTE A PRODUCCIÓN MÁSCA .....	49
9.2. CONSUMO ESPECÍFICO FRENTE AL PESO ESPECÍFICO .....	50
<b>10. ELECTRICIDAD NECESARIA EN CASO DE ELECTRIFICACIÓN DE HORNOS</b> .....	<b>51</b>
<b>11. RESUMEN DEL ESTUDIO</b> .....	<b>52</b>
<b>12. CONCLUSIONES FINALES Y DESAFÍOS FUTUROS</b> .....	<b>53</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>54</b>

## 1. Antecedentes

Uno de los problemas que más apremia a la industria de baldosas cerámicas es su adaptación a los nuevos criterios de reducción de emisiones de dióxido de carbono en lo que se denomina "la descarbonización de la industria cerámica". Los objetivos de reducción en la UE para 2030 y 2050 (55% y neutralidad en emisiones, respectivamente) son ciertamente exigentes, sobre todo para las industrias con procesos a alta temperatura.

Las principales emisiones directas de CO<sub>2</sub> se originan en los procesos de combustión, y por el mayor consumo térmico, son especialmente relevantes las de la etapa de cocción. Para reducir los consumos energéticos y reducir las emisiones el sector cerámico ha venido trabajando de forma continua en la optimización de procesos y materiales para maximizar la eficiencia energética, pero esta línea de trabajo ha alcanzado un elevado nivel de madurez, quedando un margen de mejora relativamente reducido, y claramente insuficiente para lograr por sí sola los objetivos de reducción propuestos por la UE. En consecuencia, es necesario plantear alternativas disruptivas, que se pueden simplificar en tres grandes líneas: i) uso de combustibles alternativos; ii) captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>; y iii) electrificación de procesos, con energía generada por fuentes renovables<sup>1</sup>.

La vía de la electrificación se puede considerar como la opción que presenta mayor madurez tecnológica, pero tiene como principal barrera el coste actual de dicha energía, o más concretamente la ratio de coste energía eléctrica-energía térmica, así como la poca oferta de equipos industriales.

Además, en caso de que, a nivel sectorial, se opte por la vía de la electrificación, y progresivamente se aborde desde el punto de vista técnico el diseño y fabricación de equipos eléctricos industriales, surge la necesidad de hacer una estimación de la demanda de energía que necesitaría el sector, en caso de electrificación.

Por lo tanto, para abordar este estudio, se ha llevado a cabo un análisis sectorial con el esquema conceptual que se muestra en la figura 1.

---

<sup>1</sup> Ferrer, S.; Mezquita, M.; Monfort, E.; Vedrí, J. Guía de tecnologías hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas. ITC-AICE. IVACE, 2021.

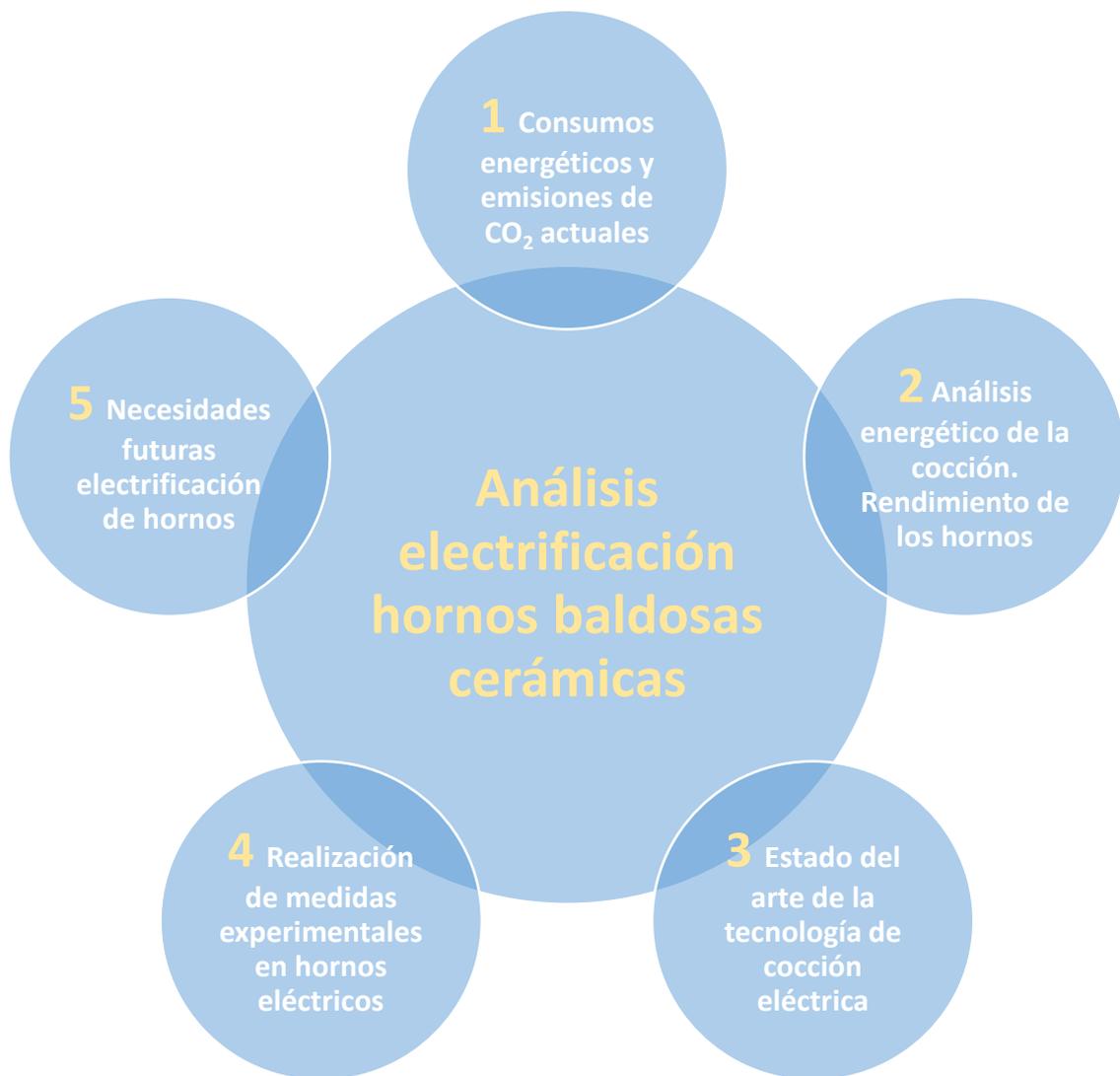


Figura 1. Esquema de los diferentes puntos que aborda el análisis sobre la electrificación de hornos.

## 2. Objetivo

El **objetivo principal** del proyecto ha sido la obtención de un informe sobre el estado del arte de la tecnología de cocción eléctrica a nivel industrial, analizar su viabilidad técnica, y determinar los requerimientos energéticos. Finalmente se ha estimado la demanda eléctrica que tendría el sector cerámico, en caso de la electrificación parcial o total de los hornos.

Queda fuera del alcance del estudio el análisis de la viabilidad económica, que depende de factores que, a corto y medio plazo, está previsto que presenten una gran variabilidad.

### 3. Metodología para la elaboración del documento

El desarrollo de este documento ha consistido en la ejecución de las siguientes acciones:

1. **Análisis de la situación actual** del sector cerámico desde el punto de vista del **consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>**.
2. Estudio energético de los hornos de cocción de baldosas cerámicas, determinación de la **energía necesaria para llevar a cabo la cocción**, para distintas tipologías de producto y distintos espesores, y obtención de **rendimientos**.
3. **Recopilación de información** sobre hornos eléctricos destinados a la cocción de materiales cerámicos y contacto con proveedores de la tecnología. La limitación, en este aspecto, es el bajo grado actual de implementación de esta tecnología en el sector.
4. Ejecución de **medidas experimentales en hornos eléctricos**, con el objetivo de realizar un balance energético y disponer de valores reales de rendimiento y consumo. Para ello se ha contado con la colaboración de 2 empresas que disponen de hornos eléctricos.
5. Estimación de las **necesidades futuras** que tendría el sector cerámico para cubrir la demanda de energía eléctrica, en caso de electrificación de todos los hornos del sector.

Finalmente, se ha elaborado el presente **documento** que incluye todos los resultados y conclusiones alcanzadas durante el desarrollo del estudio.

Para la confección del presente informe siguiendo la metodología propuesta, especialmente las acciones 3 y 4, ha sido fundamental contar con la colaboración de empresas. Por lo que desde el ITC deseamos manifestar nuestro agradecimiento a las empresas Nanneti, System Ceramics, Sacmi forni & Filter, Siti B&T Group y KERAjet que de forma desinteresada han aportado información y ofrecido su visión sobre la electrificación de los hornos (acción 3), y también muy especialmente a las empresas Vernis y Levantina Techlam que han puesto a nuestra disposición sus instalaciones para poder llevar a cabo los estudios energéticos experimentales en sus hornos eléctricos (acción 4).

#### 3.1. Consideraciones en la expresión de consumos específicos

Como se ha descrito anteriormente, una de las acciones del presente estudio ha sido la realización de campañas experimentales para la obtención de valores de consumo energético, y rendimientos de hornos eléctricos destinados a la cocción de baldosas cerámicas.

En este sentido, un tema muy importante a considerar, que se ha evidenciado en el marco de este estudio, es la importancia de utilizar unidades comparables al indicar valores de consumo específico.

Por lo tanto, se ha establecido que la comparación de los valores de consumo energético obtenidos en hornos eléctricos, con respecto a hornos de combustión deberá hacerse en unidades másicas, o en caso de hacerse en unidades de superficie, se hace necesario conocer el peso específico del producto (kg/m<sup>2</sup>).

La justificación a esta decisión es que, a igualdad del resto de variables, la cocción de baldosas cerámicas con una misma superficie y diferente espesor dará lugar a consumos energéticos distintos que, en principio, serán mayores cuanto mayor sea el espesor de las piezas, es decir, cuanto mayor sea la masa a cocer.

## 4. Consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>

### 4.1. Consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> sectoriales

En el año 2021, el consumo energético en el sector cerámico (gas y electricidad) ascendió a **18.901 GWh/año**, siendo 1.860 GWh/año de electricidad y 17.041 GWh/año de gas natural, considerando tanto el que se consume en el proceso de fabricación como el utilizado en los sistemas de cogeneración. Por lo tanto, en global, el consumo de electricidad supone un 10 % del total, y el 90 % restante corresponde a consumo de gas natural.

En la tabla 1 se muestra el consumo total sectorial de gas natural, referido al Poder Calorífico Superior, y el consumo total sectorial de energía eléctrica, correspondiente a los últimos 5 años.

Tabla 1. Consumo sectorial total de gas natural y electricidad en los últimos 5 años. Fuente: ASCER, 2022<sup>2</sup>.

Año	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Consumo térmico total (GWh/año)</b>	14.180	14.150	14.101	13.433	17.041
<b>Consumo eléctrico total (GWh/año)</b>	1.388	1.334	1.406	1.444	1.860

Cabe indicar que, en el caso del consumo eléctrico, alrededor del 20% del total se corresponde a autoconsumo proveniente de las turbinas de cogeneración. Además, es importante resaltar que el 1,47 % del consumo eléctrico total correspondiente al año 2021, se corresponde con autoconsumo renovable.

Con respecto a las emisiones directas de dióxido de carbono generadas durante la fabricación de baldosas cerámicas se dividen en dos grupos (según la Decisión 2007/589/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establecen las directrices para el seguimiento y la notificación de emisiones de gases de efecto invernadero):

- **Emisiones de combustión:** son las emisiones producidas durante la reacción exotérmica de combustión entre un combustible fósil y oxígeno.
- **Emisiones de proceso:** son las emisiones que se producen como resultado de las reacciones de descomposición de los carbonatos presentes en las materias primas durante la etapa de cocción.

Las emisiones totales verificadas de dióxido de carbono a nivel sectorial en 2021 fueron 2.847.866 toneladas de CO<sub>2</sub>, siendo aproximadamente un 7 % emisiones de proceso, y un 93 % emisiones procedentes de la combustión del gas natural.

Durante los últimos años, la cantidad de derechos de emisión de CO<sub>2</sub> gratuitos, asignados a las empresas del sector no han sido suficientes para cubrir las emisiones reales emitidas. Por tanto, se ha producido un déficit de emisiones, que ha supuesto un sobrecoste de varios millones de euros para las empresas afectadas<sup>15</sup>. En concreto, en el año 2021 la factura sectorial por la compra de derechos de emisiones se ha multiplicado casi por 6, pasando de alrededor de 11 millones de euros en 2020 a 66 millones de euros en 2021.

Además del incremento del precio de la tonelada de CO<sub>2</sub>, que ha pasado de un precio medio por tonelada de 25 euros en 2020 a una media de 54 euros en 2021, lo que ha supuesto un aumento del déficit de derechos gratuitos asignados al sector un 190%, lo que significa que las empresas han debido adquirir más derechos de emisión en el mercado de CO<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos (ASCER), 2022.

En la tabla 2 se muestran las emisiones de CO<sub>2</sub> verificadas en 2021 en la Comunitat Valenciana, por sectores de actividad<sup>3</sup>.

Tabla 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> verificadas en 2021, por sectores de actividad, en la Comunitat Valenciana.

Sector	Emisiones de CO <sub>2</sub> eq	
	Toneladas de CO <sub>2</sub> /año	%
<b>Cerámico (pavimento y revestimientos)</b>	2.847.866	35,6%
<b>Cemento</b>	1.446.979	18,1%
<b>Generación eléctrica</b>	1.386.212	17,3%
<b>Refinería</b>	1.152.334	14,4%
<b>Fritas cerámicas</b>	319.293	4,0%
<b>Combustión en sectores industriales</b>	211.913	2,6%
<b>Químico</b>	181.336	2,3%
<b>Vidrio</b>	110.365	1,4%
<b>Cerámico (tejas y ladrillos)</b>	106.281	1,3%
<b>Producción y transformación de metales féreos</b>	86.890	1,1%
<b>Cal</b>	47.339	0,6%
<b>Producción de ácido nítrico</b>	46.990	0,6%
<b>Papel y Cartón</b>	45.146	0,6%
<b>Producción de aluminio secundario</b>	16.800	0,2%
<b>TOTAL</b>	8.005.744	100%

El año 2021, 180 instalaciones de la Comunitat Valenciana estaban obligadas a presentar el informe verificado de sus emisiones de GEI, de las cuales 109 instalaciones estaban sujetas al régimen de comercio de emisiones, y el 71 restante eran instalaciones en régimen de exclusión (empresas que emiten menos de 25.000 t CO<sub>2</sub>/año). Los resultados mostrados en la tabla 2 indican que el sector de baldosas cerámicas fue el que más emisiones generó (un 35,6% del total), seguido por el sector del cemento (18,1%) y el de generación eléctrica (17,3%). Estos datos ponen de relevancia el peso que tiene el sector de baldosas cerámicas en las emisiones generadas en la Comunitat Valenciana.

#### 4.2. Consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación

Atendiendo al consumo de energía térmica en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, este se produce principalmente en tres etapas: el secado de las suspensiones cerámicas por atomización, el secado de los soportes recién conformados y la cocción de las baldosas. Como valor medio total, se considera que el consumo de energía térmica en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas es de 1.428 kWh/t de producto cocido, referido al PCS del gas natural, siendo la etapa de cocción la de mayor consumo, con un valor medio de 793 kWh/t producto cocido<sup>4</sup>.

En la tabla 3 se muestra el consumo de energía medio en estas tres etapas del proceso, así como los valores medios de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en cada etapa, distinguiendo en el caso de la etapa de cocción, entre las emisiones generadas durante la combustión y las emisiones de proceso. Los valores mostrados son con los equipos funcionando en estado estacionario, es decir en producción continua y estable.

<sup>3</sup> Balance de emisiones de gases de efecto invernadero del año 2021 de las instalaciones de la Comunitat Valenciana. Generalitat Valenciana (agroambient.gva.es)

<sup>4</sup> Monfort, E.; Mezquita, A.; Granell, R.; Vaquer, E.; Escrig, A.; Miralles, A.; Zaera, V. 2010. Análisis de consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 49(4), 303-310.

Tabla 3. Consumo térmico medio en estado estacionario y emisiones medias de CO<sub>2</sub> por etapas<sup>5 6</sup>.

Etapa del proceso	Consumo térmico (PCS) (kWh/t cocido)	Emisiones de combustión (kg CO <sub>2</sub> /t cocido)	Emisiones de proceso (kg CO <sub>2</sub> /t cocido)
Atomización	510 ± 23	93 ± 4	-
Secado de soportes	125 ± 12	23 ± 2	-
Cocción	793 ± 14	145 ± 3	25 ± 4
TOTAL	1.428 ± 49	261 ± 9	25 ± 4

El presente informe está centrado en el estudio de las posibilidades de electrificación de la etapa de cocción y para ello es necesario conocer la situación actual de la etapa de cocción, desde un punto de vista energético, y así obtener una línea base de referencia, que sirva de punto de partida para realizar el correspondiente análisis y comparativa del escenario energético actual frente a un escenario de electrificación.

Por ello, a continuación, se muestran los valores medios de consumo de energía térmica que fueron obtenidos durante un estudio sectorial de consumos de energía y emisiones de dióxido de carbono en empresas fabricantes de baldosas cerámicas y de gránulo atomizado.

En la tabla 4 se muestra el consumo específico medio de energía térmica en la etapa de cocción, referido tanto a la masa de producto cocido, expresada en toneladas (t cocido), como a la superficie de baldosas producida, expresada en metros cuadrados (m<sup>2</sup> cocido). Las medidas indicadas son con el horno funcionando en estado estacionario.

Tabla 4. Consumo medio de energía térmica en estado estacionario en la etapa de cocción de baldosas prensadas, desglosado por tipo de composición<sup>7</sup>.

Consumo energético medio en la etapa de cocción de baldosas prensadas							
Tipo de composición			Porosa roja	Porosa blanca	Gres rojo	Porcelánico	Valor medio
Consumo específico térmico	kWh/t cocido	PCI	736 ± 24	798 ± 46	653 ± 16	724 ± 18	716 ± 13
		PCS	816 ± 27	885 ± 51	724 ± 18	802 ± 20	793 ± 14
	kWh/m <sup>2</sup> cocido	PCI	12,1 ± 0,5	14,4 ± 1,3	12,9 ± 0,4	15,7 ± 0,6	14,0 ± 0,4
		PCS	13,4 ± 0,5	16,0 ± 1,4	14,3 ± 0,4	17,4 ± 0,6	15,5 ± 0,4

En el consumo específico de los hornos de cocción de baldosas influyen diversas variables, como son la composición procesada, que determina la temperatura máxima de cocción, las dimensiones de las piezas, que influyen en la masa procesada y en el aprovechamiento de la superficie del horno, y las características propias del horno.

De manera general, se observa que, el consumo específico medio de la cocción de productos porosos es mayor que el obtenido en productos gresificados.

En las composiciones de azulejos, son los productos formulados con arcillas de coloración blanca los que presentan mayor consumo, debido al mayor tiempo de cocción que requieren.

En los productos gresificados, es el gres porcelánico el que presenta mayor consumo, debido principalmente a la mayor temperatura de cocción y duración del ciclo.

<sup>5</sup> Monfort, E.; Mezquita, A.; Mallol, G.; Granell, R.; Vaquer, E., 2011. Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana. Plan de ahorro y eficiencia energética. AVEN.

<sup>6</sup> Ferrer, S.; Mezquita, M.; Monfort, E.; Vedrí, J. Guía de tecnologías hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas. ITC-AICE. IVACE, 2021.

<sup>7</sup> Monfort, E.; Mezquita, A.; Mallol, G.; Granell, R.; Vaquer, E., 2011. Estudio energético sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana. Plan de ahorro y eficiencia energética. AVEN.

Al expresar estos valores medios de consumo específico por metro cuadrado, se observa que el gres porcelánico es el producto que tiene un mayor consumo, este hecho es debido a su mayor peso específico medio, con respecto a las otras composiciones.

En la tabla 5 se muestra un resumen de los valores medios de algunos parámetros de funcionamiento de los hornos de rodillos de cocción de baldosas prensadas, distinguiendo por el tipo de composición procesada. Se ha considerado necesario mostrar estos valores porque han sido utilizados en algunos de los cálculos energéticos realizados en el informe.

Tabla 5. Condiciones medias de operación en la etapa de cocción de baldosas cerámicas prensadas<sup>8</sup>.

Parámetros		Porosa roja	Porosa blanca	Gres rojo	Porcelánico
Espesor cocido (mm)		9,4 ± 0,3	10,5 ± 0,6	9,3 ± 0,2	9,7 ± 0,3
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )		16,4 ± 0,5	18,0 ± 1,0	19,7 ± 0,4	21,7 ± 0,6
Pérdidas por calcinación (%)		9,91 ± 0,1	10,09 ± 0,34	5,48 ± 0,04	3,96 ± 0,12
Producción media	kg cocido/s	1,05 ± 0,09	0,93 ± 0,12	1,29 ± 0,10	1,10 ± 0,07
	m <sup>2</sup> /día	5.552 ± 419	4.594 ± 694	5.624 ± 422	4.385 ± 282
Duración ciclo (minutos)		47 ± 2	59 ± 5	46 ± 1	57 ± 2
Temperatura máxima (°C)		1.126 ± 6	1.144 ± 6	1.147 ± 2	1.192 ± 2

Como se observa en la tabla 5, independientemente del tipo de composición, el espesor de las baldosas cerámicas varía desde 9 hasta 11 mm. En cuanto al peso específico, son las baldosas de gres, y en concreto las de gres porcelánico, las que presentan un mayor valor. Respecto a la producción, se puede considerar que un horno, de media, produce alrededor de los 4.500 kg/h (unos 5.500 m<sup>2</sup>/día), aunque actualmente existen en el mercado hornos de capacidades productivas muy diversas<sup>9</sup>, pudiendo incluso alcanzar las 12 toneladas/h.

La duración del ciclo y temperatura de cocción son muy variables y dependen del tipo de soporte, de la composición, del formato de las baldosas, de la producción del horno, del tipo de esmalte, etc. Los valores de temperatura máxima de cocción se sitúan entre 1.120 y 1.194 °C, y la duración del ciclo de cocción puede oscilar entre los entre 45 y 64 minutos.

<sup>8</sup> Monfort, E.; Mezquita, A.; Mallol, G.; Granell, R.; Vaquer, E., 2011. Estudio energético sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana. Plan de ahorro y eficiencia energética. AVEN.

<sup>9</sup> Monfort, E.; Mezquita, A.; Mallol, G.; Granell, R.; Vaquer, E., 2011. Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana. Plan de ahorro y eficiencia energética. AVEN.

## 5. La etapa de cocción de baldosas cerámicas

El presente trabajo se centra en la etapa de cocción, y esta puede ser considerada como la más importante del proceso de fabricación, pues es la que confiere al producto final las características técnicas y estéticas deseadas: dimensiones, planaridad, rectangularidad, tonalidad, resistencia mecánica, porosidad, acabado superficial, etc.

Durante la cocción se somete a las piezas cerámicas a un ciclo térmico controlado durante el que tienen lugar una serie de transformaciones físico-químicas permanentes e irreversibles en el material, que modifican su microestructura y le confieren las propiedades finales.

Desde el punto de vista energético, las transformaciones que sufre el material son tanto exotérmicas (reacción que libera energía) como endotérmicas (reacción que absorbe energía). En la figura 2, se muestra un ejemplo de un ciclo típico de cocción de composiciones cerámicas tradicionales y se resumen las transformaciones físico-químicas más importantes que tienen lugar durante el tratamiento térmico de los productos cerámicos y los rangos de temperatura donde ocurren<sup>10 11</sup>.

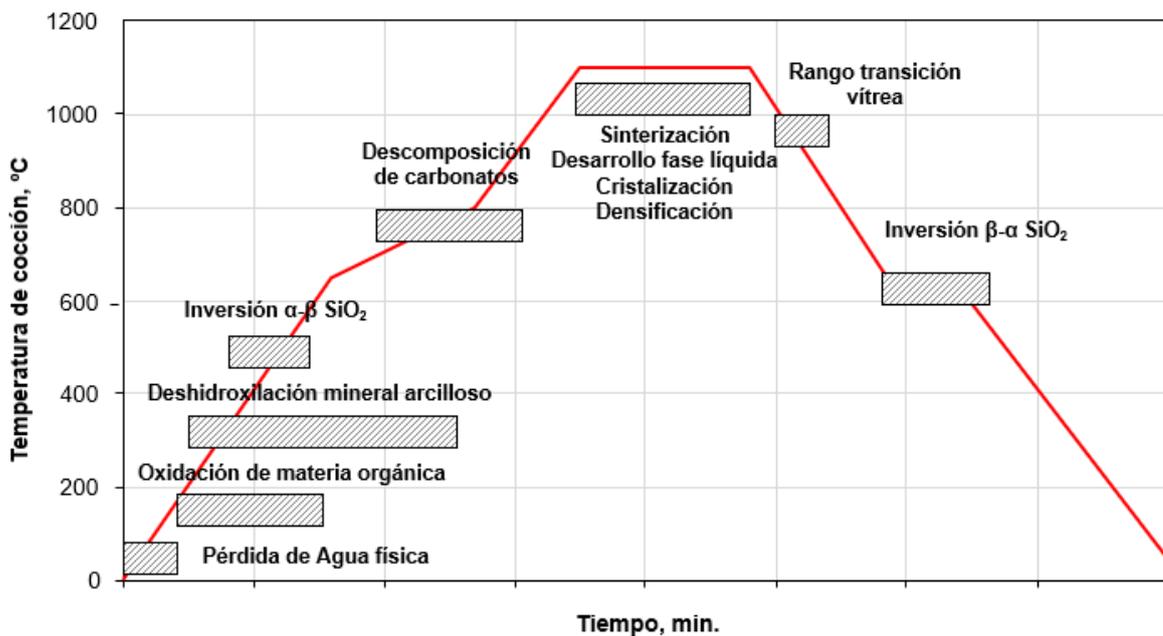


Figura 2. Ejemplo de una curva típica de cocción de composiciones cerámicas tradicionales, con las transformaciones físico-químicas que tienen lugar.

Las reacciones que se producen durante la cocción deben tener lugar de una manera gradual y controlada, pues de lo contrario pueden causar defectos permanentes en el producto.

<sup>10</sup> Ferrer, S., Mezquita, A., Gomez-Tena, M., Machi, C., Monfort, E. 2015. Estimation of the heat of reaction in traditional ceramic compositions. *Appl. Clay Science*, 108, 28-39. doi:10.1016/j.clay.2015.02.019

<sup>11</sup> Pennisi, L., 1991. In *Ceramics and Glasses*. Engineering Materials Handbook, Vol. 4. ASM International, Materials Park, OH, pp. 255-259

## 5.1. Consumo de energía y balance energético a un horno

Para la fabricación de baldosas cerámicas se utilizan hornos continuos de rodillos de combustión y la tecnología más empleada es la monococción. En general se asume que los hornos de rodillos poseen un rendimiento entre el 5 y 20% de la energía térmica que consumen, perdiéndose el resto de diversas formas, como se muestra en la figura 3.

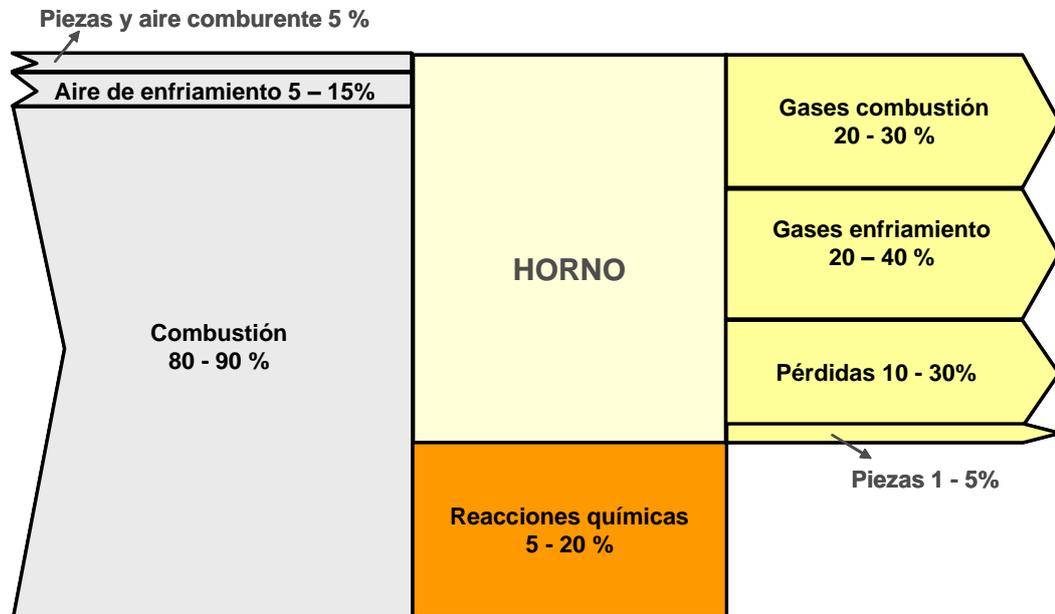


Figura 3. Corrientes que intervienen en el balance de energía a un horno de rodillos de cocción de baldosas.

En los hornos, aproximadamente entre el 20-40% de la energía introducida se pierde a través de la chimenea de los gases de enfriamiento. Normalmente una parte de estos gases se recupera hacia el secadero o se reintroduce al horno como aire comburente precalentado.

A través de la chimenea de los gases de combustión se pierde entre el 20-30% de la energía aportada al horno, aunque una parte de esta energía se puede recuperar a través de intercambiadores de calor, no es lo habitual por el riesgo de condensación de compuestos ácidos que pueden corroer las instalaciones. No obstante, hay empresas del sector que sí lo recuperan<sup>12</sup>. La suma de ambas corrientes supone entre el 40-70% de toda la energía aportada a la instalación. Las pérdidas de energía a través de las superficies del horno, conducciones, rodillos, etc. suponen entre un 10-30 % de la energía aportada. En la tabla 6 se muestran datos de producción, consumo energético y emisiones de un horno de tamaño medio.

Tabla 6. Datos medios de un horno de tamaño medio del sector<sup>13</sup>.

Horno		Valores medios
Producción media (kg cocido/ hora)		4.500
Consumo térmico específico (referido al PCS del gas natural)	kWh/t cocido	793
	kWh/m <sup>2</sup>	15,5
Emisiones específicas de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /t cocido)		150 (Gres) 220 (Azulejo)

<sup>12</sup> Mezquita A.; Monfort, E.; Vaquer, E.; Ferrer, S.; Arnal, M.A.; Toledo, J.; Cuesta, M.A. 2014. Optimización energética en la fabricación de baldosas cerámicas mediante el uso de aceite térmico. BSECV, vol. 51, 4, pp. 183-190.

<sup>13</sup> Ferrer, S.; Mezquita, M.; Monfort, E.; Vedri, J. Guía de tecnologías hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas. ITC-AICE. IVACE, 2021.

En la etapa de cocción además de las emisiones propias de la combustión de gas natural, se deben tener en cuenta las reacciones que se producen durante la cocción. Desde el punto de vista de las emisiones de gases de efecto invernadero, destaca la reacción de descomposición de los carbonatos presentes en las composiciones de productos porosos (azulejo), porque es una reacción altamente endotérmica y además genera CO<sub>2</sub> como producto de la reacción.

Así, un horno de cocción de baldosas cerámicas, produciendo **gres esmaltado y/o gres porcelánico**, emite alrededor de **150 kg CO<sub>2</sub>/t cocido**, mientras que, para **composiciones de azulejo**, las emisiones se sitúan sobre los **220 kg CO<sub>2</sub>/t cocido**. Por ello, en un horno con una producción media de 4,5 t cocido/h las emisiones asociadas serían entre **16 y 24 t CO<sub>2</sub>/día**, dependiendo de la composición procesada.

## 5.2. Energía mínima necesaria para llevar a cabo la cocción

La energía que necesita una composición cerámica para que tenga lugar su cocción es por una parte la que se consume en elevar la temperatura de dicha composición, desde la temperatura inicial del material, hasta su temperatura máxima de cocción, y por otra parte la energía necesaria para llevar a cabo las diferentes transformaciones físico-químicas del material que se pueden producir durante el proceso de cocción.

Por lo tanto, la energía mínima necesaria para llevar a cabo la cocción es la suma del calor necesario para alcanzar la máxima temperatura y el calor de reacción. En este caso, para las estimaciones no se ha considerado el calor absorbido para calentar la masa del resto de elementos que forman parte de la cámara del horno (rodillos, refractarios, etc.), solo la estrictamente necesaria para la cocción del material.

Para realizar los cálculos se pueden aplicar las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\dot{H}_{\text{Composición cerámica}} = \Delta\dot{H}_{\text{abs}} + \Delta\dot{H}_R$$

$$\Delta\dot{H}_{\text{abs}} = \dot{m}_{cr} \cdot C_{p_{cr}} \cdot (T_f - T_i)$$

Recuperable

$$\Delta\dot{H}_R = \dot{m}_{cr} \cdot \Delta h_R$$

Irrecuperable

$$\Delta\dot{H}_{\text{Composición cerámica}} = \dot{m}_{Cr} \cdot C_{p_{cr}} \cdot (T_f - T_i) + \dot{m}_{Cr} \cdot \Delta h_R$$

Figura 4. Ecuaciones para la estimación energía para cocción de baldosas cerámicas.

En las ecuaciones mostradas en la figura 4:

- $\Delta\dot{H}_{\text{Composición cerámica}}$  es el calor necesario para cocer la composición cerámica (KJ/s)
- $\Delta\dot{H}_{\text{abs}}$  es el calor absorbido por la composición hasta alcanzar la temperatura máxima programada (KJ/s)
- $\Delta\dot{H}_R$  es la entalpía total de las reacciones químicas que tienen lugar durante la cocción (KJ/s)
- $\dot{m}_{cr}$ , es el flujo másico de la composición cerámica en crudo seco que recorre el horno (kg/s).

- $C_{p_{cr}}$ , el calor específico medio de la composición cerámica (J/kg K)
- $T_i$  y  $T_f$ , son la temperatura inicial y final de la composición (K)  $\Delta H_R$ : entalpía total de las reacciones químicas (W)
- $\Delta h_R$ : entalpía de reacción del producto cerámico (J/kg)

Para estimar el primer término ( $\Delta \dot{H}_{abs}$ ) se requiere conocer la capacidad calorífica media ( $C_{p_{cr}}$ ) de los productos involucrados en el mismo, en el intervalo entre la temperatura de los productos y la temperatura de referencia a la que se realizan los cálculos. Este valor puede ser estimado en 1 kJ/kg K aunque puede ser determinado mediante ensayos de laboratorio, al igual que la energía necesaria para desarrollar las reacciones químicas del material durante el tratamiento térmico ( $\Delta h_R$ ).

Por lo tanto, el calor específico medio de la composición, así como la entalpía de reacción se puede obtener de manera experimental mediante un equipo de Calorimetría de Análisis Diferencial (DSC).

En el presente trabajo, se ha determinado experimentalmente el calor específico del material cerámico y la entalpía de reacción de las composiciones cerámicas estudiadas, mediante un equipo de Calorimetría de Análisis Diferencial (DSC), modelo Netzch STA 449. Además, el equipo está asociado a un equipo de análisis termogravimétrico, que permite registrar la pérdida de masa en función de la temperatura. En la figura 5 se muestra un esquema del equipo utilizado y en la figura 6 se muestra una fotografía del equipo de análisis térmico utilizado en el laboratorio.

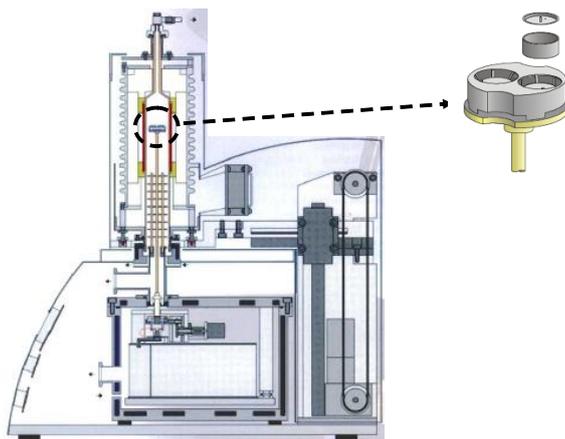


Figura 5. Esquema del equipo utilizado para determinar el calor de reacción, y del portamuestras.



Figura 6. Fotografía del equipo de análisis térmico utilizado para determinar el calor de reacción.

Del ensayo se obtiene la siguiente información:

- El calor específico de la muestra en función de la temperatura (J/kg K). Integrando esta curva en cada intervalo de temperatura, y multiplicando por la masa ensayada, se obtiene el calor de reacción en cada intervalo.
- El flujo de calor de la muestra en función de la temperatura (W/kg). Esta curva muestra el intercambio de calor de la muestra con el entorno, esto es, si las reacciones químicas que se producen son endotérmicas o exotérmicas.
- La pérdida de masa de la muestra en función de la temperatura (mg).

La interpretación conjunta de las tres curvas permite identificar las reacciones químicas que sufre la muestra durante el ciclo térmico al que es sometida, la pérdida de masa asociada a cada una de ellas, el calor cedido o absorbido, así como delimitar de manera aproximada cuándo empieza y termina cada reacción. La suma del calor de reacción de cada una de las reacciones químicas identificadas proporciona el valor global de la entalpía de reacción ( $\Delta \dot{H}_r$ ).

### 5.3. Rendimiento energético del horno

El rendimiento energético de un sistema se puede definir de varias formas, por ejemplo, se puede definir como la energía útil o realmente aprovechada durante la realización de un proceso, la cual va a depender del tipo de proceso y por lo tanto se define como energía requerida.

El objetivo principal del horno es la cocción de baldosas cerámicas. Para ello a las baldosas se les debe aportar la suficiente energía para calentar el material de forma progresiva hasta la temperatura máxima programada, y para que tengan lugar las diferentes transformaciones físico-químicas a lo largo del ciclo de cocción. Posteriormente, el material a elevada temperatura necesita ser enfriado, ya que evidentemente, el material no puede ser utilizado a más de 1000 °C.

Por lo tanto, el horno como tal es un sistema formado por una zona de calentamiento y cocción, y otra zona de enfriamiento, que actúa como un intercambiador de calor aire-piezas calientes. En la figura 7 se han representado de forma esquemática estas zonas.

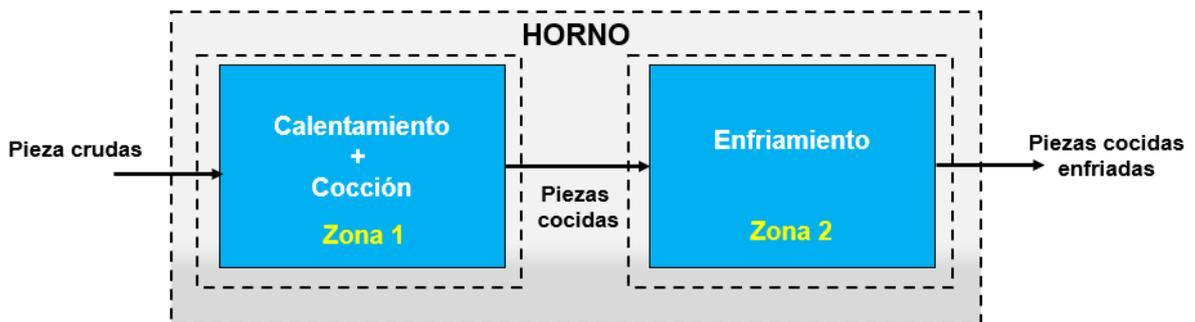


Figura 7. Esquema de las partes diferenciadas de un horno<sup>14</sup>.

Como se observa en la figura, las zonas en las que se puede dividir el horno se corresponden a:

- **Zona 1:** Calentamiento + Cocción. En esta zona es donde tiene el calentamiento progresivo del material, así como las transformaciones físico-químicas.
- **Zona 2:** Enfriamiento. Donde se lleva a cabo el enfriamiento del material, una vez cocido, desde la temperatura máxima de cocción, hasta temperatura ambiente.

Por lo tanto, analizando esta figura, el rendimiento del horno se puede establecer de diferentes formas, por ejemplo, es posible obtener el rendimiento del calentamiento y la cocción (zona 1), el rendimiento del enfriamiento (zona 2) o el rendimiento del horno completo (zona 1 + zona 2), teniendo en cuenta el horno como un equipo que incluye el calentamiento, la cocción y el enfriamiento.

En base a estas consideraciones, y estimando que el calor aportado al material para su calentamiento hasta la máxima temperatura está disponible posteriormente en la zona de enfriamiento del horno, el rendimiento de la operación de cocción se puede definir como la relación entre la cantidad de energía invertida en realizar las transformaciones físico-químicas del material, incluyendo o no su calentamiento.

En función de si se incluye o no el calor necesario para elevar la temperatura del material, existen varias formas de definir el rendimiento energético, aunque en este caso se plantean las que se muestran en la tabla 7:

<sup>14</sup> Ferrer, S.; Mezquita, A.; Aguilera, V.M.; Monfort, E. 2019. Beyond the energy balance: Exergy analysis of an industrial roller kiln firing porcelain tiles. Applied Thermal Engineering, vol. 150, p. 1002-1015

Tabla 7. Definiciones de rendimiento energético utilizadas en este informe<sup>15</sup>.

Parámetro	Ecuación	
Rendimiento zona 1	$\eta_1(\%) = \frac{\dot{m}_{cr} \cdot c_{cr} \cdot (T_f - T_0) + \Delta\dot{H}_r^0}{\dot{E}} \cdot 100$	(1)
Rendimiento global (zona 1 + zona 2)	$\eta_g(\%) = \frac{\Delta\dot{H}_r^0}{\dot{E}} \cdot 100$	(2)
	$\eta'_g(\%) = \frac{\dot{m}_{cr} \cdot c_{cr} \cdot (T_f - T_0) + \Delta\dot{H}_r^0 - \dot{m}_c \cdot c_c \cdot (T_f - T_s)}{\dot{E}} \cdot 100$	(3)

Donde:

- $\Delta\dot{H}_r^0$  corresponde a la energía invertida en realizar las transformaciones físico-químicas del material.
- $\dot{E}$  engloba toda la energía aportada al horno.
- $\dot{m}_{cr} \cdot c_{cr} \cdot (T_f - T_0)$ : engloba la energía necesaria para calentar el material desde la  $T_0$  hasta la temperatura máxima de cocción ( $T_f$ ).
- $\dot{m}_c \cdot c_c \cdot (T_c - T_0)$ : energía contenida en las piezas cocidas a la salida de la etapa de cocción, por tanto, potencialmente recuperable durante el enfriamiento del material, desde una temperatura  $T_f$  hasta la temperatura de salida del horno ( $T_s$ ).

En general, la forma que habitualmente se calcula el rendimiento del horno es teniendo en cuenta sólo la cantidad de energía invertida en realizar las transformaciones físico-químicas del material respecto a la total aportada al horno, dado que con este parámetro se computa **la energía estrictamente irrecuperable** frente a la energía total aportada al sistema (Ecuación simplificada 2 o ecuación completa 3).

De todas formas, en el presente estudio en el que se pretende **comparar la eficiencia entre hornos de combustión y hornos eléctricos**, se hace necesario calcular el rendimiento mediante la ecuación 1 ( $\eta_1$ ), que se corresponde al rendimiento de calentamiento y cocción (zona 1). Ya que, en ambos tipos de hornos, en la zona de enfriamiento, el material a elevada temperatura dispondrá de la misma cantidad de energía.

Al mismo tiempo, cuando existen recuperaciones de calor, sería más apropiado considerar el rendimiento global del conjunto horno-sistema donde el aire de enfriamiento es recuperado, que normalmente es el secadero de piezas conformadas.

Por ello, cuando se desean comparar rendimientos entre diferentes trabajos, es necesario especificar qué criterio se ha utilizado para definir el rendimiento energético, para evitar confusiones.

<sup>15</sup> Ferrer, S., 2016. Análisis energético y exergético del proceso de cocción de composiciones cerámicas. Tesis doctoral. Universitat Jaume I. Castellón. España.

#### 5.4. Transferencia de calor en los hornos. La importancia de la radiación

La transferencia de calor en la cocción de baldosas cerámicas es un fenómeno muy importante, puesto que no solo determina la duración del ciclo de cocción, sino también el perfil de temperaturas durante la cocción en un horno continuo<sup>16</sup>.

En el interior del horno existen básicamente dos mecanismos por los cuales se produce la transferencia de calor, que son la convección y la radiación<sup>17</sup>. Aunque las elevadas temperaturas que se dan en el horno hacen que la radiación sea el principal mecanismo de transferencia de calor a partir de unos 300 °C<sup>18</sup>.

En la figura 8 se muestran los coeficientes de transmisión de calor por convección ( $h_c$ ) y radiación ( $h_R$ ), en función de la temperatura, considerando una velocidad de gases en el interior del horno de 2,5 m/s, y una emisividad efectiva del sistema paredes-piezas de 0,9.

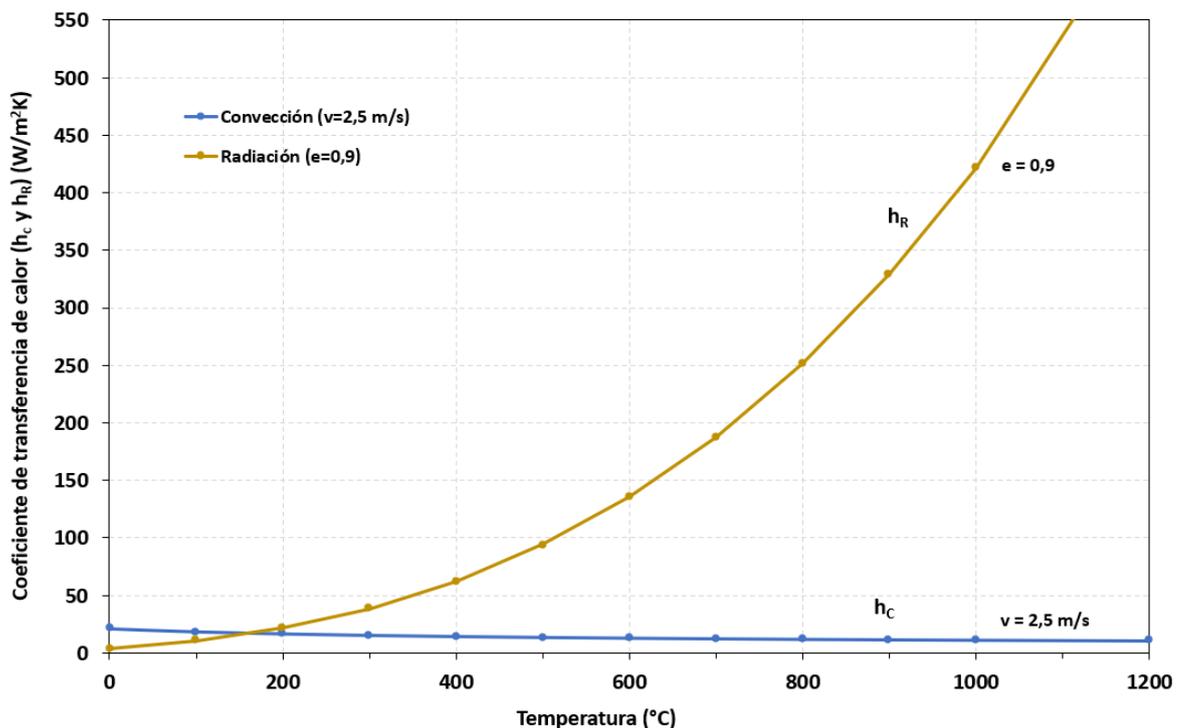


Figura 8. Coeficientes de transmisión de calor por convección y radiación en función de la temperatura.

Como puede observarse en la figura 8, un horno de rodillos operando en las condiciones habituales, en la región de calentamiento y cocción del horno, únicamente a temperaturas inferiores a 200°C, la convección es el mecanismo de transferencia de calor más importante. Sobre los 500 - 600°C, este mecanismo de transporte es ya muy poco operativo (<10%) y a temperaturas superiores a los 800°C es prácticamente despreciable.

Por lo tanto, la tecnología de calentamiento eléctrico podría resultar muy interesante para la cocción de baldosas cerámicas, ya que el mecanismo principal de transferencia de calor de las resistencias eléctricas es la radiación, y como se muestra en la figura 8, en un horno de baldosas cerámicas a partir de los 300 °C es el mecanismo de transferencia de calor predominante.

<sup>16</sup> Amorós, J.L.; Blasco, E. Transmisión de calor en la industria cerámica. 2019. Serie Ingeniería Química.

<sup>17</sup> Jarque, J.C.; Moreno, A.; Enrique, J.E.; Barba, A. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (IV). Mecanismos de transmisión de energía calorífica. Técnica Cerámica, vol. 247, pp. 566-572, 1996.

<sup>18</sup> Cantavella, V. Simulación de la deformación de baldosas cerámicas durante la cocción, Tesis Doctoral. Castellón: Universitat Jaume I, 1998.

## 6. Cocción eléctrica de baldosas cerámicas. Estado del arte.

El uso de hornos eléctricos es cada vez más frecuente en muchos sectores industriales, y a las aplicaciones clásicas de laboratorio y planta piloto cada vez se van sumando más hornos industriales, por ejemplo, en el tratamiento de materiales metálicos mediante hornos de inducción o en el uso de hornos microondas en la industria de alimentos. Dentro del calentamiento eléctrico, los métodos más frecuentes son el arco, la inducción y las resistencias eléctricas<sup>19</sup>.

Por las características del proceso de cocción de baldosas cerámicas y del producto la tecnología de **calentamiento eléctrico por resistencias** sería la más adecuada para cocer los materiales cerámicos<sup>20</sup>.

En un horno eléctrico, la corriente eléctrica fluye por las resistencias eléctricas y se convertirá en calor porque sus electrones en movimiento colisionarán con los átomos del material conductor elevando su temperatura y causando su calentamiento. Este fenómeno es conocido como efecto Joule. Concretamente, el calentamiento de las piezas se realiza de forma **indirecta** y éstas se calientan por radiación, convección o por una combinación de ambas.

En la figura 9 se muestra una imagen de diferentes tipos de elementos de calentamiento eléctrico.

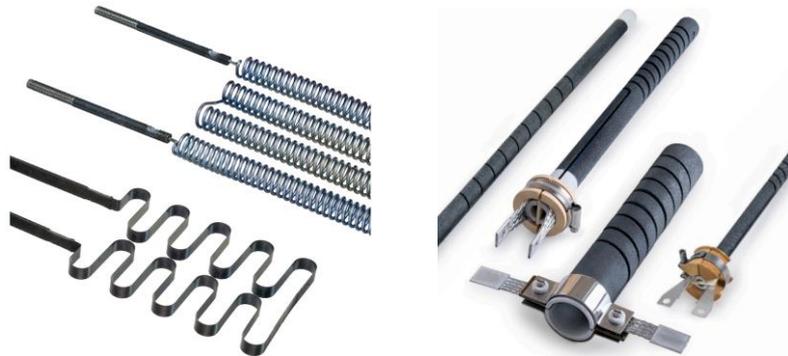


Figura 9. Imagen de resistencias eléctricas de hilo (izquierda) y de carburo de silicio (derecha). Fuente: [www.kanthal.com](http://www.kanthal.com)

La imagen de la figura 9 izquierda se corresponde con elementos de calentamiento metálicos prefabricados de alambre o bandas en aleaciones de hierro, cromo y aluminio o aleaciones de níquel-cromo para temperaturas de entre 50-1.425 °C. Por otra parte, la figura 9 derecha se corresponde con elementos de calentamiento eléctricos de carburo de silicio (SiC) para temperaturas de hasta 1.625 °C.

En general, los **hornos eléctricos de resistencias** presentan con respecto a los hornos de combustión un mayor coste en muchas aplicaciones industriales, por lo que su uso industrial y en la industria cerámica en particular es escaso, excepto en aplicaciones de baja temperatura, necesidad de cocción en atmósferas controladas, pequeñas producciones de productos especiales, etc.

---

<sup>19</sup> Astigarraga Urquiza J. 2014. Hornos industriales de resistencias: teoría, cálculo y aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana de España. ISBN 84-481-1937-1.

<sup>20</sup> Ferrer, S.; Mezquita, M.; Monfort, E.; Vedri, J. Guía de tecnologías hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas. ITC-AICE. IVACE, 2021.

Algunas de las ventajas que presentan este tipo de hornos son las siguientes:

- Permiten alcanzar **temperaturas de trabajo de 1.600-1.800 °C**, lo que cubre toda la gama de aplicaciones normales de los hornos industriales.
- **Mayor seguridad**, por ser mínimos los problemas eléctricos que pueden presentarse y no existir peligro de explosiones por fallo en los sistemas de combustión.
- **Gran precisión** en los procesos y **repetitividad** en los hornos continuos, algo mayor que en los hornos de llamas.
- Gran **flexibilidad** de funcionamiento a diferentes regímenes de trabajo
- Utilización de **energía limpia**. Es decir, utiliza energía eléctrica. Eso sí, siempre y cuando la electricidad sea de origen renovable.
- **Ausencia de gases de combustión**. Este hecho puede mejorar las condiciones ambientales, en las proximidades del horno y en el exterior de la fábrica. Aunque si existe emisión de gases procedentes de la cocción del material, así como de la decoración aplicada.
- **Sin emisiones directas de CO<sub>2</sub>**. Sólo se emitirá CO<sub>2</sub> durante la cocción de materiales porosos, que presenten carbonatos en su composición. Pero en todo caso, las emisiones serán muy minoritarias.
- **Menores pérdidas energéticas, por las chimeneas**. La cantidad de gases generados en el horno se puede reducir en un 80-90%, al no tener combustión. Sólo es necesaria la extracción de los gases generados durante el tratamiento térmico del material cerámico, para eliminar dichos gases (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF, etc.) de la atmósfera del horno.
- **Menores caudales de gases contaminantes**. La reducción de la cantidad de gases generados en el horno favorecerá su tratamiento a un menor coste, ya que se dispondrá de un menor caudal de gases a tratar, y la inversión de los sistemas de depuración, depende en gran medida del caudal de gases a depurar. No obstante, es de esperar que aumenten las concentraciones de contaminantes, lo que deberá tenerse en cuenta en su diseño y en los valores límite de emisión.
- **Menor consumo**. El consumo energético en hornos eléctricos para una misma producción es generalmente menor. El producto necesita el mismo aporte energético, pero en los hornos eléctricos los consumos en periodos de mantenimiento son inferiores al de los hornos de combustión. Además, como se ha indicado anteriormente, el consumo energético de los ventiladores del horno resultará mucho menor, al tener que evacuar una cantidad de gases inferior.
- **Posibilidad de autogeneración de electricidad**. En la propia planta, mediante la instalación de placas fotovoltaicas y/o sistemas de cogeneración en la gestión energética de los hornos.

En la industria cerámica hasta ahora el uso de hornos eléctricos se limita prácticamente a aplicaciones de laboratorio, en pequeñas plantas o en cerámicas técnicas y, por lo tanto, las producciones que se pueden obtener son limitadas.

Durante el desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo una búsqueda de hornos eléctricos específicos para la cocción de baldosas cerámicas, y también se ha contactado con los **principales proveedores de tecnología** del sector cerámico para plasmar su visión sobre la línea de electrificación de los hornos.

A continuación, se muestra la información sobre hornos eléctricos destinados a la cocción de materiales cerámicos, y la visión de los principales proveedores de tecnología del sector cerámico

## 6.1. Nanetti

Una de las empresas proveedoras de estos hornos eléctricos es la empresa **NANNETI**<sup>21</sup>, que tiene un catálogo de hornos para la fabricación de baldosas cerámicas<sup>22</sup>. Este tipo de hornos eléctricos continuos se utilizan habitualmente para la realización de pequeñas pruebas experimentales, y, por lo tanto, las producciones que se pueden obtener son bastante limitadas. Algunas empresas del sector cerámico, principalmente las de fritas y esmaltes disponen de ellos, sobre todo para hacer pruebas de I+D durante el desarrollo de nuevos productos.

En la figura 10 se muestra una imagen de uno de los modelos de hornos eléctricos de la marca Nanetti.



Figura 10. Imagen de un horno eléctrico. Por cortesía de NANNETI.

En la figura 11 se muestra un esquema en el que se indican las dimensiones internas (l (longitud interna), p (boca útil), h (altura plano rodillos a resistencias)) y las dimensiones externas (L (longitud total), P (ancho), H (alto)), de cada uno de los modelos.

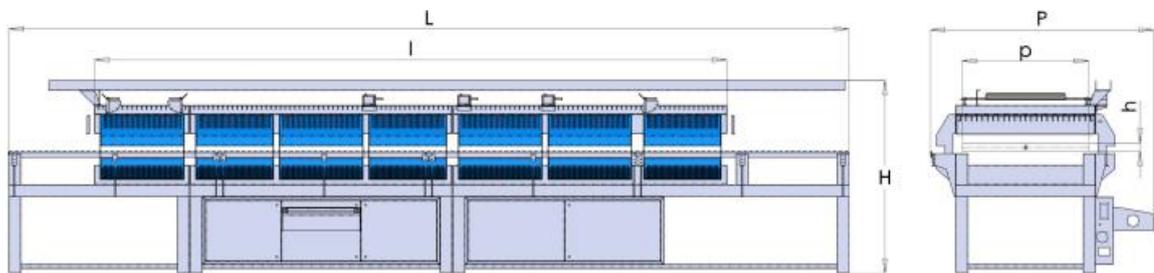


Figura 11. Imagen de un horno eléctrico. Por cortesía de NANNETI.

<sup>21</sup> Empresa ubicada en Italia (<https://www.nannetisrl.it/>) con distribuidor en España: Caslab

<sup>22</sup> <https://www.nannetisrl.it/wp-content/uploads/2022/07/SCHEDA-TECNICA-FORNI-RULLI-ERVDITA.pdf>

En la tabla 8 se muestra la gama de modelos disponibles, con los valores de dimensiones mostrados en la figura anterior, así como sus principales características. Cabe indicar que todos los modelos son capaces de alcanzar temperaturas de hasta 1.300 °C,

*Tabla 8. Modelos de hornos eléctricos Nanneti disponibles para la cocción de baldosas cerámicas.*

Modelos	l (m)	p (m)	h (m)	L (m)	P (m)	H (m)	Potencia (kW)	Valores (m <sup>2</sup> /día)
ERVD-8/1	8,4	1,0	0,05	10,5	2,3	1,6	140	192
ERVD-11/1	10,5	1,2	0,05	12,6	2,3	1,6	225	240
ERVD-15/1	14,7	1,6	0,05	18,9	2,7	1,6	305	420
ERVD-18/0	18,9	1,6	0,05	23,1	2,7	1,6	315	635
ERVD-30	30,0	1,6	0,04	35	2,7	1,6	450	1.000

Como se observa en la tabla 8 y figura 11 estos hornos continuos son capaces de producir desde 200 hasta 1.000 m<sup>2</sup>/día y tienen una longitud que oscila desde los 8 metros en los modelos más pequeños hasta los 30 metros para los modelos más grandes. Además, con ellos es posible cocer materiales de entre 5 y 25 mm de espesor.

En la tabla 9 se muestra la información facilitada por técnicos de la empresa Nanneti acerca del consumo energético que tendría el horno para la cocción de baldosas cerámicas de formato 1200x1200x100 mm.

*Tabla 9. Estimación consumos horno eléctrico Nanneti.*

Parámetro	Valores
Formato (mm)	1200x1200x10
Producción (m <sup>2</sup> /h)	20
Duración del ciclo (minutos)	60
Temperatura máxima de cocción (°C)	1.100
Consumo específico (kWh/m <sup>2</sup> )	8-10

Considerando un ciclo de 60 minutos, con temperatura máxima de cocción de 1100°C. El horno podría producir unos 20 m<sup>2</sup>/h y el consumo eléctrico sería de alrededor de 8-10 kWh/m<sup>2</sup>. No se aporta información sobre el peso específico del material y, por tanto, no es posible indicar valores de consumo específico en unidades másicas.

## 6.2. System Ceramics

En el sector español de fabricación de baldosas cerámicas sólo existe un horno monoestrato de rodillos eléctrico de producción industrial para la fabricación de láminas cerámicas. Este horno fue construido en el año 2006 por la empresa **System Ceramics**<sup>23</sup>, y es uno de los hornos que ha sido caracterizado durante las medidas experimentales, por lo que en apartados posteriores se muestran sus principales características.

En este horno, el aporte de calor se realiza mediante módulos de calentamiento eléctricos que alcanzan temperaturas de hasta 1350 °C. Estos módulos están repartidos a lo largo del horno por encima y por debajo del plano que delimitan los rodillos, en las zonas de calentamiento y cocción, y también en parte de la zona de enfriamiento.

<sup>23</sup> <https://www.systemceramics.com/es>

En la figura 12 se muestra una imagen del horno eléctrico fabricado por System Ceramics que se encuentra instalado en la empresa Levantina Techlam, S.A.



Figura 12. Imagen del horno eléctrico fabricado por System Ceramics. Por cortesía de Levantina.

### 6.3. Sacmi forni & Filter

Asimismo, se ha contactado también con los principales proveedores de tecnología del sector. En el caso de la firma italiana **SACMI**, en particular de su empresa filial especializada en hornos **SACMI FORNI & FILTER**<sup>24</sup>, ha manifestado que los hornos eléctricos es una de sus líneas de investigación, y que actualmente está en fase de I+D.

Por el momento, las limitaciones que ven en la tecnología de cocción eléctrica son las siguientes:

- **Espesor:** Indican que actualmente, a su juicio, no es económicamente interesante cocer baldosas cerámicas de más de 6 mm de espesor. En teoría con ciclos muy lentos sería posible cocer espesores mayores, incluso de hasta 20 mm, pero el coste eléctrico unido a la baja productividad lo harían inviable económicamente.
- **Rotura resistencias:** Por experiencias previas, indican que las resistencias se estropean con mucha frecuencia, y éste será un tema a abordar en el futuro, el de la búsqueda de resistencias que soporten trabajar en continuo en contacto directo con los componentes generados durante la cocción del material cerámico. Se están explorando otras opciones para evitar los daños causados por las atmósferas agresivas, pero por el momento presentan costes prohibitivos.
- **Potencia y cantidad de electricidad:** Debido al alto consumo que presentan los hornos, será necesario dotar al sector de la infraestructura necesaria para poder abastecerse de suficiente electricidad. Además, el origen de esta electricidad debería ser renovable, al menos en un porcentaje elevado.

A pesar de todas las dificultades comentadas anteriormente sí que resaltan muchas ventajas en los hornos eléctricos respecto a los actuales, como por ejemplo el mayor rendimiento que pueden presentar con respecto a los hornos de combustión, la menor cantidad de gases a extraer del horno, etc. Además, si se impone esta tecnología, los productos deberán ser de bajo espesor, por lo que esto también presentará ventajas medioambientales derivadas de un menor consumo de materias primas, un menor consumo energético. Esta disminución de espesor y consecuentemente de peso también presentaría ventajas adicionales de carácter ambiental y técnico (mejora en su manipulación y optimización en el transporte). Remarcar que, para determinados usos de las baldosas cerámicas, especialmente en exteriores, para cumplir con los requerimientos técnicos exigidos, será necesario que el producto tenga un espesor mínimo que pueda aportar la resistencia adecuada para el uso.

---

<sup>24</sup> <https://www.sacmi.com/>

De cara al futuro, en el marco de esta línea de investigación, SACMI tiene previsto construir un prototipo de horno eléctrico continuo de laboratorio con capacidad para cocer baldosas cerámicas de hasta 7-8 mm de espesor y esperan tener resultados en los próximos 2 años.

Aparte de los temas técnicos, desde SACMI también manifiestan que en el mercado hay reticencia en la adquisición de productos de bajo espesor, de ahí la importancia de realizar grandes esfuerzos para transmitir al cliente final que dichos productos podrán presentar idénticas prestaciones técnicas para determinados usos que las baldosas cerámicas habituales, de espesores típicos entre 8 y 11 mm, que son las más extendidas en el mercado.

#### 6.4. Siti B&T Group

Otra de las empresas con las que se ha contactado es la firma italiana **Siti B&T Group**<sup>25</sup>. Durante los contactos mantenidos han manifestado que una de sus líneas de investigación está centrada en los hornos eléctricos, aunque actualmente sus esfuerzos en I+D están más orientados al desarrollo de la tecnología de hidrogeno.

Actualmente los hornos fabricados por la firma italiana **Siti B&T Group** funcionan con gas natural, GLP, combustibles líquidos e hidrógeno+metano. Indican que todavía no existe una tecnología desarrollada en el campo de la electrificación de máquinas térmicas, ya que los factores a considerar y los desafíos a abordar son diferentes, en el uso de máquinas térmicas alimentadas íntegramente por electricidad.

En concreto, según Siti B&T Group, los principales desafíos son:

##### 1. **Potencia eléctrica a instalar:**

Según indican, tomando como referencia el horno indicado en la tabla 10, la potencia total suministrada por la combustión sería igual a 11,3 MW. Lo que significa que, asumiendo que las resistencias entregasen la misma potencia para alimentación monofásica, o 3,76 MW para alimentación trifásica, indican que actualmente sería una solución poco práctica para los usuarios industriales.

Tabla 10. Horno de referencia tomado para las estimaciones, Siti B&T Group.

Parámetro	Valores
Longitud horno (m)	150
Tamaño de boca (mm)	2.950
Producción (kg/h)	~ 7.500
Peso específico (kg/m <sup>2</sup> )	24,2
Combustible	CH <sub>4</sub>
Potencia térmica entregada (MW)	11,3

Una vez obtenida esta potencia térmica mediante electricidad, parece que podría ser complicada la gestión y distribución del calor generado en un entorno relativamente grande. Es decir, sería necesario generar altas potencias térmicas en espacios amplios (ver amplitud horno).

Indican que son conocedores de soluciones híbridas que se utilizan para bajas producciones y bajos consumos específico de material (kcal/kg). A medida que aumentan estos valores, se pasa de un suministro eléctrico a uno híbrido hasta llegar a uno térmico de combustión. Suponiendo que el proveedor de electricidad sea capaz de garantizar al usuario una potencia de 11,3 MW (o 3,76 MW para trifásica), indican que pueden existir otros agravantes, como pueden ser: el dimensionamiento del cuadro de alta potencia, la evaluación de la seguridad y riesgo eléctrico derivado del aumento constante de potencia, las dimensiones de la instrumentación y cableado (reorganización de los espacios del horno derivado del aumento de las dimensiones de los instrumentos electrónicos).

<sup>25</sup> <https://sitibt.com/hornos-esp>

## 2. Resistencias eléctricas

Existen resistencias que alcanzan temperaturas incluso superiores a las de los ciclos de cocción (>1200°C). La dificultad radica en hacer funcionar las resistencias eléctricas a altas temperaturas y en una atmósfera químicamente agresiva para los materiales. Indican que en la cocción de vidrio se presentan situaciones similares con hornos eléctricos, donde, sin embargo, las temperaturas son más bajas (~800° C) y la atmósfera es "más limpia".

## 3. Gestión del horno:

Actualmente el intercambio de calor de los humos a las baldosas se realiza por convección en la 1ª zona del horno y por radiación en la 2ª zona. Con el uso de resistencias eléctricas, sólo se produce uno de los dos métodos de intercambio de calor, por lo que se modificaría la actual forma de cocer las baldosas cerámicas.

## 4. Cocción del producto:

La atmósfera del horno tiene importantes consecuencias en el resultado final del producto: brillo, tonalidades, coloración del esmalte. La cantidad de oxígeno tiene influye en el brillo del producto (especialmente en los brillos), así como en los tonos y colores obtenidos. Con el uso de electricidad, sería necesario calibrar el color de los esmaltes e introducir ventiladores para insuflar aire caliente en los hornos, así como para la recirculación (con el consiguiente aumento de los kW de corriente que sería necesario).

Por lo tanto, en cuanto a descarbonización, la principal línea de investigación de la firma italiana **Siti B&T Group** son las mezclas de hidrógeno y metano, hasta el uso de solo hidrogeno como combustible (cero emisiones de CO<sub>2</sub> y total independencia de combustibles fósiles/gas natural).

## 6.5. KERAjet

Por otra parte, la empresa **KERAjet**<sup>26</sup>, ubicada en Almassora, ha puesto en marcha el **proyecto Helioker**, cuyo principal objetivo es proponer una planta 100% eléctrica para la fabricación de baldosas cerámicas. En sus instalaciones de Almassora van a construir una planta piloto que dispondrá de 4 líneas, compuestas por una prensa para gran formato (laminadora) con capacidad de hacer espesores de entre 2 y 20 mm, un secadero eléctrico, máquinas de decoración full digital y posteriormente un horno eléctrico de 165 metros. Para alimentar dicha planta, en el techo tienen prevista una instalación de placas fotovoltaicas de unos 8 MW de potencia<sup>27</sup>.

En la tabla 11 se muestran las principales características del horno eléctrico de elevada eficiencia que KERAjet plantea para el proyecto Helioker. Este tipo de hornos se diferencia con respecto a los de combustión en el aislamiento, que en su caso es de fibra cerámica y además permite un encendido/apagado rápido.

Tabla 11. Horno eléctrico de la empresa KERAjet.

Parámetro	Valores
Longitud horno (m)	165
Anchura de boca (m)	2,2-2,8
Temperatura máxima (°C)	1.250
Producción (m <sup>2</sup> /día)	12.000
Potencia instalada (MW)	4
Consumo medio (kWh/m <sup>2</sup> )	7

<sup>26</sup> <https://kerajet.com/es/inicio/>

<sup>27</sup> <https://castellonplaza.com/jose-vicente-tomas-kerajet-fabricar-productos-ceramicos-con-energia-electrica-ya-es-una-opcion>

En la figura 13 se muestra el esquema de una sección del horno, así como una fotografía del horno eléctrico instalado en las instalaciones de KERAjet.

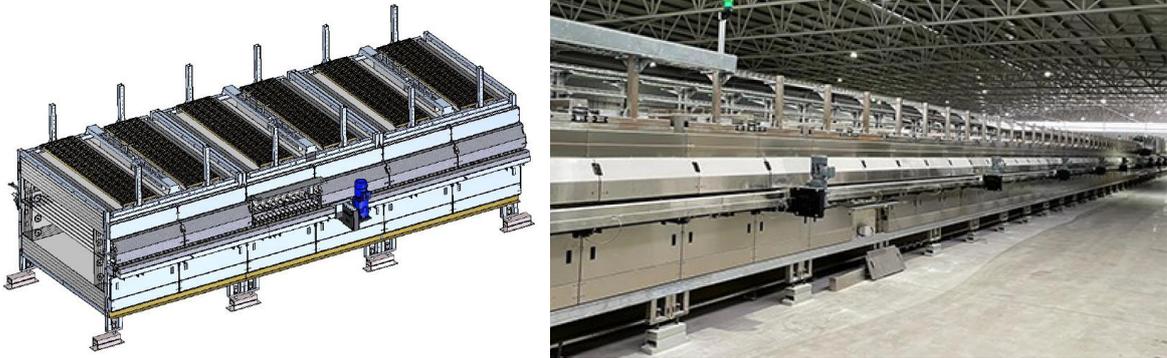


Figura 13. Esquema de la sección del horno eléctrico (izquierda) y fotografía del horno eléctrico instalado en KERAjet (derecha), Fuente: KERAjet.

Desde KERAjet han manifestado que:

- Las producciones de un horno eléctrico respecto a uno de gas no varían, ya que las curvas y los ciclos de cocción son idénticos. Solo varía la forma de suministrar la energía para llevar a cabo la cocción.
- La producción y los consumos energéticos dependerán, de la misma forma que ocurre en los hornos de gas, de las materias primas, del formato de la baldosa, del tipo de composición, etc.
- Los valores medios de consumo que estiman son de 7 kWh/m<sup>2</sup>, valores determinados en los hornos prototipo que disponen en la planta piloto. Aunque evidentemente indican que, a mayor espesor de la baldosa, el consumo energético aumentará.

## **7. Resultados de la energía mínima para la cocción de baldosas cerámicas**

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la energía mínima necesaria para llevar a cabo la cocción, para varias tipologías de producto y para distintos espesores y los resultados obtenidos durante la realización de medidas experimentales en dos hornos eléctricos, uno industrial y otro semi industrial. En ambos casos se ha realizado un balance energético completo. Para ello se ha contado con la colaboración de dos empresas, una fabricante de baldosas cerámicas y otra de fritas cerámicas.

También se indican las posibilidades de desarrollo de la tecnología, así como las necesidades futuras que tendría el sector cerámico para cubrir la demanda de energía eléctrica, en caso de electrificación de la etapa de cocción

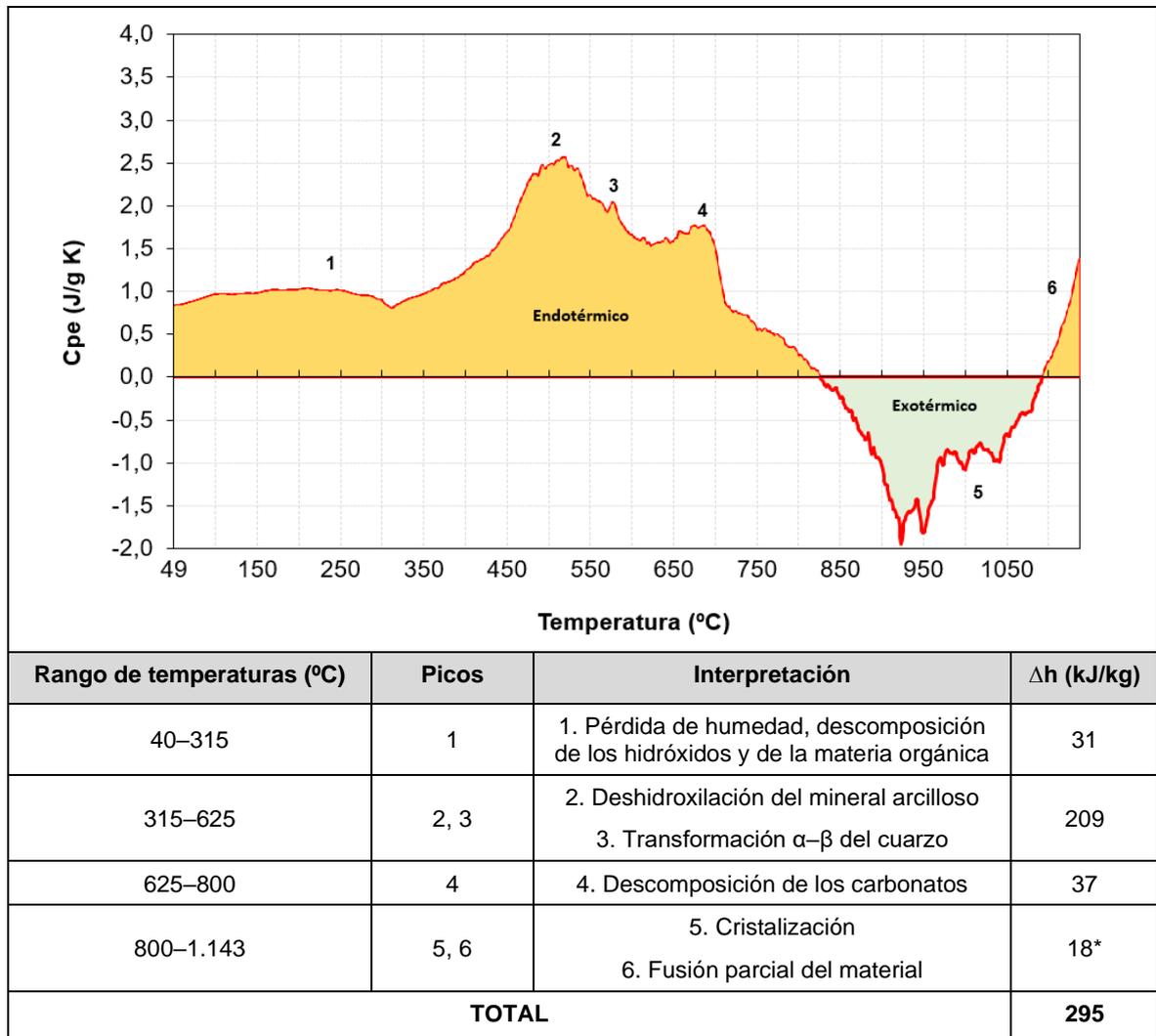
### **7.1. Estudio del calor de reacción**

Es este apartado se analizan los resultados obtenidos al determinar el calor de reacción necesario para llevar a cabo las transformaciones físico-químicas de las diferentes composiciones estudiadas, mediante la técnica de calorimetría diferencial. Para el cálculo se ha considerado que las composiciones están secas porque el ensayo así lo requiere la técnica de calorimetría diferencial no contempla el valor de la humedad.

Las curvas que se muestran en las figuras 14 a 17, identifican las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la cocción de las composiciones estudiadas. Las curvas relacionan la capacidad calorífica efectiva del material en función de la temperatura y los números identifican los picos observados. Las transformaciones observadas, así como el rango de temperatura y la energía intercambiada en cada una de ellas, se desglosan en cada una de las tablas que acompañan a las curvas.

### 7.1.1. Gres rojo

En la figura 14 se muestran los resultados obtenidos durante la cocción del **gres rojo**, donde se han identificado diferentes transformaciones físicas y químicas, que se reflejan en la siguiente curva.



\* La cristalización es un proceso exotérmico y la fusión del material es endotérmico, por lo que el valor mostrado es el global

Figura 14. Curva de DSC y transformaciones físico-químicas identificadas en la composición de gres rojo (GR).

Los números situados en la gráfica, así como en la tabla identifican los picos más significativos observados en la curva, así como la energía intercambiada en cada una de las transformaciones.

La entalpía de reacción de la composición de gres rojo es de **295 ± 30 kJ/kg crudo (82 ± 8 kWh/t crudo)** y las principales reacciones que tienen lugar durante su cocción son:

- Pérdida de la humedad, la descomposición de hidróxidos así como de la materia orgánica.
- Descomposición del mineral arcilloso, donde se rompe la estructura cristalina de los minerales, con desprendimiento de agua.
- Transformación alotrópica del cuarzo.
- Descomposición de los carbonatos.
- Formación de fase líquida que conlleva a una reducción de porosidad en la estructura (sinterización).
- Formación de fases cristalinas

### 7.1.2. Gres porcelánico

En la figura 15 se muestran los resultados obtenidos durante la cocción del **gres porcelánico**, donde se han identificado diferentes transformaciones físicas y químicas, que se reflejan en la siguiente curva.

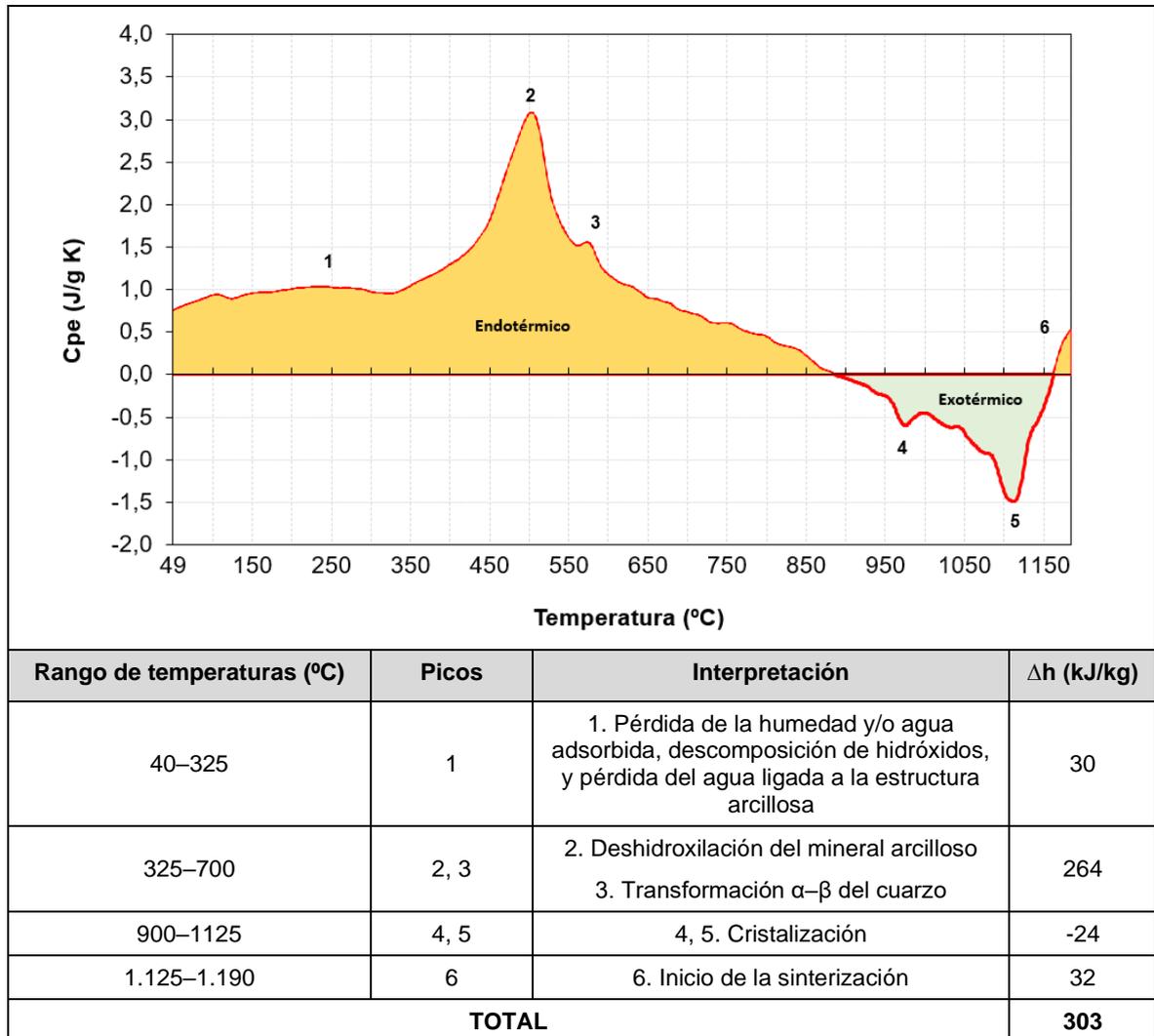


Figura 15. Curva de DSC y transformaciones físico-químicas identificadas en la composición de gres porcelánico (GP).

La entalpía de reacción de la composición de gres porcelánico es de **303 ± 30 kJ/kg crudo (84 ± 8 kWh/t crudo)** y las principales reacciones que tienen lugar durante la cocción del gres porcelánico son:

- Pérdida del agua libre, la ligada a estructuras arcillosas y descomposición de hidróxidos.
- Descomposición del mineral arcilloso, que consiste en la rotura de la estructura cristalina de los minerales, con desprendimiento de agua.
- Transformación alotrópica del cuarzo.
- Cristalizaciones, que se producen a partir de 900 °C para formar silico-aluminatos, principalmente mullita.
- Formación de fase líquida a elevada temperatura, con la fusión de feldespatos alcalinos. Esta reacción conlleva una reducción de porosidad en la estructura. Todas las reacciones que tienen lugar son de carácter endotérmico, excepto las cristalizaciones, que son exotérmicas.

### 7.1.3. Azulejo rojo

En la figura 16 se muestran los resultados obtenidos durante la cocción del **azulejo rojo**, donde se han identificado diferentes transformaciones físicas y químicas, que se reflejan en la siguiente curva.

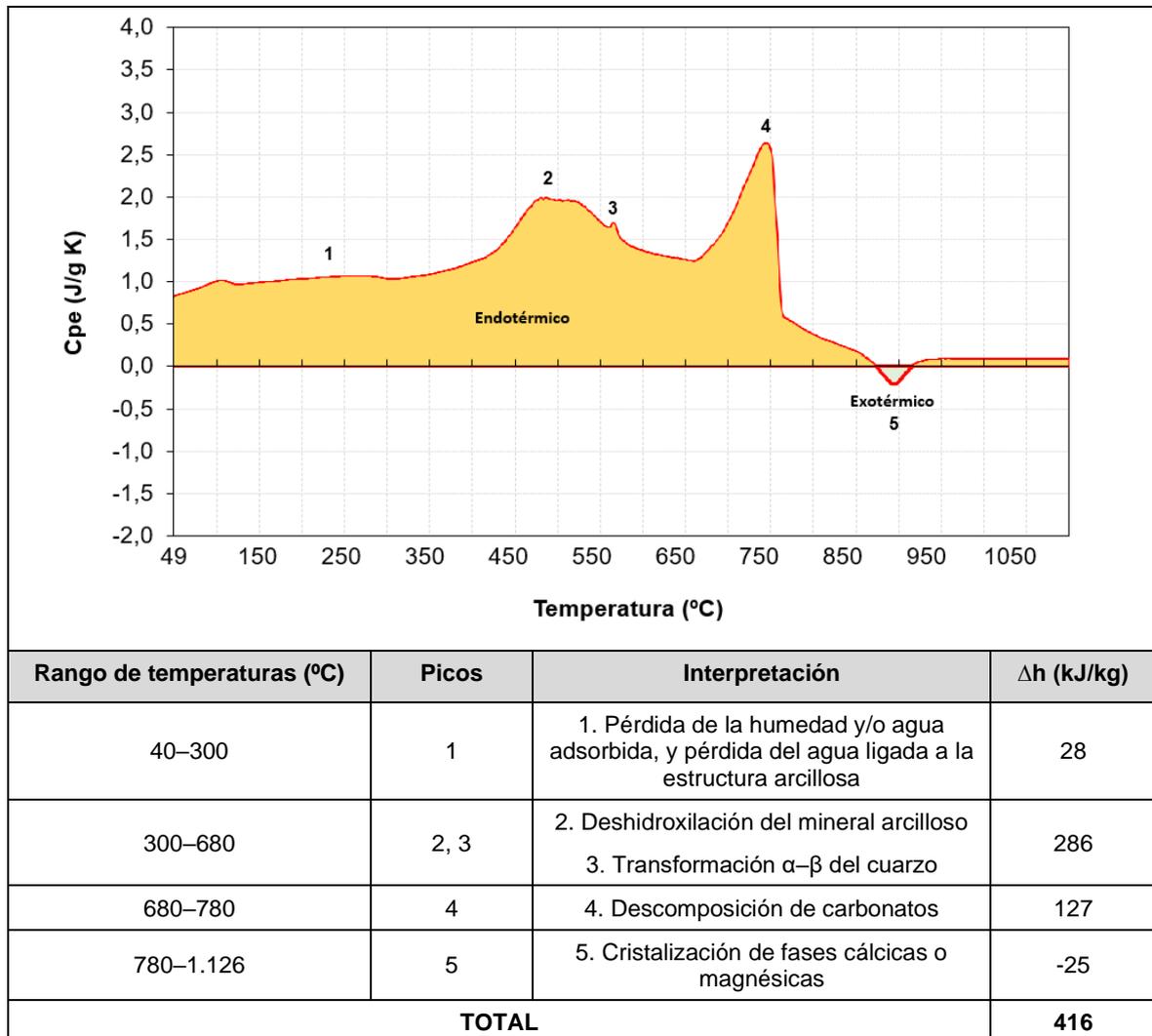


Figura 16. Curva de DSC y transformaciones físico-químicas identificadas en la composición de azulejo rojo (AR).

La entalpía de reacción de la composición de azulejo rojo es de **416  $\pm$  42 kJ/kg crudo (116  $\pm$  12 kWh/t crudo)** y las principales reacciones que tienen lugar durante la cocción son:

- Pérdida del agua, libre, adsorbida o ligada a estructuras arcillosas.
- Descomposición del mineral arcilloso.
- Transformación alotrópica del cuarzo.
- Descomposición de los carbonatos.
- Cristalización de fases cristalinas cálcicas o magnésicas (como anortita, dióxido, gehlenita, wollastonita) y de silico-aluminatos, como la mullita.

Todas las reacciones que tienen lugar son de carácter endotérmico, excepto la formación de fases cristalinas, que es un fenómeno exotérmico.

### 7.1.4. Azulejo blanco

En la figura 17 se muestran los resultados obtenidos durante la cocción del **azulejo blanco**, donde se han identificado diferentes transformaciones físicas y químicas, que se reflejan en la siguiente curva.

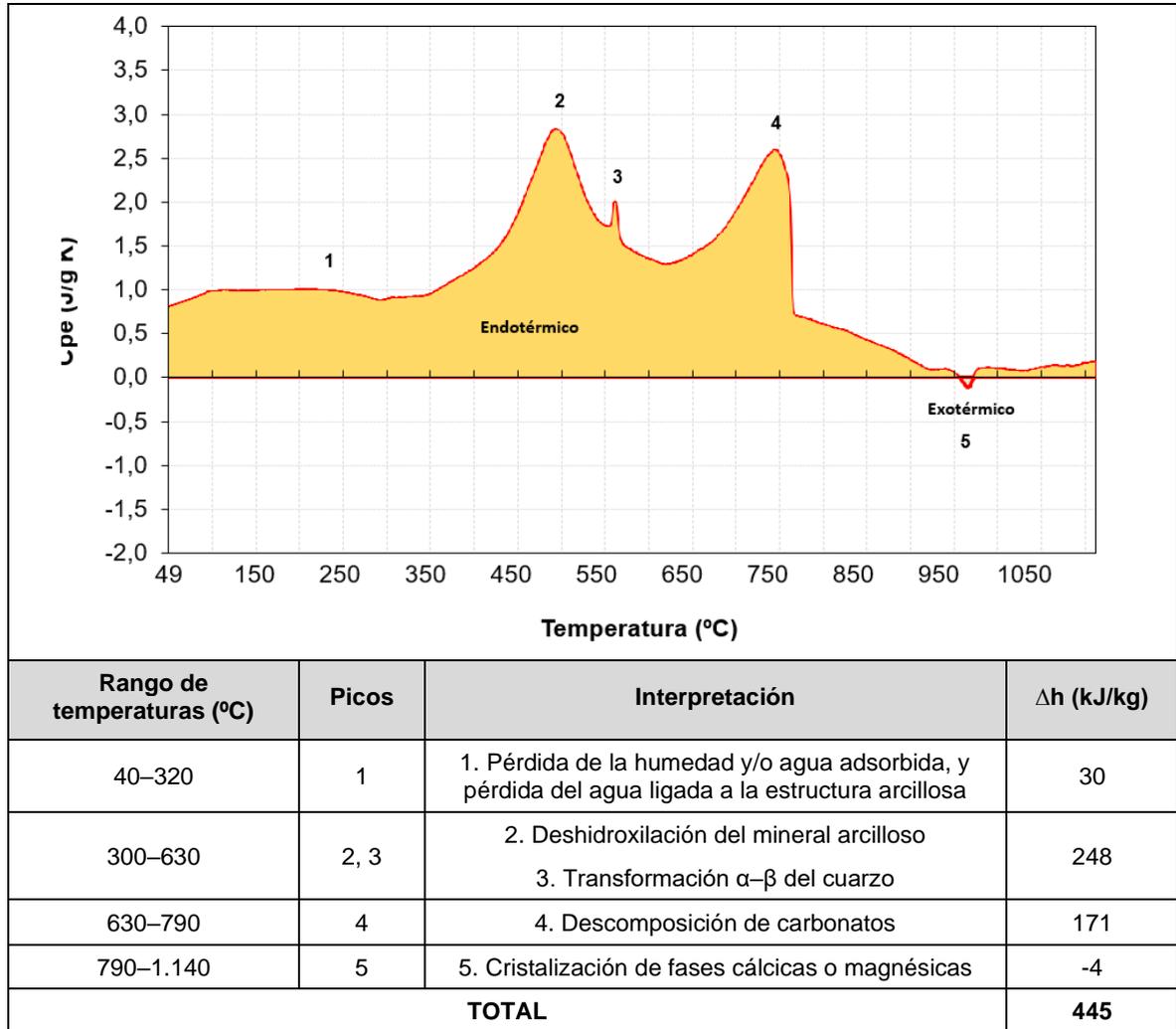


Figura 17. Curva de DSC y transformaciones físico-químicas identificadas en la composición de azulejo blanco (AB).

La entalpía de reacción de la composición de azulejo blanco es de **445 ± 45 kJ/kg crudo (124 ± 13 kWh/t crudo)**, valor superior al obtenido para las composiciones de gres. Esto es debido principalmente a la presencia de mayor cantidad de carbonatos en la composición. Las principales reacciones que tienen lugar durante su cocción son:

- Pérdida del agua libre, adsorbida o ligada a estructuras arcillosas.
- Descomposición del mineral arcilloso.
- Transformación alotrópica del cuarzo.
- Descomposición de los carbonatos.
- Cristalización de fases cristalinas cálcicas o magnésicas (como anortita, dióxido, gehlenita, wollastonita) y de silico-aluminatos, como la mullita.

Al igual que anteriormente, todas las reacciones que tienen lugar son de carácter endotérmico, excepto la formación de fases cristalinas, que es un fenómeno exotérmico.

En la tabla 12 se presenta un resumen de los calores de reacción determinados en las diferentes composiciones cerámica analizada.

*Tabla 12. Comparativa del calor de reacción de las composiciones estudiadas.*

Composición	Acrónimo	$\Delta h$ (kJ/kg crudo)	$\Delta h$ (kJ/kg cocido)
Gres rojo	GR	295±30	279±28
Gres porcelánico	GP	303±30	291±29
Azulejo rojo	AR	416±42	375±38
Azulejo blanco	AB	445±45	400±40

De los resultados mostrados en las figuras **14 a 17** y en la tabla 12, se pueden extraer las siguientes observaciones:

- Las figuras muestran que, en todas las composiciones, tienen lugar varias transformaciones en el material cuando los productos crudos se calientan desde temperatura ambiente hasta alrededor de los 800 °C. Las transformaciones identificadas como más importantes han sido la eliminación del agua libre (humedad), la combustión de la materia orgánica, la transformación alotrópica del  $\alpha$ - $\beta$ -cuarzo, la pérdida de los grupos OH<sup>-</sup> en las arcillas, y la descomposición de los carbonatos en las composiciones que los contienen.
- Entre los 800 °C hasta la temperatura máxima de cocción programada (entre 850 °C y 1200 °C, dependiendo de la composición) se desarrollan las transformaciones físico-químicas que determinan las propiedades finales del producto y los cambios dimensionales más importantes (contracción) en los productos de baja porosidad (gres rojo y gres porcelánico, y la formación de fases cristalinas estables (silicatos de calcio) en el caso de los productos con soporte poroso (azulejos porosos).
- Desde el punto de vista energético, la deshidroxilación de los minerales arcillosos y la descomposición de los carbonatos son las principales reacciones endotérmicas. Por lo tanto, el calor total de reacción depende principalmente de estas transformaciones.
- El consumo por unidad de masa muestra que el AB y el AR consumen mayor cantidad de energía debido a su mayor contenido en carbonatos. Las composiciones del GP y GR presentan el menor consumo específico de energía, principalmente debido a su bajo contenido en carbonatos.

## 7.2. Determinación de energía necesaria para la cocción de diferentes composiciones

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la **energía mínima necesaria para llevar a cabo la cocción**, para las distintas tipologías de producto y distintos espesores.

Aplicando las ecuaciones mostradas en la figura 4, y a partir de los valores medios mostrados anteriormente en la tabla 5 y tabla 6, se ha estimado la energía mínima que sería necesaria para la cocción de las diferentes composiciones de baldosas cerámicas existentes, independientemente del tipo de horno utilizado, por lo que los resultados son aplicables tanto a hornos de combustión como a hornos eléctricos.

Tabla 13. Energía necesaria para la cocción de diferentes tipos de composiciones.

Tipo de composición	T máx. (°C)	Ciclo cocción (min.)	Energía calentamiento		Calor de reacción		Energía mín. cocción	
			kWh/ t cocido	kWh/ m <sup>2</sup> cocido	kWh/ t cocido	kWh/ m <sup>2</sup> cocido	kWh/ t cocido	kWh/ m <sup>2</sup> cocido
Gres rojo	1.145	46 ± 1	294	5,81	77	1,53	372	7,34
Gres porcelánico	1.190	57 ± 2	311	6,74	81	1,75	392	8,49
Azulejo rojo	1.125	47 ± 2	275	4,53	104	1,71	379	6,24
Azulejo blanco	1.145	59 ± 5	280	5,05	111	2,01	391	7,05

Como se observa en la tabla 13, al comparar los valores de consumo específico por unidad de masa, los valores son muy similares, encontrándose diferencias máximas del 5%. En cambio, al comparar valores de consumo específico por unidad de superficie, se encuentran diferencias del 28%.

Por lo tanto, **la comparación de consumos energéticos entre hornos y entre diferentes tipos de composiciones, debe ser realizada en unidades másicas**. Si se presentan valores en unidades de superficie, pone en evidencia la necesidad de conocer el peso específico del producto cerámico.

Además, indicar que, para todos los casos, el calor de reacción es la energía estrictamente irrecuperable, ya que la energía aportada para calentar el material puede ser potencialmente recuperable, al menos parcialmente, durante el enfriamiento del material.

El material, una vez cocido se encuentra a la temperatura máxima programada para su cocción. Este material pasa a la zona de enfriamiento, y el contenido energético de dicho material es similar al aportado para su calentamiento, que es el mostrado en la tabla 13.

Según los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 13, la potencia mínima necesaria a aportar a un horno de tamaño medio sería de 1,73 MW, y en general la potencia media aplicada a los hornos del sector se sitúa sobre los 4 MW. Esto indica que actualmente, casi el 60% de la potencia aportada a los hornos no es aprovechada.

### 7.2.1. Rendimiento energético

Considerando los valores de energía mínima indicados en la tabla 13 y a partir de los valores medios de consumo específico por tipo de composición ha sido posible estimar el rendimiento actual que presentan los hornos para la cocción de diferentes composiciones.

En la tabla 14 se muestra el cálculo del rendimiento de los hornos, según lo indicado en el apartado 5.3. Por una parte, se muestra el rendimiento de la zona 1 (figura 7), correspondiente a la zona de

**calentamiento más cocción**, y por otra parte el **rendimiento global del horno** (zona 1 + zona 2 en la figura 7), que incluye el calentamiento, la cocción y el enfriamiento del material.

Tabla 14. Estimación del rendimiento para diferentes tipos de composiciones.

Tipo de composición	Cesp medio en PCS (kWh/t cocido)	Energía mín. cocción (kWh/t cocido)	Rendimiento calentamiento y cocción ( $\eta_1$ ) (%)	Rendimiento global del horno ( $\eta_g$ ) (%)
Gres rojo	724	372	51	11
Gres porcelánico	802	392	49	10
Azulejo rojo	818	379	46	13
Azulejo blanco	885	391	44	13

Según los datos mostrados en la tabla 14, el rendimiento de los hornos considerando el calentamiento y cocción se encuentra entre el 44 y 51%. Pero llegado a este punto, el material necesita ser enfriado de forma controlada hasta su salida del horno. Si el calor residual contenido en las piezas del material tras su cocción no es reaprovechado, el rendimiento global del horno se reduce significativamente, alcanzando valores de entre el 11 y el 13%. En este sentido resaltar que actualmente un elevado porcentaje de los hornos del sector cerámico tiene sistemas de recuperación de calor instalados en la zona de enfriamiento del horno.

Por lo tanto, vistos estos resultados, en el futuro es necesario:

- **Introducir cambios en la tecnología de cocción que permitan aproximar el consumo real a la energía mínima necesaria para llevar a cabo la cocción del material**, posibilitando de esta manera un aumento considerable en la eficiencia energética del proceso.
- Focalizar las mejoras en la transferencia de calor desde los sistemas de calentamiento hasta el material cerámico, para que en la zona de calentamiento y cocción el rendimiento supere los valores mostrados en la tabla 14.
- Trabajar en la recuperación al máximo del calor residual generado en la zona de enfriamiento del horno. En este punto el material cerámico se encuentra a temperaturas superiores a los 1000 °C, y debe ser enfriado progresivamente. En este aspecto, el rendimiento global de la planta aumentaría si fuese posible la recuperación del aire de enfriamiento, aunque esto es muy dependiente de cada escenario y configuración de la empresa.
  - **Hornos de combustión:** Sería posible recuperar el calor para precalentar el aire de combustión, o llevarlos a los secaderos. Si no es posible por la distancia, siempre se podría plantear la generación de electricidad a partir del calor residual.
  - **Hornos eléctricos:** Se podría recuperar calor en los secaderos o generar electricidad a partir del calor residual.
- Integrar en el mismo horno la recuperación del calor en la chimenea de extracción de los gases generados durante la cocción.

## 8. Resultados de las medidas experimentales en hornos eléctricos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante la realización de medidas experimentales en dos hornos eléctricos de cocción de baldosas cerámicas, en los que se ha llevado a cabo un balance energético completo. Para ello se ha contado con la colaboración de dos empresas que disponen de hornos eléctricos.

Las medidas se llevaron a cabo en un horno semi industrial de la marca Nanneti, instalado en la empresa Vernis, y un horno eléctrico industrial de la marca System Ceramics, en el que la empresa Levantina Techlam, ubicada en Novelda, produce sus laminas cerámicas.

En la tabla 15 se muestra un resumen de los hornos medidos, y el tipo de composición cerámica caracterizada.

Tabla 15. Medidas experimentales llevadas a cabo en hornos eléctricos

Empresa	Marca horno	Producto	Formato	Espesor
Vernis	Nanneti ERVD-15/01	Gres porcelánico	30 cm x 30 cm	6 mm
			30 cm x 30 cm	9 mm
Levantina Techlam	System Ceramics	Gres porcelánico	300 cm x 100 cm	3 mm
			300 cm x 100 cm	5 mm

Las medidas experimentales llevadas a cabo en cada uno de estos hornos, para cada formato y espesor, han sido las siguientes:

- Determinación del consumo específico de energía.
- Registro de la producción, duración del ciclo, curva de cocción programada, temperatura y humedad de las piezas.
- Determinación del caudal, temperatura y contenido energético de los gases generados durante la cocción del material.
- Caracterización en continuo de la composición química de los gases de salida del horno. Como el H<sub>2</sub>O, los compuestos ácidos: NH<sub>3</sub>, HCl, HF y SO<sub>2</sub> y los Compuestos Orgánicos Volátiles: CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>, CHOH y COVT.
- Determinación del caudal y temperatura en la chimenea de enfriamiento.
- Medida de las pérdidas de calor por las superficies del horno mediante una cámara termográfica.
- Medida de las dimensiones del horno, y registro del número de resistencias instaladas, potencia, etc.

En ambos hornos, el aporte de calor se realiza mediante resistencias eléctricas ubicadas por encima y por debajo del plano que delimitan los rodillos, en las zonas de calentamiento, cocción y también en la cámara inferior de la zona de enfriamiento. Además, los gases generados durante la cocción del material, así como los gases generados la zona de enfriamiento se emiten directamente a la atmósfera.

La determinación de los compuestos presentes en la corriente de gases de salida de los hornos se ha realizado mediante un procedimiento de muestreo en continuo "in situ", con extracción en caliente y en húmedo que permite determinar la concentración másica de especies gaseosas orgánicas mediante dos principios de medida:

- Espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR), según la especificación técnica CEN/TS 17337:2019.
- Detector de ionización de llama (FID), según la norma UNE-EN 12619:2013.

Ambos principios de medida se utilizan en paralelo acoplados a un sistema de extracción y distribución de gases que permite conocer la concentración másica total de los siguientes compuestos: O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, HF, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>, CHOH y COVs expresados como COVT (compuestos orgánicos volátiles totales).

## 8.1. Horno eléctrico Nanneti ERVD-15/01

### 8.1.1. Descripción del horno

El horno eléctrico que dispone la empresa Vernis es un horno monoestrato de rodillos de la marca Nanneti, modelo **ERVD-15/01**. En la tabla 8 del presente informe se pueden consultar las características principales de este modelo en concreto.

El horno consta en total de 14 zonas, las primeras 5 zonas son de precalentamiento, posteriormente tiene 2 zonas de cocción y finalmente 7 zonas para el enfriamiento del material. En la figura 18 se muestra una imagen del panel de control del horno, donde se pueden observar cada una de las zonas mencionadas.



Figura 18. Imagen del panel de control del horno Nanneti, instalado en la empresa Vernis.

En el horno, hasta la zona 5, el aporte de calor se realiza mediante resistencias metálicas de hilo, que están repartidas por encima y por debajo del plano que delimitan los rodillos. En la zona de máxima temperatura, vienen instaladas resistencias de carburo de silicio, tal como se muestra en la figura 19.

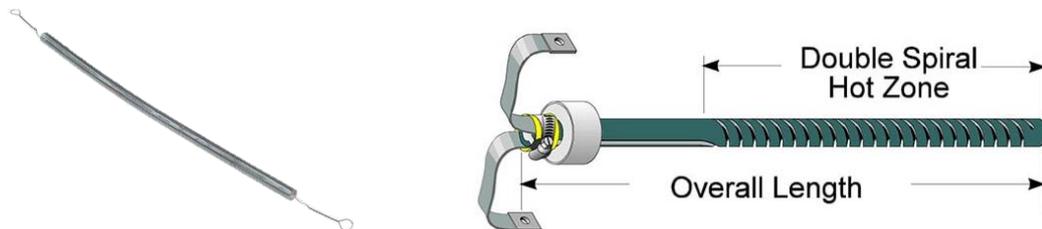


Figura 19. Resistencias de hilo (izquierda) y de carburo de silicio (derecha)

Los gases generados durante la cocción son extraídos, por tiro natural, a través de una chimenea que se encuentra situada a la entrada del horno. Los gases de enfriamiento se evacúan a través de unas escotillas, que se van abriendo y cerrando de manera continua y así van progresivamente evacuando el calor del interior del horno. El aire caliente recogido en la zona de enfriamiento es emitido al ambiente.

En la tabla 16 se muestra un resumen de las diferentes zonas del horno Nanneti ERVD-15/01. La potencia total eléctrica instalada en el horno asciende a **265 kW**.

*Tabla 16. Características de horno Nanneti ERVD-15/01.*

Horno	Producto	Número de zonas	Resistencias
Nanneti ERVD-15/01	Pre calentamiento	5	Resistencias metálicas de hilo (4 en cámara superior y 4 en cámara inferior)
	Cocción	2	Resistencias de carburo de silicio 8 resistencias por zona (4 en cámara superior y 4 en cámara inferior)
	Enfriamiento	7	Resistencias en la cámara inferior en 5 zonas

En la figura 20 se muestra una imagen general del horno, así como una imagen de uno de los módulos del horno.



*Figura 20. Imagen del horno Nanneti instalado en la empresa Vernis.*

Las mediciones en este horno se llevaron a cabo durante el día 22 de septiembre de 2022 donde también se monitorizaron en continuo el caudal, la temperatura y los compuestos presentes en la chimenea de extracción de los gases generados durante la cocción.

Los ensayos experimentales se realizaron durante la cocción de gres porcelánico, con 2 espesores diferentes, uno de 6 mm y otro de 9 mm, sin decorar ni esmaltar.

Las características del producto fabricado, así como algunos parámetros de cocción se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Parámetros de funcionamiento del horno eléctrico programados en Vernis.

Parámetro	Valores	Valores
Material	Porcelánico	Porcelánico
Formato	30 cm x 30 cm	30 cm x 30 cm
Espesor	9 mm	6 mm
Masa pieza cocida	1,448 kg/pieza	0,997 kg/pieza
Peso específico	18,9 kg/m <sup>2</sup>	13,0 kg/m <sup>2</sup>
Producción	0,084 kg cocido/s	0,069 kg cocido/s
	302 kg cocido/h	248 kg cocido/h
	16 m <sup>2</sup> /hora	19 m <sup>2</sup> /hora
	384 m <sup>2</sup> /día	456 m <sup>2</sup> /día
Duración del ciclo	48 minutos	48 minutos
Aprovechamiento tapete	60%	60%
Temperatura máxima de cocción	1.170 °C	1.170 °C
Consumo específico del horno	668 kWh/t	787 kWh/t
	12,60 kWh/m <sup>2</sup>	10,26 kWh/m <sup>2</sup>

Durante las medidas experimentales también se determinaron las pérdidas de calor a través de las superficies del horno, que se evaluaron a partir de la medida experimental de la temperatura y de la emisividad de los materiales que componen las superficies mediante cámara termográfica.

A continuación, en la figura 21 se muestra una termografía general del horno, tomada durante la realización de las medidas experimentales, donde se pueden observar con una mayor intensidad de color las paredes laterales de las zonas de máxima temperatura.

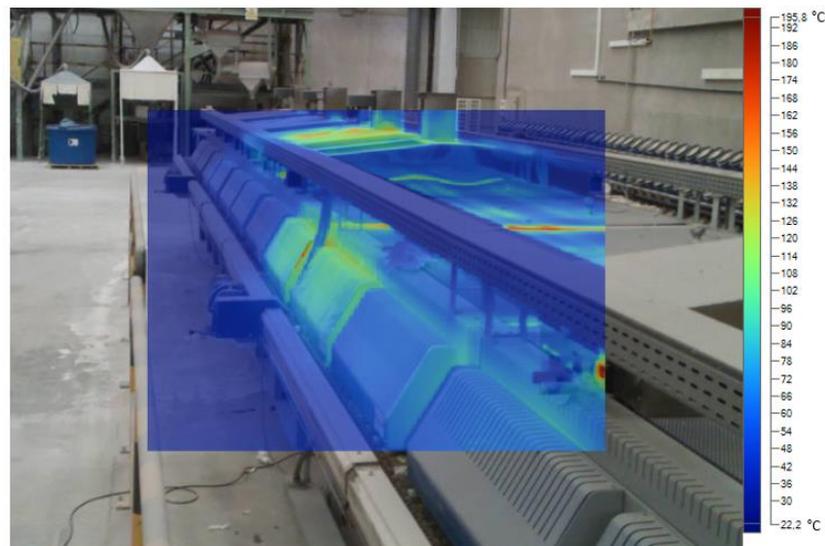


Figura 21. Termografía general del horno eléctrico instalado en Vernis.

Como se observa en la termografía, a diferencia de los hornos de combustión, las paredes del horno se encuentran prácticamente a temperatura ambiente, excepto en la zona de alta temperatura, que se encontraron valores alrededor de los 100 °C.

### 8.1.2. Resultados obtenidos de la evolución del consumo durante las medidas experimentales

A continuación, en las siguientes gráficas se muestra evolución del consumo energético obtenido durante el tiempo de realización de la prueba. En general, el consumo medio del horno para los 2 tipos de espesores cocidos fue de unos 200 kWh/h. En el caso de la figura 22 se ha representado la evolución del consumo específico, en unidades de superficie, durante el tiempo de realización de la prueba.

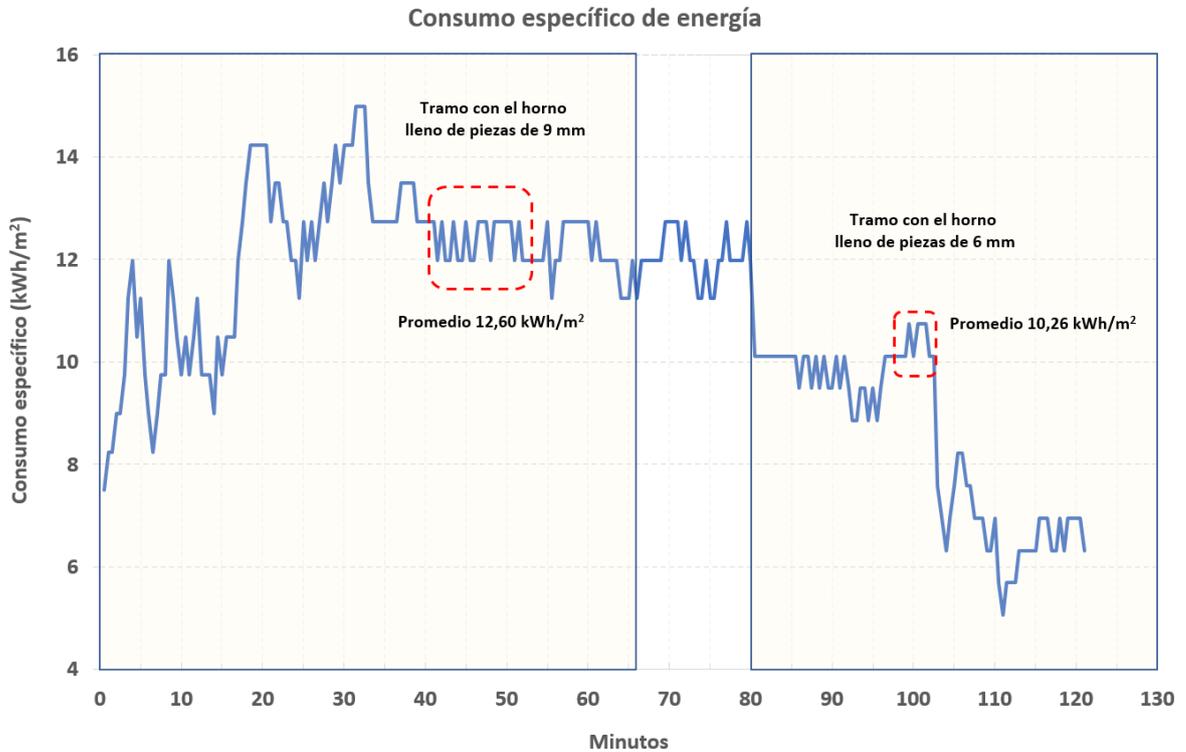


Figura 22. Evolución del consumo específico, en unidades de superficie, durante el tiempo de realización de la prueba.

Durante la realización de las pruebas se registró en continuo el consumo energético y se hicieron todas las medidas experimentales para las piezas de 9 mm. Una vez cocido el material, se estuvo un tiempo sin introducir piezas, y a continuación se introdujo el material de 6 mm de espesor y se iniciaron las medidas experimentales. En el caso de la figura 23 se ha representado la evolución del consumo específico, en unidades de masa, durante el tiempo de realización de la prueba.

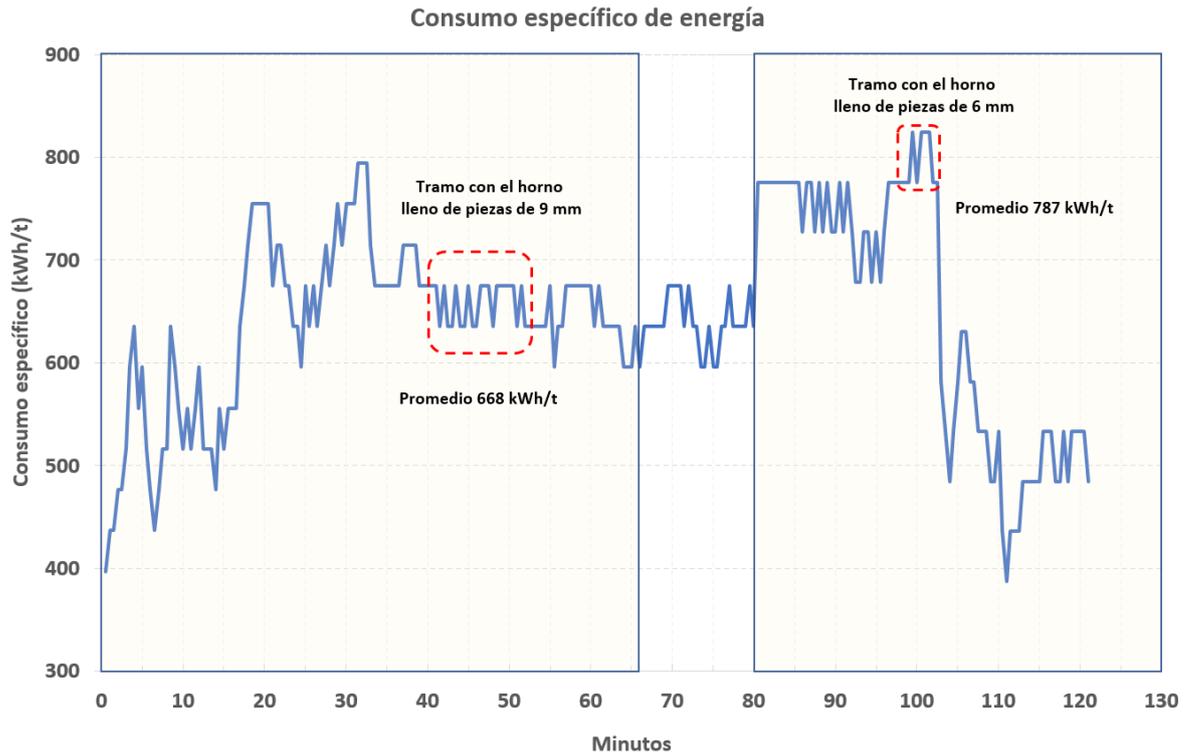


Figura 23. Evolución del consumo específico, en unidades de masa, durante el tiempo de realización de la prueba.

Como se puede observar en la figura 23, el consumo energético del horno cociendo gres porcelánico para piezas con espesor de 9 y 6 mm fue de 668 y 787 kWh/t, respectivamente. El consumo obtenido para piezas de 9 mm de espesor fue inferior a los valores de consumo de un horno de gas para este tipo composiciones. En cambio, para el material de 6 mm de espesor, los valores obtenidos son muy similares a los obtenidos en la cocción de porcelánico.

### 8.1.3. Resultados de la caracterización de los gases de escape del horno eléctrico Nanneti ERVD-15/01

El día 22 de septiembre de 2022 durante tres horas se monitorizó la emisión de los gases generados durante la cocción de gres porcelánico de dos espesores diferentes, uno de 6 mm y otro de 9 mm. El formato de las piezas era de 30x30 cm sin esmaltar ni decorar. Además, se les aplicó una capa fina de engobe de forma manual en las costillas, para evitar que se adhirieran en los rodillos.

En primer lugar, se llevó a cabo la caracterización de las piezas de 9 mm. Después de un hueco, se introdujeron las piezas de 6 mm. De esta forma se separó claramente la emisión de cada tipo de baldosas.



Figura 24. Imagen del montaje de los equipos utilizados para la monitorización de la emisión de las baldosas.

En el **Anexo 1**, se recogen los valores promedio de caudal, concentración y factor de emisión de los compuestos determinados durante las medidas experimentales que, para preservar la confidencialidad, han sido omitidos del presente informe.

Cabe indicar que los resultados obtenidos fueron prácticamente idénticos en los dos espesores de piezas estudiadas. Para la mayoría de los compuestos medidos los valores de concentración obtenidos se encuentran por debajo de los valores límites de emisión aplicables actualmente a las empresas de baldosas cerámicas.

Los niveles de concentración de  $O_2$  medidos son más altos que los de un horno de combustión con gas natural, resultados esperables teniendo en cuenta que proceden de un proceso sin combustión. De la misma manera se observaron valores muy bajos  $CO_2$ , y aunque se estén cociendo los materiales cerámicos en un horno eléctrico, se puede atribuir estos valores de  $CO_2$  a la descomposición de la materia orgánica presente en las materias primas, en las tintas o en los ligantes introducidos en la misma composición.

### 8.1.4. Resultados de los balances de energía

A continuación, se muestran los resultados de los balances de energía para los dos espesores, realizados al horno eléctrico, tanto en valor absoluto (MWh/h) como referidos a la masa de producto cocido (kWh/t). La temperatura de referencia del balance energético es 0 °C (273 K). Por esta razón, las corrientes que entran al horno a temperatura ambiente aportan energía al proceso.

#### 8.1.4.1. Gres porcelánico de 9 mm de espesor

En la tabla 18 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, durante la cocción de las baldosas de 9 mm de espesor.

Tabla 18. Resultados del balance de energía. Producto de 9 mm

ENERGÍA	Corrientes	Energía (kWh/h)	Energía específica (kWh/t)	Contribución porcentual al balance (%)
APORTADA	Electricidad	202	668	98,8
	Piezas crudas	2	8	1,2
	<b>TOTAL</b>	<b>204</b>	<b>676</b>	<b>100,0</b>
DISIPADA	Reacciones químicas	18	61	9,0
	Chimenea gases cocción	12	41	6,1
	Piezas cocidas	25	83	12,3
	Pérdidas por paredes	16	51	7,6
	Perdidas incontroladas (incluyen el aire de enfriamiento)	133	439	65,0
	<b>TOTAL</b>	<b>204</b>	<b>676</b>	<b>100</b>

El aporte total de energía al horno eléctrico se estima en torno a **204 kWh/h**.

De toda esta energía, aproximadamente un 9,0 % se emplea en realizar las transformaciones físico-químicas del material durante su cocción.

A través de la chimenea de extracción de los gases generados durante la cocción del material sale sobre el 6,1 % de la energía total aportada al horno. En las piezas cocidas se pierde el 12,3 % de la energía aportada al horno debido a que las piezas salen del mismo a temperaturas cercanas a los 300 °C. Por las paredes y bóveda del horno se pierde un 7,6 % de la energía consumida.

El resto de energía pérdida, sobre el 65 %, es la energía que no ha sido posible cuantificar, y es la que se pierde a través de la superficie de las conducciones y ventiladores, por orificios y fisuras del horno. En este horno el valor es elevado porque el aire de enfriamiento se vierte al exterior sin ser recogido en conductos, por lo que es imposible determinarlo de manera experimental.

### 8.1.4.2. Gres porcelánico de 6 mm de espesor

En la tabla 19 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, durante la cocción de las baldosas cerámicas de 6 mm.

Tabla 19. Resultados del balance de energía. Producto de 6 mm

ENERGÍA	Corrientes	Energía (kWh/h)	Energía específica (kWh/t)	Contribución porcentual al balance (%)
APORTADA	Electricidad	195	787	99,0
	Piezas crudas	2	8	1,0
	<b>TOTAL</b>	<b>197</b>	<b>795</b>	<b>100,0</b>
DISIPADA	Reacciones químicas	15	61	7,6
	Chimenea gases cocción	5	21	2,6
	Piezas cocidas	21	83	10,5
	Pérdidas por paredes	16	63	7,9
	Perdidas incontroladas (incluyen el aire de enfriamiento)	140	567	71,4
	<b>TOTAL</b>	<b>197</b>	<b>795</b>	<b>100,0</b>

En este caso, el aporte total de energía al horno eléctrico se estima en torno a **197 kWh/h**.

De toda esta energía, aproximadamente un 7,6 % se emplea en realizar las transformaciones físico-químicas del material durante su cocción. A través de la chimenea de extracción de los gases generados durante la cocción del material sale sobre el 2,6 % de la energía total aportada al horno. En las piezas cocidas se pierde el 10,5 % de la energía aportada al horno debido a que las piezas, al igual que en el caso anterior, salen a temperaturas cercanas a los 300 °C.

Por las paredes y bóveda del horno se pierde un 7,9 % de la energía consumida. El resto de energía pérdida, más del 71 % se pierde a través de la superficie de las conducciones y ventiladores, por orificios y fisuras del horno, así como por las escotillas de evacuación del aire de enfriamiento, ya que éste se vierte al exterior sin ser recogido en conductos. Como se ha indicado previamente, en este horno el valor es elevado porque el aire de enfriamiento no ha sido posible determinarlo de manera experimental.

### 8.1.5. Comparativa del consumo por producto

En la tabla 20 se muestra el consumo específico del horno referido tanto a la masa de producto cocido como a la superficie de producto cocido.

Tabla 20. Consumo específico del horno eléctrico Nanneti ERVD-15/01, referido a la masa y a la superficie de producto cocido.

Espesor (mm)	C <sub>esp</sub> (kWh/t cocido)	C <sub>esp</sub> (kWh/m <sup>2</sup> cocido)
9	668	12,60
6	787	10,26

Los datos disponibles en el ITC de consumos específicos de energía en hornos que producen gres porcelánico indican que el valor medio del sector se sitúa en torno a **802 kWh/t cocido PCS (17,4 kWh/m<sup>2</sup> cocido PCS)**. En las condiciones en las que se realizador las medidas experimentales, se puede concluir que para el producto de 9 mm se obtienen consumos específicos de entre un 17 y 28 % inferiores al valor medio sectorial, dependiendo si se compara el consumo específico en unidades másicas o de superficie.

Por otra parte, para el producto de 6 mm, se ha obtenido un consumo específico referido a la masa de producto un 2 % inferior al valor medio sectorial y un 41 % inferior al referirlo a unidades de superficie.

En la tabla 21 se muestra el cálculo del rendimiento del horno Nanneti, según lo indicado en el apartado 5.3.

*Tabla 21. Estimación del rendimiento para diferentes tipos de composiciones.*

<b>Espesor</b>	<b>Cesp (kWh/t cocido)</b>	<b>Energía mín. cocción (kWh/t cocido)</b>	<b>Rendimiento calentamiento y cocción (%)</b>	<b>Rendimiento global del horno (%)</b>
9	668	392	59	9
6	787	391	50	8

Según los datos mostrados, el rendimiento del horno considerando el calentamiento y cocción se encuentra entre el 50 y 59 %, valores ligeramente superiores a los determinados anteriormente para hornos de combustión. Como el calor residual contenido en las piezas del material tras su cocción no es reaprovechado, el rendimiento global del horno se reduce significativamente, alcanzando valores de entre el 8 y el 9 %.

#### **8.1.6. Conclusiones ensayos experimentales en el horno Nanneti**

De los ensayos experimentales llevados a cabo en el horno Nanneti, se puede concluir que, a pesar de que las piezas se llegaron a cocer, el horno no llegaba a alcanzar la temperatura programada. Por ello, para producciones en continuo, en ciertas zonas del horno se debería aumentar la potencia instalada o incluso añadir algún módulo más en la zona de calentamiento-cocción.

En lo que respecta a la zona de enfriamiento, esta también debería ser optimizada ya que las piezas abandonan el horno a temperaturas cercanas a los 300 °C. En este caso, se debería añadir algún módulo más o incluso plantear el introducir inyección forzada de aire, aunque esto podría desestabilizar la zona de calentamiento del horno.

Como conclusión a los ensayos en los hornos eléctricos de Nanneti, para producciones en continuo, este tipo de hornos todavía tienen mucho margen de mejora y necesitan ser optimizados en muchos aspectos, principalmente en aspectos energéticos, así como en los puntos relacionados con un mayor control y regulación en la etapa de enfriamiento del material.

## 8.2. Horno eléctrico System Ceramics. Levantina Techlam.

### 8.2.1. Descripción del horno

El horno eléctrico que dispone la empresa Levantina Techlam es un horno monoestrato de rodillos de la marca System Ceramics, construido en el año 2006. El horno está formado por 46 módulos y medio, 20 de ellos forman la zona de calentamiento y cocción, y el resto la zona de enfriamiento.

En este horno, el aporte de calor se realiza mediante módulos de calentamiento eléctrico que están repartidos a lo largo del horno por encima y por debajo del plano que delimitan los rodillos, en las zonas de calentamiento y cocción, y también en parte de la cámara inferior de la zona de enfriamiento.

El calor es aportado por los módulos de calentamiento que se muestran en la figura 25, donde el material de las resistencias está fabricado con una aleación ferrítica de hierro-cromo-aluminio y pueden ser utilizados a temperaturas de hasta 1350 °C.



Figura 25. Imagen de los módulos de calentamiento utilizado en el horno eléctrico.

Los gases generados durante la cocción se emiten directamente a la atmósfera mediante una chimenea que se encuentra situada a la entrada del horno. Los gases de enfriamiento se recogen a través de varios conductos hasta la chimenea principal de la zona de enfriamiento. Los gases recogidos en esta zona de enfriamiento se emiten a la atmósfera, sin ser reaprovechados en otras etapas del proceso productivo.

En la figura 26 se muestran imágenes del horno, en concreto de la parte superior, así como de los laterales.

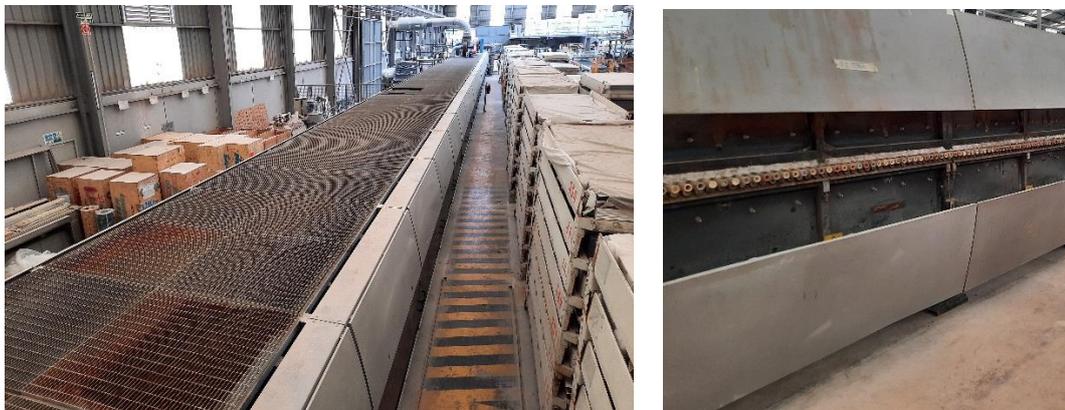


Figura 26. Imagen general de la parte superior y de los laterales del horno eléctrico System.

En la tabla 22 se muestran las principales características del horno eléctrico de la empresa Levantina Techlam. El total de potencia eléctrica instalada en el horno asciende a **1.281 kW**.

Tabla 22. Distribución del horno por zonas y potencia eléctrica instalada.

Parámetro	Número de módulos	Características
Zona de calentamiento + Cocción	20 módulos	El primer módulo con resistencias es el módulo 3
Zona de enfriamiento	26 módulos y medio	<p><b>M21 al M29:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de enfriamiento natural sin inyección de aire</li> <li>• Resistencias en cámara inferior.</li> </ul> <p><b>M30 al M41:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de enfriamiento indirecto</li> <li>• Resistencias en cámara inferior.</li> </ul> <p><b>M42 y M43,5:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de enfriamiento natural sin inyección de aire</li> </ul> <p><b>M44 al M46:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de enfriamiento final</li> <li>• Inyección aire ambiente</li> </ul>

### 8.2.2. Resultados obtenidos durante las medidas experimentales

A continuación, se exponen los resultados obtenidos durante la realización de las medidas experimentales realizadas los días 19 y 29 de septiembre de 2022. Los ensayos experimentales de cocción se llevaron a cabo durante la cocción de gres porcelánico, son 2 espesores diferentes, uno de 5 mm y otro de 3 mm.

Las características del producto fabricado, así como algunos parámetros de funcionamiento del horno se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Parámetros de funcionamiento del horno eléctrico de la empresa Levantina.

Parámetro	Valores	Valores
Material	Porcelánico	Porcelánico
Formato	300 cm x 100 cm	300 cm x 100 cm
Espesor	5 mm	3 mm
Masa pieza cocida	38 kg/pieza	24 kg/pieza
Peso específico	12,7 kg/m <sup>2</sup>	8,0 kg/m <sup>2</sup>
Duración del ciclo	62 minutos	47 minutos
Aprovechamiento tapete	57%	57%
Temperatura máxima de cocción	1.190 °C	1.190 °C
Consumo específico del horno	625 kWh/t	687 kWh/t
	7,92 kWh/m <sup>2</sup>	5,50 kWh/m <sup>2</sup>

Cabe indicar que durante las medidas experimentales también se determinaron las pérdidas de calor a través de las superficies del horno, que se evaluaron a partir de la medida experimental de la temperatura y de la emisividad de los materiales que componen las superficies mediante cámara termográfica.

En la figura 27 se ha representado la temperatura media de las paredes y de la bóveda a lo largo del horno, obtenidas durante la cocción de las láminas de 3 mm. Los valores obtenidos durante la cocción de las láminas de 5 mm son similares, por estos motivos sólo se muestran los resultados de las láminas de 3 mm. La línea negra vertical situada en la posición de 42 metros (módulo 20) indica el final de la zona de cocción e inicio del enfriamiento.

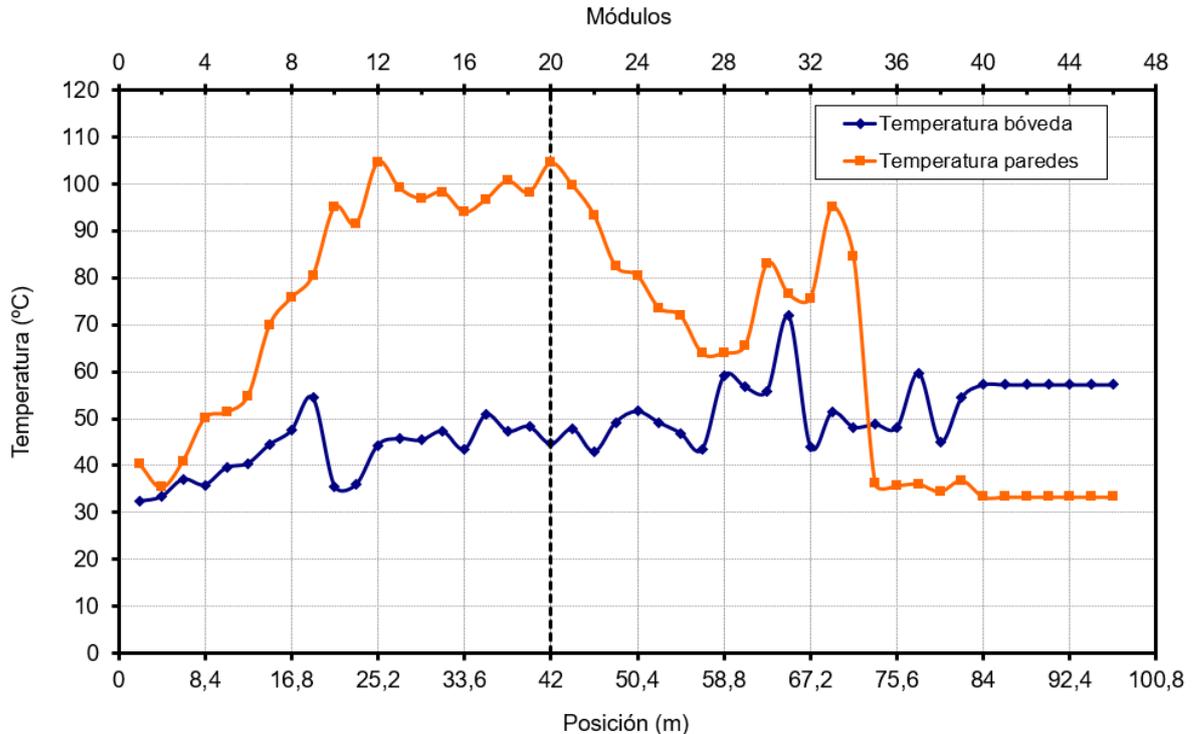


Figura 27. Temperatura de las paredes y la bóveda del horno durante la cocción de las láminas de 3 mm

A continuación, se muestran algunas termografías tomadas en las paredes y en la bóveda del horno.

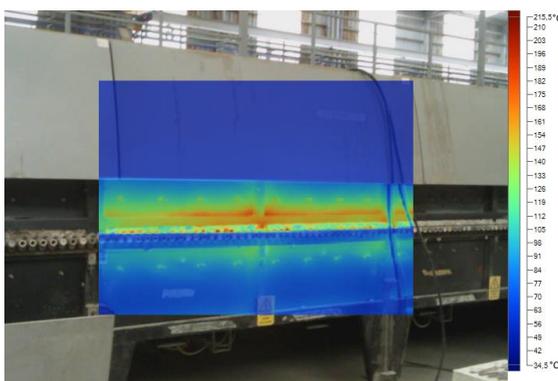


Figura 28. Termografía de la pared. Módulo 20.

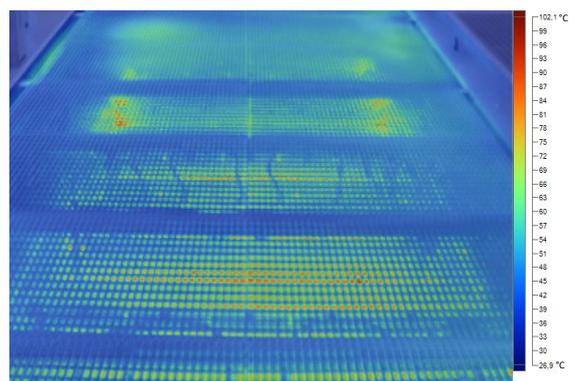


Figura 29. Termografía de la bóveda. Módulo 24.

### 8.2.3. Resultados de la caracterización de la emisión de gases durante la cocción en el Horno eléctrico System Ceramics

Las medidas realizadas en el horno eléctrico de la marca System Ceramics se realizaron los días 19 y 29 de septiembre de 2022. Cada día de medida se monitorizó la emisión de los gases generados durante la cocción de gres porcelánico de un espesor diferente, uno de 5 mm y otro de 3 mm. Los dos espesores de piezas se presentan en formato de 3x1 m. Además, a estas piezas de gran formato se les aplicó tinta con un gramaje de 24,5 g/m<sup>2</sup> para las de 3 mm y de 18,0 g/m<sup>2</sup> para las de 5 mm.



Figura 30. Imagen del montaje de los equipos utilizados para la monitorización de la emisión de las baldosas.

En el **Anexo 2** se recogen los valores promedio de caudal, concentración y factor de emisión de los compuestos determinados durante las medidas experimentales. Los resultados de dichas campañas han sido omitidos del presente informe por razones de confidencialidad.

De manera general, los niveles de concentración obtenidos para algunos de los compuestos estudiados son más elevados a los de un horno de combustión de gas natural, sin embargo, la carga másica de todos los compuestos medidos es significativamente más baja, debido a que el caudal de humos en este horno eléctrico es muy inferior al de un horno de gas natural, y por lo tanto la carga másica disminuye proporcionalmente. La presencia de COVs, CO, SO<sub>2</sub>, HCl y HF son atribuibles a la descomposición térmica de las materias primas, debido a que se trata de un horno eléctrico y no hay combustión.

En caso de que se desee implementar sistemas de recuperación de calor de este tipo de corrientes, es necesario evaluar previamente la presencia de contaminantes de naturaleza ácida, ya que puede generarse condensaciones que deterioren el equipamiento instalado.

Al igual que en el caso del horno anterior, los niveles de concentración de O<sub>2</sub> son altos como cabría esperar de un proceso sin combustión. De la misma manera se observaron valores muy bajos de CO<sub>2</sub>.

### 8.2.4. Resultados del balance de energía

A continuación, se muestran los resultados de los balances de energía para los dos espesores, realizados al horno eléctrico, tanto en valor absoluto (MWh/h) como referidos a la masa de producto cocido (kWh/t). La temperatura de referencia del balance energético es 0 °C (273 K). Por esta razón, las corrientes que entran al horno a temperatura ambiente aportan energía al proceso.

#### 8.2.4.1. Producto de 5 mm de espesor

En la tabla 24 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, durante la cocción de la lámina cerámicas de 5 mm.

Tabla 24. Resultados del balance de energía. Producto de 5 mm.

ENERGÍA	Corrientes	Energía (kWh/h)	Energía específica (kWh/t)	Contribución porcentual al balance (%)
APORTADA	Electricidad	764	625	81,2
	Aire de enfriamiento	101	83	10,8
	Piezas crudas	76	62	8,1
	<b>TOTAL</b>	<b>940</b>	<b>770</b>	<b>100,0</b>
DISIPADA	Reacciones químicas	89	73	9,4
	Chimenea gases cocción	76	62	8,0
	Piezas cocidas	22	18	2,3
	Aire enfriamiento indirecto	175	143	18,6
	Aire enfriamiento final	164	134	17,4
	Pérdidas por paredes	169	139	18,0
	Perdidas incontroladas	247	202	26,2
	<b>TOTAL</b>	<b>940</b>	<b>770</b>	<b>100,0</b>

El aporte total de energía al horno eléctrico se estima en torno a **940 kWh/h**.

De toda esta energía, aproximadamente un 9,4 % se emplea en realizar las transformaciones físico-químicas del material durante su cocción.

A través de la chimenea de extracción de los gases generados durante la cocción del material sale sobre el 8 % de la energía total aportada al horno. Por la chimenea de enfriamiento del horno se vierte al exterior un 36 % de la energía consumida en el horno. Las pérdidas por las paredes y bóveda del horno son del 18 %.

Las pérdidas de energía que no se pueden cuantificar y que se corresponden con las producidas a través de la superficie de las conducciones y ventiladores, por orificios y fisuras del horno, así como las resistencias dispuestas en el exterior del horno, ascienden al 26 % de la energía total aportada.

#### 8.2.4.2. Producto de 3 mm de espesor

En la tabla 25 se muestra el resumen de los resultados obtenidos, durante la cocción de la lámina cerámicas de 3 mm.

Tabla 25. Resultados del balance de energía. Producto de 3 mm.

ENERGÍA	Corrientes	Energía (kWh/h)	Energía específica (kWh/t)	Contribución porcentual al balance (%)
APORTADA	Electricidad	699	687	81,2
	Aire de enfriamiento	97	96	11,3
	Piezas crudas	64	63	7,5
	<b>TOTAL</b>	<b>861</b>	<b>847</b>	<b>100,0</b>
DISIPADA	Reacciones químicas	91	89	10,5
	Chimenea gases cocción	79	78	9,2
	Piezas cocidas	12	12	1,4
	Aire enfriamiento indirecto	90	88	10,4
	Aire enfriamiento final	142	140	16,6
	Pérdidas por paredes	161	159	18,8
	Perdidas incontroladas	285	281	33,2
	<b>TOTAL</b>	<b>861</b>	<b>847</b>	<b>100,0</b>

El aporte total de energía al horno de eléctrico se estima en torno a **861 kWh/h**.

De toda esta energía, aproximadamente un 10,5 % se emplea en realizar las transformaciones físico-químicas del material.

A través de la chimenea de los gases generados durante la cocción del material sale el 9,2 % de la energía aportada. Por la chimenea de enfriamiento del horno se vierte al exterior un 27 % de la energía consumida en el horno. Las pérdidas por las paredes y bóveda del horno ascienden a casi el 19%.

El resto de las pérdidas de energía producidas a través de la superficie de las conducciones y ventiladores, por orificios y fisuras del horno, así como las resistencias dispuestas en el exterior del horno, son superiores al 33 % de la energía total aportada.

### 8.2.5. Comparativa del consumo por producto

En la tabla 26 se muestra el consumo específico del horno referido tanto a la masa de producto cocido como a la superficie de producto cocido.

Tabla 26. Consumo específico del horno eléctrico de Levantina, referido a la masa y a la superficie de producto cocido.

Espesor (mm)	C <sub>esp</sub> (kWh/t cocido)	C <sub>esp</sub> (kWh/m <sup>2</sup> cocido)
5	625	7,92
3	687	5,50

Los datos disponibles en el ITC de consumos específicos de energía en hornos que producen gres porcelánico indican que el valor medio del sector se sitúa en torno a **802 kWh/t cocido PCS (17,4 kWh/m<sup>2</sup> cocido PCS)**. Se puede concluir que el consumo del horno estudiado, y en las condiciones en las que se realizaron las medidas experimentales, es entre un 14 y 22% inferior al valor medio sectorial, si lo comparamos con respecto al consumo específico referido a la masa de producto, o entre un 55 y un 68% si lo comparamos con respecto al consumo específico referido a la superficie de producto.

En la tabla 27 se muestra el cálculo del rendimiento del horno de System Ceramics, según lo indicado en el apartado 5.3.

*Tabla 27. Estimación del rendimiento del horno para los diferentes productos determinados.*

Espesor	Cesp (kWh/t cocido)	Energía mín. cocción (kWh/t cocido)	Rendimiento calentamiento y cocción (%)	Rendimiento global del horno (%)
5	625	473	76	12
3	687	478	69	13

Según los datos mostrados, en este caso el rendimiento del horno considerando el calentamiento y cocción se encuentra entre el 69 y 76%. Estos valores son un 28% superiores a los determinados anteriormente en hornos de combustión. Por lo tanto, estos resultados hacen pensar que la transferencia de calor mejora en los hornos eléctricos.

De todas formas, como el calor residual contenido en las piezas del material tras su cocción no es reaprovechado, el rendimiento global del horno se reduce significativamente, alcanzando valores de entre el 12 y 13%.

#### **8.2.6. Conclusiones ensayos experimentales en el horno System Ceramics**

De los ensayos experimentales llevados a cabo en el horno System Ceramics, se puede concluir que la empresa Levantina cuece sin problemas láminas cerámicas de espesores de 3 y 5 mm. Este es un horno que data del año 2006, y presenta ciertas limitaciones constructivas, pero a pesar de ello, el consumo energético por unidad de masa es entre un 14 y 22% inferior a los valores medios sectoriales disponibles para hornos de combustión.

Además, en la zona de calentamiento y cocción se obtienen valores de rendimiento un 28% superiores a los determinados en hornos de combustión y esto hace pensar que la transferencia de calor mejora en los hornos eléctricos.

## 9. Consumo energético de los hornos en función del espesor

Una de las variables que mayor influencia tiene sobre el consumo energético en un horno es la producción. La cantidad de energía necesaria para cocer un producto cerámico depende, entre otras variables, de la masa de producto a cocer.

A continuación, se muestran una serie de gráficas en las que se han representado los datos determinados en el presente estudio (coloración naranja), junto con datos disponibles en la base de datos de ITC sobre hornos de combustión que producen **gres porcelánico** (coloración azul).

### 9.1. Consumo absoluto del horno frente a producción másica

En la figura 31 se muestra una gráfica que representa el consumo absoluto de energía del horno, frente a la producción másica referida al producto cocido, para composiciones de gres porcelánico, incluyendo, tal como se ha indicado, los valores de consumo de hornos eléctricos determinados en el presente proyecto.

En la gráfica se aprecia una marcada relación entre ambas variables; cuanto mayor es la producción, mayor es el consumo energético, tal y como cabría esperar. La relación es lineal, obteniéndose un coeficiente de la regresión de 0,9909.

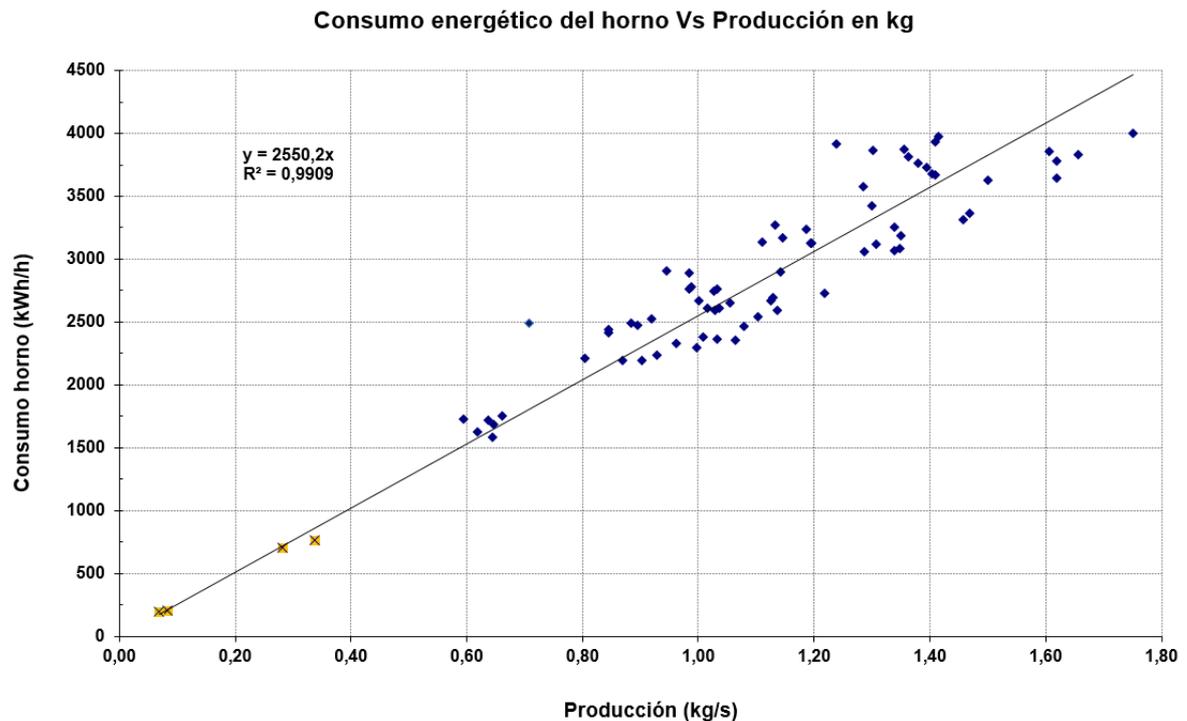


Figura 31. Relación entre el consumo energético y la producción másica de los hornos.

## 9.2. Consumo específico frente al peso específico

A continuación, en la figura 32 se muestra una gráfica que representa el consumo específico de energía por unidad de superficie en cocido (kWh/m<sup>2</sup>), frente al peso específico. En la gráfica se aprecia una marcada relación entre ambas variables; cuanto mayor es el peso específico, mayor es el consumo específico, tal y como cabría esperar. La relación es lineal, y el coeficiente de la regresión obtenido es de 0,9921.

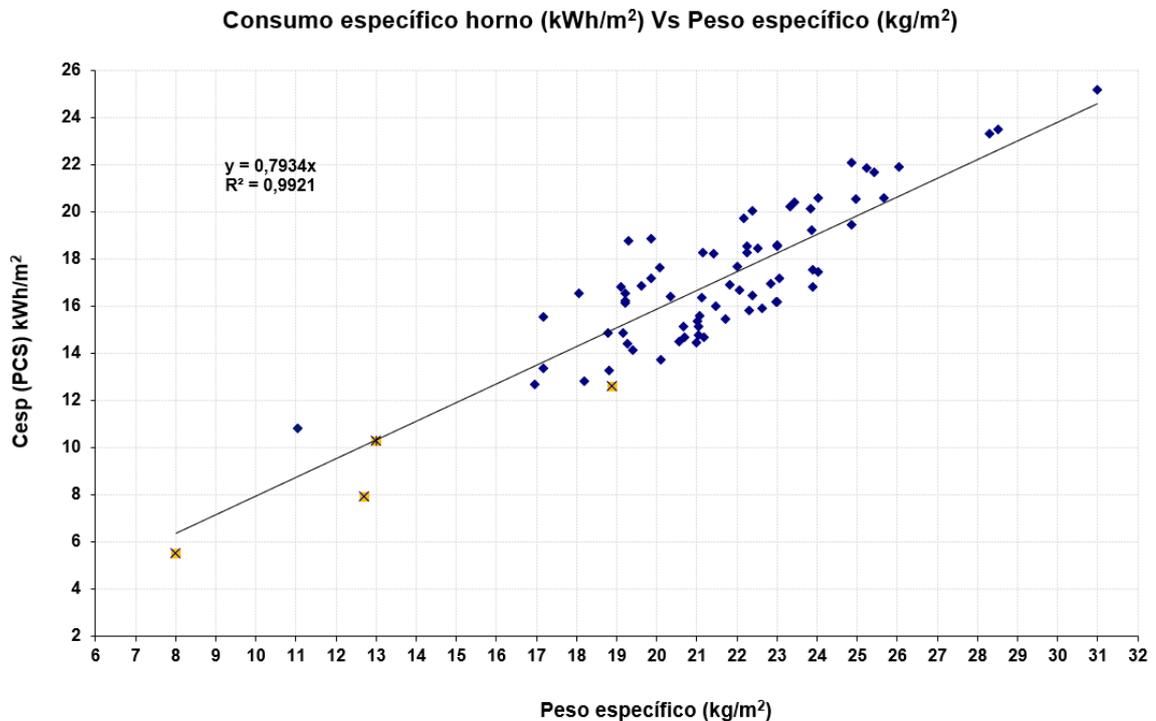


Figura 32. Relación entre el consumo específico por unidad de superficie y el peso específico de los productos.

En conclusión, a la gráfica mostrada en la figura 32, se puede decir que el consumo energético depende de un elevado número de variables (espesor, contenido en carbonatos, ciclo, temperatura máxima de cocción etc.) y que algunas no son independientes entre sí, aunque la tendencia que se observa es clara, y cuanto mayor es el espesor, mayor es el consumo específico por unidad de superficie, aunque no siempre en la proporción esperada.

Lo que la gráfica pone también en evidencia es que, aunque la producción se determina habitualmente en unidades de superficie (m<sup>2</sup>), en el horno se realiza la cocción de una masa de producto.

Por ello, para llevar a cabo comparativas de consumo entre diferentes hornos y diferentes escenarios, y todavía más si se quiere comparar consumos y rendimientos entre los hornos de combustión y los hornos eléctricos, deben hacerse en unidades másicas, o en caso de hacerse en unidades de superficie, se hace necesario conocer el peso específico del producto (kg/m<sup>2</sup>).

## 10. Electricidad necesaria en caso de electrificación de hornos

La electrificación del calor de alta temperatura para la cocción de baldosas cerámicas supondría un cambio en la distribución de consumos energéticos actual del sector. En la tabla 28 se ha estimado la cantidad de electricidad que necesitaría el sector en diferentes escenarios de electrificación de los hornos hasta alcanzar el 100%.

Para el cálculo, se ha considerado un consumo eléctrico medio por horno de 4 MWh/h<sup>28</sup> (31,68 GWh/año), y que en el sector hay alrededor de 250 hornos en operación.

Tabla 28. Estimación de las necesidades de electricidad del sector, según consumo medio de un horno.

Porcentaje de electrificación hornos (%)	Consumo eléctrico sectorial estimado (GWh/año)	Potencia fotovoltaica requerida (GWp)
25	1.980	1,3-1,5
50	3.960	2,6-3,0
75	5.940	4,0-4,6
100	7.920	5,3-6,1

Como se observa en la tabla 28, las necesidades de electricidad para abastecer a todos los hornos del sector, en caso de ser electrificados, son muy elevadas, y en caso de electrificación total se estiman en torno a los 7.920 GWh/año.

En la tabla 28 también se han estimado las necesidades de potencia fotovoltaica que serían necesarias para cubrir las necesidades eléctricas. La generación eléctrica real depende de muchos factores (ubicación, orientación de los paneles, rendimiento de los paneles, etc.) no sólo de la potencia pico instalada, pero en la zona de Castelló, se puede situar en el intervalo 1.300 kWh-1.500 kWh anuales por kWp instalado.

Por lo tanto, para suministrar la energía eléctrica a todo el sector, en caso de una electrificación completa de los hornos sería necesaria una potencia pico en fotovoltaica de entre 5 GW y 6 GW.

A modo de referencia, España en 2021 tenía sobre 15 GWp de potencia fotovoltaica instalada y fue la quinta fuente de generación eléctrica en España en 2021, generando con este tipo de energía renovable 20.954 GWh<sup>29</sup>.

La demanda sectorial, en caso de electrificar todos los hornos, supondría un 38% de toda la electricidad generada por la energía fotovoltaica en España el año 2021.

<sup>28</sup> Ferrer, S.; Mezquita, M.; Monfort, E.; Vedri, J. Guía de tecnologías hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas. ITC-AICE. IVACE, 2021.

<sup>29</sup> <https://es.statista.com/estadisticas/1004390/generacion-solar-fotovoltaica-en-espana/>

## 11. Resumen del estudio

A continuación, se resumen los puntos más relevantes derivados del estudio.

### Estado del arte de la cocción de baldosas cerámicas:

- El uso de hornos eléctricos es cada vez más frecuente en muchos sectores industriales, y presentan una serie de ventajas: no emiten CO<sub>2</sub> de forma directa, se reduce la cantidad de gases generados en el horno, presentan un menor consumo energético, y además, parte de la energía eléctrica consumida puede ser autogenerada en la propia planta.

Comercialmente existen hornos eléctricos para la cocción de baldosas cerámicas, aunque la oferta de hornos industriales es escasa y se centra en hornos concebidos para fines de investigación, con producciones de material limitado, por lo que son sistemas con mucho margen de mejora y necesitan ser optimizados en muchos aspectos.

- Los principales proveedores de tecnología del sector ofrecen visiones distintas, no existiendo un consenso generalizado en cuanto a las nuevas tecnologías a adoptar para la descarbonización de la etapa de cocción. Mientras algunos apuestan claramente por la electrificación o al menos la electrificación de los hornos se encuentra entre sus líneas de investigación, otros parecen ser que ven más clara la línea del uso del hidrógeno como combustible.

No obstante, existe un mayor consenso en identificar las principales limitaciones en la tecnología eléctrica, tales como la dificultad de procesar piezas de gran espesor (más por coste que por tecnología), sobre el tipo de resistencias a utilizar para que soporten atmósferas agresivas, y sobre la capacidad de dotar al sector de la infraestructura necesaria para poder abastecer electricidad a precios competitivos con los de la energía térmica.

### Medidas experimentales:

- En el marco de este estudio se ha evidenciado la importancia de utilizar unidades comparables al reportar valores de consumo específico. Por ello, para llevar a cabo comparativas de consumo entre diferentes hornos y diferentes escenarios, y todavía más si se quiere comparar consumos y rendimientos entre los hornos de combustión y los hornos eléctricos, deben hacerse en unidades másicas, o en caso de hacerse en unidades de superficie, es necesario que este dato se acompañe del valor del peso específico del producto (kg/m<sup>2</sup>), puesto que ambos valores están ligados.
- Los valores de consumo determinados en uno de los hornos eléctricos caracterizados son similares a los de hornos de combustión, en cambio, en el horno eléctrico de producción industrial se han obtenido valores de consumo específico por unidad de masa entre un 14 y 22% inferiores.
- Los valores de rendimiento obtenidos en el horno eléctrico industrial durante el calentamiento y cocción han alcanzado valores situados entre el 69 y el 76%, frente al 44 y 51%, alcanzado en hornos de combustión. Por tanto, estos valores son un 28% superiores a los valores disponibles en hornos de combustión. Ello hace pensar que la transferencia de calor (fundamentalmente por radiación) mejora en los hornos eléctricos de resistencias, por lo que evidencia que la tecnología de calentamiento eléctrico podría resultar muy interesante para la cocción de baldosas cerámicas.
- Por tanto, con los resultados obtenidos experimentalmente la cocción eléctrica presenta grandes expectativas, ya que a pesar de que los hornos eléctricos todavía no están energéticamente optimizados, se obtienen valores de rendimiento mayores que los de combustión, que podrían aumentar implementando algunas mejoras y rediseñando ciertas zonas.

- Un aspecto importante a destacar desde el punto de vista administrativo, si se instalan hornos eléctricos, es que los valores límite de emisión (VLE) que aparecen en las autorizaciones ambientales integradas (AAI), deberían modificarse, ya que los valores límite de emisión (VLE) en hornos de combustión se expresan en unidades de concentración referidos a un contenido en oxígeno, pero en hornos eléctricos el caudal de gases extraído de la zona de calentamiento y cocción es mucho menor, casi independiente del aporte de energía y con un contenido de oxígeno superior al 20%, por lo que estos VLE deberían expresarse de otra forma, como por ejemplo mediante factores de emisión (mg de contaminante/kg de material procesado o mg de contaminante/m<sup>2</sup>).

#### **Demanda eléctrica sectorial:**

- Las necesidades de electricidad para abastecer a todos los hornos del sector, en caso de ser electrificados, son muy elevadas, y se necesitarían potencias fotovoltaicas de entre 5 y 6 GW para cubrir toda la demanda eléctrica.
- La electrificación de los hornos en el sector de baldosas cerámicas necesitaría de un cambio en las infraestructuras eléctricas. En el presente estudio no se ha abordado este análisis debido a la carencia de información al respecto.

## **12. Conclusiones finales y desafíos futuros**

De los trabajos realizados en este proyecto se pueden indicar las siguientes conclusiones.

### **Marco tecnológico**

- **La alternativa de horno eléctrico parece posicionarse como una opción a implantar a medio-largo plazo a escala industrial**, al menos para productos de bajo espesor y/o bajas producciones.

Las principales **ventajas** que resultarían de la implantación de la **cocción eléctrica** son:

- la eliminación de las emisiones directas de CO<sub>2</sub>
- la reducción del consumo energético por una mayor eficiencia energética,
- la reducción de la carga de contaminante emitida, que además se emite con un menor caudal de gases (80-90% inferior con respecto a los hornos de combustión), lo que facilita su posible tratamiento, en caso de ser necesario.
- en instalaciones de reducida potencia, la posible integración de la generación fotovoltaica y/o los sistemas de cogeneración en la gestión energética de los hornos.

Las principales **desventajas** identificadas son:

- el mayor precio de la energía eléctrica con respecto a la térmica
  - la escasa oferta de equipos industriales y componentes
  - la necesidad de adaptar las infraestructuras eléctricas
- En los próximos años es **vital, el desarrollo de proyectos demostrativos a escala piloto e industrial**, específicamente diseñados para la cocción de baldosas cerámicas, para acelerar su desarrollo y facilitar su implantación en el sector ya que una de las principales limitaciones de la cocción eléctrica es la poca oferta de equipos industriales.

Este tipo de proyectos permitiría ampliar el conocimiento sobre las necesidades derivadas de la cocción eléctrica para cualquier formato, el tipo de resistencias a utilizar, así como, identificar la adecuación de las infraestructuras tanto internas como externas para poder abastecer de la suficiente electricidad al sector cerámico.

---

**Anexo**

---

El presente informe nº C221382 expedido a petición de la firma ASCER - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE AZULEJOS Y PAVIMENTOS CERÁMICOS, consta de una portada y 65 páginas.

Castellón, 25 de noviembre de 2022



**Dr. Salvador Ferrer Castan**  
Sostenibilidad

## **Cláusulas de responsabilidad**

Los resultados, conclusiones y/o recomendaciones contenidos en este informe sólo se refieren al material sometido a ensayo y/o a la información suministrada por el peticionario.

No se admite ninguna responsabilidad referente a la exactitud y representatividad del muestreo a menos que éste haya sido efectuado bajo nuestra propia supervisión. Salvo mención expresa, las muestras y sus referencias han sido elegidas libremente por el peticionario.

Reservados todos los derechos. El contenido de este informe goza de la protección que le otorga la ley. No podrá ser comunicado, transformado, reproducido o distribuido públicamente en todo o en parte, sin la autorización expresa del Instituto de Tecnología Cerámica - AICE. La distribución de este informe solamente está autorizada para el envío puntual y no masivo a clientes y/o proveedores del peticionario, con el único objetivo de informar y siempre citando la autoría del Instituto de Tecnología Cerámica –AICE.

El Instituto de Tecnología Cerámica - AICE no se hace responsable del uso que el peticionario u otra persona o entidad haga de los datos o indicaciones contenidos en el presente informe, en perjuicio o en beneficio de las marcas comerciales que el peticionario haya podido citar como identificación de las muestras sometidas a estudio.

Este informe tiene carácter exclusivamente comercial y no podrá ser utilizado en cualquier procedimiento judicial o administrativo, ni como dictamen pericial ni como prueba documental, salvo autorización expresa del Instituto de Tecnología Cerámica - AICE. La autorización por parte de ITC-AICE estará condicionada, cuando así se requiera, al abono por parte del cliente, incluso con carácter previo, de los fondos necesarios para cubrir los gastos asociados a la defensa de este informe. ITC-AICE se reserva el derecho de tomar las oportunas acciones legales en caso de incumplimiento de esta cláusula.

El Instituto de Tecnología Cerámica - AICE podrá incluir en sus informes análisis, comentarios o cualquier otra valoración que juzgue necesaria, aun cuando ésta no hubiese sido expresamente solicitada.

El Instituto de Tecnología Cerámica - AICE se compromete a respetar estrictamente el carácter confidencial de los datos y resultados obtenidos en este informe.