

#### Sede UJI

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

#### Sede Almassora

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

#### www.itc.uji.es

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

## Análisis del empleo de aire enriquecido con oxígeno en un horno de cocción de baldosas cerámicas

Informe nº C232665

Nº de páginas 26

ASCER-Asociación española de fabricantes de azulejos y pavimentos cerámicos

Castellón, 24 de Noviembre de 2023



## Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivo y alcance</b>	<b>3</b>
<b>3. Consideraciones teóricas del empleo de aire enriquecido</b>	<b>4</b>
<b>4. Descripción de las instalaciones</b>	<b>6</b>
4.1. Descripción del horno	6
4.2. Equipos instalados para dosificación de oxígeno	7
<b>5. Resultados obtenidos</b>	<b>10</b>
5.1. Resultados obtenidos en la zona de alta temperatura	11
5.1.1. Situación inicial	11
5.1.2. Inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de alta temperatura	14
5.1.3. Análisis económico	17
5.2. Resultados obtenidos en la zona de calentamiento	18
5.2.1. Situación inicial	18
5.2.2. Inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de calentamiento	20
5.2.3. Análisis económico	23
<b>6. Conclusiones</b>	<b>24</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>25</b>

## 1. Introducción

El objetivo de reducción de emisiones indicado en el Pacto Verde Europeo<sup>1</sup> es alcanzar una reducción global de emisiones de GEI hasta un 50 - 55 %, en el año 2030, respecto a los niveles de 1990.

Entre las iniciativas puestas en marcha por la UE para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero destaca, por su importancia, el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (RCDE o EU ETS por sus siglas en inglés), una de las piedras angulares de la política de lucha contra el cambio climático de la UE. Este sistema funciona de acuerdo con el principio de “limitación y comercio”. Se pone un límite máximo a la cantidad total de GEI que pueden emitir las instalaciones contempladas en el régimen. El límite va bajando a lo largo del tiempo para hacer que disminuyan las emisiones totales. Este sistema entró en funcionamiento en 2005, siendo hoy el primer y mayor mercado de carbono en el mundo.

El sector de baldosas cerámicas europeo está sujeto a las reglas del EU ETS , esto significa, que cada empresa debe cuantificar y reportar anualmente las emisiones de GEI generadas en sus instalaciones, y abonar por ellas, al precio establecido en el mercado de derechos de emisión, con el consiguiente incremento de costes en sus balances económicos, pues al coste de la energía, hay que sumar el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub>; además, hay que sumar la incertidumbre asociada al mercado de CO<sub>2</sub>, debido a las grandes oscilaciones de precios.

Para evitar la deslocalización de las empresas a países con menores presiones medioambientales, la Comisión Europea estableció la posibilidad de que aquellos sectores con mayor riesgo de trasladar su producción fuera de Europa (conocidos como “sectores en riesgo de fuga de carbono”) pudieran recibir asignación gratuita de derechos de emisión para parte de sus necesidades. El sector de baldosas cerámicas cumple con los criterios para ser considerado sector expuesto a riesgo significativo de fuga de carbono<sup>2</sup>, dada su importante cuota exportadora y por los elevados costes de CO<sub>2</sub> que debe soportar en sus cuentas.

Sin embargo, las emisiones asignadas de manera gratuita al sector de baldosas cerámicas no alcanzan para cubrir las emisiones realmente emitidas, y por tanto el coste de las emisiones no cubiertas por este mecanismo pasa a ser un coste directo adicional para las empresas del sector.

El sector cerámico, tal y como se puso de manifiesto en el informe “Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector español de baldosas cerámicas”<sup>3</sup> , tras los cambios tecnológicos ocurridos en la década de los años 80, ha continuado realizando esfuerzos por aumentar la eficiencia energética en las instalaciones y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> directas en el proceso productivo.

Actualmente, se considera que las tecnologías de fabricación utilizadas están bastante optimizadas, y por tanto presentan un margen de reducción de las emisiones directas del proceso ciertamente limitado. Con los objetivos de reducción de emisiones tan ambiciosos que se han establecido a nivel europeo, el sector deberá aplicar modificaciones sustanciales en el proceso de fabricación con medidas de descarbonización específicas, así como estudiar la incorporación de tecnologías de descarbonización horizontales, más disruptivas, como puede ser el empleo de gases renovables (biometano, H<sub>2</sub>), la electrificación de algunos procesos, la implementación de energías renovables en el proceso, o la captura del CO<sub>2</sub> emitido.

Dado que la implementación de nuevas tecnologías en un proceso productivo muy optimizado, con elevado consumo energético y gran productividad, es un proceso que requiere tiempo, investigación y recursos, a corto plazo las acciones que se plantean para avanzar en la descarbonización del proceso de fabricación de baldosas son acciones que plantean modificaciones de menor calado en el proceso, pero que ya han mostrado su viabilidad en otros materiales o en otros procesos. Estas

---

<sup>1</sup> COM/2019/640 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social europeo y al Comité de las Regiones. El Pacto Verde Europeo.

<sup>2</sup> [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage\\_en#tab-0-1](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage_en#tab-0-1)

<sup>3</sup> <https://transparencia.ascer.es/media/1048/pf-6-informe-castellano.pdf>

acciones, por tanto, pueden ser transferidas y adaptadas al proceso cerámico con menores riesgos técnicos y económicos, y permiten alcanzar un impacto positivo en la reducción de emisiones, facilitando la transición del sector cerámico hacia un proceso con menores emisiones.<sup>4</sup>

Algunas de estas medidas son:

- Nuevos procesos de preparación de materias primas
- Modificaciones en los materiales cerámicos, tanto soportes como esmaltes, para reducir el consumo de energía durante la etapa de cocción y las emisiones procedentes de las materias primas.
- Implementación de sistemas avanzados de recuperación de calor.
- Optimización del diseño de hornos y secaderos para aumentar su eficiencia.
- Incrementar la automatización en el control de variables de los procesos de secado y cocción.
- Mayor control y regulación del proceso de combustión en los quemadores de los hornos.
- Implementación de planes de eficiencia energética, auditorías y balances de energía.

Una de las acciones de ahorro que se puede implementar en los hornos de cocción de baldosas para optimizar la combustión en los quemadores de gas natural es la optimización del caudal de aire de combustión, para evitar el empleo de un exceso de aire que conlleva un sobreconsumo innecesario de gas natural. Esta medida de ahorro es ampliamente conocida en el sector, y se ha ido implementando de manera generalizada en los hornos.<sup>5</sup>

Pero esta medida esté limitada por la propia composición del aire, que es el comburente de la reacción de combustión, ya que únicamente contiene un 20,9 % de oxígeno, que es realmente el compuesto que interviene en la reacción de combustión del gas natural. El resto de los componentes del aire, principalmente nitrógeno, no intervienen en la reacción de combustión.

En este trabajo se propone enriquecer con oxígeno el aire utilizado como comburente en un horno de cocción de baldosas cerámicas, y analizar su impacto en el consumo de gas natural, en las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros compuestos, en la regulación y estabilidad del horno, así como en la calidad del producto final.

## 2. Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto de utilizar aire enriquecido en oxígeno en la cocción de baldosas cerámicas, en un horno continuo de rodillos empleado para la cocción de baldosas cerámicas.

Dado que el trabajo se va a realizar en un horno diseñado para utilizar aire como comburente, por seguridad de la instalación, se ha planteado un enriquecimiento máximo del aire hasta el 25 % de oxígeno. Mayores concentraciones de oxígeno en el comburente requieren una revisión exhaustiva de la instalación para adecuarla al uso de oxígeno, molécula altamente reactiva con cualquier compuesto inflamable que pueda estar en la conducción (aceite lubricante, grasa, etc.).

Los resultados obtenidos en el enriquecimiento hasta el 25 % de oxígeno en el aire de combustión se han analizado atendiendo a la calidad del producto final, al consumo de gas natural y emisiones en chimenea, y a los parámetros productivos más afectados por el cambio realizado en la composición del comburente.

---

<sup>4</sup> Ferrer, S.; Mezquita, A.; Monfort, E.; Vedrí, J. Guía de Tecnologías Hipocarbónicas para la industria de baldosas cerámicas. ITC-AICE 2021, con el apoyo de la Generalitat Valenciana. ISBN 978-84-123808-1-1. <https://www.itc.uji.es/>

<sup>5</sup> Monfort, E.; Mezquita, A.; Mallol, G.; Granel, R.; Vaquer, E. Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana. Ed.: Valencia. Agencia Valenciana de la Energía-AVEN. Depósito Legal: V-2078-2011. <https://www.itc.uji.es/>

### 3. Consideraciones teóricas del empleo de aire enriquecido

El aporte de oxígeno puro a la combustión conlleva como principal beneficio permitir la combustión completa del combustible reduciendo la cantidad de aire aportado al proceso. El aire está compuesto por aproximadamente un 79% de nitrógeno y este gas no participa de la reacción de combustión. Por ello, aunque en la combustión estequiométrica de metano con oxígeno, procedente del aire, sólo se requieren dos moléculas de oxígeno por cada molécula de metano, cuando se utiliza aire como comburente se están aportando además 7,56 moléculas de nitrógeno, presentes en el aire estequiométrico empleado para aportar el oxígeno, tal y como se muestra a continuación:



La ventaja de emplear aire enriquecido es que la cantidad de nitrógeno aportado con el oxígeno se reduce, concretamente con aire enriquecido a un porcentaje de oxígeno del 25 %, se aportan 6 moléculas de nitrógeno por cada molécula de metano.



En la Tabla 1 se muestra la cantidad mínima de aire necesaria en cada uno de los dos casos considerados.

Tabla 1. Cantidad de gases en condiciones estequiométricas en función de su contenido en oxígeno

Comburente(*)	Oxígeno (%)	Oxígeno (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> GN)	Nitrógeno (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> GN)	Comburente (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> GN)	Reducción de comburente (%)
Aire	21	2	7,56	9,56	--
Aire enriquecido	25	2	6	8	16 %

(\*) Para seguir el argot industrial en este informe al comburente, independientemente de su contenido en oxígeno, se le denominara aire de combustión o simplemente aire.

Los resultados obtenidos muestran que un enriquecimiento en oxígeno del aire empleado como comburente permitiría reducir la cantidad de aire de combustión, obteniéndose como consecuencia un ahorro de combustible, al reducirse el volumen total de gases a calentar en cada quemador.

Este resultado se obtiene en una combustión teórica estequiométrica. En los hornos industriales, se suele trabajar con un exceso de aire, para asegurar la completa combustión del gas natural y la presencia de oxígeno dentro de la cámara de combustión. En cualquier caso, el enriquecimiento en oxígeno permitirá la reducción total del caudal de aire utilizado, manteniendo el exceso de comburente habitual en la instalación industrial, con el consiguiente ahorro de gas natural.

Además, la reducción del caudal de aire de combustión conlleva una reducción en el caudal de gases de combustión que se evacuan del horno por la chimenea de humos, de modo que se reduce una de las principales salidas de energía del horno.

Para estimar este ahorro de gas, en condiciones próximas a la realidad industrial, se ha calculado la reducción del caudal de aire que se obtendría en un horno en el que haya un exceso de aire de combustión del 40 %, y en el que su temperatura sea de 120 °C. En estas condiciones, se ha estimado cuál sería el ahorro energético derivado de dejar de calentar este volumen de aire desde los 120 °C que llega al quemador (en este ejemplo) hasta una media de 1000 °C, requeridos en el horno.

El resultado obtenido muestra una reducción en el aporte de calor requerido de 0,67 kWh /Nm<sup>3</sup> GN. Este valor, para un horno de tamaño medio que fabrique entre 6000 y 7000 m<sup>2</sup>/día, implicaría un ahorro de gas natural del 6,3 %.

En la siguiente tabla se muestra el resultado obtenido, en función del exceso de aire considerado en el horno.

Tabla 2. Estimación del ahorro de gas con un enriquecimiento del aire del 25 %, para diferentes excesos de aire.

Exceso de aire (%)	Ahorro energético (kWh/Nm <sup>3</sup> GN)	Ahorro energético (%)	Ahorro <sup>(*)</sup> (€/m <sup>2</sup> )
20	0,57	5,4	0,05
40	0,67	6,3	0,06

(\*) Coste del gas natural considerado 50 €/MWh

Otro aspecto a considerar de la reducción del caudal de aire de combustión, consecuencia directa del empleo de aire enriquecido, es el aumento de la temperatura de la llama en los quemadores, y por tanto, el aumento de las probabilidades de la formación de compuestos de nitrógeno, principalmente NO<sub>x</sub> térmico, ya que la cantidad de nitrógeno presente en el aire enriquecido sigue siendo elevada.

La cantidad de NO<sub>x</sub> térmico formado, fundamentalmente en forma de NO, depende de la temperatura máxima alcanzada (T), de las concentraciones de N<sub>2</sub> y de O<sub>2</sub>, y del tiempo (t) de permanencia a máxima temperatura, se puede estimar de forma simplificada según la siguiente expresión<sup>6</sup>:

$$[\text{NO}_x] = K_1 \cdot \exp(-K_2/T) \cdot [\text{N}_2] \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot t$$

De manera cualitativa, en la siguiente figura se puede observar cómo evoluciona la formación de este compuesto en función de la proporción de O<sub>2</sub> en el comburente.

<sup>6</sup> Y.B. Zel'dovich (1946). "The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions". Acta Physicochimica U.S.S.R. 21: 577–628.

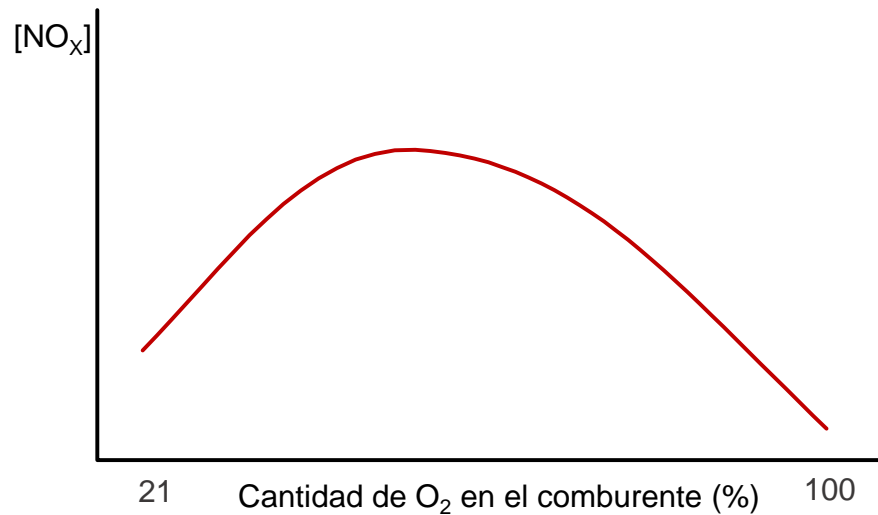


Figura 1. Formación de compuestos  $\text{NO}_x$  al aumentar la cantidad de oxígeno en el comburente.

## 4. Descripción de las instalaciones

### 4.1. Descripción del horno

Las pruebas experimentales se han realizado en un horno industrial, fabricado e instalado por SACMI, en 2015.

El horno consta de 66 módulos constructivos, 40 corresponden a las zonas de calentamiento y alta temperatura, y 26 se ubican en las tres zonas de enfriamiento del horno.



Figura 2. Imagen general del horno industrial donde se ha realizado el trabajo.



El aire de combustión es aire caliente recuperado de la chimenea de enfriamiento. Tiene una temperatura de 150 °C, y se distribuye mediante dos circuitos de aire diferentes en los anillos de quemadores: un circuito de aire aporta el aire de combustión a los quemadores de la zona de calentamiento, y el otro circuito aporta el aire de combustión a los quemadores de la zona de alta temperatura.

En consecuencia, durante la realización del proyecto, se han planificado dos puntos de inyección de oxígeno, uno para cada circuito de aire de combustión, para poder estudiar de manera diferenciada los efectos de emplear aire enriquecido en estas dos zonas diferenciadas en el horno.

## 4.2. Equipos instalados para dosificación de oxígeno

Para la inyección de oxígeno, se ha instalado un contenedor de oxígeno en la parte exterior de la nave, y un sistema de control y regulación de la presión y caudales de oxígeno (SKID), en las proximidades del horno.

Se ha utilizado el contenedor MacroGas que consiste en una cisterna con capacidad aproximada de 17000 litros y una capacidad de gasificación de 1000 Nm<sup>3</sup>/h de oxígeno.

El SKID instalado fue diseñado específicamente para aplicaciones industriales de enriquecimiento de aire oxicomcombustión con oxígeno puro en fase gas y con una capacidad máxima de dosificar 200 Nm<sup>3</sup>/h.

El equipo tiene unas protecciones que limitan la inyección de oxígeno en el sistema dependiendo de la temperatura, concentración de oxígeno y caudal de aire a la entrada del horno. para garantizar la seguridad de la maniobra con interbloqueos predefinidos y integrados con el control del horno. Además, dispone de un PLC donde se registran todos los datos y se pueden modificar las condiciones de uso del equipo conservando la seguridad.



Figura 3. Contenedor de oxígeno.





Figura 4. Sistema de regulación y control de la entrada de oxígeno (SKID)

A salida del SKID, se derivan 2 líneas de oxígeno para inyección, que se realiza en 2 puntos diferentes. Toda la canalización se realiza en tubo de cobre de 28x26 mm limpio y desengrasado para su uso con oxígeno.

En cada una de las conducciones que distribuyen el aire de combustión a las dos zonas del horno, se han instalado:

- Un caudalímetro de aire
- Un punto para la inyección de oxígeno
- Un sensor de oxígeno



Figura 5. Inyección de oxígeno en una de las conducciones de aire de combustión.

La configuración del dispositivo experimental flexibiliza la inyección de oxígeno a dos puntos diferentes, permitiendo el estudio del efecto del enriquecimiento en cada una de las zonas, individualmente, tal y como se ilustra en el esquema de la Figura 6.

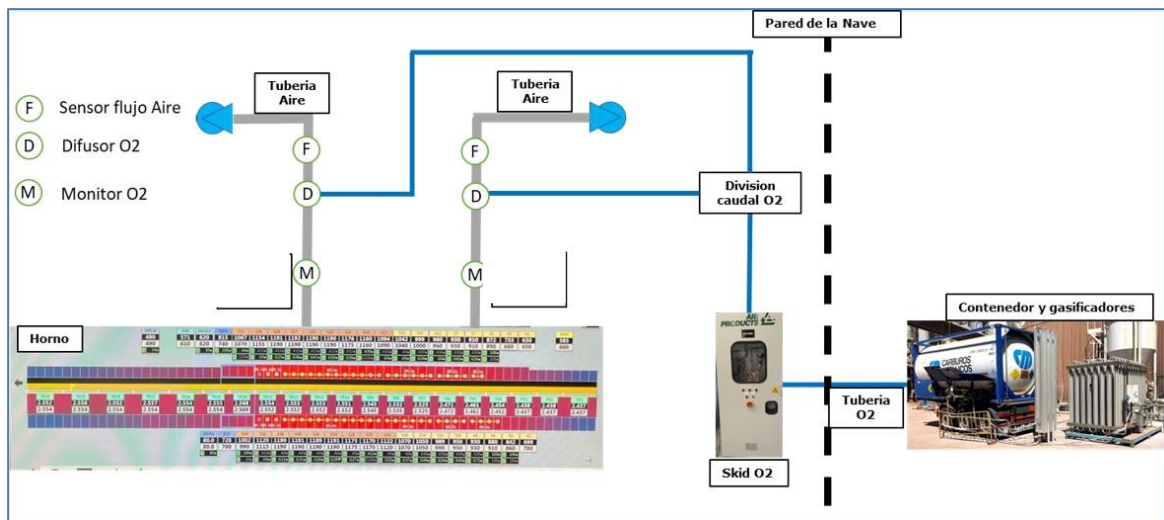


Figura 6. Esquema de inyección de oxígeno en los dos circuitos de aire de combustión del horno.



*Figura 7. Inyección de oxígeno en una de las conducciones de aire de combustión.*

## 5. Resultados obtenidos

El análisis del impacto del uso de aire enriquecido en oxígeno en un horno industrial de cocción de baldosas cerámicas se ha realizado de manera experimental durante varias semanas, en las que de manera paulatina se han ido incorporando maniobras nuevas, una vez analizados los resultados de las maniobras previas.

En este informe se muestran únicamente los resultados obtenidos en las dos últimas situaciones de trabajo estudiadas, en las que se han incorporado simultáneamente varias maniobras en el horno, obteniéndose unos buenos resultados en términos de ahorro energético, funcionalidad del horno y calidad del producto final. No obstante, no se ha dispuesto de tiempo suficiente para realizar un ajuste más detallado de los parámetros de funcionamiento del horno, que sin duda podrían dar lugar a mejores resultados.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestra el plan de trabajo seguido durante la realización de las pruebas industriales.

Tabla 3. Planificación y realización de las pruebas industriales

Período	Acciones
Semanas 35-36-37	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación del contenedor de oxígeno y del SKID.</li> <li>• Conexión de las conducciones de aporte de oxígeno al horno,</li> <li>• Conexiones eléctricas al cuadro general de control.</li> </ul>
Semana 38	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación de sensores</li> <li>• Verificación de funcionamiento de toda la instalación.</li> </ul>
Semana 39	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterización inicial del horno.</li> <li>• Análisis de las condiciones de funcionamiento para la realización de las pruebas.</li> </ul>
Semana 40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primera inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de alta temperatura, hasta el 22 %.</li> <li>• Inyección hasta el 23 % y 24 % de O<sub>2</sub> en la zona de alta temperatura.</li> </ul>
Semana 42	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inyección de O<sub>2</sub> en la zona de alta temperatura hasta el 25 %.</li> <li>• Primeras pruebas de reducción del caudal de aire en esta zona.</li> </ul>
Semana 43	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primera inyección de O<sub>2</sub> en la zona de baja T hasta el 25 %.</li> <li>• Reducción del caudal de aire en esta zona.</li> <li>• Pruebas de reducción del caudal de chimenea.</li> </ul>
Semana 44	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inyección de O<sub>2</sub> en la zona de alta T hasta el 25 %.</li> <li>• Reducción del caudal de aire en esta zona.</li> <li>• Reducción del caudal de chimenea.</li> </ul>

## 5.1. Resultados obtenidos en la zona de alta temperatura

La situación de trabajo en el horno durante la realización de las maniobras de inyección de oxígeno en la zona de alta temperatura se muestra en la Tabla 4, y se mantuvo constante durante la duración de las pruebas realizadas. Adicionalmente a los valores mostrados, se registraron también el consumo de gas natural en todo el horno, y el caudal de aire de combustión en la zona de alta temperatura.

Tabla 4. Parámetros de trabajo en el horno.

Parámetro	Descripción
Producto	Gres porcelánico
Formato	60 cm x 60 m
Ciclo de cocción	50 minutos
Temperatura máxima de cocción	1195 °C
Temperatura del aire de combustión	150 °C

### 5.1.1. Situación inicial

El perfil de presión estática en el horno en la situación inicial de funcionamiento, sin inyección de oxígeno, se muestra en la Figura 8.



Se observa un perfil de presión estática habitual en este tipo de hornos, en el que la presión en la cámara superior va en aumento desde la zona de entrada del horno hasta la zona de máxima temperatura, siendo la presión positiva únicamente al final de la zona de alta temperatura. La máxima presión se sitúa entre las zonas de alta temperatura y enfriamiento, lo que se considera correcto desde el punto de vista operativo.

En la cámara inferior, el perfil es similar, pero los valores de presión son inferiores, estando toda la cámara del horno en depresión.

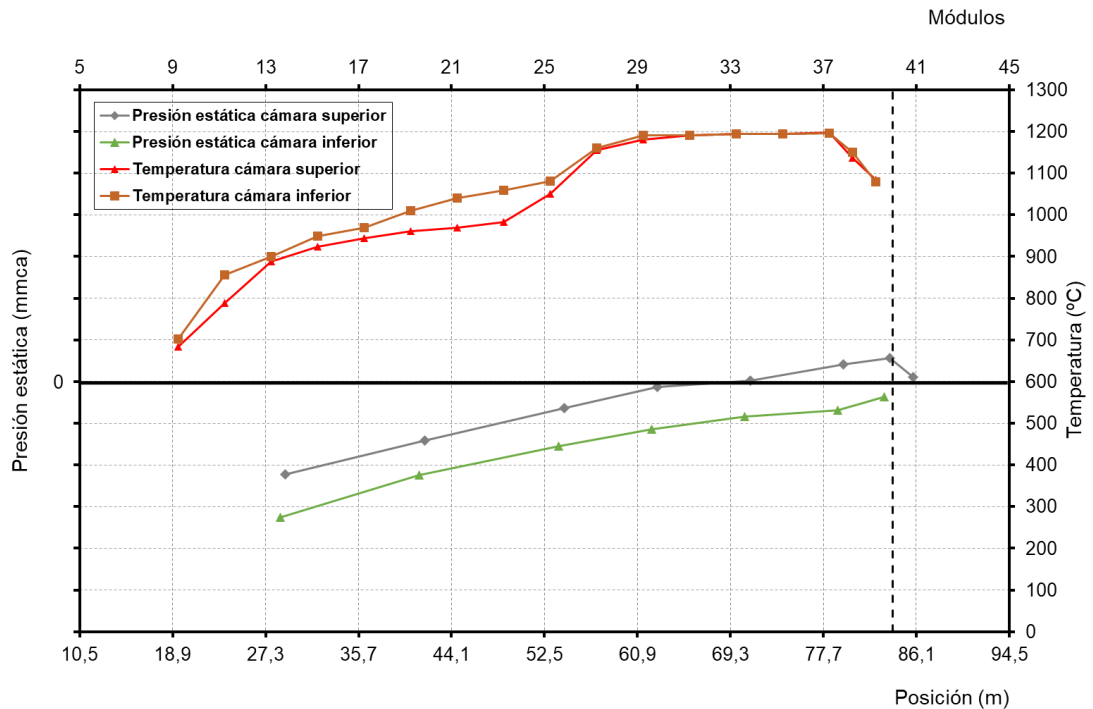


Figura 8. Perfil de presión estática en el horno. Situación inicial.

El perfil de contenido en oxígeno en el horno en la situación inicial de funcionamiento, sin inyección de oxígeno, se muestra en la Figura 9.

Se observa, como es habitual, un menor contenido en oxígeno en la cámara inferior, en la zona de calentamiento. A medida que las piezas avanzan por el horno, el contenido en oxígeno va en aumento, en ambas cámaras, hasta alcanzar el 20,9 % en la zona de enfriamiento.

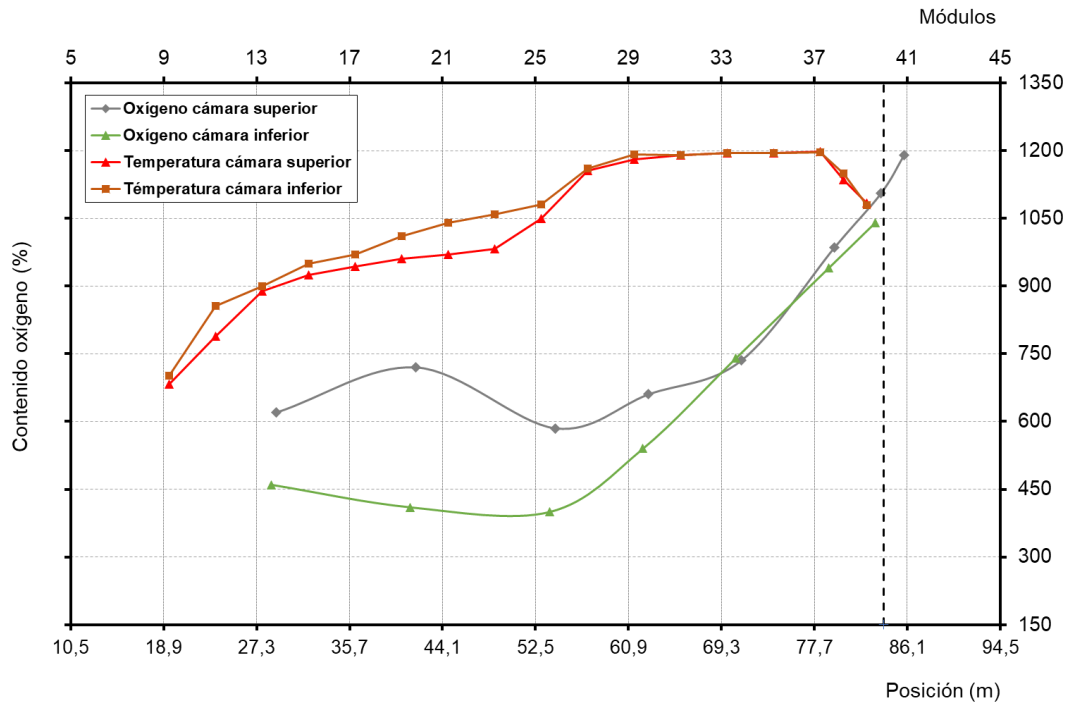


Figura 9. Perfil de contenido en oxígeno en el horno. Situación inicial.

Además, se determinaron los valores de presión de aire y de gas natural en los quemadores de los anillos de la zona de alta temperatura, antes de realizar la maniobra de inyección de oxígeno en el aire de combustión en esta zona. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

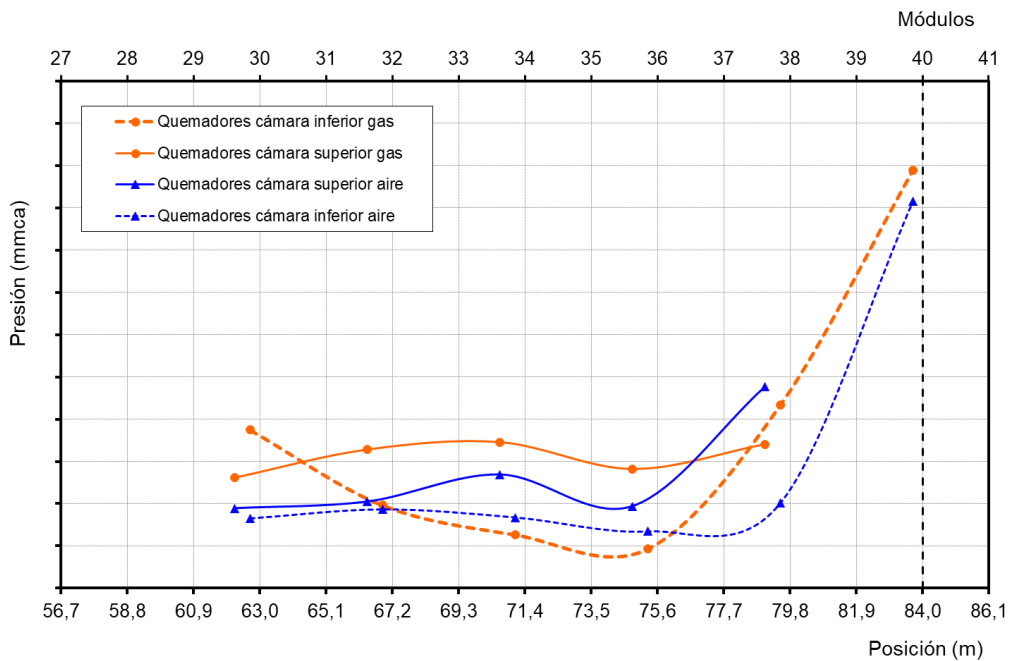


Figura 10. Presión de aire y gas en los quemadores. Zona alta temperatura. Situación inicial.

### 5.1.2. Inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de alta temperatura

La maniobra completa realizada consistió en realidad en tres maniobras parciales, que se realizaron simultáneamente. Como se ha comentado anteriormente, antes de poder implementar las tres maniobras de manera simultánea, se habían implementado de manera individual, observando el funcionamiento del horno y la calidad del producto final, para asegurar unas buenas condiciones de trabajo tras cada paso realizado antes de proseguir con la siguiente maniobra.

Las maniobras realizadas fueron:

1. Inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de alta temperatura, hasta alcanzar un enriquecimiento del 25 %.
2. Reducción del caudal de aire en la zona de alta temperatura (42 %).
3. Reducción del caudal de gases que se extraen del horno (6,5 %). El caudal se redujo mediante la disminución de la frecuencia del motor del ventilador de extracción de humos.

Tras la realización de las tres modificaciones, se dejaron pasar un par de horas para que se estabilizase el funcionamiento del horno, y se volvieron a determinar todos los parámetros productivos.

Los resultados más relevantes se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados obtenidos tras las maniobras en la zona de alta temperatura.

Parámetro	Resultado
Estabilidad del horno	Horno estable
Consumo de gas natural	Ahorro del 4,7 %
Consumo de oxígeno	70 Nm <sup>3</sup> /h
Perfil de presión estática	Similar a la inicial
Contenido en oxígeno	Superior al inicial
Presiones de aire y gas en quemadores de la zona de alta T	Valores inferiores a los iniciales
Ratio oxígeno/gas natural	Ligeramente inferior al inicial
Concentración de HF, HCl, H <sub>2</sub> S	Aumentan entre 5 – 10%
Concentración de CO <sub>2</sub>	Similar a la inicial
Concentración de NO <sub>x</sub>	Aumenta un 60 %

En general, se aprecia que la maniobra no tuvo efectos negativos en la operatividad y estabilidad del horno, ni en el sistema de combustión. La calidad del producto final se mantuvo estable tras los cambios realizados, sin observarse la aparición de defectos. La principal consecuencia fue el aumento del contenido en oxígeno en la cámara de combustión, y el ahorro de gas natural alcanzado.

Respecto a las emisiones de gases, se observó que la concentración de CO<sub>2</sub> se mantuvo igual que en la situación inicial. Hay que tener en cuenta que sólo se ha enriquecido una parte del aire de combustión, y que sólo se ha enriquecido hasta un 25 %. Además, las mediciones en chimenea se realizan después de una entrada de aire ambiente de dilución que hay en la chimenea de humos. Por todo esto, como consecuencia de la maniobra realizada, no era de esperar un aumento significativo en la concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de chimenea. Aunque, eso sí, en valor absoluto las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen, como consecuencia del menor consumo de gas natural.



En el caso del NO<sub>x</sub>, se observó un incremento del 60% sobre los valores de concentración iniciales. No obstante, este incremento da lugar a unos niveles de concentración muy por debajo del Valor Límite de Emisión (VLE) permitido en las Autorizaciones Ambientales Integradas concedidas en la Comunitat Valenciana (250 mg/Nm<sup>3</sup>).

En la Figura 11 se muestra comparativamente el perfil de presión estática en la situación inicial y tras la realización de las maniobras. Se observa que, al haberse reducido el caudal de gases que se extraen del horno, se ha mantenido la presión estática en la cámara de combustión en valores muy similares a los que había en la situación inicial, de modo que la bajada de presión estática originada por la reducción del caudal de aire se ve compensada por la reducción del caudal de gases que se extraen del horno, y como resultado el perfil de presión estática se mantiene prácticamente igual.

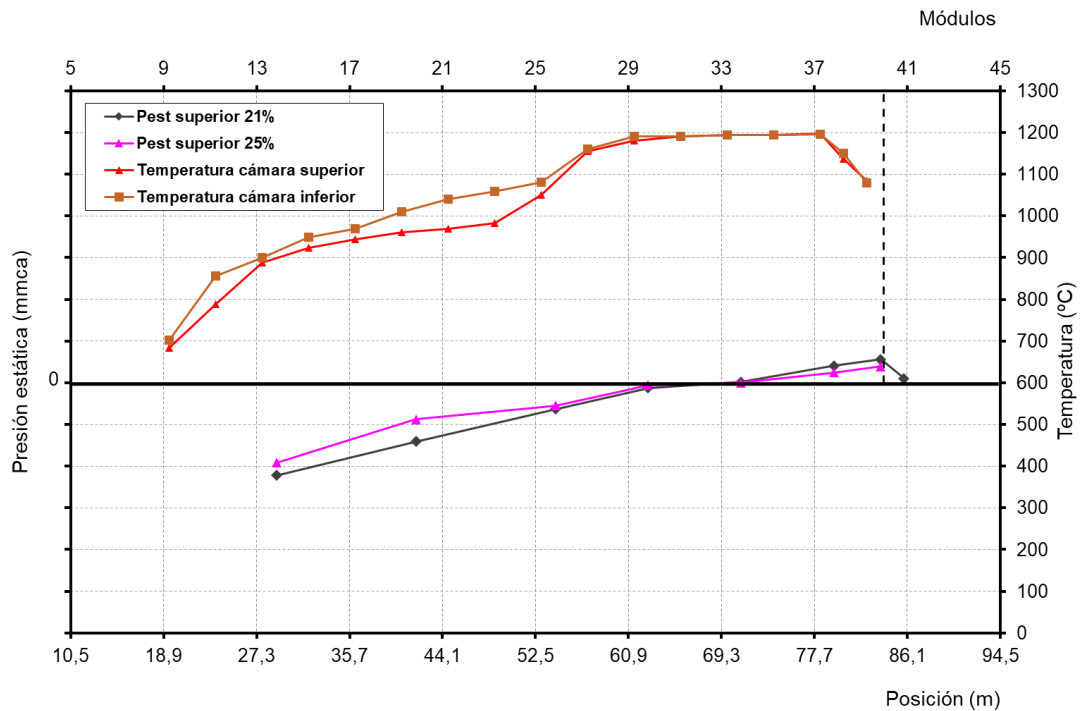


Figura 11. Comparativa del perfil de presión estática en la cámara superior del horno. Situación inicial y tras la maniobra en la zona de alta temperatura.

En la Figura 12 se muestra comparativamente el contenido en oxígeno en la situación inicial y tras la realización de las maniobras. Se observa que el aumento del contenido en oxígeno en el aire de combustión, del 21 % al 25 %, a pesar de haberse reducido también el caudal de aire, conlleva a un incremento general del contenido en oxígeno en el interior del horno, más acusado en la zona de alta temperatura, que es donde se ha enriquecido el aire de combustión.

En el resto del horno, el aumento del contenido en oxígeno se produce por el paso de los gases en contracorriente al movimiento de las piezas, desde la zona de alta temperatura hacia la zona de calentamiento.

Este resultado parece indicar que el caudal de aire de combustión podría haberse reducido en mayor medida, siendo el límite de la maniobra el caudal de aire con el que se consiguiese igualar el contenido en oxígeno que había inicialmente.

No obstante, además del contenido en oxígeno y el ahorro energético, hay otros parámetros de trabajo a considerar al reducir el caudal de aire de combustión, razón por la que no se redujo en mayor medida el caudal de aire de combustión en la zona de alta temperatura. Entre estos parámetros cabe citar la estabilidad de la llama, una correcta distribución del calor en el horno y la presión estática en la cámara de combustión.

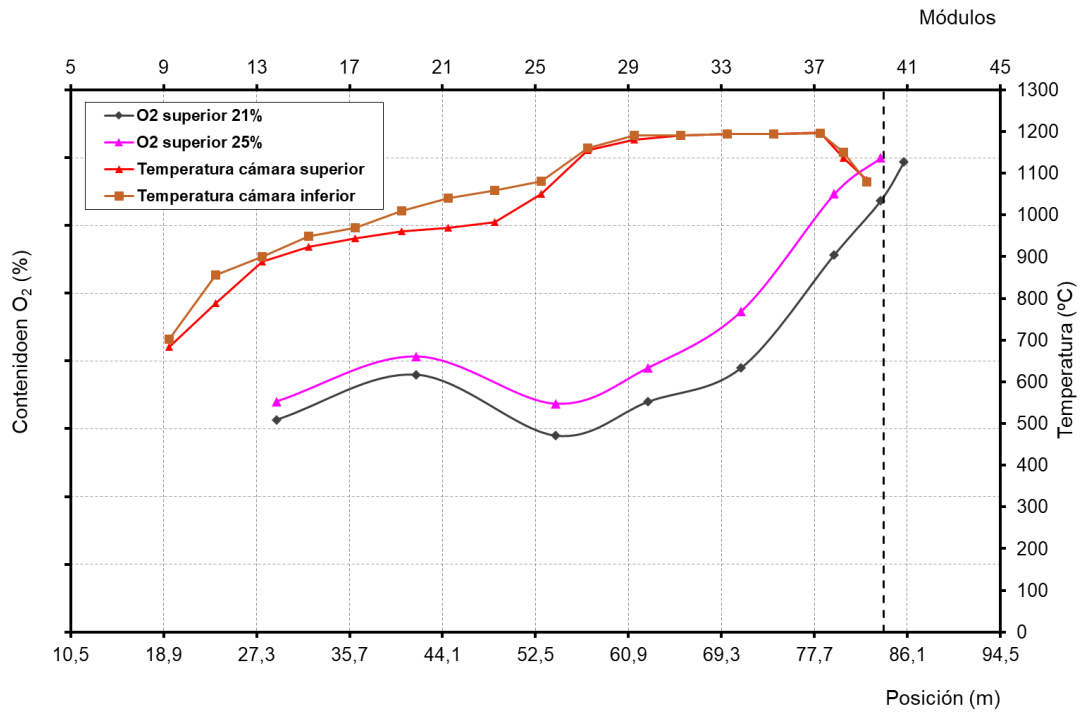


Figura 12. Comparativa del contenido en oxígeno en la cámara superior del horno. Situación inicial y tras la maniobra en la zona de alta temperatura.

En la Figura 13 se muestra comparativamente la presión de aire y de gas en los quemadores de la cámara superior, en la situación inicial de combustión con aire y tras la realización de las maniobras. Se observa una bajada general en las presiones de aire y de gas medidas en los quemadores, producidas por la reducción del caudal de aire de combustión, y por la reducción en el consumo de gas natural.

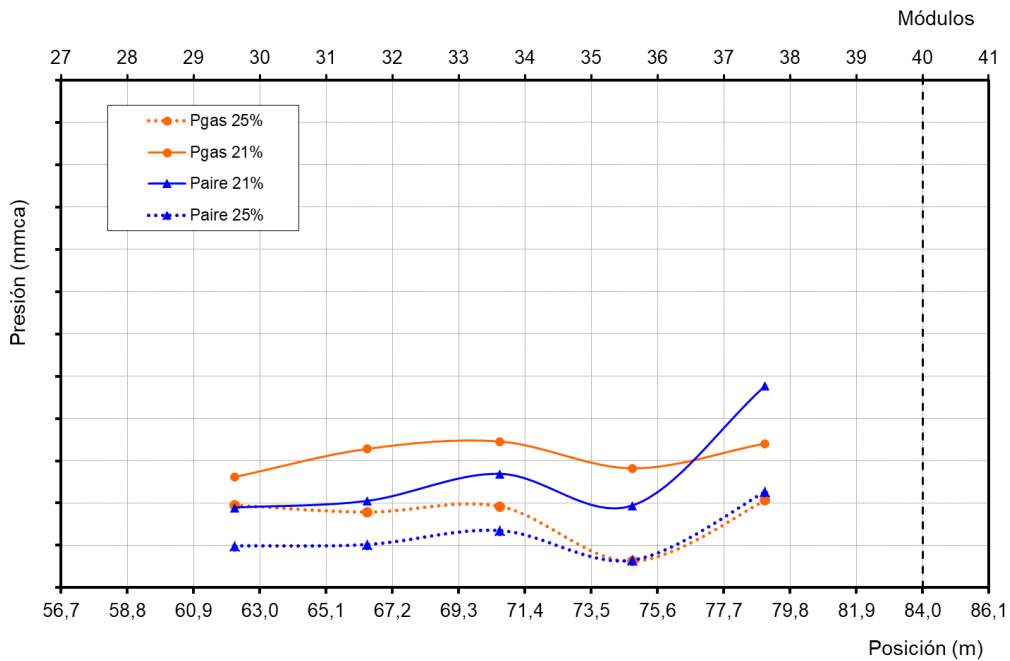


Figura 13. Comparativa de la presión de aire y gas en los quemadores de la cámara superior del horno. Situación inicial y tras la maniobra en la zona de alta temperatura.

Tras la realización de las maniobras, no se observaron problemas de calidad en las piezas. Es de esperar que al reducirse las presiones de gas y de aire en los quemadores, la llama sea más corta y se modifique la distribución del calor en la zona afectada, lo que podría ocasionar gradientes transversales de temperatura. Al estar fabricando gres porcelánico, y estar realizando las maniobras en la zona de alta temperatura, diferencias de temperatura transversales podrían ocasionar la aparición de defectos de estabilidad dimensional, como calibres o descuadres, o la obtención de piezas de distintas tonalidades.

En el horno estudiado, y en las condiciones en las que se realizaron las maniobras en la zona de alta temperatura, no se observó la aparición de ninguno de estos defectos en las piezas. No obstante, sería interesante determinar experimentalmente los gradientes transversales de temperatura con diferentes reducciones del caudal de aire de combustión (enriquecido hasta el 25 % de oxígeno) para analizar su influencia real en la distribución de temperatura en el interior del horno.

### 5.1.3. Análisis económico

La maniobra realizada, consistente en la inyección de oxígeno hasta un 25 % en el aire de combustión en el circuito de la zona de alta temperatura, seguida de una reducción en el caudal de aire de combustión y una disminución del caudal de gases en la chimenea, para mantener la presión estática en el horno en los valores habituales, ha propiciado un ahorro de gas natural en los anillos de quemadores afectados por la maniobra, estimado en unos 20-25 Nm<sup>3</sup>/h gas natural.

En la Figura 14 se muestra cuál sería el beneficio económico alcanzado, considerando el ahorro de gas natural y las emisiones de CO<sub>2</sub>, y el coste incurrido por el consumo de oxígeno.

El análisis se ha hecho considerando:

- Tres valores para el coste del oxígeno: 100 / 90 / 80 €/t O<sub>2</sub>
- Cuatro valores para el coste del gas natural: 40 / 50 / 60 / 70 €/MWh
- Un valor del coste de los derechos de emisión: 80 €/t CO<sub>2</sub>

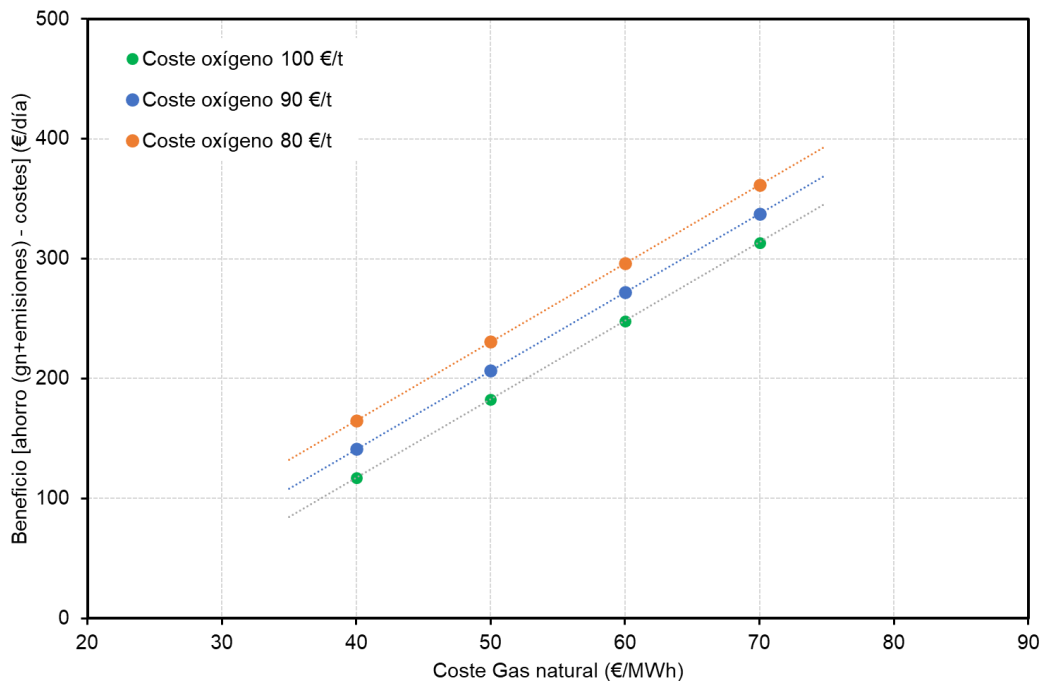


Figura 14. Representación gráfica del análisis económico realizado tras las maniobras en la zona de alta temperatura.

La situación con los costes actuales de oxígeno y de gas natural (100 €/t y 40 €/MWh, respectivamente), indica un diferencial positivo de 117 €/día, entre el coste del oxígeno y el ahorro de gas natural, y de las emisiones. Por unidad productiva, en el caso estudiado, este diferencial positivo sería de 0,013 €/m<sup>2</sup>.

## 5.2. Resultados obtenidos en la zona de calentamiento

La situación de trabajo en el horno durante la realización de las maniobras de inyección de oxígeno en la zona de calentamiento fue la misma que había durante la ejecución de las maniobras en la zona de alta temperatura, mostrada en la Tabla 4.

### 5.2.1. Situación inicial

El perfil de presión estática en el horno en la situación inicial de funcionamiento, sin inyección de oxígeno en la zona de calentamiento, se muestra en la Figura 15.

Se observa un perfil de presión estática similar al obtenido anteriormente, en el que la presión en la cámara superior va en aumento desde la zona de entrada del horno hasta la zona de máxima temperatura, siendo la presión positiva únicamente al final de la zona de alta temperatura. La máxima presión se sitúa entre las zonas de alta temperatura y enfriamiento, lo que se considera correcto desde el punto de vista operativo.

En la cámara inferior, el perfil es similar, pero los valores de presión son inferiores, estando toda la cámara del horno en depresión.

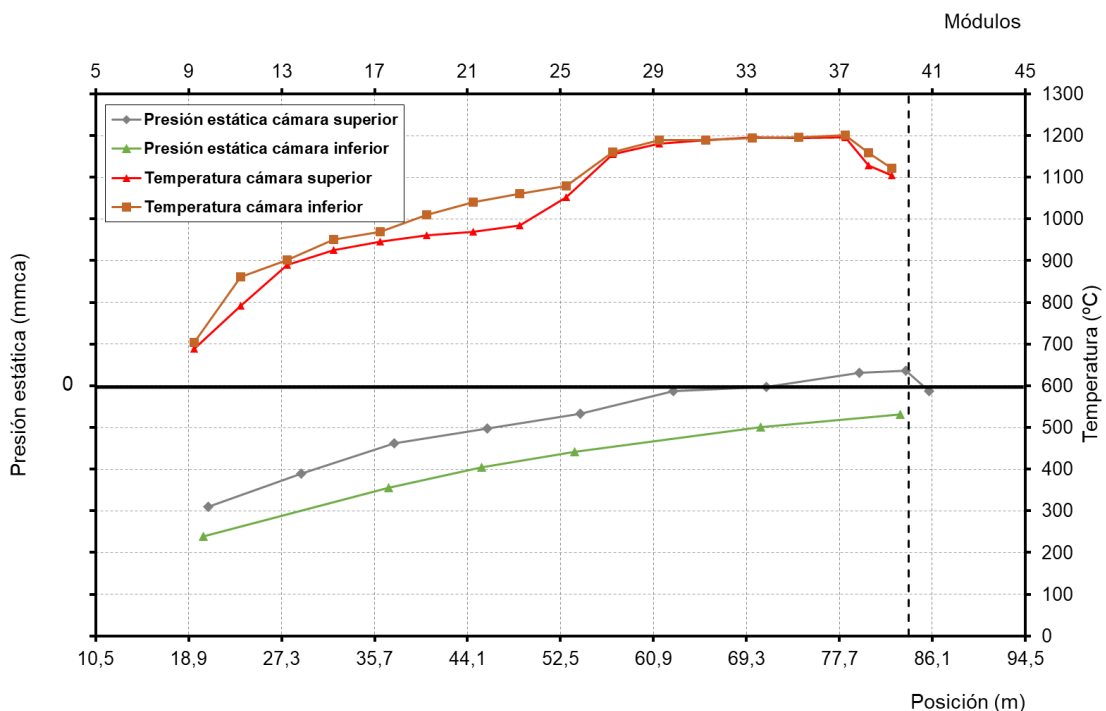


Figura 15. Perfil de presión estática en el horno. Situación inicial.

El perfil de contenido en oxígeno en el horno en la situación inicial de funcionamiento, sin inyección de oxígeno, se muestra en la Figura 16.

Se observa un menor contenido en oxígeno en la cámara inferior, en la zona de calentamiento. A medida que las piezas avanzan por el horno, el contenido en oxígeno va en aumento, en ambas cámaras, hasta alcanzar el 20,9 % en la zona de enfriamiento.

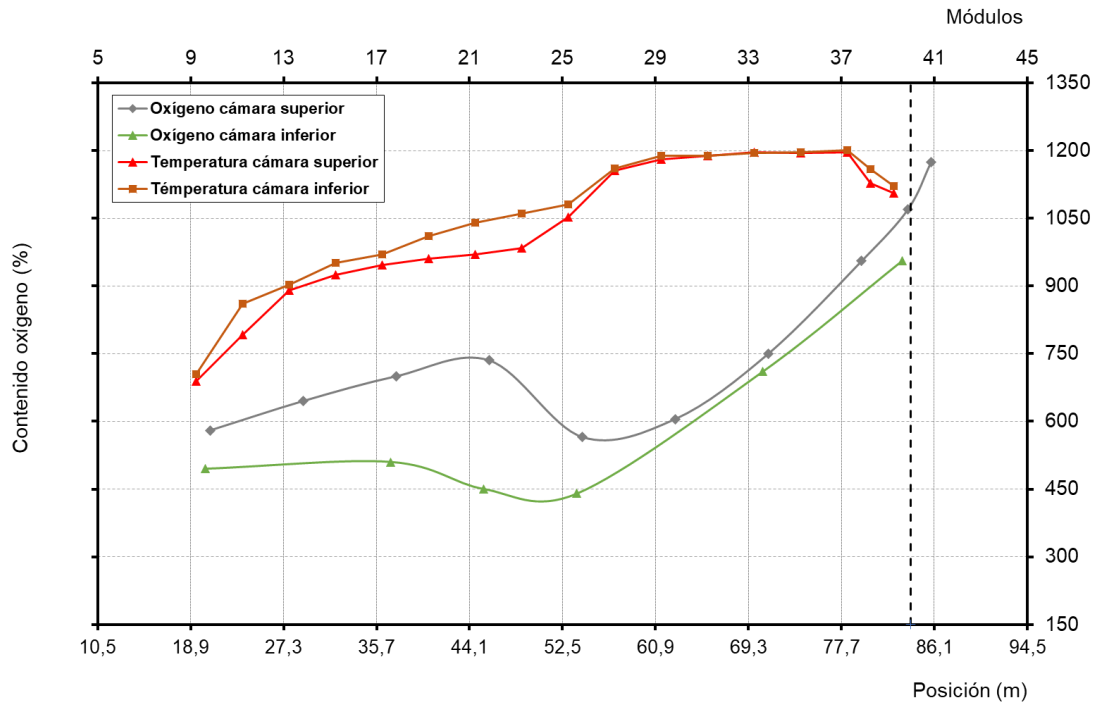


Figura 16. Perfil de contenido en oxígeno en el horno. Situación inicial.

Los valores de presión de aire y de gas natural en los quemadores del horno, antes de realizar la maniobra de inyección de oxígeno en el aire de combustión en la zona de calentamiento, se muestran en la siguiente figura.

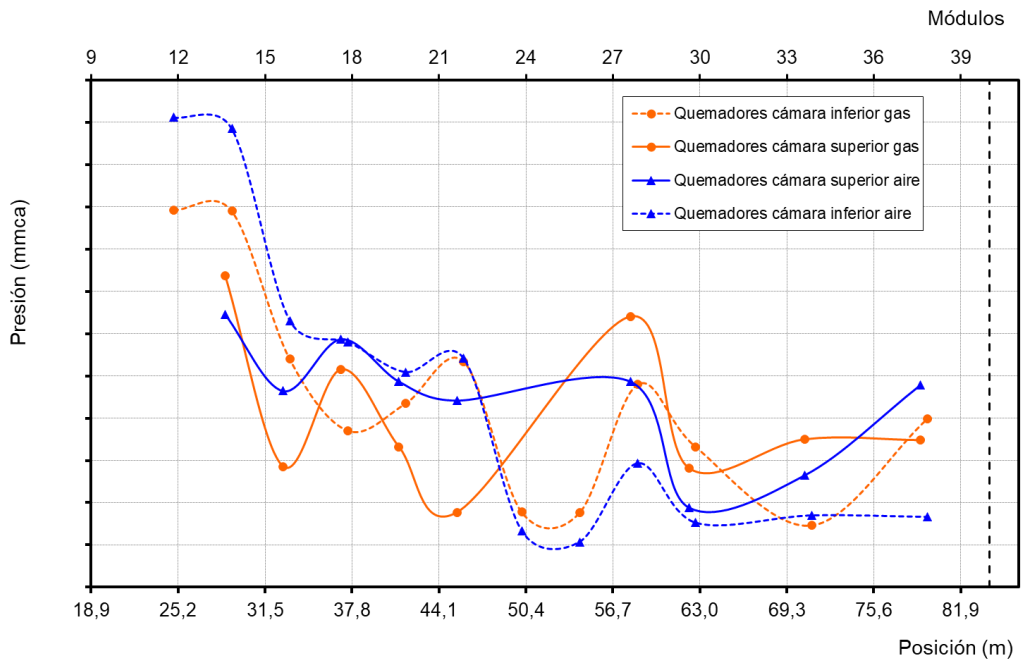


Figura 17. Presión de aire y gas en los quemadores. Situación inicial.

### 5.2.2. Inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de calentamiento

Al igual que en la zona de alta temperatura, la maniobra completa realizada en la zona de calentamiento consistió en tres maniobras parciales, que se realizaron simultáneamente. Como se ha comentado anteriormente, antes de poder implementar las tres maniobras de manera simultánea, se habían implementado de manera individual, observando el funcionamiento del horno y la calidad del producto final, para asegurar unas buenas condiciones de trabajo tras cada paso realizado antes de proseguir con la siguiente maniobra.

Las maniobras realizadas fueron:

1. Inyección de oxígeno en el aire de combustión de la zona de calentamiento, hasta alcanzar un enriquecimiento del 25 %.
2. Reducción del caudal de aire en la zona de calentamiento (34 %).
3. Reducción del caudal de gases que se extraen del horno (9,2 %). El caudal se redujo mediante la disminución de la frecuencia del motor del ventilador de extracción de humos

Tras la realización de las tres modificaciones, se dejaron pasar un par de horas para que se estabilizase el funcionamiento del horno, y se volvieron a determinar todos los parámetros productivos.

Los resultados más relevantes se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos tras las maniobras en la zona de calentamiento.

Parámetro	Resultado
Estabilidad del horno	Horno estable
Consumo de gas natural	Ahorro del 4,1 %
Consumo de oxígeno	186 Nm <sup>3</sup> /h
Perfil de presión estática	Similar al inicial
Contenido en oxígeno	Superior al inicial
Presiones de aire y gas en quemadores de la zona de calentamiento	Valores inferiores a los iniciales
Ratio oxígeno/gas natural	Inferior al inicial
Concentración de HF, HCl, H <sub>2</sub> S	Aumentan entre 8 – 15%
Concentración de CO <sub>2</sub>	Similar a la inicial
Concentración de NOx	Aumenta un 110 %

En general, al igual que en la maniobra realizada en la zona de alta temperatura, se aprecia que la maniobra en la zona de calentamiento no tuvo efectos negativos en la operatividad y estabilidad del horno, ni en el sistema de combustión. La calidad del producto final se mantuvo estable tras los cambios realizados, sin observarse la aparición de defectos. La principal consecuencia fue el aumento del contenido en oxígeno en la cámara de combustión, y el ahorro de gas natural alcanzado.

Al igual que en la maniobra anterior, la concentración de CO<sub>2</sub> se mantuvo igual que en la situación inicial, sin observarse un aumento significativo en la concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de chimenea. Aunque, eso sí, en valor absoluto las emisiones de CO<sub>2</sub> también se reducen, como consecuencia del menor consumo de gas natural.

El mayor incremento en emisiones se observó en los compuestos de NO<sub>x</sub>, que con esta maniobra se duplicaron. No obstante, el valor obtenido continuó estando por debajo del Valor Límite de Emisión.

En la Figura 18 se muestra comparativamente el perfil de presión estática en la situación inicial y tras la realización de las maniobras. Se observa que, al haberse reducido el caudal de gases que se extraen del horno, se ha mantenido la presión estática en la cámara de combustión en valores muy similares a los que había en la situación inicial, de modo que la bajada de presión estática originada por la reducción del caudal de aire se ve compensada por la reducción del caudal de gases que se extraen del horno, y como resultado el perfil de presión estática se mantiene prácticamente igual.

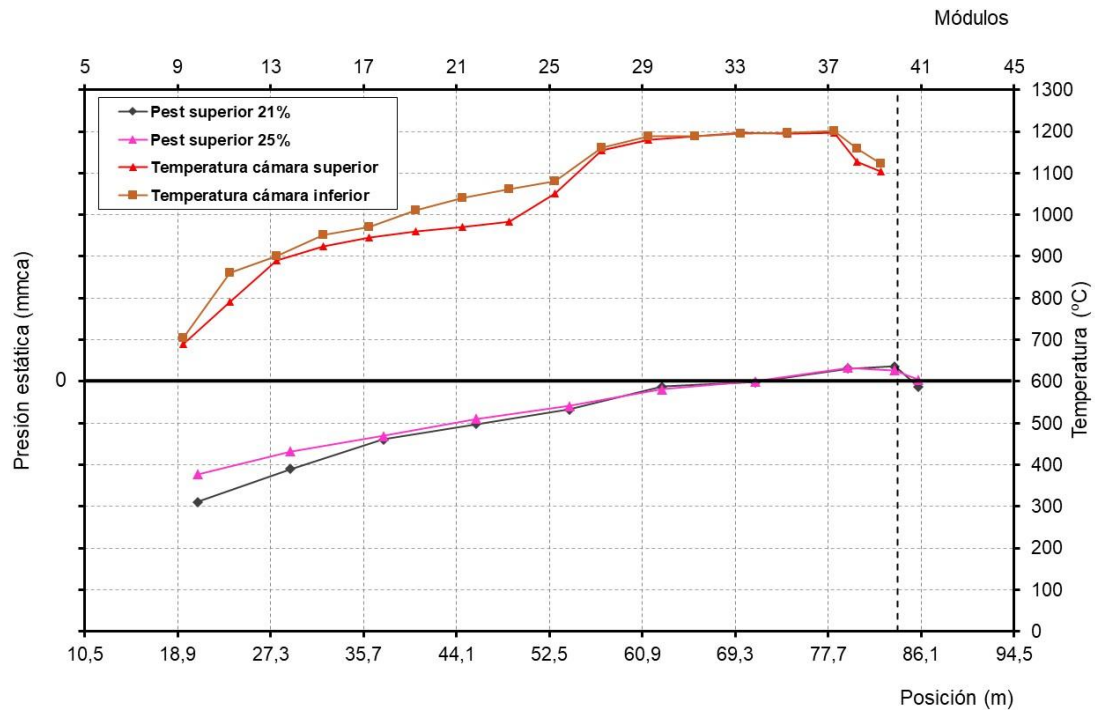


Figura 18. Comparativa del perfil de presión estática en la cámara superior del horno. Situación inicial y tras la maniobra en la zona de calentamiento.

En la Figura 19 se muestra comparativamente el contenido en oxígeno en la situación inicial y tras la realización de las maniobras. Se observa que el aumento del contenido en oxígeno en el aire de combustión de la zona de calentamiento, del 21 % al 25 %, a pesar de haberse reducido también el caudal de aire de combustión conlleva a un incremento del contenido en oxígeno en esta zona.

En este caso, sin embargo, el contenido en oxígeno en el resto del horno, es decir, en la zona de alta temperatura, no se modifica, debido a que los gases de la zona de calentamiento se evacuan del horno sin pasar por la zona de alta temperatura.

Este resultado parece indicar que el caudal de aire de combustión en la zona de calentamiento podría haberse reducido en mayor medida, siendo el límite de la maniobra el caudal de aire con el que se consiguiese igualar el contenido en oxígeno que había inicialmente en esta zona. No obstante, además del contenido en oxígeno y el ahorro energético, hay otros parámetros de trabajo a considerar al reducir el caudal de aire de combustión, razón por la que no se redujo en mayor medida el caudal de aire de combustión en la zona de calentamiento.



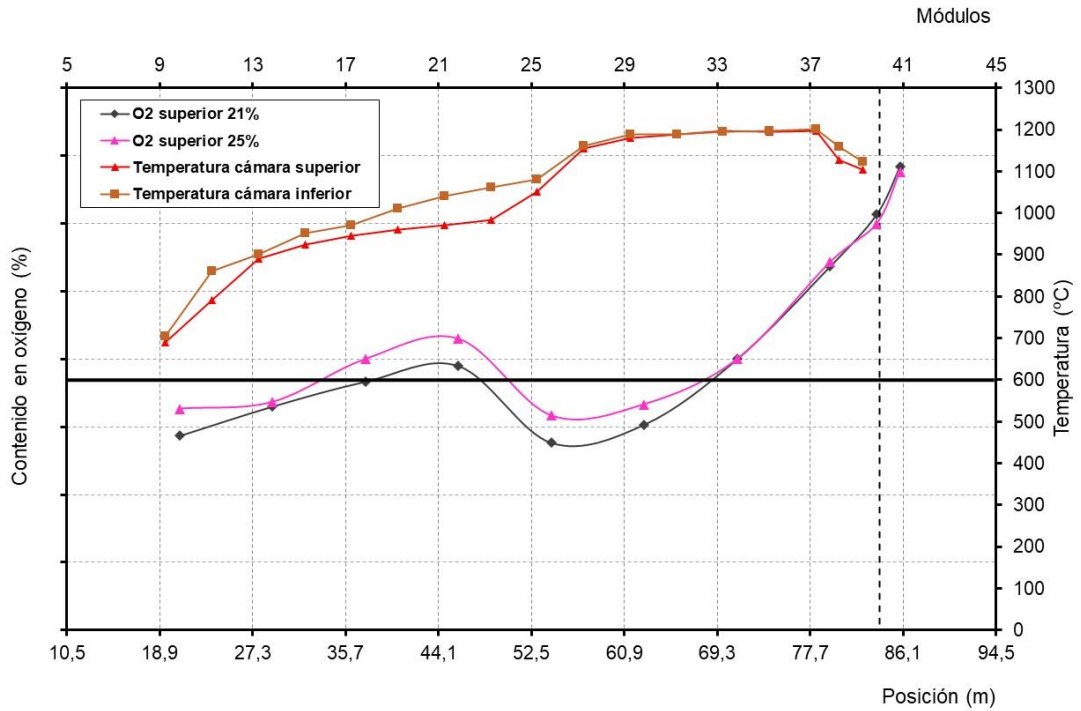


Figura 19. Comparativa del contenido en oxígeno en la cámara superior del horno. Situación inicial y tras la maniobra en la zona de calentamiento.

En la Figura 20 se muestra comparativamente la presión de aire y de gas en los quemadores de la cámara superior, en la situación inicial de combustión con aire y tras la realización de las maniobras en la zona de calentamiento. Se observa una bajada general en las presiones de aire y de gas medidas en los quemadores de esta zona, producidas por la reducción del caudal de aire de combustión, y por la reducción en el consumo de gas natural. En la zona de alta temperatura, las presiones de aire y de gas en los quemadores no se han visto afectadas por la maniobra realizada en la zona de calentamiento.

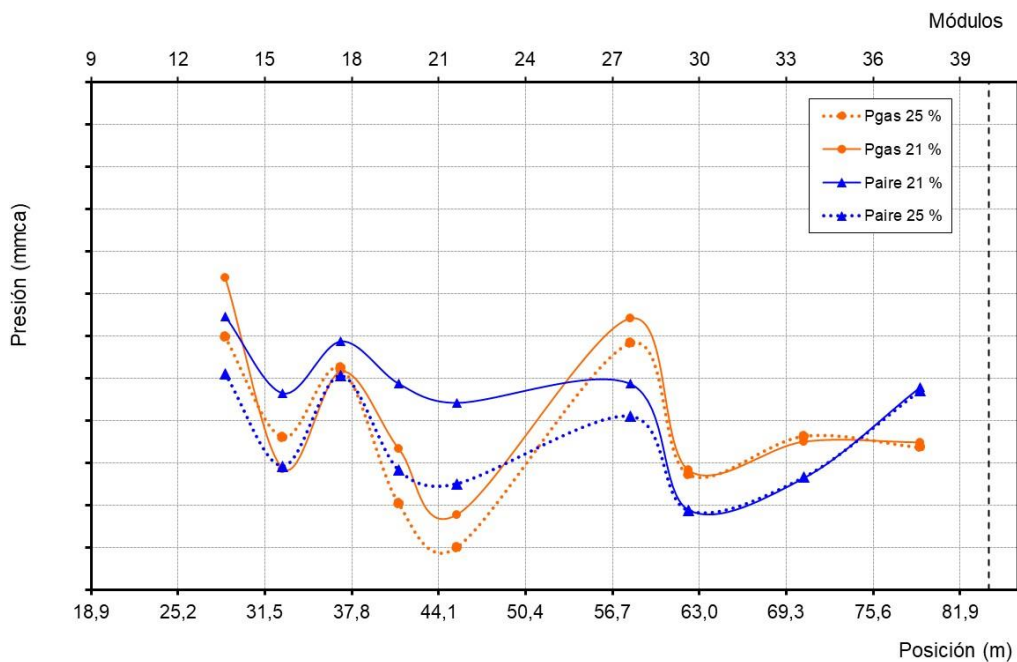


Figura 20. Comparativa de la presión de aire y gas en los quemadores de la cámara superior del horno. Situación inicial y tras la maniobra en la zona de calentamiento.

Tras la realización de las maniobras, no se observaron problemas de calidad en las piezas. Es de esperar que al reducirse las presiones de gas y de aire en los quemadores, la llama sea más corta y se modifique la distribución del calor en la zona afectada, lo que podría ocasionar gradientes transversales de temperatura. Al estar realizando las maniobras en la zona de calentamiento, siendo el producto gres porcelánico, podrían aparecer problemas de corazón negro en el caso de ser piezas de mayor grosor, o tener mayor densidad aparente.

En el horno estudiado, y en las condiciones en las que se realizaron las maniobras en la zona de alta temperatura, no se observó la aparición de defectos en las piezas. No obstante, sería interesante determinar experimentalmente los gradientes transversales de temperatura con diferentes reducciones del caudal de aire de combustión (enriquecido hasta el 25 % de oxígeno) para analizar su influencia real en la distribución de temperatura en el interior del horno.

### 5.2.3. Análisis económico

La maniobra realizada, consistente en la inyección de oxígeno hasta un 25 % en el aire de combustión en el circuito de la zona de calentamiento, seguida de una reducción en el caudal de aire de combustión y una disminución del caudal de gases en la chimenea, para mantener la presión estática en el horno en los valores habituales, ha propiciado un ahorro de gas natural en los anillos de quemadores afectados por la maniobra, estimado en unos 20 Nm<sup>3</sup>/h gas natural.

En la Figura 21 se muestra cuál sería el ahorro económico alcanzado, considerando el ahorro de gas natural y las emisiones de CO<sub>2</sub>, y el coste incurrido por el consumo de oxígeno.

El análisis se ha hecho considerando:

- Tres valores para el coste del oxígeno: 100 / 90 / 80 €/t O<sub>2</sub>
- Cuatro valores para el coste del gas natural: 40 / 50 / 60 / 70 €/MWh
- Un valor del coste de los derechos de emisión constante: 80 €/t CO<sub>2</sub>

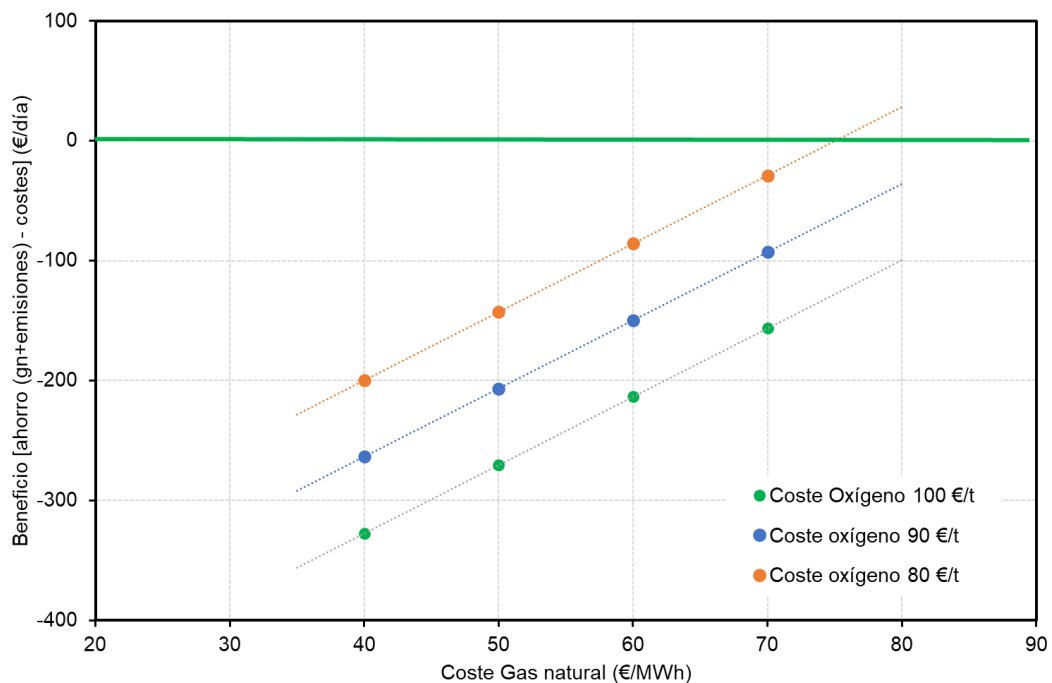


Figura 21. Representación gráfica del análisis económico realizado tras las maniobras en la zona de calentamiento.

Los resultados obtenidos en la zona de calentamiento muestran que, en la situación actual (costes de oxígeno 100 €/t y de gas natural 40 €/MWh), los costes superan ampliamente los beneficios económicos (en 410 €/día), incluso considerando los costes de las emisiones (327 €/día).

Únicamente en un escenario de bajos costes de oxígeno, y elevado coste del gas natural y de los derechos de emisión, el balance económico saldría favorable, en este caso.

## 6. Conclusiones

Del trabajo realizado en el marco de este proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

La inyección de oxígeno en el aire de combustión, hasta un enriquecimiento del 25 %, seguida de una reducción en el caudal de aire de combustión, tiene como consecuencia un ahorro de gas natural, tanto en la zona de calentamiento como en la zona de alta temperatura. En el horno estudiado y en las condiciones en las que se han realizado las maniobras descritas en el presente informe, el ahorro alcanzado ha sido superior al 4 %, en ambos casos.

La reducción del caudal de aire de combustión tiene influencia en la presión estática del horno, ya que, al introducirse menos gases, la presión disminuye. Tras la inyección de oxígeno y la reducción del caudal de aire, es importante revisar que el perfil de presión estática en el horno se mantiene en los valores adecuados, y que la circulación de gases por el interior del horno es la correcta.

En este trabajo se ha alcanzado un ahorro de gas natural superior al 4 %, realizando el enriquecimiento con oxígeno en una u otra zona del horno. Queda pendiente conocer cuál sería el ahorro total de gas natural al incrementar el contenido en oxígeno en el aire de combustión de todo el horno, y reducir el caudal de aire en todos los anillos de quemadores. Las pruebas realizadas, descritas en este informe, no permiten asegurar que el ahorro total sea la suma de los ahorros obtenidos por separado en cada zona, ya que se ha comprobado que al circular los gases longitudinalmente por el interior del horno, desde la zona de alta temperatura hacia la de calentamiento, las acciones realizadas en la zona de máxima temperatura tienen influencia en las zonas previas, de calentamiento.

El enriquecimiento de oxígeno en el aire de combustión, seguido de una reducción en el caudal de aire, se ha observado que conduce a una mayor emisión de compuestos de nitrógeno (NOx). No obstante, este incremento no supera en ningún momento el Valor Límite de Emisión para estos compuestos.

En las condiciones en las que se han realizado las maniobras en este trabajo, se ha observado un ligero aumento de las emisiones de compuestos ácidos, y no se ha observado un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de chimenea. No obstante, hay que tener en cuenta que las emisiones de CO<sub>2</sub> en valor absoluto sí se reducen, por el menor consumo de gas natural.

El análisis económico realizado muestra que, con los precios considerados de oxígeno (100 €/t), de gas natural (40 €/MWh) y de las emisiones de CO<sub>2</sub> (80 €/t), en la zona de alta temperatura, el ahorro alcanzado compensa el coste del oxígeno necesario, alcanzándose un beneficio de 0,013 €/m<sup>2</sup>, lo que considerando 330 días productivos al año, asciende a 38600 €/año.

En la zona de calentamiento, sin embargo, el ahorro de gas natural conseguido no logra compensar el mayor consumo de oxígeno necesario para enriquecer el aire de combustión de toda esta zona, ni siquiera considerando el coste de las emisiones.

No obstante, hay que considerar que el coste del oxígeno está relacionado con el volumen de consumo, de modo que un mayor consumo de oxígeno en la instalación redundaría en una bajada su precio. Y en el caso de que la empresa se generase el oxígeno, su coste sería aún menor. Además, es previsible a futuro un escenario de alza de precios del gas natural y de los derechos de emisión, por lo que la rentabilidad de la inyección de oxígeno en el aire de combustión se vería favorecida.

Si se considera que los resultados obtenidos en las dos zonas del horno son aditivos (4,7 % + 4,1 % de ahorro de gas natural) , el balance económico realizado muestra que con un coste del oxígeno

de 90 €/t, un coste del gas natural de 60 €/MWh, y un precio de los derechos de emisión de 80 €/t CO<sub>2</sub>, se obtiene un resultado positivo, cifrado en unos 120 €/día (unos 39600 €/año), valor que aumenta al incrementarse el coste del gas natural y de los derechos de emisión.

## 7. Recomendaciones

El enriquecimiento con oxígeno del aire de combustión ha permitido la reducción del caudal de comburente en el horno, sin que por ello se viese afectado el funcionamiento del horno ni la calidad del producto final durante la realización de las pruebas descritas.

No obstante, la reducción del caudal de aire de combustión puede conllevar modificaciones en la distribución del calor dentro del horno, y un aumento de las emisiones de compuestos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Al reducir el caudal de aire se reduce la longitud de la llama en los quemadores. Esta maniobra debe realizarse paulatinamente para asegurar una correcta distribución del calor en cada sección y un contenido en oxígeno adecuado dentro del horno.

Una inadecuada distribución del calor en el horno podría derivar en defectos de corazón negro, problemas de estabilidad dimensional y/o en la aparición de tonos en el producto final, ocasionados por la existencia de gradientes transversales de temperatura. Se recomienda, al realizar esta maniobra, determinar la temperatura en el horno en diversas secciones transversales para observar la influencia de la reducción del caudal de aire en la homogeneidad transversal de temperatura en el horno. En el caso de observarse diferencias de temperatura, se podría actuar sobre el sistema de combustión mediante la modificación del diseño de los quemadores o de las toberas, de modo que se facilitase una buena distribución del calor en el centro del horno, sin tener que necesariamente trabajar con mayores caudales de aire de combustión.

Las maniobras realizadas en el marco del presente trabajo no han implicado, en ningún caso, modificaciones en la regulación de los quemadores del horno. No obstante, sería recomendable que tras la inyección de oxígeno y la reducción del caudal de aire general en el horno, se revisara de manera individualizada la regulación de cada anillo de quemadores, para realizar un ajuste final de caudal de aire, adaptado a los requerimientos particulares de cada zona del horno. De este modo se podrían alcanzar mayores ahorros de gas que los cuantificados hasta la fecha con el ajuste de caudal general realizado.

El presente informe nº C232665 expedido a petición de la firma ASCER-Asociación española de fabricantes de azulejos y pavimentos cerámicos, consta de una portada y 26 páginas.

Castellón, 24 de Noviembre de 2023



**Dra. Ana Mezquita Martí**  
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.