



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR INDUSTRIAL ESPAÑOL. CASO DE APLICACIÓN A LA INDUSTRIAL DE LA CERÁMICA

Autor: Lucas Sáenz de Miera Navarrete

Director: Pedro Linares Llamas

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Descarbonización en el sector industrial español. Caso de aplicación a la industria de la
cerámica

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Lucas Sáenz de Miera Navarrete

Fecha: 15 / 07 / 2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pedro Linares Llamas

Fecha: 15 / 07 / 2025

DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR INDUSTRIAL ESPAÑOL. CASO DE APLICACIÓN A LA INDUSTRIAL DE LA CERÁMICA

Autor: Sáenz de Miera Navarrete, Lucas.

Director: Linares Llamas, Pedro.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda la descarbonización de la industria cerámica en España, una de las más intensivas en consumo energético y emisiones de CO₂. La motivación principal del estudio radica en el papel crítico que este sector juega dentro del contexto económico nacional y su contribución significativa a las emisiones industriales, lo que lo convierte en un objetivo prioritario en los planes de transición energética hacia una economía baja en carbono.

La industria cerámica española, especialmente concentrada en la provincia de Castellón, consume más del 12 TWh anuales de gas natural y emite aproximadamente 2,2 millones de toneladas de CO₂. A pesar de avances tecnológicos y mejoras en eficiencia, la dependencia del gas natural sigue siendo abrumadora.

Este trabajo ofrece un análisis tecno-económico detallado de las alternativas disponibles para reducir la huella de carbono del sector, aportando información clave para la toma de decisiones estratégicas.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica y económica de las principales tecnologías de descarbonización aplicables a la industria cerámica española. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y caracterizar los procesos con mayor impacto energético y ambiental en la producción de baldosas cerámicas y fritas.
- Evaluar técnicamente las tecnologías disponibles para reducir emisiones: biometano, hidrógeno verde y electrificación
- Desarrollar un análisis económico comparativo de dichas opciones mediante el cálculo del coste nivelado de producción.
- Proyectar la competitividad futura de cada tecnología bajo distintos escenarios temporales y de precios de la energía y el CO₂.

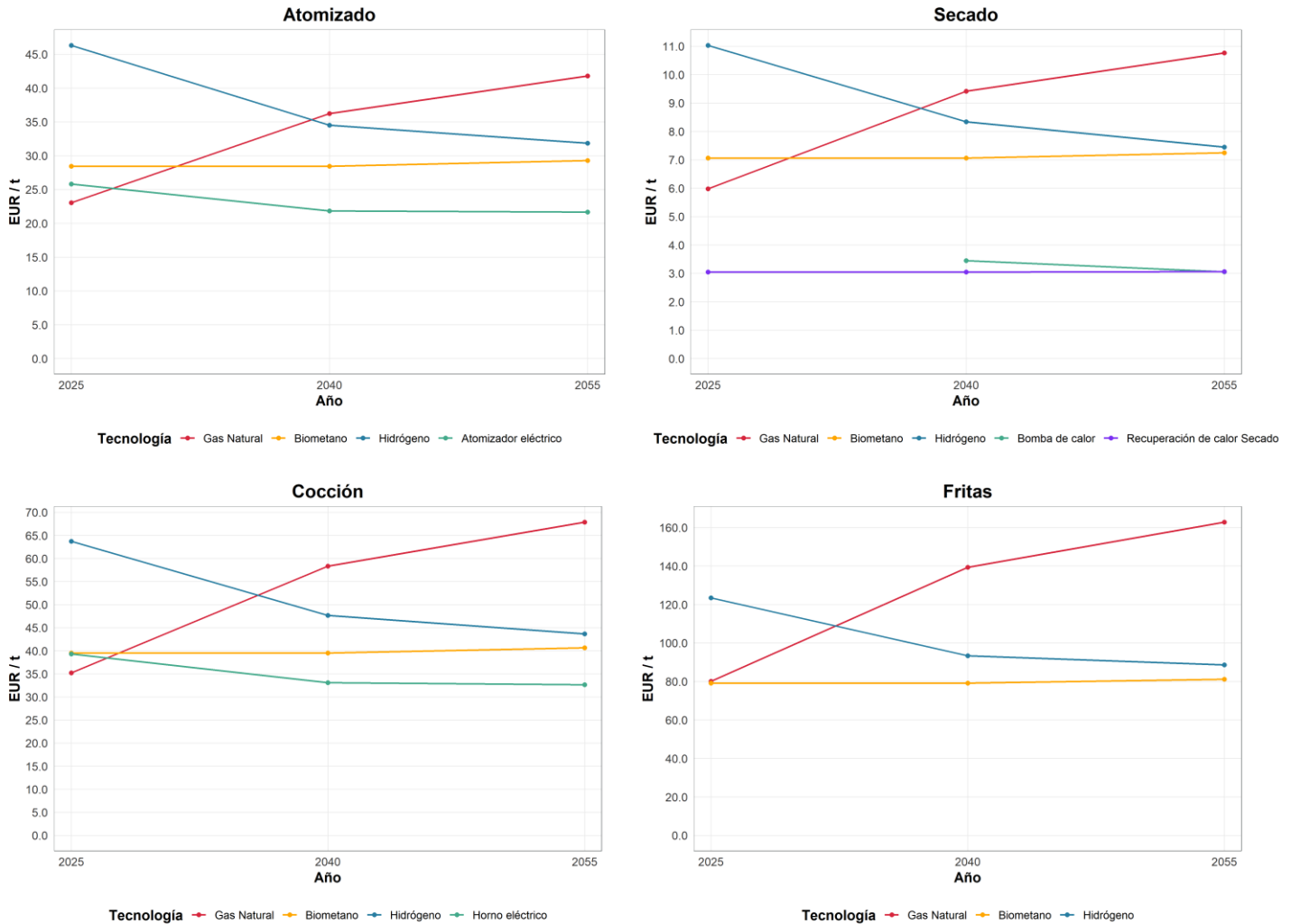
Metodología

El enfoque metodológico combina un análisis técnico de los procesos de fabricación más relevantes —atomización, secado, cocción y fusión de fritas— con un modelado económico basado en el coste nivelado de la producción. Se realiza una recopilación exhaustiva de datos técnicos y económicos, tanto de fuentes públicas como de información facilitada por asociaciones sectoriales (como ASCER y ANFFECC).

Para cada tecnología analizada (biometano, hidrógeno verde o electrificación), se determinan sus consumos energéticos, costes de inversión (CAPEX), costes operativos (OPEX) y sensibilidad frente a las principales variables de mercado. El estudio contempla tres horizontes temporales: inversión en 2025, 2040 y 2055.

Resultados

Ruta de descarbonización



Los resultados muestran una pérdida progresiva de competitividad del gas natural, principalmente por el aumento previsto en el coste de las emisiones de CO₂. A lo largo del periodo analizado (2025-2055), la electrificación emerge como la opción más competitiva en atomizado, secado y cocción, gracias a su estabilidad de costes y a una evolución tecnológica favorable. En cambio, en la etapa de fritas —para la que actualmente no existe una alternativa eléctrica viable— el biometano se posiciona como la mejor opción a corto y

medio plazo, aunque su potencial está condicionado por una capacidad limitada de suministro en el futuro.

El análisis de sensibilidad realizado demuestra que aproximadamente el 90 % del coste total de cada alternativa está determinado por dos factores clave: el consumo energético de los equipos y el precio de la energía. Ambos presentan una elevada incertidumbre, por lo que variaciones del ± 25 % en cualquiera de ellos pueden modificar completamente el orden de competitividad entre las tecnologías. En cambio, el impacto del CAPEX (inversión inicial) resulta limitado en todas las etapas, confirmando que no es un factor decisivo en la toma de decisiones.

Por etapas, el secado se presenta como aquella en la que las conclusiones son más claras, con tecnologías como la recuperación de calor y las bombas de calor que combinan bajo coste y baja sensibilidad. En la cocción y el atomizado, que concentran la mayor parte del consumo energético, la electrificación se muestra como la opción más competitiva, si bien muestran una mayor sensibilidad y requieren datos más precisos sobre rendimientos reales y evolución de precios. En fritas, en la que no existe una electrificación posible hoy en día, el biometano destaca por su estabilidad, lo que apunta hacia una posible convergencia futura entre ambas tecnologías.

Conclusiones

La industria cerámica, especialmente concentrada en la provincia de Castellón, es uno de los sectores industriales con mayor peso económico y climático de España. Concentra más de la mitad del consumo de gas industrial de la Comunidad Valenciana, genera cerca del 5 % de las emisiones industriales del país y da empleo a más de 90.000 personas. Su descarbonización es, por tanto, una necesidad urgente y una oportunidad estratégica para transformar el modelo productivo.

Este estudio demuestra que dicha descarbonización es técnicamente viable y, bajo ciertas condiciones, económicamente competitiva. La electrificación se posiciona como la opción

más eficiente y estable en la mayoría de las etapas del proceso, mientras que el biometano ofrece una solución alternativa en aquellos casos donde la electrificación no es aún aplicable. Por otra parte, el hidrógeno, si bien muestra perspectivas de reducción de costes en el largo plazo, sigue siendo más costoso que la electrificación en todos los escenarios analizados.

El análisis evidencia que el coste de la energía —en función del consumo de los equipos y del precio de mercado— determina hasta el 90 % del coste total de las alternativas. La elevada sensibilidad a estos factores subraya la importancia de invertir en eficiencia energética y tomar decisiones robustas frente a la incertidumbre. En cambio, el CAPEX tiene un impacto limitado y no condiciona la viabilidad de las opciones analizadas.

La electrificación generalizada, en caso de ser la opción elegida, implicaría un aumento sustancial de la demanda eléctrica del sector, lo que hace imprescindible planificar de forma urgente la modernización de la red eléctrica en Castellón. Sin una red adecuada, la electrificación no será viable, por muy favorable que resulte sobre el papel. Esta planificación, además, debe anticiparse con suficiente margen, ya que mientras un horno eléctrico puede estar operativo en uno o dos años, las infraestructuras de red necesarias para abastecerlo pueden tardar entre cinco y diez años en desarrollarse.

En definitiva, descarbonizar la industria cerámica no es solo una obligación ambiental, sino una oportunidad para reforzar la competitividad, modernizar la industria y liderar la transición hacia un modelo sostenible. Las decisiones que se tomen hoy serán determinantes para el futuro del sector.

DECARBONIZATION OF THE SPANISH INDUSTRIAL SECTOR. CASE STUDY: THE CERAMIC INDUSTRY

Author: Sáenz de Miera Navarrete, Lucas

Supervisor: Linares Llamas, Pedro

Partner Institution: ICAI – Comillas Pontifical University

PROJECT SUMMARY

Introduction

This Bachelor's Thesis addresses the decarbonization of the ceramic industry in Spain, one of the most energy-intensive and CO₂-emitting sectors. The main motivation behind the study lies in the critical role this industry plays within the national economy and its significant contribution to industrial emissions, making it a key target in the energy transition towards a low-carbon economy.

The Spanish ceramic industry, primarily concentrated in the province of Castellón, consumes over 12 TWh of natural gas per year and emits approximately 2.2 million tons of CO₂. Despite technological advancements and efficiency improvements, the sector remains heavily dependent on natural gas.

This work provides a detailed techno-economic analysis of the available alternatives to reduce the sector's carbon footprint, offering key insights to support strategic decision-making.

Objectives

The general objective of this work is to assess the technical and economic feasibility of the main decarbonization technologies applicable to the Spanish ceramic industry. To achieve this, the following specific objectives are set:

- Identify and characterize the processes with the greatest energy and environmental impact in the production of ceramic tiles and frits.

- Technically assess the available technologies to reduce emissions: biomethane, green hydrogen, and electrification.
- Develop a comparative economic analysis of these options through the calculation of the levelized cost of production.
- Project the future competitiveness of each technology under different timeframes and scenarios for energy and CO₂ prices.

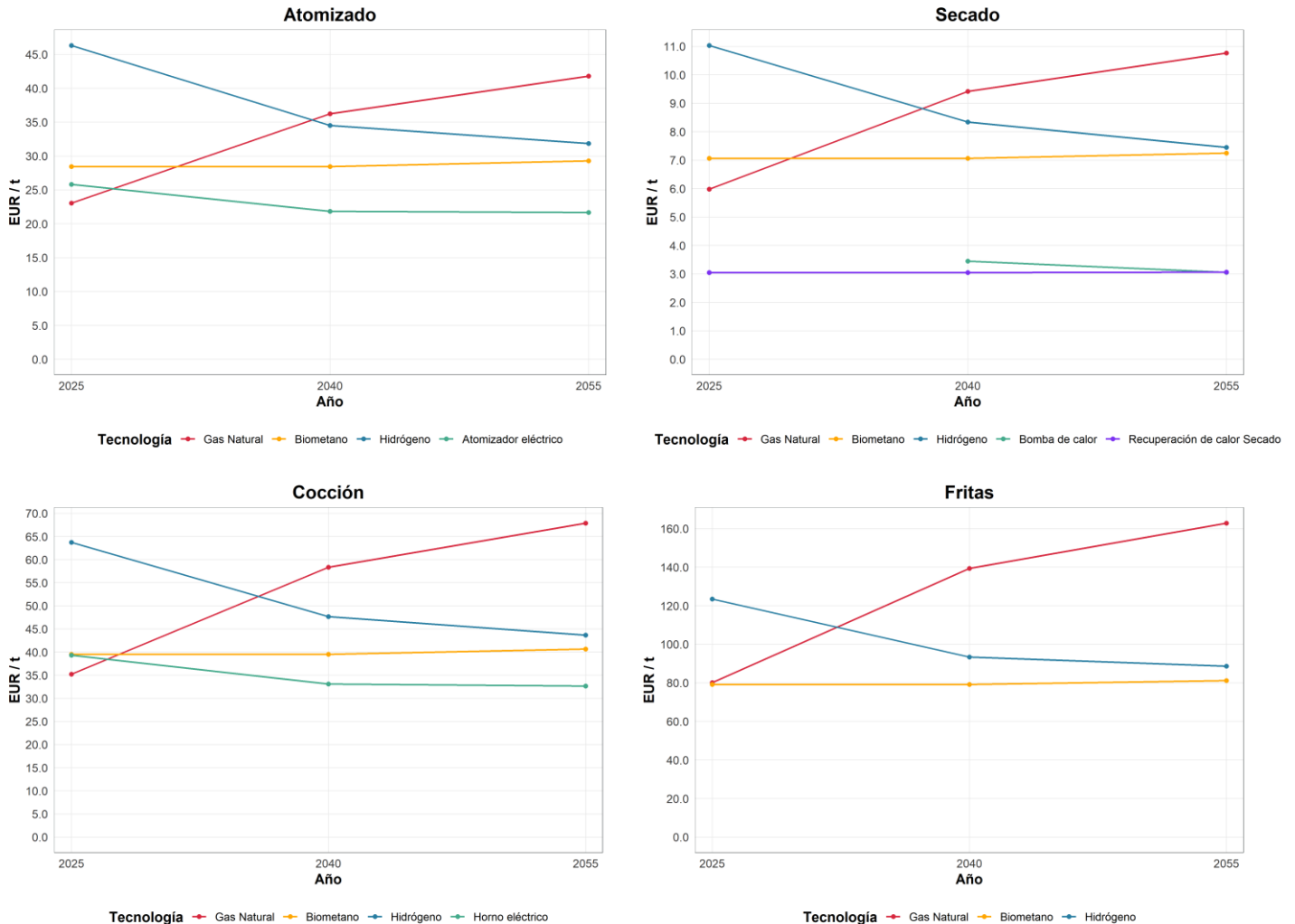
Methodology

The methodological approach combines a technical analysis of the most relevant manufacturing processes — atomization, drying, firing, and frit melting — with an economic model based on the levelized cost of production. An exhaustive collection of technical and economic data is conducted, using both public sources and information provided by industry associations (such as ASCER and ANFFECC).

For each technology analyzed (biomethane, green hydrogen, or electrification), energy consumption, investment costs (CAPEX), operating costs (OPEX), and sensitivity to key market variables are determined. The study considers three time horizons: investment in 2025, 2040, and 2055.

Results

Ruta de descarbonización



The results show a progressive loss of competitiveness for natural gas, primarily due to the expected increase in CO₂ emission costs. Throughout the period analyzed (2025–2055), electrification emerges as the most competitive option for atomization, drying, and firing, thanks to its cost stability and favorable technological development. However, in the frit stage — for which no viable electric alternative currently exists — biomethane is positioned as the best short- and medium-term solution, although its potential is limited by future supply constraints.

The sensitivity analysis reveals that approximately 90% of the total cost of each alternative is determined by two key factors: equipment energy consumption and energy prices. Both are highly uncertain, and a $\pm 25\%$ variation in either can completely change the competitiveness ranking of the technologies. By contrast, the impact of CAPEX (initial investment) is limited across all stages, confirming it is not a decisive factor in decision-making.

By production stage, drying offers the clearest conclusions, with technologies such as heat recovery and heat pumps combining low cost and low sensitivity. In firing and atomization — the most energy-intensive processes — electrification stands out as the most competitive option, though it shows greater sensitivity and requires more precise data on real-world performance and price evolution. In frit production, where electrification is not yet viable, biomethane stands out for its stability, suggesting a possible future convergence between the two technologies.

Conclusions

The ceramic industry, heavily concentrated in Castellón, is one of Spain's most economically and environmentally significant industrial sectors. It accounts for more than half of the industrial gas consumption in the Valencian Community, generates nearly 5% of the country's industrial emissions, and employs over 90,000 people directly and indirectly. Its decarbonization is therefore both an urgent necessity and a strategic opportunity to transform the production model.

This study demonstrates that such decarbonization is technically feasible and, under certain conditions, economically competitive. Electrification stands out as the most efficient and stable option across most stages of the process, while biomethane offers an alternative in areas where electrification is not yet applicable. Hydrogen, although promising in terms of long-term cost reductions, it remains more expensive than electrification in all scenarios analyzed.

The analysis shows that energy costs — depending on equipment consumption and market prices — determine up to 90% of the total cost of the alternatives. The high sensitivity to

these factors underscores the importance of investing in energy efficiency and making robust decisions in the face of uncertainty. In contrast, CAPEX has a limited impact and does not determine the viability of the options studied.

Widespread electrification, if chosen, would entail a substantial increase in the sector's electricity demand, making it essential to urgently plan the modernization of the electricity grid in Castellón. Without adequate grid infrastructure, electrification will not be viable, no matter how favorable it looks on paper. Moreover, this plan must begin well in advance, since while an electric kiln can be operational within one or two years, the necessary grid infrastructure may take five to ten years to develop.

In short, decarbonizing the ceramic industry is not only an environmental obligation but also an opportunity to enhance competitiveness, modernize the industry, and lead the transition toward a sustainable model. The decisions made today will be decisive for the future of the sector.

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	13
<i>Índice de figuras</i>	15
<i>Índice de tablas</i>	17
Capítulo 1. Introducción	18
Capítulo 2. Situación actual	21
2.1 Azulejos y pavimentos cerámicos	22
2.1.1 Producción y exportación.....	22
2.1.2 Consumo energético e impacto CO ₂	25
2.1.3 Impacto socioeconómico (PIB y empleo)	31
2.2 Fritas, esmaltes y colores cerámicos	32
Capítulo 3. Procesos de fabricación	36
3.1 Proceso de fabricación de las baldosas cerámicas.....	36
3.1.1 Preparación y composición de materia primas.....	37
3.1.2 Conformado de la pieza.....	38
3.1.3 Esmaltado y decoración	38
3.1.4 Cocción.....	39
3.1.5 Tratamientos adicionales	39
3.1.6 Clasificación y embalaje	39
3.2 Proceso de fabricación de las fritas y esmaltes cerámicos	39
3.2.1 Fritas	40
3.2.2 Esmaltes.....	41
Capítulo 4. Procesos energéticos	42
4.1 Atomización	44
4.2 Secado	47
4.2.1 Secaderos verticales	48

4.2.2 Secaderos horizontales.....	49
4.3 Cocción.....	51
4.4 Fritas.....	60
4.5 Resumen de consumos y emisiones	61
Capítulo 5. Análisis técnico de las opciones de descarbonización	64
5.1 Análisis técnico	64
5.1.1 Mejora de eficiencia y recuperación de calor.....	64
5.1.2 Biometano como combustible alternativo	67
5.1.3 H ₂ Verde como combustible alternativo.....	68
5.1.4 Electrificación	74
5.1.5 Resumen.....	94
Capítulo 6. Análisis económico de las opciones de descarbonización	100
6.1.1 CN: El método y los datos.....	101
6.1.2 Datos	102
6.1.3 Resultados	118
Capítulo 7. Conclusiones.....	135
Capítulo 8. Bibliografía.....	139

Índice de figuras

Figura 1: Cifra de negocios y empleo clúster cerámico 2023	21
Figura 2: El sector de las baldosas cerámicas en cifras	22
Figura 3: Evolución de las emisiones sectoriales desde 1980 hasta la actualidad	28
Figura 4: Asignaciones gratuitas Industria cerámica en España	30
Figura 5: Emisiones CO ₂ de la industria cerámica en España	31
Figura 6: Evolución emisiones específicas de CO ₂ del sector de fritas	34
Figura 7: Proceso general de fabricación de cerámicas	36
Figura 8: Proceso de fabricación de las baldosas cerámicas	37
Figura 9: Distribución de porcentajes de consumos energéticos en el sector español de baldosas cerámicas (Elaboración propia)	42
Figura 10: Diagrama para la fabricación de baldosas (E Monfort, 2011)	44
Figura 11: Atomizador Industrial (Anon., n.d.)	45
Figura 12: Funcionamiento de un atomizador (Salvador Ferrer Castán, 2022)	46
Figura 13: Diagrama de Sankey atomizador	47
Figura 14: Esquema de la circulación de gases y piezas en un secadero vertical (SACMI)	49
Figura 15: Secador horizontal de varios planos	50
Figura 16: Diagrama de Sankey de un secadero de baldosas	51
Figura 17: Curva de cocción de un ciclo típico	53
Figura 18: Esquema de un horno monoestrato de rodillos	55
Figura 19: Balance de energía térmica a un horno. Intervalos de valores habituales en cada corriente (Salvador Ferrer Castán, 2022)	56
Figura 20: Interpretación de la curva de capacidad calorífica del gres porcelánico en función de la temperatura	58
Figura 21: Horno de fusión de frita cerámica (INGENEO, 2025)	61
Figura 22: Intercambiador de calor polimérico	66
Figura 23: HPHE utilizado en el proyecto DREAM	66

Figura 24: Diferentes configuraciones de un atomizador híbrido	75
Figura 25: Esquema funcionamiento bomba de calor	80
Figura 26: Integración de una bomba de calor en un secadero	82
Figura 27: Ejemplo de secado por infrarrojos	85
Figura 28: Secadero horizontal electrificado	87
Figura 29: Horno eléctrico de laboratorio de SACMI	89
Figura 30: medioambientales en la etapa de fusión del proceso de fabricación del vidrio (Anon., 2013).....	92
Figura 31: Proyección del precio del gas natural hasta 2070	112
Figura 32:Proyección del precio del biometano hasta 2070.....	114
Figura 33:Proyección del precio del hidrógeno verde hasta 2070.....	115
Figura 34:Proyección del coste final de la electricidad (AFRY).....	116
Figura 35: Proyección del precio de la electricidad hasta 2070	117
Figura 36: Proyección del precio de las emisiones de CO2 hasta 2070	118
Figura 37:Resultados del coste nivelado para cada tecnología en las distintas etapas del proceso de fabricación, considerando escenarios de inversión en los años 2025, 2040 y 2055.	119
Figura 38: Distribución y variabilidad de los componentes del coste nivelado. Peso y volatilidad de cada componente en el coste total, permitiendo identificar cuáles influyen más y requieren un análisis de sensibilidad más detallado.	124
Figura 39: Coste nivelado de cada tecnología en función del consumo específico de los equipos.....	126
Figura 40: Coste nivelado de cada tecnología en función del precio de mercado del gas natural, biometano, hidrógeno, y electricidad	127
Figura 41: Impacto del CAPEX en el coste nivelado total.....	133

Índice de tablas

Tabla 1: Ranking mundial producción baldosas cerámicas.....	24
Tabla 2: Ranking mundial exportación baldosas cerámicas.....	25
Tabla 3: Consumo sectorial total de gas natural y electricidad en los últimos 5 años. Fuente: ASCER, 2024	26
Tabla 4: Datos importantes sobre consumo de energía en 2023	27
Tabla 5: Producción y emisiones de las fritas en España	34
Tabla 6: Gases de salida del atomizador (Salvador Ferrer Castán, 2022).....	46
Tabla 7: Sistema de aporte de energía de un secadero vertical	49
Tabla 8: Sistema de aporte de energía de un secadero horizontal	50
Tabla 9: principales detalles de cada proceso de cada producto final	52
Tabla 10: Datos de un horno de tamaño medio	57
Tabla 11: Calor de reacción total necesario para cada tipo de composición cerámica	59
Tabla 12: Consumos y emisiones del sector.....	62
Tabla 13: Principales características del gas natural y del hidrógeno	70
Tabla 14: Ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible.....	72
Tabla 15: Principales características de cada configuración	76
Tabla 16: Características del granulado por ambas vías (García-Ten, 2012).....	78
Tabla 17: Comparativa de consumos entre los procesos vía seca y vía húmeda.....	78
Tabla 18: Consumos energéticos de distintas opciones de descarbonización del proceso de secado	85
Tabla 19: Descripción del secadero horizontal. Fuente: SACMI.....	87
Tabla 20: Características básicas del horno eléctrico fabricado por Systemfoc.....	90
Tabla 21: CAPEX de los atomizadores	103
Tabla 22: CAPEX de los secadores	104
Tabla 23: CAPEX de los hornos.....	105

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, conocido como los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones meteorológicos, desde el siglo XIX ha aumentado considerablemente y está causado principalmente por la acción humana, fundamentalmente debido a la combustión de combustibles fósiles, los más importantes el carbón, el petróleo y el gas. El efecto de la combustión de estos combustibles es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), que se quedan atrapados dentro de la atmósfera de la Tierra e inducen un aumento de la temperatura global del planeta.

Desde hace muchos años, el cambio climático se ha definido como un problema global, y se ha intentado combatir de distintas maneras. Uno de los principales y más importantes acuerdos es el Protocolo de Kioto de 1995, donde la comunidad internacional intentó unir a todos los países para combatir la acción climática. Hoy en día, 192 países forman parte de este acuerdo. Más adelante, se firmó un acuerdo histórico: el Acuerdo de París de 2015, donde por primera vez en la historia se consiguió agrupar a todas las naciones del mundo para realizar ambiciosos esfuerzos con el fin de mantener la temperatura global del planeta por debajo de los 2 °C, y si fuese posible por debajo de 1,5 °C.

Ante esto, la principal acción para combatir el cambio climático en los últimos años ha sido la implementación de las energías renovables para sustituir la generación de electricidad mediante la combustión de combustibles fósiles. Hoy en día, las energías renovables no solo son mejores para el medio ambiente, sino que muchas de ellas son más competitivas que los métodos tradicionales. Según Red Eléctrica Española, en 2023 España acabó el año con una potencia instalada de 125,6 GW, de la cual el 61,3 % son renovables, y se espera que esta cifra siga aumentando con los años.

Estando ya definido y en marcha el camino de la generación eléctrica renovable, el siguiente desafío es abordar la demanda térmica de la sociedad, que representa un 50 % de la demanda

energética de la UE y un 41 % de la de España. Esta demanda térmica en Europa se divide principalmente entre la calefacción y el agua caliente sanitaria (más del 60 %) y los procesos térmicos industriales (algo más del 30 %). En España, dentro del 41 % de demanda energética, el 50 % corresponde a calor en el sector industrial.

Hoy en día, la mayor parte de la energía térmica se obtiene mediante la combustión de combustibles fósiles, lo que provoca que la industria europea emita unas 600 Mt de CO₂ al año, representando aproximadamente el 25 % de las emisiones totales de Europa.

Ante esta situación, surge la necesidad de descarbonizar estos procesos industriales para cumplir con los objetivos establecidos en los distintos acuerdos climáticos. Esta descarbonización, directamente alineada con la Acción por el Clima (ODS 13), no es sencilla y requiere la colaboración de múltiples actores para avanzar con rapidez y eficacia. El principal reto es que cada industria demanda temperaturas y tecnologías distintas, por lo que la descarbonización debe abordarse de forma sectorial y específica (ODS 9: Industria, innovación e infraestructura). Por ejemplo, la industria del acero necesita temperaturas de hasta 1700 °C, mientras que la del papel no supera los 200 °C.

Como es de esperar, las industrias más contaminantes son aquellas que requieren altas temperaturas para sus procesos y son más difíciles de descarbonizar. Entre ellas destacan la industria del acero, la cerámica, el cemento, la química y el aluminio.

España es una de las principales potencias en la industria cerámica, especialmente en el sector de azulejos y pavimentos cerámicos (el más relevante), que representa alrededor del 5 % de las emisiones industriales de todo el país. En 2023, España cerró el año con una producción total de 394 millones de m² y una facturación total de 4.864 millones de euros. De esta cifra, el 73 % provino de exportaciones, lo que convierte a España en el octavo productor mundial y el tercer exportador mundial en 2023, y el primero en Europa en ambas categorías.

Ligada a este sector se encuentra la fabricación de fritas y esmaltes, con 30 empresas ubicadas en la Comunidad Valenciana, una facturación de 1.300 millones de euros y un volumen de exportación de 441 millones de euros.

Dada esta situación, surge la necesidad de contribuir activamente a la descarbonización de este sector. Además del evidente beneficio climático, esta transformación puede mejorar la calidad del aire y la salud pública (ODS 3: Salud y bienestar), al reducir las emisiones contaminantes que afectan directamente a las zonas industriales.

La escasez de estudios sobre nuevas tecnologías y metodologías motiva la realización de análisis tanto técnicos como económicos para evaluar las opciones y necesidades reales de descarbonización en este sector. Aunque ya existen artículos que abordan la situación actual del sector cerámico y sus tecnologías, este trabajo busca profundizar en las tecnologías emergentes y en su viabilidad técnico-económica para los próximos años.

Capítulo 2. SITUACIÓN ACTUAL

El clúster cerámico en España está compuesto principalmente por unas 150 empresas agrupadas en tres asociaciones: **ASCER** (Asociación Española De Fabricantes De Azulejos Y Pavimentos Cerámicos), **ANFFECC** (Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores Cerámicos) y **ASEBEC** (Asociación Española de Fabricantes de Maquinaria y Bienes de Equipo para la Industria Cerámica). En los apartados siguientes se expondrá con detalle la situación actual de cada una de las agrupaciones, pero hay ciertos datos que valen la pena destacar del clúster al completo.

Lo primero hay que destacar que la actividad de la industria cerámica en España se lleva a cabo casi al 100% en la provincia de Castellón en la Comunidad Valenciana, donde se encuentran la gran mayoría de las empresas. En 2023 la cifra total de negocios del clúster cerámico fue de 6.667 M€, lo que representa el 28% de la cifra de negocios industriales en Castellón, un 7% de la de la Comunidad Valenciana. El número de empleos directos generados fue de 20.432, un 46% de todos los trabajadores de la industria en Castellón, y un 7% del empleo industrial de la Comunidad Valenciana.

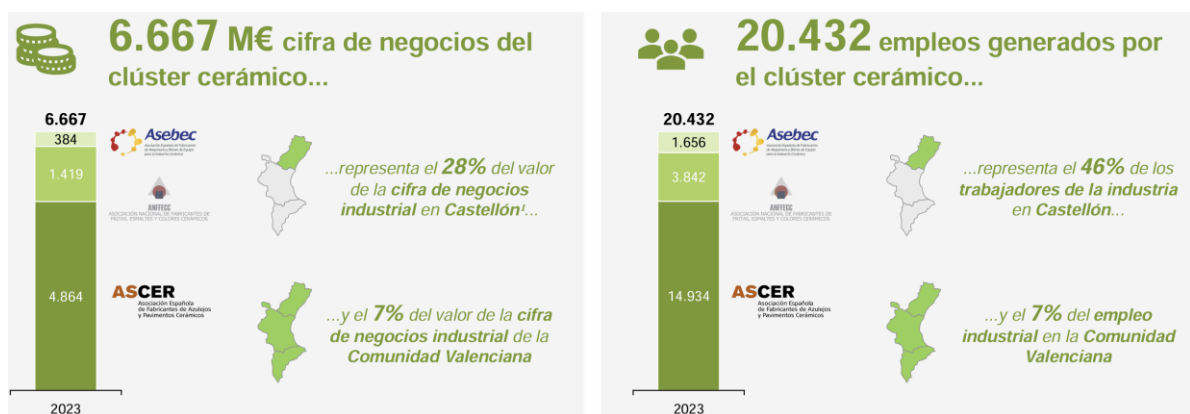


Figura 1: Cifra de negocios y empleo clúster cerámico 2023

Fuente: El sector de los azulejos y pavimentos cerámicos en 2023: impacto socioeconómico y relevancia para la provincia de Castellón (ASCER) (Anon., 2024)

2.1 AZULEJOS Y PAVIMENTOS CERÁMICOS

Como se ha mencionado previamente, el sector de los azulejos y pavimentos cerámicos en España es uno de los más importantes en toda la industria de la cerámica, y a nivel mundial se posiciona como líder en cuanto a desarrollo tecnológico, diseño y calidad de servicio. Este sector tiene un gran impacto en la economía del país y en sus cuestiones sociales.

2.1.1 PRODUCCIÓN Y EXPORTACIÓN

En 2023, España fabricó 394 millones m² de azulejos y pavimentos cerámicos, alcanzando una facturación total de 4.864 M€. De esa cifra, 3.564 M€ procedieron de exportaciones y 1.300 M€ del mercado interno. Las ventas al exterior llegaron a 189 países, lo que consolida a España como primer productor y exportador europeo.

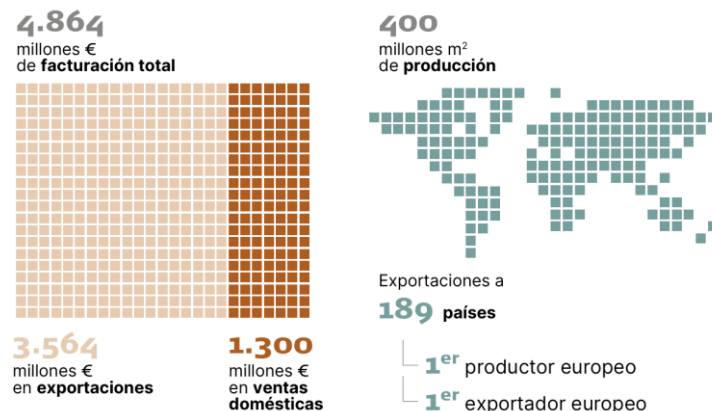


Figura 2: El sector de las baldosas cerámicas en cifras

Fuente: Resumen Ejecutivo ASCER 2023 (Anon., 2023)

A partir de 2022 la producción y, en consecuencia, las exportaciones cayeron de forma notable. Aunque el descenso responde a varios factores—tensiones en la cadena de suministro, menor demanda en algunos mercados y costes logísticos—el encarecimiento del gas natural ha sido determinante, al aumentar de forma directa los costes de cocción en los hornos.

Para cuantificar el impacto, resulta útil comparar las principales magnitudes de 2021 y 2023 (producción, facturación y cuota exportadora), lo que permitirá valorar en números la dimensión del retroceso y subrayar la necesidad de opciones energéticas más competitivas en el corto y medio plazo.

Según el último informe de ASCER sobre el impacto socioeconómico del sector (2024), la industria de baldosas cerámicas española ha sufrido una caída del 32,9 % en la producción entre 2021 y 2023. Pese a ello, la facturación global apenas varió gracias a un incremento de precios que compensó el menor volumen vendido. Un dato clave es el EBITDA, que se redujo un 21,3 %, reflejando la presión sobre los márgenes provocada por el encarecimiento energético y otras tensiones de coste.

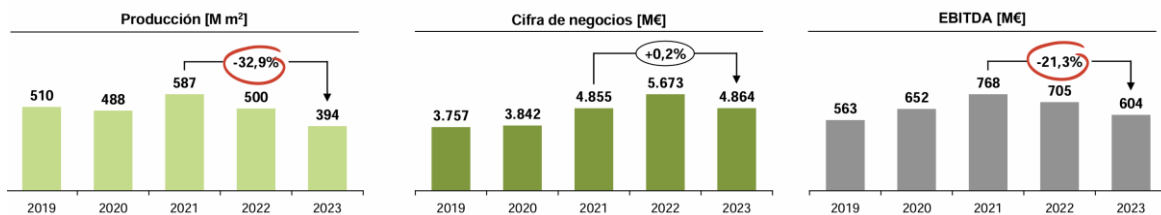


Gráfico 1: Variación de producción, cifra de negocios y EBITDA del sector cerámico de las baldosas

Fuente: El sector de los azulejos y pavimentos cerámicos en 2023: impacto socioeconómico y relevancia para la provincia de Castellón (ASCER) (Anon., 2024)

La misma dinámica se observa en el comercio exterior: las exportaciones descendieron en proporción parecida a la producción, pero su valor se mantuvo porque el precio medio de venta al exterior aumentó un 43,6 %. El resultado es un sector que factura prácticamente lo mismo, aunque produce y despacha menos unidades, con una rentabilidad deteriorada por los mayores costes de energía y materias primas.

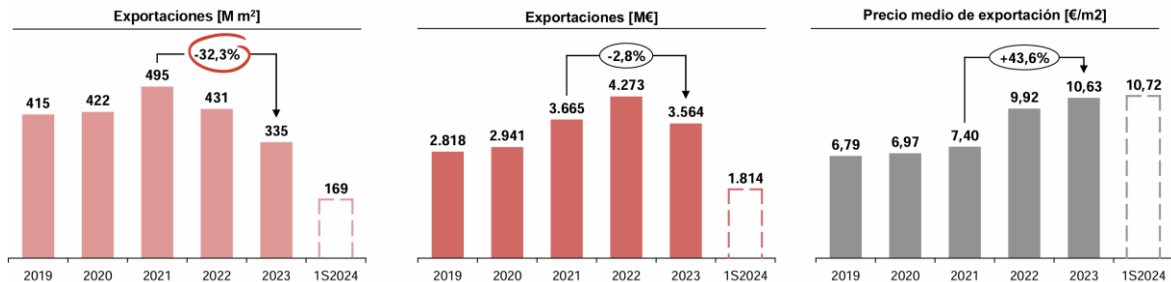


Gráfico 2: Variación de exportaciones y su precio medio del sector cerámico de las baldosas.

Fuente: El sector de los azulejos y pavimentos cerámicos en 2023: impacto socioeconómico y relevancia para la provincia de Castellón (ASCER) (Anon., 2024)

Para valorar realmente los datos de producción y exportación de baldosas cerámicas en España conviene compararlos con la escena internacional. Según la 12.^a edición de *World Production and Consumption of Ceramic Tiles* (CWW, 2019), al cierre de 2023 España ocupaba la octava posición mundial en producción, con el 2,5 % del total. Se trata de un descenso claro frente a 2021, cuando era cuarta con el 3,1 % de la oferta global.

TOP MANUFACTURING COUNTRIES							
COUNTRY	2019 (Sq.m Mill.)	2020 (Sq.m Mill.)	2021 (Sq.m Mill.)	2022 (Sq.m Mill.)	2023 (Sq.m Mill.)	% on 2023 world production	% var. 23/22
1. CHINA	8,225	8,474	8,863	7,312	6,730	42.2%	-8.0%
2. INDIA	2,223	2,318	2,550	2,300	2,450	15.4%	6.5%
3. BRAZIL	909	840	1,049	927	793	5.0%	-14.5%
4. IRAN	398	449	458	480	450	2.8%	-6.3%
5. INDONESIA	347	304	410	430	413	2.6%	-4.0%
6. EGYPT	300	285	340	380	400	2.5%	5.3%
7. VIETNAM	560	559	554	579	397	2.5%	-31.4%
8. SPAIN	510	488	587	500	394	2.5%	-21.2%
9. ITALY	401	344	435	431	374	2.3%	-13.2%
10. TURKEY	296	370	438	385	372	2.3%	-3.4%
TOTAL	14,169	14,431	15,684	13,724	12,773	80.1%	-6.9%
TOTAL WORLD	16,812	17,139	18,602	16,862	15,937	100.0%	-5.5%

Source / Fuente: Mecis / Acimac Research dept. "World production and consumption of ceramic tiles", 12th edition 2024

Tabla 1: Ranking mundial producción baldosas cerámicas

Fuente "World production and consumption of ceramic tiles," 12th edition (CWW, 2019)

En exportaciones, España se mantiene en los puestos de cabeza: es tercera, con el 12,5 % del comercio mundial. No obstante, el volumen enviado al exterior retrocedió un 20,1 % respecto a 2022, año en el que ocupaba la segunda plaza.

TOP EXPORTING COUNTRIES										
COUNTRY	2019 (Sq.m Mill.)	2020 (Sq.m Mill.)	2021 (Sq.m Mill.)	2022 (Sq.m Mill.)	2023 (Sq.m Mill.)	% on 2023 national production	% on 2023 world exports	% var 23/22	value 2023 (million €)	average export price (€/sq.m)
1. CHINA	779	622	601	579	615	9.1%	22.3%	6.2%	4,275	6.9
2. INDIA	359	437	483	422	589	24.1%	21.4%	39.6%	2,254	3.8
3. SPAIN	415	422	496	431	344	87.4%	12.5%	-20.1%	3,553	10.3
4. ITALY	323	318	364	356	285	76.2%	10.3%	-20.0%	5,049	17.7
5. IRAN	162	179	182	194	203	45.1%	7.4%	4.5%	n.a.	n.a.
6. BRAZIL	101	96	128	113	89	11.2%	3.2%	-21.8%	362	4.1
7. TURKEY	112	132	154	127	79	21.2%	2.9%	-37.9%	632	8.0
8. GHANA	3	8	30	52	53	43.8%	1.9%	0.6%	n.a.	n.a.
9. POLAND	50	58	62	50	43	53.0%	1.6%	-14.5%	429	10.0
10. MEXICO	41	37	41	42	38	14.3%	1.4%	-10.1%	258	6.9
TOTAL	2,344	2,308	2,541	2,367	2,337	19.4%	84.9%	-1.3%		
TOTAL WORLD	2,828	2,775	3,034	2,819	2,753	17.3%	100.0%	-2.3%		

Source / Fonte: Mecis / Acimac Research dept. "World production and consumption of ceramic tiles", 12th edition 2024

Tabla 2: Ranking mundial exportación baldosas cerámicas

Fuente "World production and consumption of ceramic tiles", 12th edition (CWW, 2019)

En síntesis, España sigue siendo una potencia de referencia en el mercado de la baldosa cerámica, superada solo por países de muy distinto tamaño y estructura industrial, como China e India. Dentro de Europa, continúa liderando la producción y la exportación, seguida de cerca por Italia.

2.1.2 CONSUMO ENERGÉTICO E IMPACTO CO₂

Consumo energético

Fuente: Informe energía ASCER 2023

El proceso productivo más común en Europa para fabricar baldosas cerámicas es la monococción tras molienda vía húmeda y atomización. Este proceso implica un alto consumo energético, concentrado en tres etapas clave: atomización (500–600 °C), secado de soportes (150–250 °C) y cocción (1100–1200 °C). La energía utilizada en estas fases proviene principalmente del gas natural, lo que convierte la combustión en la principal fuente de emisiones de CO₂ del sector.

En 2023, el consumo energético total del sector cerámico en España fue de 13.775 GWh, compuesto por 12.327 GWh de gas natural (90%) y 1.448 GWh de electricidad (10%). En

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

Año	2019	2020	2021	2022	2023	Promedio (5 años)
Consumo térmico total (GWh/año)	14.101	13.433	17.041	15.020	12.327	14.384
Consumo eléctrico total (GWh/año)	1.406	1.444	1.860	1.736	1.448	1.579
Producción (Mm2/año)	510	488	587	500	394	496

Tabla 3: Consumo sectorial total de gas natural y electricidad en los últimos 5 años. Fuente: ASCER, 2024

Para entender la relevancia de la cerámica en la industria española, el sector representó el 55% del consumo de gas industrial en la Comunidad Valenciana y el 7% del total nacional, mientras que en electricidad supuso el 8% del consumo eléctrico industrial en la Comunidad Valenciana.

En cuanto a fuentes renovables, la generación fotovoltaica creció significativamente: la potencia instalada aumentó más del 70% y la generación un 141%, llegando a cubrir el 7,6% del consumo eléctrico del sector. Sin embargo, la cogeneración de alta eficiencia disminuyó un 12% respecto a 2022, debido a la falta de un marco retributivo adecuado.

La factura energética total del sector en 2023 fue de 1.031 millones de euros, representando un 21% de la facturación total del sector. Aunque esta cifra es un 38,7% inferior a la de 2022, sigue siendo un 104% superior a la registrada en 2019, antes de la pandemia.

En resumen, a pesar de la reducción del consumo energético y de la factura energética, el sector continúa enfrentando altos costes energéticos, y su descarbonización efectiva sigue siendo necesaria, subrayando la necesidad de optimizar procesos y diversificar fuentes energéticas para proteger la competitividad del sector.

Es interesante destacar que como el uso del gas para la fabricación de baldosas fue de un 90% y el de electricidad un 10%, pero en cambio, en términos económicos, debido a que el precio de la electricidad fue superior al del gas, la factura económica resultó en un 80% de gas y un 20% de electricidad.

	Demanda energética 2023 (TWh)	Factura de la energía consumida (M€)	Porcentaje de energía utilizada	Porcentaje factura energía consumida
Gas	12,3 TWh	824 M€	90%	80%
Electricidad	1,45 TWh	207 M€	10%	20%
Total	13,75 TWh	1031 M€	100%	100%

Tabla 4: Datos importantes sobre consumo de energía en 2023

Emisiones de CO₂

El sector cerámico español, especialmente concentrado en la provincia de Castellón, es uno de los principales emisores industriales de dióxido de carbono (CO₂) debido a su elevada demanda energética, basada casi en su totalidad en combustibles fósiles. En 2023, las emisiones verificadas de CO₂ fueron de alrededor de las 2.200.000 toneladas, lo que representa una parte significativa del total regional y nacional. De estas emisiones, aproximadamente un 92% se originaron en procesos de combustión, principalmente de gas natural, mientras que el 8% restante correspondió a emisiones de proceso

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

Además, en 2023, el sector cerámico fue el mayor emisor de CO₂ de la Comunidad Valenciana, representando el 30,6% del total de emisiones industriales verificadas, por delante de sectores como el cementero, la generación eléctrica y las refinerías. Esta realidad subraya la importancia estratégica del sector en los planes regionales y nacionales de descarbonización.

Es interesante ver como las emisiones específicas de CO₂ por m² de baldosa se han reducido drásticamente desde 1980:

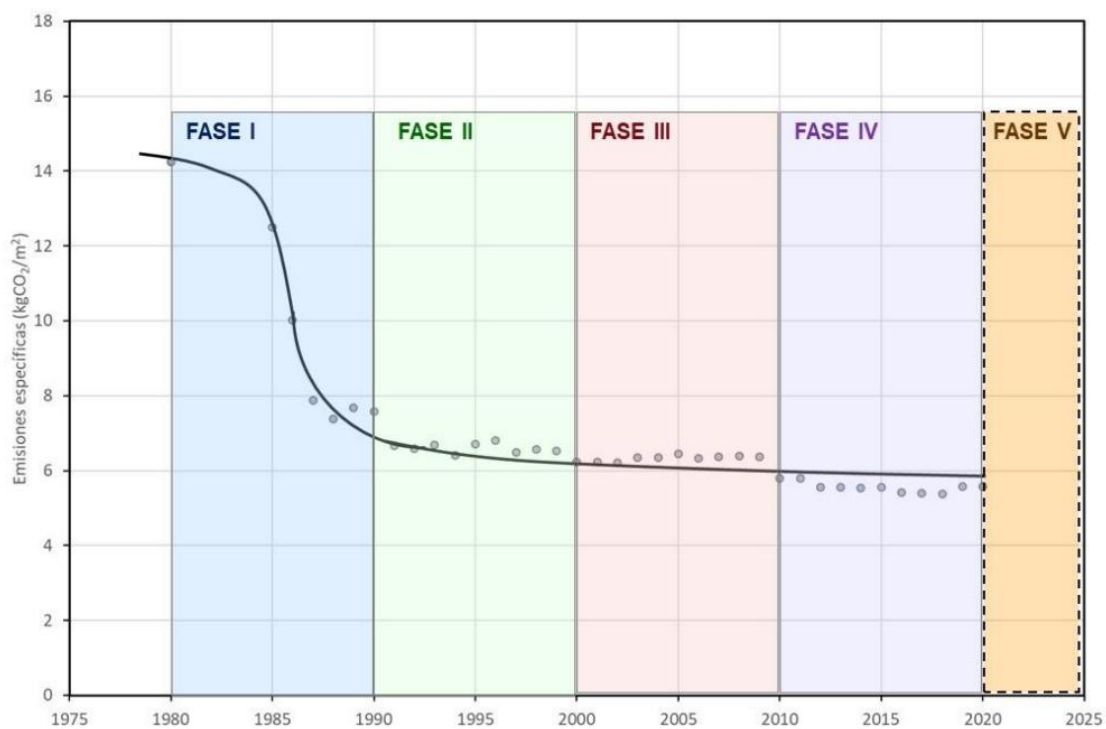


Figura 3: Evolución de las emisiones sectoriales desde 1980 hasta la actualidad

Desde 1980, el sector cerámico ha logrado una importante reducción de sus emisiones específicas de CO₂ por metro cuadrado de producto, pasando de 14,2 kg CO₂/m² en 1980 a 5,6 kg CO₂/m² en la actualidad. En la década de 1980, los avances vinieron principalmente del cambio de combustible a gas natural y la introducción de hornos monoestrato. Durante los años 90, la implantación generalizada de la monococción y los nuevos hornos de rodillos

permitieron una reducción del 46 % respecto a 1980. Entre 2000 y 2010, la mejora del control del proceso, el auge del gres porcelánico y el uso de sistemas de cogeneración impulsaron una reducción acumulada del 56 % desde 1980. En la década siguiente, la eficiencia energética se mejoró mediante la recuperación de calor, el precalentamiento del combustible y nuevos quemadores de alta eficiencia, reduciendo las emisiones hasta los 5,8 kg CO₂/m². Finalmente, desde 2020, las acciones más destacadas han sido la automatización de procesos, la digitalización y la adopción de grandes formatos, alcanzando una reducción total del 61 % respecto a 1980 y del 26 % respecto a 1990. Estos resultados reflejan una mejora sostenida en la eficiencia energética del sector.

En el contexto de la descarbonización de la industria en Europa, en 2005 nace el EU ETS (European Union Emissions Trading System), el principal mecanismo de la Unión Europea para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores industriales intensivos en energía. Funciona bajo el principio de “cap and trade”: se establece un límite máximo (cap) de emisiones para el conjunto de instalaciones incluidas en el sistema, y dentro de ese límite se asignan derechos de emisión (uno por cada tonelada de CO₂ equivalente). Parte de estos derechos se reparten gratuitamente y el resto se subasta. Las empresas deben disponer de suficientes derechos para cubrir sus emisiones anuales, pudiendo comprar, vender o conservar los sobrantes.

El límite de emisiones se reduce cada año, fomentando así una disminución progresiva de las emisiones. Desde su creación, el EU ETS ha contribuido a reducir cerca del 47 % de las emisiones del sector energético e industrial europeo respecto a los niveles de 2005. Además, los ingresos generados por la venta de derechos (más de 175.000 millones de euros desde 2013) se destinan a financiar proyectos de energías renovables, eficiencia energética e innovación tecnológica baja en carbono.

En la siguiente figura se pueden ver el historial de asignaciones gratuitas que ha tenido la industria de la cerámica en España:

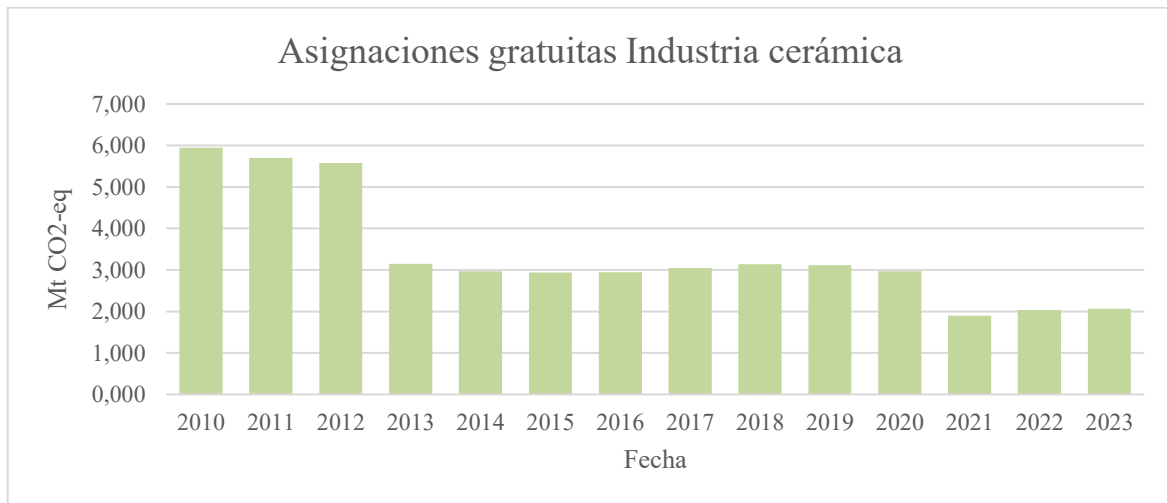


Figura 4: Asignaciones gratuitas Industria cerámica en España

En paralelo, las emisiones no cubiertas por derechos gratuitos asignados bajo el régimen europeo de comercio de emisiones (EU ETS) han supuesto un problema económico adicional para la industria cerámica. El sector experimentó un déficit estructural de derechos de emisión, viéndose obligado a adquirir parte de ellos en el mercado. En 2023, este desfase generó una factura de 12 millones de euros, con un precio medio de 83,47 €/tCO₂, que repercute directamente sobre los costes de producción y la competitividad de las empresas.

El sector de la cerámica en España prevé que la nueva revisión del EU ETS puede reducir en un 14% las asignaciones para el nuevo periodo que comenzaría para 2026 y finalizaría en 2030 (Vicente, 2024). De la misma manera el secretario general de ASCER, Alberto Echevarría, lamentó que para 2030 no habrá emisiones gratuitas para el sector cerámico en España. Esto es un gran problema para la industria cerámica, ya que en 2025 se espera volver a aumentar la producción de cerámica a los niveles previos a la crisis del gas, por lo que el aumento de la producción, y con ello las emisiones, junto con una reducción de emisiones gratuitas y un aumento del precio del carbono, se traduce en un aumento diferencial de la factura de carbono.

En la siguiente figura se pueden ver las emisiones de CO₂ durante los últimos años en España. Se puede apreciar cómo debido a la reducción de la producción en los últimos años,

la factura de carbono se ha ido reduciendo, pero como se ha comentado previamente, esta situación se puede invertir muy rápidamente.

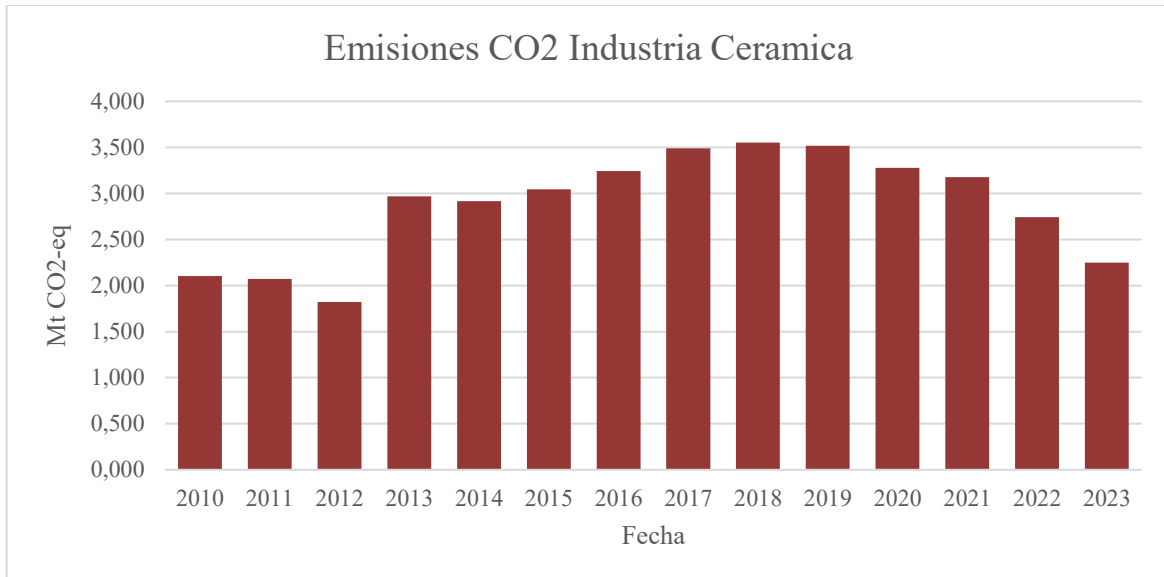


Figura 5: Emisiones CO2 de la industria cerámica en España

2.1.3 IMPACTO SOCIOECONÓMICO (PIB Y EMPLEO)

Fuente: El sector de los azulejos y pavimentos cerámicos en 2023: impacto socioeconómico y relevancia para la provincia de Castellón (PwC y ASCER) (Anon., 2024)

La industria española de baldosas cerámicas también supone un pilar socioeconómico de primer orden. Según el estudio de PwC para ASCER (2023), su contribución al PIB ascendió a 6.522 M€, el 3,4 % del PIB industrial nacional. De esa cifra, 1.452 M€ corresponden a actividad directa, mientras que el resto se reparte entre impactos indirectos e inducidos. Entre los beneficiarios de esta actividad destaca el sector energético (electricidad y gas), uno de los principales proveedores de las fábricas cerámicas.

En empleo, el clúster generó 91.929 puestos de trabajo (un 3,8 % del empleo industrial español) en 2023, de los cuales 14.934 son empleos directos. Dentro de los efectos indirectos e inducidos, el mayor impulso recae en los servicios administrativos y el comercio al por

mayor, que sumaron 10.821 empleos—el 14,1 % de todos los puestos indirectos e inducidos. Estos datos confirman el fuerte efecto multiplicador del sector, tanto por su peso en la cadena de suministro energética como por su capacidad para dinamizar servicios auxiliares y comercio.

2.2 FRITAS, ESMALTES Y COLORES CERÁMICOS

Fuente: ANFFECC (ANFFECC, n.d.)

Las fritas cerámicas son materiales vítreos que se obtienen al fundir diversas materias primas naturales o sintéticas en hornos a 1350-1550 °C. La masa fundida se enfría de forma súbita al pasarla por agua, lo que la solidifica en pequeños granos de vidrio.

Su uso principal es la formulación de esmaltes cerámicos: una capa que se aplica sobre la superficie del azulejo para conferirle dureza, resistencia al rayado e impermeabilidad. Las fritas también actúan como base de los colores cerámicos, responsables del acabado estético de la baldosa.

Estructura y localización

España cuenta con 27 empresas dedicadas a la fabricación de fritas, esmaltes y colores cerámicos, agrupadas principalmente en la provincia de Castellón, en la Comunidad Valenciana, donde se concentra el 70% de la producción europea del sector. Este clúster industrial genera cerca de 3.842 empleos directos (ANFFECC, 2023) y un impacto indirecto en más de 25.000 puestos de trabajo relacionados con la cadena de valor cerámica. Entre las empresas más destacadas figuran Esmalglass, Torrecid, Ferro Spain y Altadia, con sedes en municipios como Villarreal, Onda y Almazora (D. Carlos Gonzalvo Lucas, 2006).

Posición Internacional

España es el principal productor europeo, albergando, en 2008, 21 de las 42 plantas de fritas de la UE, por delante de Italia (9 plantas). Aunque la UE fue líder mundial hasta hace dos

décadas, la irrupción de China y otros países asiáticos ha desplazado el epicentro global de la producción. No obstante, las empresas españolas mantienen una posición de referencia internacional gracias a su apuesta por la innovación, el diseño y la calidad. Más del 70% de la producción española se destina a la exportación (ANFFECC, 2025), con una presencia consolidada en mercados de Europa, América, Asia y África.

Situación económica y retos

El sector facturó 1.419 millones de euros en 2023, aunque sufrió una caída del 21,5% respecto al año anterior, debido a la crisis energética, la desaceleración de la construcción y la inestabilidad en mercados clave como Argelia, Polonia y Portugal (Vicente, 2024). El aumento de los costes energéticos ha incentivado la descentralización productiva hacia países con menores precios del gas, aunque España sigue liderando en innovación y valor añadido.

Consumo energético y emisiones de CO₂

En 2023, el sector de fritas y esmaltes cerámicos registró un consumo energético de 1,1 TWh de gas y 0,17 TWh de electricidad, cifras inferiores a las de años anteriores debido a la crisis energética que ha afectado a la industria. En cuanto a las emisiones de CO₂, la industria ha logrado reducirlas en más de un 40% desde 2005, gracias a la adopción de tecnologías avanzadas como la oxicomustión y a la mejora continua en la eficiencia energética de los hornos.

La siguiente tabla muestra la evolución de la producción, las emisiones totales y el ratio promedio de emisiones del sector desde 2019 hasta 2023:

	2019	2020	2021	2022	2023
Producción (tn)	830.83	802.586	957.087	803.127	571.449
Emisiones totales (tn)	352.893	330.501	395.338	331.647	214.101
Ratio emisión promedio	0,4247	0,4118	0,4131	0,41	0,37
% mejora según ratio emisión promedio	34,7	36,6	36,5	36,47	42,36

Tabla 5: Producción y emisiones de las fritas en España

Como se observa, las emisiones específicas del sector han disminuido de forma significativa desde 2005, lo que queda reflejado claramente en la evolución del ratio de emisiones de CO₂, ilustrada en el gráfico adjunto

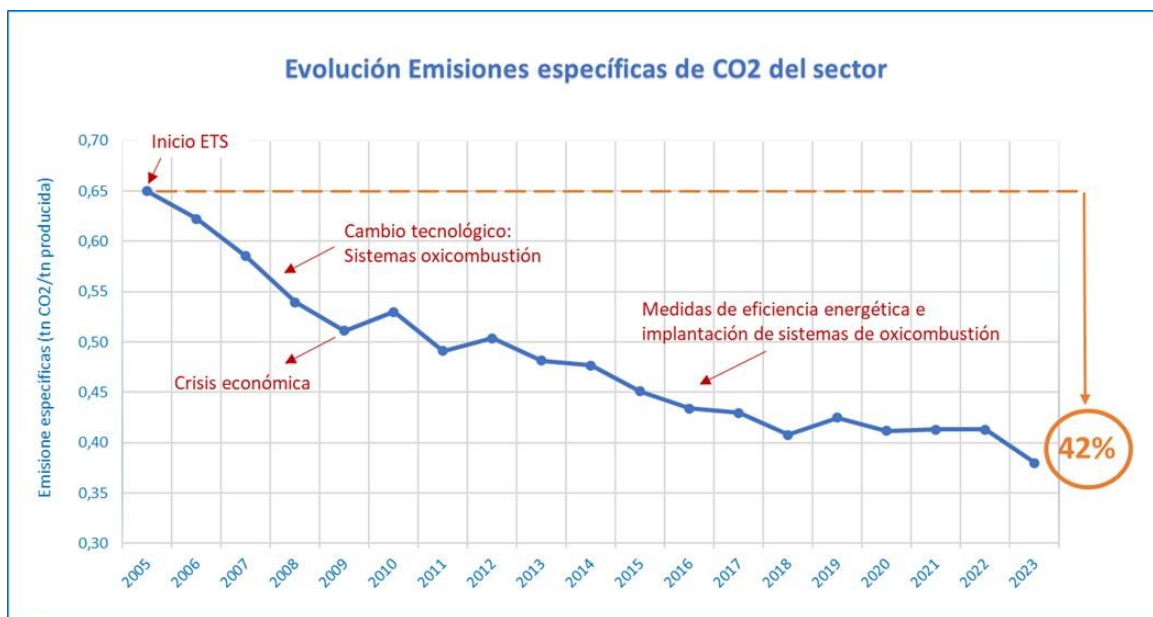


Figura 6: Evolución emisiones específicas de CO₂ del sector de fritas

Es también de gran interés como han evolucionado los derechos de emisión en la industria de las fritas cerámicas. El sector empezó recibiendo derechos de sobra y durante la primera década de ETS, 2005-2015, tuvo en general más del 15% de derechos concedidos de excedente (unos años más que otros). Entre 2015 y 2020, siguió teniendo excedente, aunque en menor porcentaje, en torno al 10%.

En 2020 hubo una revisión y un recorte por parte de la UE de más del 24% de derechos. Esto ha hecho que, por un lado, algunas empresas que emiten menos de 25.000 ton/año se hayan acogido a medidas equivalentes, por lo que no tienen asignación de derechos, sino que deben cumplir con una serie de obligaciones de reducción progresiva de emisiones. Las que siguen dentro del sistema han visto su asignación reducida. Esto ha hecho que, en los últimos años,

hayan faltado derechos, si bien no tantos como previsto inicialmente, pues el sector ha sufrido una crisis energética que le ha llevado a una caída de producción.

En 2023, el sector registró un excedente del 17,2% de derechos debido a la reducción de actividad, pero en 2024 se produjo un déficit del 10,9% frente a los derechos asignados y las emisiones verificadas. Esto indica que, si la producción de fritas aumenta en los próximos años, la falta de derechos será aún mayor, incrementando el coste asociado a la factura de carbono. Se prevé que para el periodo 2025 puedan producirse recortes adicionales en los derechos, y que para 2030 el sector podría no recibir asignaciones gratuitas.

En respuesta a estos retos, se están desarrollando proyectos innovadores como H2frit, que investiga la incorporación de hidrógeno en la mezcla de combustibles para hornos, y se han implementado Declaraciones Ambientales de Producto para certificar la huella de carbono de las fritas. Empresas punteras como Altadía proyectan una reducción adicional del 14% en sus emisiones directas antes de 2025, mediante la automatización y optimización de procesos productivos (Plaza cerámica, 2023).

Conclusión

La industria española de fritas cerámicas, líder europeo por volumen y tecnología, ha demostrado una notable capacidad de adaptación frente a los desafíos energéticos y regulatorios recientes. Aunque la crisis energética y la desaceleración de la construcción han reducido la producción y el consumo energético, el sector ha logrado disminuir sus emisiones específicas de CO₂ en más de un 40% desde 2005, gracias a la innovación tecnológica y la mejora de la eficiencia en los procesos. Sin embargo, la progresiva reducción de derechos de emisión y el endurecimiento de la normativa europea plantean retos importantes para la competitividad y la sostenibilidad futura del sector. La apuesta por proyectos pioneros como la incorporación de hidrógeno y la certificación ambiental evidencia el compromiso de la industria con la descarbonización, aunque será imprescindible seguir avanzando en la transición energética y la digitalización para mantener el liderazgo internacional y cumplir con los objetivos climáticos a medio y largo plazo.

Capítulo 3. PROCESOS DE FABRICACIÓN

Fuente: Universidad San Francisco de Paula (Colombia) (Anon., n.d.)

El proceso de fabricación de la cerámica es el conjunto de procedimientos de carácter físico y químico en el que se transforma la materia prima, principalmente la arcilla, en productos cerámicos con unas propiedades características que la hacen adecuada para distintos usos. En la figura 3 se puede ver gráficamente el proceso general de fabricación de los productos cerámicos, que incluye pasos como la extracción de la materia prima, el secado o la cocción.

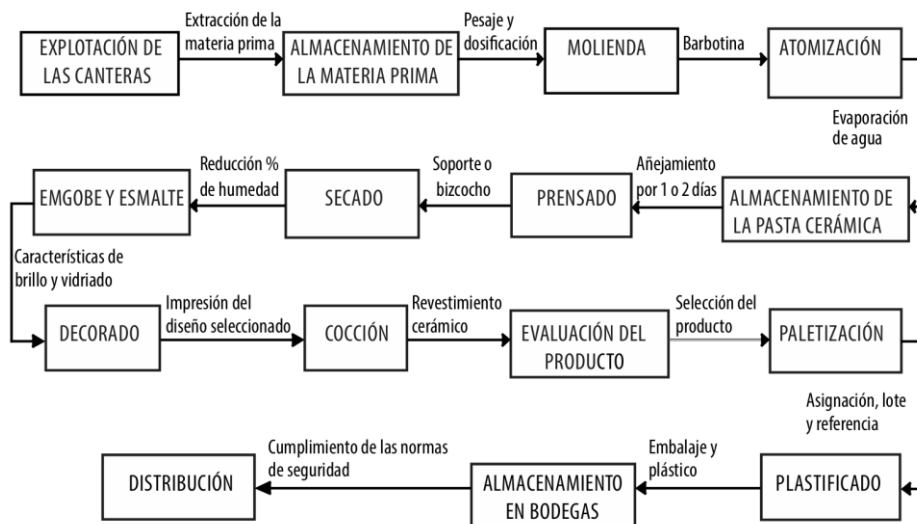


Figura 7: Proceso general de fabricación de cerámicas

A continuación, se describirán los procesos específicos de fabricación de las baldosas cerámicas, y de las fritas y esmaltes cerámicos.

3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS

Las baldosas cerámicas son unas placas de poco grosor que generalmente son utilizadas para revestimientos de suelos y paredes, las principales materias primas con las que se fabrican

son: productos de a tierra (arcilla y feldespato), agua, fuego y aire. Estas materias primas se extraen en canteras, se les añade aditivos, polvos y agua, se les da forma y se introducen a un horno de cocción, del cual sale el nuevo material, la baldosa cerámica. Según un informe de ASCER, este proceso de fabricación se puede separar en 6 fases (Anon., 2023):



Figura 8: Proceso de fabricación de las baldosas cerámicas

3.1.1 PREPARACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIA PRIMAS

La composición tipo de los compuestos para baldosas cerámicas son: arcilla 50-70%, arcilla refractaria 10-20%, feldespato 15-25%, caolín 0-10%. El primer paso es la **extracción** de estas materias primas en las canteras, en el caso de España y en específico para las baldosas, se extraen fundamentalmente en la Comunidad Valenciana, en las zonas de Villar del Arzobispo, La Yesa, Chulilla, Alcora y San Juan de Moró, aunque una pequeña proporción procede de Teruel. (Anon., n.d.)

Posteriormente se **almacenan** estas materias primas y procede con la **formulación** de la mezcla. Esta formulación se refiere al pesado y dosificación de las distintas arcillas para emplear en la fabricación de las baldosas, para esto se aplica una formula.

Una vez obtenida la mezcla con las cantidades correctas de cada materia prima se procede con la molienda. En la **molienda** se carga un molino con la materia prima, agua, un defloculante y unas bolas de alúmina (bolas resistentes que se emplean como cuerpo molidor). El defloculante es un agente capaz de convertir un material que es poco fluido, en uno que sí gana en esta capacidad, pero todo ello sin necesidad de aportar mucho líquido. El resultado de este proceso se denomina barbotina, una mezcla acuosa que se almacena en cisternas.

El último proceso de esta fase se denomina **atomización**, donde se produce la evaporación del agua de la barbotina gracias a flujos de aire a unos 500°, flujo que se consigue con un quemador de gas que calienta el aire a dicha temperatura. Una vez evaporado el aire, se obtiene el polvo atomizado.

3.1.2 CONFORMADO DE LA PIEZA

Durante esta fase se conformará la forma de la pieza a través del moldeo, posteriormente haciéndose pasar por un secadero.

Durante el **moldeo** se le da la forma a la pieza, unos prensadores aplican fuerzas de unos 250kg/cm² compactando el material y formando el soporte o bizcocho. A la baldosa por la parte inferior se le imprime una cuadrícula, este ayudará a que se fijen las cerámicas durante su instalación.

El proceso de **secado** está diseñado para eliminar al máximo la humedad del soporte, reduciendo el porcentaje de humedad por debajo del 1%, el objetivo principal es aumentar su resistencia mecánica durante su recorrido en la línea de producción. En este proceso se utiliza el gas como combustible para calentar el aire.

3.1.3 ESMALTADO Y DECORACIÓN

En esta fase se aplica un **esmalte** en la superficie de las baldosas, la función principal de estos esmaltes es conferir una capa impermeable, protectora y decorativa, proporcionando al azulejo su belleza y características técnicas específicas, como la impermeabilidad, la dureza y la resistencia al rayado, a los ácidos, a la abrasión y los detergentes, etc... (ANFFECC).

Durante esta fase no solo se le aplica esa capa protectora, sino que también tiene lugar la **decoración**, dando las características visuales necesarias a la pieza.

3.1.4 COCCIÓN

La **cocción** es la fase más importante de la fabricación de las baldosas cerámicas. El soporte o bizcocho ya esmaltado y decorado se introduce en unos hornos de gas donde se cuece a más de 1.100°C. Durante este proceso se transforman las materias primas en un nuevo material de una composición cristalina, el producto final ya conocido como el revestimiento cerámico.

Esta es una de las fases más relevantes para este estudio ya que es donde tiene lugar la mayor emisión de gases de efecto invernadero, debido al uso de gas en los quemadores para llegar a las temperaturas tan elevadas. Se estudiará profundamente más adelante con el resto de las fases que requieran un consumo energético.

3.1.5 TRATAMIENTOS ADICIONALES

Durante esta fase se realiza el precorte, los pulidos superficiales o el rectificado y biselado del producto acabado.

3.1.6 CLASIFICACIÓN Y EMBALAJE

Por último, se **clasifican** las piezas según sus características y se dirigen a la estación de embalaje, donde robots paletizan todas las piezas y una vez listas las almacenan en bodegas listas para su distribución.

3.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS FRITAS Y ESMALTES CERÁMICOS

Como se ha explicado previamente, el esmalte cerámico es una capa que se adhiere al azulejo para darle unas características específicas. Para la fabricación de estos esmaltes es necesaria la frita cerámica:

3.2.1 FRITAS

3.2.1.1 Preparación, dosificado y mezclado de la materia prima

En este paso se preparan las materias primas para que tengan una composición homogénea y constante. Se comienza con una dosificación de estas materias primas seleccionadas y controladas en la proporción establecida.

3.2.1.2 Horno de fusión

La mezcla de materias primas se hace pasar por un horno de fusión mediante un tornillo sin fin, donde la velocidad controla el flujo másico alimentado al horno. El objetivo de estos hornos es fundir la materia prima para poder enfriarla rápidamente a su salida. Hay dos tipos de hornos utilizados en este proceso:

A. Hornos de fusión mediante proceso continuo

Son los más utilizados en la industria, el enfriamiento posterior puede ser tanto por aire como por agua.

B. Hornos de fusión mediante proceso discontinuo

Es utilizado en raras ocasiones y son hornos rotatorios con enfriamiento por agua.

Los principales criterios para la selección de hornos es la escala de producción y la formulación del producto. Estos hornos utilizan gas natural como combustible y las temperaturas de fusión oscilan entre los 1350 °C y 1550 °C

3.2.1.3 Enfriamiento

Al salir del horno, la mezcla fundida tiene que ser enfiada rápidamente, hay dos opciones:

A. Enfriamiento por aire

Se hace pasar la masa fundida por unos rodillos laminadores que están refrigerados por agua, esto da lugar a un producto laminado que se hace pasar por un quebrantador para transformarlo en pequeñas escamas.

B. Enfriamiento por agua

En este caso la masa fundida se vierte en un depósito con agua a temperatura ambiente, aquí se solidifica y se rompe en pequeños trozos.

Una vez obtenida la frita, se utiliza como materia prima para la fabricación de los esmaltes.

3.2.2 ESMALTES

Se trata de un proceso muy simple donde tiene lugar la molienda y homogeneización de las materias primas en un molino de bolas, este paso se debe hacer por vía húmeda. Posteriormente se deposita el esmalte en tanques de homogeneización donde se mezclan varias moliendas para lograr la densidad y viscosidad necesaria.

No se trata de un proceso con un gran consumo energético, por lo que es menos relevante para este estudio.

Capítulo 4. PROCESOS ENERGÉTICOS

El objetivo de este apartado es localizar y analizar de manera profunda aquellos puntos en la cadena de producción donde haya un consumo energético considerable. De esta manera se consigue describir los distintos tipos de tecnología, su consumo energético, su eficiencia... fundamental para más adelante poder evaluar la implementación de nuevos combustibles o tecnologías.

Al principio de este estudio se menciona que el 90% del consumo energético para la fabricación de baldosas es de gas, y el 10% restante es de electricidad. En la figura 5 se puede observar la distribución en porcentajes del consumo energético en el sector español de baldosas cerámicas.

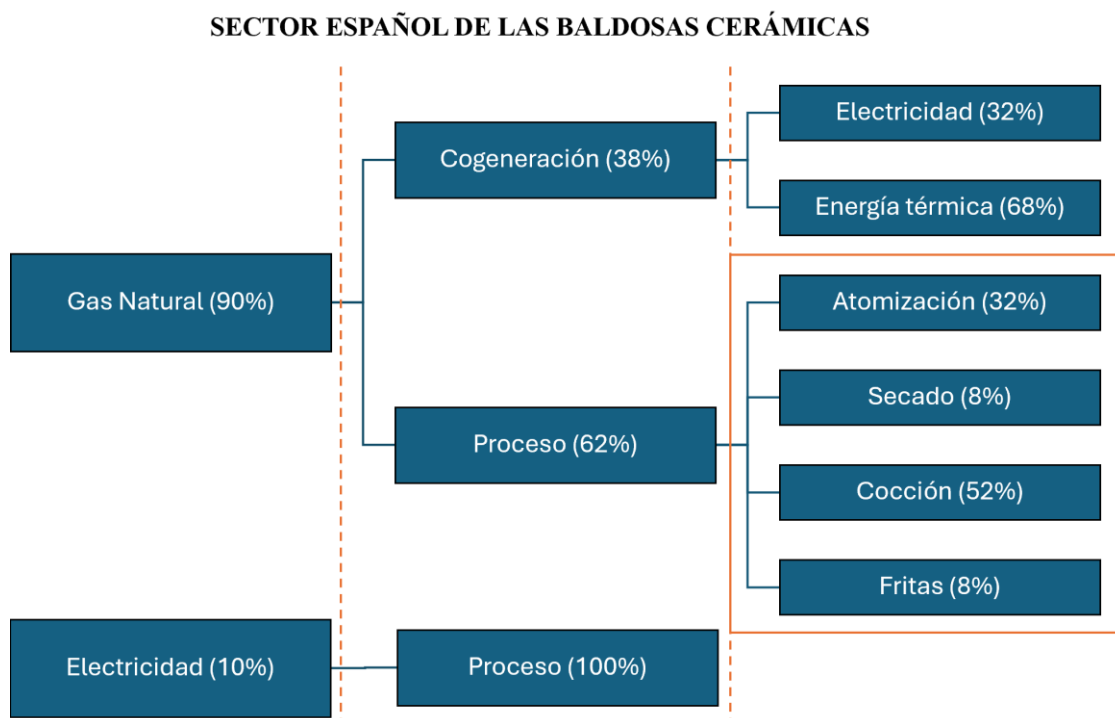


Figura 9: Distribución de porcentajes de consumos energéticos en el sector español de baldosas cerámicas

(Elaboración propia)

En Europa y por ende en España, el proceso más común para la fabricación de baldosas es el llamado proceso por vía húmeda y monococción. Este es el proceso que se ha descrito previamente, y se basa en la molienda de las materias primas por vía húmeda, seguido por un secado por **atomización** para obtener un producto granulado con una humedad en torno al 5%-6%, lo que permite posteriormente realizar un prensado de manera homogénea. Una vez realizado el prensado se lleva a cabo el **secado** de las piezas para conseguir una humedad inferior al 1%, se aplica el **esmalte** necesario y se realiza la **cocción** del producto con el esmalte ya aplicado (monococción).

El proceso se puede realizar también por “vía seca”, solo unas pocas empresas en el sector utilizan este método ya que presenta varios defectos importantes, siendo uno de ellos la desigual distribución de presión lo que da como resultado una densidad y una contracción desiguales del cuerpo cerámico, lo que origina grietas y delaminación (Titan Industrial Ceramic, 2023). La principal ventaja de la vía seca es el ahorro de agua y energía, ya que no se tiene que incluir agua en el proceso y por ello no tiene lugar el secado por atomización.

En la figura 6 se puede ver un esquema que resume la fabricación de baldosas por “vía húmeda” y “vía seca”

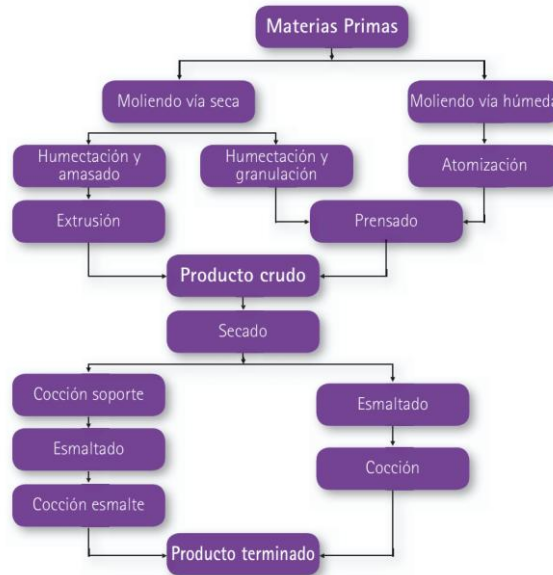


Figura 10: Diagrama para la fabricación de baldosas (E Monfort, 2011)

Como se ha mencionado anteriormente, los puntos en la cadena de producción por “vía húmeda” que son más relevantes para este estudio debido a su alto consumo energético son la **atomización**, el **secado**, y la **cocción**. Entre el secado y la cocción tiene lugar la aplicación del esmalte al producto cerámico, este proceso como tal no requiere de energía, pero en la fabricación del esmalte es necesaria la **frita**, cuyo consumo energético en su fabricación es muy elevado debido a su alta temperatura en los hornos de fusión. Por ello también se analizará la fabricación de las fritas, ya que tiene un gran impacto en el consumo final de energía para la fabricación de azulejos.

4.1 ATOMIZACIÓN

La atomización es el proceso por el cual se reduce la humedad de la barbotina (mezcla de materias primas después de la molienda) desde un 40% hasta aproximadamente un 6%. De esta manera se obtienen unos gránulos prácticamente esféricos que en su conjunto presentan una gran fluidez, lo que facilita la operación del relleno de los moldes de manera homogénea. En la figura 7 se muestra la fotografía de un atomizador de la empresa SACMI.



Figura 11: Atomizador Industrial (Anon., n.d.)

El proceso de secado se lleva a cabo poniendo en contacto la barbotina con una corriente de aire caliente a unos 500°C, esta corriente de aire puede tener dos orígenes: un quemador de gas natural vena de aire; o ser los gases de escape de una turbina de cogeneración, con su correspondiente quemador de postcombustión (Salvador Ferrer Castán, 2022).

Estos gases calientes se introducen en la parte superior del atomizador por medio de ventiladores, por otra parte, la barbotina que estaba almacenada se moviliza a través de bombas y se pulveriza al interior de atomizador. Esta se pone en contacto con el aire caliente y las gotas se secan rápidamente, dando lugar a una composición sólida granulada que por la gravedad cae al fondo del atomizador, donde es recogida por una cinta que la transporta hasta los almacenes. Por otra parte, los gases húmedos pasan por un filtro que elimina todas las partículas en suspensión, una vez filtrados, se expulsan al exterior a través de la chimenea.

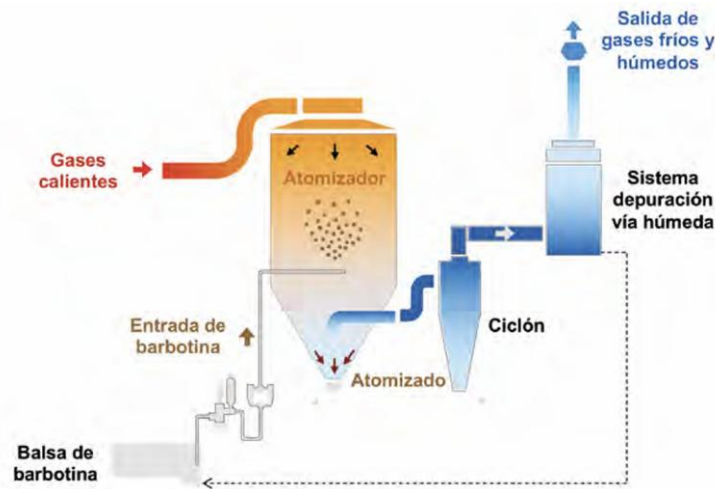


Figura 12: Funcionamiento de un atomizador (Salvador Ferrer Castán, 2022)

Es interesante obtener información de los gases de salida de un atomizador para una posible recuperación de calor en otros procesos.

Parámetro	Intervalo de variación
Caudal específico (Nm ³ /kg)	2,1-4,5
Temperatura (°C)	90-115
Humedad (% vol.)	15-25
Humedad absoluta (m ³ agua/m ³ totales)	0,15-0,25
Contenido de O ₂ (% vol.) en gases secos	16-21
Contenido de CO ₂ (% vol.) en gases secos	1-2

Tabla 6: Gases de salida del atomizador (Salvador Ferrer Castán, 2022)

El factor más importante para tener en cuenta es la temperatura de salida de estos gases, y se puede ver que rondan los 100°C. Esto quiere decir que podría ser posible el uso de los gases de salida de un atomizador para los procesos de secado (100°C-200°C), y se analizará más adelante como una posible mejora de la eficiencia.

Los aspectos más importantes que considerar son el consumo energético y las propiedades del atomizador. El combustible utilizado, tanto si los gases de aire caliente provienen de un quemador convencional o de una turbina de cogeneración, es el gas natural. Según los datos

recogidos por el ITC en el año 2022, el rendimiento de los atomizadores que se utilizan hoy en día es del 60%-70%, es decir que se pierden en torno al 30%-40% de la energía que se utiliza. Estas pérdidas son habitualmente los gases que se pierden por la chimenea (20%-30%), energía perdida a través de la superficie del atomizador (1%-5%) y con el polvo atomizado (2%-5%). La representación visual del rendimiento de los atomizadores se puede ver en la figura 9 (Salvador Ferrer Castán, 2022).

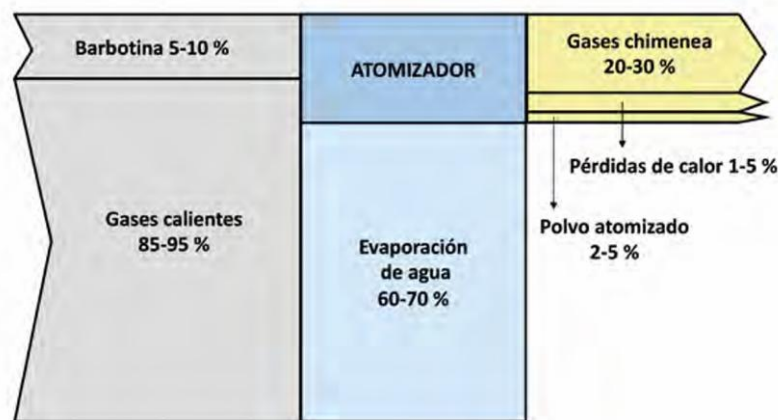


Figura 13: Diagrama de Sankey atomizador

La razón por la que la atomización supone un gran consumo energético es debido a la cantidad de gas natural que se necesita para conseguir una corriente de aire a alta temperatura. El consumo específico medio del gas natural de los atomizadores hoy en día es aproximadamente 476 (kWh/t ss*), lo que al final supone unas emisiones específicas de CO₂ de unos 86 kg CO₂/t ss.

* El "ss" (materia seca) se refiere a la masa de material sin contar el agua o humedad presente. En el caso del atomizado o secado, la cantidad de energía se mide en función de la masa de materia seca que se está procesando.

4.2 SECADO

La siguiente etapa del proceso en la que hay un consumo energético relevante es en el secado de las baldosas prensadas. Una vez obtenido el polvo atomizado, se llenan unos moldes y

tiene lugar el prensado de las baldosas, lo que resulta en los llamados soportes mecánicos, que como se ha explicado antes, estos contienen alrededor de un 6% de agua. La etapa de secado tiene un doble objetivo, siendo el primero la reducción de la humedad de los soportes por debajo del 1%, lo más cercano posible al 0%, de esta manera se incrementa la resistencia mecánica para que no haya roturas en la etapa de decoración. El segundo objetivo es el aumento de la temperatura para que el esmaltado y decorado de las piezas se realice correctamente (E Monfort, 2011).

Hay dos opciones a elegir para el secado de las baldosas, los secaderos verticales y los horizontales. Ambos tipos de secadores siguen el mismo principio, el secado por convección forzada en la que se ponen en contacto los soportes cerámicos con corrientes de aire calientes procedentes de la combustión del gas natural.

4.2.1 SECADEROS VERTICALES

Hoy en día aproximadamente el 75% de los procesos de secados de baldosas se hace por medio de estos tipos de secadores (E Monfort, 2011), por lo que se puede decir que es la opción predeterminada en este proceso.

En este caso las piezas se disponen sobre unos rodillos metálicos, formando entre ellos unidades que habitualmente se nombran como “cestones”. El conjunto de estos cestones y piezas rotan sobre un eje como si fuese una noria y se mueven verticalmente de manera vertical por los secadores, entrando en contacto con el aire caliente en contracorriente. Una vez acabado el proceso, automáticamente se recogen las piezas ya secas y esa balda de rodillos metálicos queda libre, estos vuelven a bajar y automáticamente son cargados con nuevas piezas, formando nuevos cestones. Este proceso suele durar alrededor de 60 minutos y las temperaturas rondan entre los 100°C y los 200°C, aunque estas condiciones dependen de las características del producto a secar.

En estos secadores el aporte de calor se realiza mediante quemadores de **gas natural**, debido a las bajas temperaturas en comparación con la atomización y la cocción, no se suelen utilizar gases que provengan de una turbina de cogeneración. Una de las opciones que se estudiará es el uso de los gases de salida de los atomizadores, ya que su temperatura ronda los 100°C y supondría un gran ahorro energético en este proceso. Lo más común es que parte de los gases de secado se recirculen en el mismo proceso, y alcancen la temperatura de secado requerida mediante la instalación en la propia conducción de uno o dos quemadores de tipo vena de aire. Los gases húmedos se extraen por una chimenea para purgar el interior de los secaderos. En la figura 10 se puede ver un esquema de la circulación de los gases.

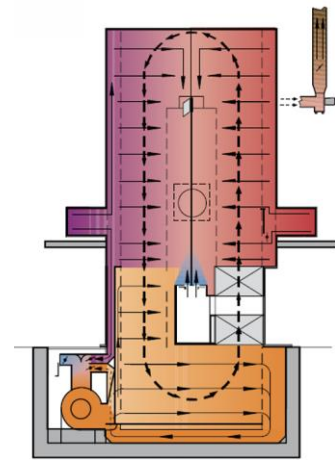


Figura 14: Esquema de la circulación de gases y piezas en un secadero vertical (SACMI)

El consumo específico medio de la operación de secado de baldosas cerámicas en un secadero vertical es de unos 116 kWh/t de producto seco (E Monfort, 2011). En la tabla 4 se muestra un ejemplo de las características de un secador vertical de tamaño medio (Salvador Ferrer Castán, 2022).

Secadero vertical	Valores medios
Producción (m ² /h)	225
Potencia total media del secadero (kW)	650
Número de quemadores	1-2
Potencia térmica de los quemadores (kW)	480

Tabla 7: Sistema de aporte de energía de un secadero vertical

4.2.2 SECADEROS HORIZONTALES

Estos secadores utilizan el mismo principio que los verticales, la convección forzada entre del aire con los soportes cerámicos para reducir la humedad de estos. En este caso las piezas

húmedas se introducen en unos rodillos por un extremo del secador y se extraen secas desde el otro extremo.

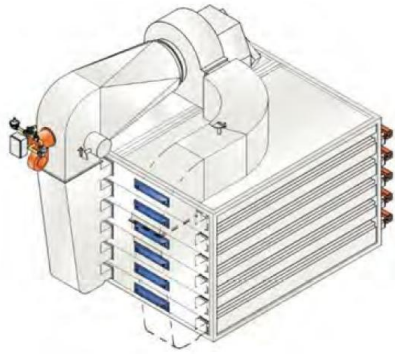


Figura 15: Secador horizontal de varios planos

Lo más común es el uso de secadores horizontales de varios planos, unos encima de otros, de manera que se puede aprovechar mejor el espacio que ya ocupa. La manera de calentar el aire es a través de quemadores de gas natural, los gases calientes se hacen pasar por cada uno de los planos para que entren en contacto con las piezas por encima y por debajo de ellas. Al igual que en los verticales el aire caliente se recircula en el mismo proceso y los gases húmedos se extraen a través de una chimenea. En este caso los ciclos de secado son mucho

más cortos, alrededor de los 25 minutos, siendo la temperatura de secado de unos 250 °C (Salvador Ferrer Castán, 2022).

En la tabla 5 se muestra un ejemplo de las características de un secador vertical de tamaño medio.

Secadero horizontal	Valores medios
Producción (m ² /h)	225
Potencia total media del secadero (kW)	650
Número de quemadores (depende del tamaño del secadero)	4-8
Potencia térmica de los quemadores (kW)	80

Tabla 8: Sistema de aporte de energía de un secadero horizontal

Los secadores horizontales también se utilizan, aunque en menor medida, en el sector de la cerámica. La principal razón es por el espacio utilizado en comparación con los secadores verticales, pero la ventaja que tienen es su mejor control de las curvas de temperatura y humedad del secado de las piezas, lo que ha hecho que su empleo en el sector haya aumentado en los últimos años.

En ambos tipos de secaderos, el combustible principal es el gas natural y el aporte total de calor es una combinación de esta combustión de gas natural y de los posibles recursos de recuperación de aire caliente precedentes de otras instalaciones. De todo este calor aportado, se ha medido que se utiliza un 30%-35% para el secado de las piezas, es decir para la extracción de agua. Por otra parte, las piezas salen de los secaderos con una energía que supone el 15%-20% del balance energético, y esta no es considerada como una pérdida, ya que una de las funciones de este secadero es calentar los soportes cerámicos para facilitar la fase de decoración. Tras hacer este análisis se considera que el rendimiento de estos secaderos está en torno al 45%-55%, y el resto son pérdidas en los gases de la chimenea y en menor pérdida por convección y radiación desde las superficies externas. La figura 12 es una representación visual del balance de energías de este proceso.



Figura 16: Diagrama de Sankey de un secadero de baldosas

Finalmente, gracias al ITC se han obtenido unos datos medios acerca del consumo energético y las emisiones de un secadero. El consumo medio total de energía térmica se sitúa alrededor de los 125 kWh/t ss (PCS del gas natural), y no se consideran diferencias significativas de consumo energético por tipo de secadero (vertical u horizontal) ni por tipología de producto procesado. Respecto a las emisiones de CO₂, se estima que un secadero, emite sobre los 21 kg CO₂/t ss.

4.3 COCCIÓN

Se trata de la etapa más importante en cadena de producción de las baldosas, y ello conlleva a que suponga el mayor consumo energético de todas.

Antes de empezar a analizar el proceso de cocción, es necesario diferenciar las distintas composiciones cerámicas tradicionales cuatro de baldosas cerámicas (gres rojo, gres

porcelánico, azulejo rojo y azulejo blanco), dos de cerámica estructural (ladrillo y teja blancos) y una composición de vajilla de porcelana (CASTÁN, 2016). A continuación, se presenta una tabla con los principales detalles de cada proceso de cada producto final:

Referencia	Producto final	Detalles de proceso		
		Conformado	Cocción	
			Temperatura máxima (°C)	Ciclo total (h)
GR	Baldosa de gres rojo	Prensado semiseco	1143	0,46
GP	Baldosa de gres porcelánico	Prensado semiseco	1190	0,57
AR	Azulejo rojo	Prensado semiseco	1126	0,40
AB	Azulejo blanco	Prensado semiseco	1140	0,51
LB	Ladrillo blanco	Extrusión	850	24
TJ	Teja blanca	Prensado en plástico	1019	18
VP	Vajilla de porcelana	Colado	1000	22

Tabla 9: principales detalles de cada proceso de cada producto final

Las baldosas cerámicas se cuecen normalmente en hornos continuos de monoestrato con procesos de monococción (cocción simultanea de soporte y esmalte), aunque existen hornos de bicocción donde en una primera etapa se cuece el soporte y más adelante otra atapa de cocción con el esmalte añadido. El combustible para estos hornos de cocción es gas natural limpio, lo que permite estar en contacto directo con el material de la cocción.

La temperatura durante el ciclo de cocción es muy variable y depende de aspectos como el tipo de soporte, el horno, el esmalte...pero se establece que la temperatura máxima varía entre los 1.100 °C y 1.200°C. Con respecto al tiempo de cocción este varia también ente los 40 y 70 minutos. La longitud de estos hornos puede llegar a alcanzar los 150 metros, pero de media rondan los 100 metros de longitud.

Como se ha mencionado anteriormente, la etapa de cocción es una de las más importantes, ya que la mayor parte de las características finales dependen en gran medida de las reacciones durante este proceso. Estas reacciones tienen que ser controladas y se dan a temperaturas distintas, por ello se desarrolla la llamada curva de cocción, que establece la temperatura del horno en cada momento. Esta curva de cocción se divide en 3 partes: calentamiento, cocción, y enfriamiento.

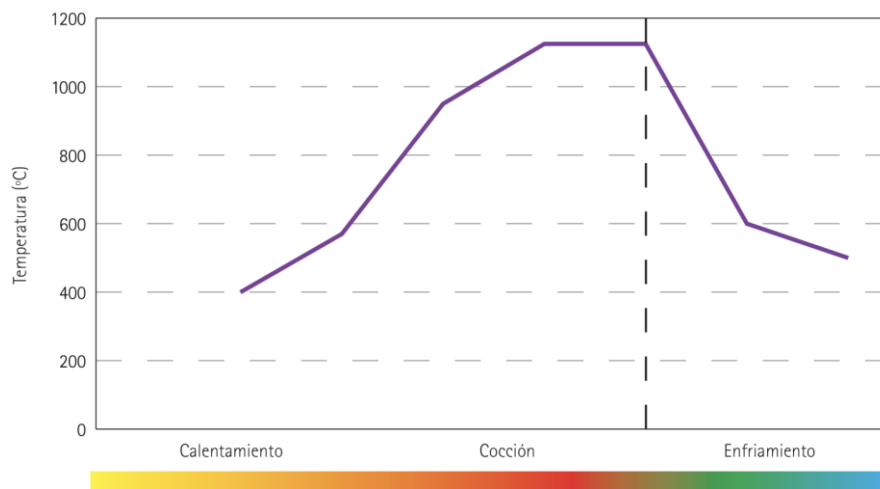


Figura 17: Curva de cocción de un ciclo típico

Esta curva de cocción se modifica en función del tipo de producto que se desee fabricar, espesor, esmalte...pero todas ellas se caracterizan por sus 3 etapas:

- **Calentamiento:** Esta es la primera etapa del horno de cocción y transcurre desde la entrada de las piezas a temperatura ambiente, hasta que se alcanza una temperatura de unos 800°-900°C. Su función es eliminar la humedad residual de los moldes, la combustión de la materia orgánica, la transformación alotrópica del α - β cuarzo, la pérdida de los grupos OH- en las arcillas (deshidroxilación), y la descomposición de los carbonatos en las composiciones que los contienen. Estas reacciones generan tensiones internas que, en caso de superar la resistencia mecánica del material, ocasionarían su rotura.

- **Cocción:** Esta fase de cocción va desde los 800°-900°C hasta la temperatura máxima de cocción, es donde tiene lugar las transformaciones físico-químicas más importantes. Tiene lugar una reducción de la porosidad, lo que da lugar a una contracción, uno de los cambios de dimensión más importante. En el caso de los productos con soporte poroso se da un proceso de cristalización, formando silicatos de calcio.

En la zona de cocción, al igual que en la de calentamiento, hay situados numerosos quemadores de gas en las paredes laterales del horno. Al final de esta zona se encuentra un muro transversal que separa la zona de cocción con la zona de enfriamiento con el objetivo de no influenciar las distintas etapas en el proceso.

- **Enfriamiento:** La etapa comienza cuando finaliza el aporte de calor en la fase de cocción, y lo podemos dividir en 3 etapas: enfriamiento rápido, lento, y final, cada una de ellas con una zona distinta en el horno.
 - Enfriamiento rápido: Nada más finalizar la cocción, los moldes pasan a una nueva zona donde se inyectan corrientes de aire fría por encima y debajo del plano de los rodillos. Su función es el acoplamiento entre el esmalte y el soporte, disminuyendo la temperatura hasta los 600°C, por encima de la temperatura a la que se produce la transformación alotrópica del cuarzo.
 - Enfriamiento lento: En esta fase tiene lugar la transformación del cuarzo β a cuarzo α , a 573°C, el aporte de aire frío es indirecto y lento, ya que esta transformación “involucra únicamente la rotación de los átomos; por lo que es muy rápida e implica un elevado cambio volumétrico” (Anon., s.f.). Si el proceso no es lo suficientemente homogéneo, se pueden producir roturas en el material, por lo que es ideal que en este proceso el enfriamiento se efectuará a una velocidad lenta, 0,98°C/min.

Esta fase del enfriamiento va desde los 600°C hasta los 450°C.

- Enfriamiento final: Una vez superado el punto crítico de la transformación del cuarzo, se vuelven a introducir aire frío de manera directa para disminuir al máximo la temperatura del producto.

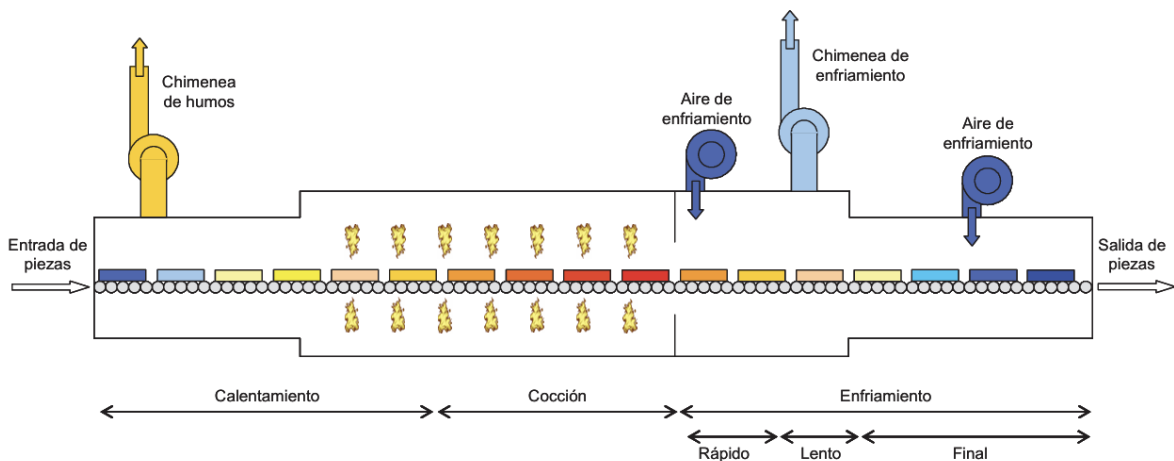


Figura 18: Esquema de un horno monoestrato de rodillos

Con respecto a los gases de salida, estos se emiten a la atmosfera a través de dos focos distintos. Los gases de combustión procedentes de la zona de calentamiento y cocción se expulsan a través de una chimenea a la entrada del horno, a estos se les aplica una corriente de aire frío para reducir la temperatura y no dañar los ventiladores.

En cuanto a los gases procedentes de las zonas de enfriamiento la temperatura de salida es inferior y se expulsan directamente a través de una o dos chimeneas a la salida del horno.

El balance energético de un horno típico de cocción indica que, en los hornos más eficientes, solo el 20 % de la energía aportada se utiliza en la cocción del material cerámico (Cerámica.name, s.f.).

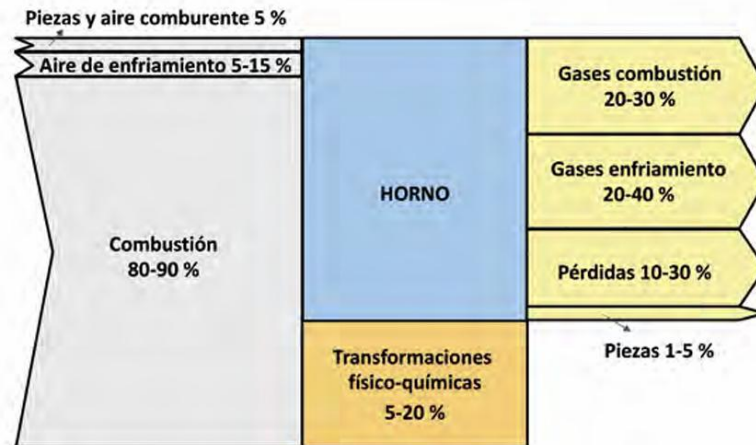


Figura 19: Balance de energía térmica a un horno. Intervalos de valores habituales en cada corriente
(Salvador Ferrer Castán, 2022)

Como se puede ver en diagrama de Sankey, alrededor del 80% de la energía se pierde en el horno a través de los gases de combustión, gases de enfriamiento, y pérdidas en las paredes de los hornos. Cierto es que los gases emitidos, tanto por las chimeneas de combustión y de enfriamiento pueden ser reutilizados instalando un proceso de recuperación de calor.

Los gases de combustión se expulsan a un temperatura de aproximadamente 270°C (Galindo, 2015), pero estos se denominan humos sucios, ya que contienen partículas en suspensión, compuestos orgánicos y elementos ácidos, como fluoruros, azufre, óxidos nitrosos y otros. Para la posible recuperación de calor es necesaria una previa depuración de estos gases. Una vez obtenidos los gases depurados, el calor se puede recuperar a través de un intercambiador de calor y utilizado en otros procesos como la atomización o el secado.

En cuanto a los gases de enfriamiento estos se consideran gases limpios ya que son simplemente aire ambiente que se ha calentado durante la etapa de enfriamiento. La temperatura de esos gases ronda entre los 140°C y 200°C y se pueden recuperar de manera directa o indirecta ya sea para:

- El uso de estos en otras etapas del horno como el comburente en los quemadores o en los gases de secado en el prehorno o,

- El uso en procesos como la atomización o el secado.

En general, para un horno de tamaño medio, se puede considerar un consumo térmico específico de unos 793 kWh/t cocido, más de 6 veces más que el secado y casi el doble que el proceso de atomización.

En cuanto a las emisiones de CO₂, es de gran relevancia el proceso de la descomposición de los carbonatos en la cocción de productos porosos, ya que es una reacción altamente endotérmica y además genera CO₂ como producto de la reacción. Teniendo esto en cuenta, un horno que produce gres esmaltado y/o gres porcelánico, emite unos 150 kg CO₂/t cocido, y un horno que produzca composiciones de azulejo emite alrededor de 220 kg CO₂/t cocido.

Horno		Valores medios
Producción media (t cocido/ hora)		4,5
Consumo térmico específico (referido al PCS del gas natural)	kWh/t cocido	793
	kWh/m ²	15,5
Emisiones específicas de CO ₂ (kg CO ₂ /t cocido)		150 (Gres) 220 (Azulejo)
Emisiones de CO ₂ según producción media (t CO ₂ /día)		16 y 24 t CO ₂ /día
Emisiones de CO ₂ medias en la corriente de salida (% vol.) en base seca		3 - 5

Tabla 10: Datos de un horno de tamaño medio

Una de las soluciones para descarbonizar la industria es buscar nuevas alternativas a estos hornos, por ello también es interesante estudiar la energía mínima necesaria en cada transformación en esta etapa de cocción. Es una información muy relevante para luego poder evaluar su viabilidad técnica en otros métodos alternativos.

Las reacciones más importantes que tienen lugar en el ciclo de cocción son las siguientes:

1. Evaporación del agua libre
2. Deshidroxilación de minerales arcillosos
3. Transformación alotrópica
4. Descomposición de carbonatos
5. Cristalización de fases cálcicas

6. Formación de fase vítrea por fusión de fases cristalinas

La tesis de Salvador Ferrer Castán “ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DEL PROCESO DE COCCIÓN DE COMPOSICIONES CERÁMICAS” (CASTÁN, 2016) es un documento extraordinario en el que se realizan estudios sobre la energía mínima necesaria para llevar a cabo cada transformación en las distintas composiciones cerámicas.

En este caso utilizaremos el Gres Porcelánico (GP) como ejemplo para desarrollar:

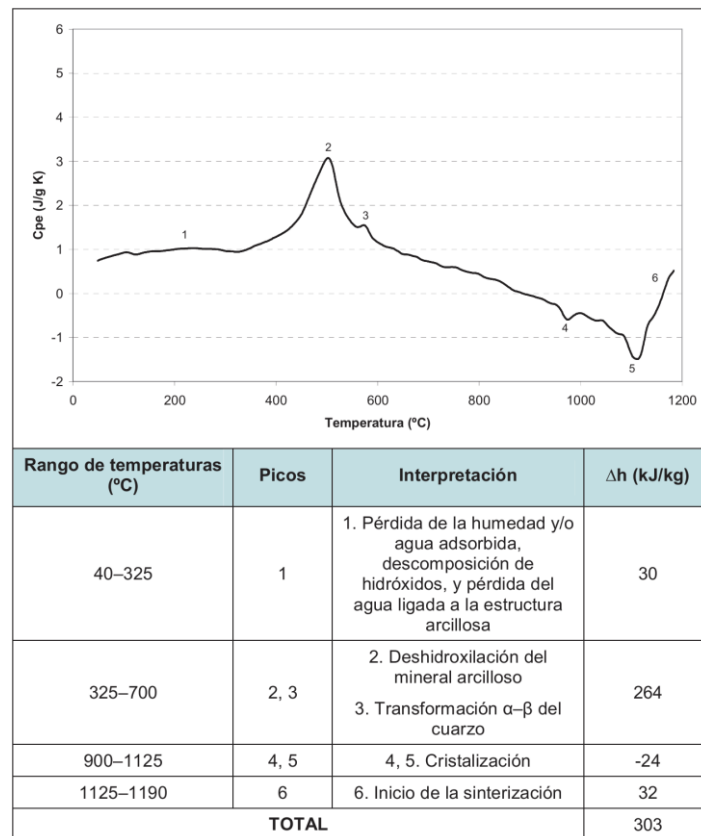


Figura 20: Interpretación de la curva de capacidad calorífica del gres porcelánico en función de la temperatura

En la figura 16 se observa la entalpía de reacción en cada fase de la cocción del gres porcelánico, el estudio de Salvador Ferrer estudia lo mismo para cada tipo de composición cerámica. Los resultados se pueden observar en la tabla 8:

Composición		Calor de reacción		
		Método experimental (kJ/kg producto crudo)	Método analítico (kJ/kg producto crudo)	Diferencia (%)
Gres rojo	GR	300±30	300±35	0
Gres porcelánico	GP	300±30	310±28	-1
Azulejo rojo	AR	420±42	430±35	-3
Azulejo blanco	AB	440±44	420±36	5
Ladrillo blanco	LB	320±32	340±42	6
Teja blanca	TJ	420±42	410±62	3
Vajilla de porcelana	VP	400±40	430±30	8

Tabla 11: Calor de reacción total necesario para cada tipo de composición cerámica

Esta información es de especial relevancia a la hora de desarrollar un horno lo más eficiente posible, ya que se debería buscar un aporte suficiente, pero no excesivo, de potencia para poder llevar a cabo todas estas reacciones.

Para calcular la energía mínima necesaria para llevar a cabo la cocción, es necesario añadir a los cálculos la energía necesaria para alcanzar la temperatura máxima. Considerando que la capacidad calorífica media del gres porcelánico es de 1 KJ/(kg·K), que la temperatura inicial son 40°C y la final es 1190°C, se obtiene la energía necesaria:

$$Q \left(\frac{kJ}{kg} \right) = Cp * \Delta T$$

$$Q = 1 * (1190 - 40) = 1150 \frac{kJ}{kg}$$

Por ello la energía final necesaria es la suma de la energía necesaria para cada transformación y para alcanzar la temperatura máxima, es decir, 1.453 kJ/kg o 1.395 kJ/kg cocido, equivalentes a 387,5 kWh/t.

Si se considera un horno de 4.500 kg/h, el aporte de potencia necesario sería de 1.74 MW de potencia, sin embargo, la mayoría de los hornos de hoy en día aportan 4 MW (Salvador Ferrer Castán, 2022). Hay una gran diferencia entre lo necesario y lo aplicado, por lo que es realmente necesario introducir cambios en la tecnología para aproximar el consumo de energía al necesario, aumentando la eficiencia del proceso.

4.4 FRITAS

Como se ha explicado anteriormente, el proceso de fabricación de las fritas es muy intensivo en energía, debido mayoritariamente a las altas temperaturas que se necesitan para fundir los materiales y obtener así la frita. La energía térmica en esta etapa se consigue fundamentalmente por la combustión de gas natural. En el año 2023, el consumo energético en el sector de fritas (ANFFECC, 2025) ascendió a 1,1 TWh/año y las emisiones totales verificadas de dióxido de carbono a nivel sectorial en ese año fueron de 571.499 toneladas de CO₂.

Las temperaturas necesarias para fundir los materiales rondan los 1300°C y 1500°C y los ciclos de fusión duran entre 30 y 60 minutos. Eso se consigue mediante hornos continuos de fusión con gas natural como combustible. Hay dos tecnologías, la combustión por gas-aire y la oxicomustión con un consumo de alrededor de 1900kWh/t (Información enviada personalmente por ASCER), siendo esta última la tecnología más implantada en el sector.

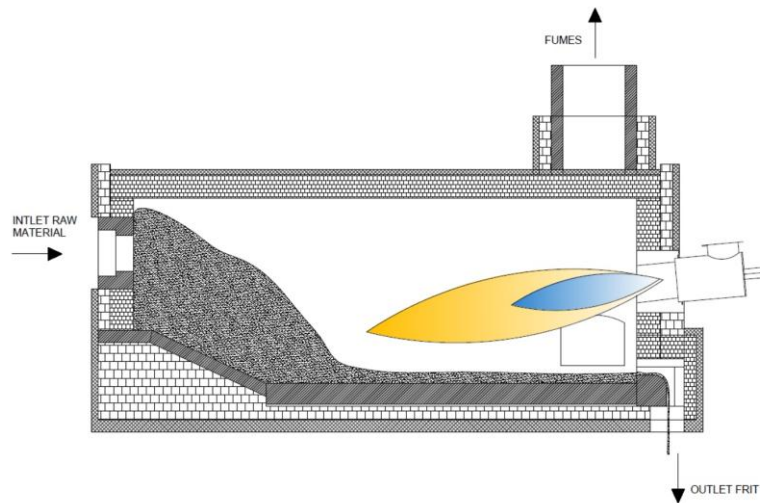


Figura 21: Horno de fusión de frita cerámica (INGENEO, 2025)

La mezcla de materias primas se introduce al horno por la izquierda donde entra en contacto con los gases a altas temperaturas. En este proceso se dan las reacciones necesarias para fundir estas materias, que, al finalizar, fluye al otro extremo de horno gracias a la acción de la gravedad. Al salir del horno es esencial un rápido enfriamiento de esta para formar el material vítreo.

Como conclusión la industria de las fritas se sitúa en España con un consumo específico de 1924 kWh/t, y unas emisiones específicas de 375 kg CO₂/t.

4.5 RESUMEN DE CONSUMOS Y EMISIONES

A continuación, se presenta una tabla con los distintos factores más importantes para tener en cuenta a la hora de analizar los consumos energéticos del proceso de fabricación de las baldosas.

Los resultados de la tabla se han obtenido de la siguiente manera:

Lo primero de todo necesitamos la producción de baldosas en 2023: 394 Mm² (Anon., 2024). Para poder hacer los cálculos hay que convertir este valor a toneladas, ya que los datos de

consumos y emisiones vienen datos por tonelada de producto. El peso índice medio de los azulejos y pavimentos cerámicos es de 22kg/m² (IAG, 2023), por lo que la producción total en se estima que fue de 8.668.000 toneladas de producto.

Por otra parte, los datos existentes sobre los consumos en las etapas de atomizado y secado se dan en kWh/t ss, que como se ha explicado antes, son consumos en función de las toneladas de procesada, las cuales tienen un porcentaje de humedad. Es necesario transformar estos valores a kWh/t producto final para realizar los cálculos de manera adecuada.

En el caso de la atomización, el polvo atomizado tiene un 6% de humedad, por lo que el 94% es sustancia seca:

$$\text{Consumo atomizado} = \frac{476}{0,94} = 506,38 \frac{kWh}{t \text{ final}}$$

En el caso del secado, la humedad del producto seco es de aproximadamente el 1%, por lo que el consumo en función del producto final sería:

$$\text{Consumo secado} = \frac{125}{0,99} = 126,26 \frac{kWh}{t \text{ final}}$$

Etapa	Consumo específico (kWh/t)	Producción 2023 (Mm2)	Producción 2023 (t)	Consumo total (TWh)	% del consumo total	Emisiones específicas (kg CO ₂ /t)	Emisiones totales (t CO ₂)	% de las emisiones totales
Atomizado	506,38	394,00	8.668.000	4,39	32,64	86,00	745.448	30,53
Secado	126,26	394,00	8.668.000	1,09	8,14	21,00	182.028	7,45
Cocción	792,00	394,00	8.668.000	6,87	51,05	150,00	1.300.200	53,25
Fritas	1.924,93		571.449	1,10	8,18	374,66	214.101	8,77
Total				13,45	100,00		2.441.777	100,00

Tabla 12: Consumos y emisiones del sector

Está claro que la cocción de las baldosas es el principal consumidor, con más del 50% de la energía total, y el principal contaminante con casi un 55% de emisiones respecto al total.

A continuación, se hará un análisis técnico y económico de las diferentes opciones de descarbonización y su implementación en la industria.

Capítulo 5. ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS OPCIONES DE DESCARBONIZACIÓN

En la fabricación de baldosas cerámicas, las etapas térmicas (atomización, secado, cocción y fusión de fritas) son responsables de casi la totalidad de las emisiones directas de CO₂. Aproximadamente el 32% de las emisiones provienen de la atomización, 8% del proceso de secado, otro 7% de la fabricación de fritas, y aproximadamente un 55% provienen de la fase de cocción. Para alcanzar los objetivos de descarbonización, será necesario un cambio tecnológico profundo en estas etapas intensivas en energía mediante la electrificación (uso de calor eléctrico renovable), sustituyendo el gas por combustibles renovables (biometano, hidrógeno verde), captura de CO₂, y mejoras de eficiencia energética. A continuación, se analizan las principales opciones emergentes por proceso, detallando aspectos como su principio de funcionamiento, requisitos técnicos, compatibilidad con las plantas actuales, eficiencia energética o impacto en CO₂.

5.1 ANÁLISIS TÉCNICO

5.1.1 MEJORA DE EFICIENCIA Y RECUPERACIÓN DE CALOR

En el proceso de fabricación cerámica, una parte significativa del consumo energético se destina a la cocción y al atomizado de los productos. Ambos procesos generan corrientes de gases residuales con alto contenido energético que, si se gestionan adecuadamente, pueden ser reutilizados para mejorar la eficiencia del sistema productivo.

Los hornos cerámicos generan dos flujos principales de calor residual: los gases de combustión y los gases de enfriamiento. Estos últimos, al tratarse de aire ambiente calentado por intercambio térmico con las piezas cerámicas, están prácticamente libres de

contaminantes, lo que los convierte en una fuente ideal de calor para ser reutilizada directamente en procesos como el secado por atomización o el precalentamiento del aire en los quemadores del propio horno. Esta reutilización no solo reduce el consumo de gas natural, sino que además no requiere intercambiadores de calor, simplificando la instalación.

En cambio, la recuperación del calor contenido en los gases de combustión es mucho más compleja. Aunque su potencial energético es elevado, estos gases pueden contener compuestos corrosivos como HF, HCl o SO_x. Cuando la temperatura de estos gases desciende por debajo del punto de rocío, dichos compuestos se condensan, lo que puede causar una corrosión severa en conductos e intercambiadores. Por esta razón, muchas instalaciones evitan su recuperación directa, diluyendo los gases antes de su evacuación para reducir su temperatura y proteger los ventiladores de extracción.

No obstante, existen estrategias que permiten aprovechar parte del calor de la chimenea de combustión sin incurrir en estos riesgos. Una opción es el intercambio indirecto mediante intercambiadores de calor específicos que transfieren energía térmica a un fluido secundario (como aire ambiente o aceite térmico). Este sistema, además de evitar el contacto directo con los humos corrosivos, permite transportar el calor recuperado a otras zonas de la planta con mayor flexibilidad. En el caso del uso de aire como fluido intermedio, hay que tener en cuenta las limitaciones de presión y caudal en equipos como los secaderos, mientras que con aceites térmicos estas limitaciones son mucho menores.

Entre las tecnologías más prometedoras se encuentran los intercambiadores de calor basados en tubos poliméricos, más resistentes a la corrosión que los convencionales de acero, y los sistemas HPHE (Heat Pipe Heat Exchanger). Esta última tecnología ha sido validada en diversos proyectos europeos (como DREAM, SMARTREC (Smartrec, 2025) o ETEKINA (ETEKINA, 2025)), demostrando una alta eficiencia térmica (entre 45% y 65%) y tiempos de retorno muy competitivos, incluso en aplicaciones piloto dentro de hornos de cocción de baldosas.



Figura 23: HPHE utilizado en el proyecto DREAM



Figura 22: Intercambiador de calor polimérico

En definitiva, mientras que el calor residual de los gases de enfriamiento ya se utiliza con bastante frecuencia en la industria cerámica, todavía existe un amplio margen de mejora en la recuperación del calor de los gases de combustión. La clave para avanzar en esta dirección pasa por el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías resistentes a la corrosión, con mayor eficiencia térmica y adaptadas a las condiciones específicas de cada planta.

Es interesante también estudiar la recuperación de los gases de salida del atomizador. Como se ha mencionado previamente, estos gases de salida están entre los 100°C y 200°C, convirtiéndose en una posible fuente de recuperación para utilizar en los posteriores procesos de secado, los cuales necesitan temperaturas que rondan los 200°C. Hoy en día no existen estudios que analicen la posibilidad de utilizar los gases de salida del atomizador, pero sin duda es una opción a evaluar y tener en cuenta.

Con respecto a la etapa del secado, los gases de salida se encuentran a muy baja temperatura y no hay datos ni estudios que estudien la rentabilidad de recuperar ese calor.

5.1.2 BIOMETANO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO

El biometano se obtiene a partir de un proceso de upgrading del biogás que es el gas obtenido a partir de la descomposición biológica controlada de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (CIRCE, 2021). Esta depuración consiste básicamente en eliminar el CO₂ de la composición y conseguir así un producto con un porcentaje en metano superior al 96 %, por lo que se obtiene una composición similar a la del gas natural.

Dado que el biometano es básicamente CH₄ purificado (obtenido de biogás por digestión anaerobia), no requiere modificaciones en los quemadores ni en la instalación para su uso. Esto lo hace inmediatamente compatible con los equipos industriales actuales y, a corto plazo, es la forma más sencilla de descarbonizar parcialmente los procesos de atomización, secado, cocción, y fabricación de fritas.

Con respecto a la reducción de emisiones debido al uso del metano, el porcentaje de biometano incluido en la mezcla del combustible es el porcentaje de emisiones que se reduciría, ie. 50% de biometano en combustible – 50% de reducción de emisiones de combustión.

En cuanto al consumo energético, el biometano presenta un PCS (Poder Calorífico Superior) idéntico al del gas natural, por lo que los consumos específicos (kWh/t) se mantienen iguales.

El desafío radical del uso del biometano es su escasez actual tanto en España como en Europa, aunque haya algunos países como Francia que dispongan de grandes cantidades. En la actualidad hay pocas plantas en España de generación de biometano para su inyección en la red de gas natural. Hay un ejemplo de planta de biometano en Madrid, situada en Valdemingómez, esta inyecta una cantidad aproximada de 9,3 millones de Nm³/año de biometano a la red de gas natural. Teniendo en cuenta un consumo anual en el sector cerámico de 1.140 millones de Nm³/año, esta planta representa solamente el 0,8% del gas que consume el sector cerámico. Hay proyectos previstos (RETEMA, 2022) para aumentar la cantidad de biometano inyectado a la red en España, pero la realidad es que se trata de un

combustible que requiere de grandes cantidades de residuos orgánicos, y serían necesarias muchas plantas de tratamiento de estos residuos para que su producción pueda alcanzar valores significativos y cubrir la demanda del sector.

Sin embargo, hay visiones más optimistas, como la que expresa Jose Ignacio Linares en su estudio sobre el potencial del biometano en España (Linares, 2025). En los dos últimos años, España ha conseguido duplicar su parque de plantas de biometano, pasando de cinco a once instalaciones operativas y elevando la producción efectiva hasta unos 252 GWh anuales (455 GWh de capacidad instalada). Este primer salto refleja un cambio de ritmo claro: la cartera firme ya incluye 22 plantas en construcción, con una generación prevista de 1,15 TWh/año, y 79 proyectos en fase de tramitación que añadirían más de 3,2 TWh/año adicionales una vez entren en servicio. Si todo el pipeline actual se conecta antes de 2028, la capacidad nacional superará los 5 TWh anuales, cubriendo de facto una cuarta parte del objetivo que marca el PNIEC para 2030 y sentando las bases para alcanzar la meta REPowerEU de 45 TWh.

A pesar de este crecimiento acelerado, la oferta potencial sigue siendo muy superior: los estudios de Sedigás (Sedigás, 2023) estiman un potencial máximo en 163 TWh/año, de los que un escenario realista sin cultivos intermedios –aún poco extendidos– rondaría 116 TWh/año, lo que representa aproximadamente un 37% de la demanda de gas natural actual en España (311,7 TWh) (ENAGÁS, 2025).

5.1.3 H₂ VERDE COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO

El hidrógeno (H₂) es el elemento químico más abundante del universo, aunque no se encuentra de manera libre en la naturaleza, sino combinado en moléculas como el agua (H₂O) o en hidrocarburos (por ejemplo, en el gas natural). Para su obtención en estado puro, se requiere un aporte energético que, dependiendo de la fuente y el proceso utilizado, conllevará emisiones de dióxido de carbono (CO₂) más o menos significativas. Por este motivo, el hidrógeno se considera un vector energético (Ministerio para la Transición Ecológica y el

Reto Demográfico (MITERD), 2020) y no una fuente primaria de energía, ya que su producción exige energía externa y su principal función es la de almacenar y transportar esa energía para su posterior uso.

Este escenario podría cambiar debido al reciente descubrimiento del Hidrógeno dorado (Valdehita, 2024), un nuevo tipo de hidrógeno que sí que se encuentra de manera libre en la naturaleza y que se considera como una nueva fuente primaria de energía.

La relevancia creciente del hidrógeno se debe, en gran parte, a su potencial para descarbonizar sectores industriales que son difíciles de electrificar. La clasificación del hidrógeno depende de las emisiones de CO₂ asociadas a su obtención. Desde la perspectiva de la descarbonización, el hidrógeno verde, o el dorado si lo hubiera, es el único con verdadero potencial para reducir drásticamente las emisiones. Este se produce, principalmente, mediante electrólisis del agua usando electricidad de origen renovable.

Existen otros tipos de hidrógenos que pueden ser considerados como soluciones para la descarbonización, como el hidrógeno azul o el rosa. El H₂ azul se obtiene a partir de gas natural (metano), mediante un proceso conocido como “reformado de gas natural (metano) con vapor (SMR)” (Inycom Energy, 2025). Este proceso emite CO₂, pero incluye sistemas de captura de carbono, por lo que a veces es considerado como opción para descarbonizar. Por otra parte, el H₂ rosa se obtiene de la misma manera que el H₂ verde, pero con energía nuclear en vez de energía renovable.

En el caso de la cerámica, el hidrógeno podría utilizarse como combustible en los procesos donde en la actualidad se utilice gas natural, pero para estudiar su viabilidad técnica, es necesario hacer una comparativa de las características del hidrógeno frente al gas natural. A continuación, se muestra una tabla extraída del ITC (Salvador Ferrer Castán, 2022) con la comparativa de ambos gases:

Parámetros	Hidrógeno	Gas natural
Composición considerada	100 % H ₂ (Hidrógeno)	90 % CH ₄ (Metano) 7,5 % C ₂ H ₆ (Etano) 1,5 % C ₃ H ₈ (Propano) 0,4 % C ₄ H ₁₀ (Butano) 0,6 % N ₂ (Nitrógeno)
PCS (kWh/Nm ³)	3,543	11,783
PCI (kWh/Nm ³)	2,997	10,617
Aire teórico (Nm ³ aire/Nm ³ combustible)	2,38	9,52
Densidad gas (kg/Nm ³)	0,0899	0,7955
Densidad relativa al aire (kg/Nm ³)	0,0695	0,6167
Coeficiente de difusión molecular (cm ² /s)	0,61	0,16
Rango de inflamabilidad (% vol.)	4-75 (Aire)	5-15 (Aire)
	4-94 (Oxígeno)	5-61 (Oxígeno)
Velocidad laminar de llama (cm/s)	270 (Aire)	35 (Aire)
	890 (Oxígeno)	330 (Oxígeno)
T adiabática de llama (°C)	2.045 (Aire)	1.875 (Aire)
	2.805 (Oxígeno)	2.780 (Oxígeno)
Visibilidad de la llama	No	Si
Índice de Wobbe (kWh/Nm ³)	48,357	54,158

Tabla 13: Principales características del gas natural y del hidrógeno

Tras estudiar y comparar estos datos, se han llegado a las siguientes conclusiones:

El hidrógeno presenta un poder calorífico por unidad de volumen aproximadamente 3,5 veces menor que el del gas natural, por lo que se requiere un volumen mayor para generar la misma cantidad de energía. Esto implica adaptar tuberías, válvulas y quemadores en cualquier instalación que pretenda usarlo como combustible. Además, es 14,5 veces más ligero que el aire y se difunde hasta 4 veces más rápido que el metano, lo cual favorece su rápida dispersión en espacios abiertos y reduce el riesgo de explosión en caso de fugas; sin embargo, su tendencia a fugarse a través de uniones, roscas y soldaduras exige sistemas de sellado y detección específicos.

Por otra parte, el hidrógeno posee rangos de inflamabilidad y explosión en aire muy amplios (4-75 % en volumen), superiores a los del gas natural; pese a ello, su baja densidad y alta

fugacidad pueden mitigar parcialmente este riesgo en ciertos escenarios. Un aspecto destacable es que su combustión no genera CO₂, sino principalmente vapor de agua (H₂O) (E&M Combustión, s.f.). No obstante, su temperatura adiabática de llama (2.045 °C) es algo mayor que la del gas natural (1.875 °C), lo que puede favorecer la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x) si no se controlan adecuadamente las condiciones de combustión.

Asimismo, la llama de hidrógeno es prácticamente invisible, lo cual dificulta su detección por medios convencionales y exige detectores de llama y sistemas de seguridad adicionales. Por último, diversos estudios indican que mezclar hidrógeno con gas natural en proporciones de hasta un 15-20 % (en volumen) permite su uso en infraestructuras existentes sin cambios significativos. Sin embargo, para porcentajes superiores se requieren modificaciones o rediseños tanto en quemadores como en equipos de combustión.

Para entender mejor las diferencias que presenta en hidrógeno con respecto al gas natural se ha desarrollado una tabla con las ventajas y desventajas que supondría el remplazo del gas natural con hidrógeno verde:

Ventajas	Desventajas
Reducción de emisiones de CO ₂ al reemplazar total o parcialmente el gas natural.	Mayor volumen necesario para generar la misma cantidad de energía (su poder calorífico volumétrico es menor).
Combustión limpia, generando fundamentalmente vapor de agua (H ₂ O).	Formación potencial de NO _x más elevada, debido a la mayor temperatura adiabática de la llama.
Se puede mezclar con gas natural (hasta un 15-20 % en volumen) sin grandes modificaciones.	Necesidad de rediseñar instalaciones y quemadores para porcentajes altos o uso 100 % de hidrógeno.
Rápida dispersión en caso de fuga al ser muy ligero, reduciendo riesgos en espacios abiertos.	Fugas más probables: su menor densidad y alta fugacidad exigen sistemas de sellado y detección específicos.

Amplio rango de inflamabilidad, que puede aportar estabilidad a la llama en ciertas condiciones.	Amplio rango de explosividad (4-75 % en aire), requiriendo medidas de seguridad adicionales, especialmente en recintos cerrados.
	Llama prácticamente invisible por lo que se necesitan detectores de llama y sistemas de seguridad avanzados.

Tabla 14: Ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible

Hidrógeno en las etapas de atomización, secado y cocción

Actualmente, no existen estudios específicos sobre el uso del hidrógeno como combustible en las etapas de atomización y secado dentro de la industria cerámica. Sin embargo, desde el punto de vista técnico, su integración en estos procesos es viable, especialmente mediante su mezcla con gas natural en proporciones de hasta un 20 % en volumen. Esta opción permite una implantación progresiva sin requerir modificaciones sustanciales en los sistemas existentes. Para un uso exclusivo o mayoritario de hidrógeno, en cambio, sí se requieren adaptaciones importantes en los quemadores, debido a las propiedades particulares del hidrógeno, como su menor densidad energética volumétrica, mayor velocidad de combustión y amplio rango de inflamabilidad.

La situación es distinta en la etapa de cocción, donde sí se han llevado a cabo estudios y proyectos piloto con resultados prometedores. En 2023, por ejemplo, la empresa SACMI realizó la primera cocción experimental de baldosas utilizando hidrógeno puro (100 % H₂) en su horno piloto de laboratorio (Cofindustria ceramica, 2024). Asimismo, el fabricante SITI/B&T desarrolló un horno industrial piloto, TitaniumH2, diseñado para operar con hasta un 60 % de hidrógeno. Esta tecnología fue probada con éxito en la planta de Revigrés (Portugal), donde el hidrógeno se generó in situ mediante electrolizadores alimentados con energía solar, demostrando así la viabilidad técnica de integrar hidrógeno verde en un entorno industrial real (Cofindustria ceramica, 2024).

Los primeros resultados indican que, incluso con mezclas elevadas (hasta el 60 % de H₂), no se observaron alteraciones significativas en la calidad del producto cocido, al tiempo que se logró una reducción proporcional de las emisiones de CO₂ en función del porcentaje de sustitución del gas natural.

No obstante, uno de los principales desafíos asociados al uso del hidrógeno en procesos térmicos cerámicos es la necesidad de adaptar los quemadores, ya que no existen actualmente modelos comerciales específicamente diseñados para su aplicación directa en hornos de baldosas (Salvador Ferrer Castán, 2022). Las propiedades del hidrógeno; como su mayor índice de llama, una velocidad de combustión hasta 10 veces superior a la del metano, y una mayor producción de vapor de agua; implican cambios técnicos relevantes que afectan tanto al diseño del quemador como al control del proceso térmico. Esto conlleva a la necesidad de modificar las instalaciones actuales para poder acomodar un caudal de gases 3,5 veces mayor.

Hidrógeno en la fabricación de fritas

Dada la similitud entre los procesos térmicos de la industria del vidrio y los de la fabricación de fritas cerámicas, el uso del hidrógeno como sustituto del gas natural en estos hornos representa una alternativa técnicamente viable. En 2024, la Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores Cerámicos (ANFFECC) puso en marcha el proyecto H₂Frit, que contempla la instalación y operación de un horno piloto adaptado al uso de hidrógeno como combustible principal en la fusión de fritas (Clúster Andaluz del Hidrógeno, 2024).

Los primeros ensayos fueron exitosos, logrando utilizar una mezcla con hasta un 100 % de hidrógeno en el proceso de combustión sin que se observaran alteraciones ni en la eficiencia del proceso de fusión ni en la calidad del vidrio obtenido (ANFFECC, 2024). Los análisis realizados sobre las fritas producidas indicaron que los vidriados derivados de estas no presentaban diferencias significativas respecto a los obtenidos con combustibles fósiles, lo que valida la viabilidad técnica del hidrógeno para esta aplicación (ANFFECC, 2024).

Desde el punto de vista técnico, el horno piloto funcionó con una configuración de oxidación (utilizando oxígeno en lugar de aire) (Ortega, 2024). Esta estrategia no solo evita la presencia de nitrógeno en los gases de combustión, sino que también facilitaría la captura del CO₂ de proceso originado por la descomposición de carbonatos, que es independiente del tipo de combustible utilizado.

En cuanto al grado de madurez tecnológica, esta tecnología se encuentra actualmente en un nivel TRL 7, es decir, en fase de demostración a escala piloto en un entorno relevante. Si los resultados preliminares se consolidan, se espera que hacia 2030 puedan instalarse hornos industriales de H₂ o plenamente adaptados al hidrógeno en plantas de producción de gran escala, siempre que se garantice el suministro de este vector energético.

Desde la perspectiva ambiental, el uso exclusivo de hidrógeno permitiría eliminar entre un 60 % y un 70 % de las emisiones totales de CO₂ asociadas al proceso de fusión de fritas, dado que estas corresponden mayoritariamente a la combustión del gas natural. Las emisiones restantes, procedentes del CO₂ de proceso (liberado por los carbonatos presentes en las materias primas), podrían ser abordadas mediante tecnologías de captura de carbono o medidas de compensación.

5.1.4 ELECTRIFICACIÓN

5.1.4.1 Atomización

La etapa de **atomización** consiste en pulverizar y secar con aire caliente la barbotina (mezcla acuosa de arcillas) para obtener polvo granulado. Es un proceso de alta temperatura (entrada de aire ~450-600 °C) y muy intensivo en energía: un solo atomizador industrial típico requiere entre 1 y 40 MW térmicos y opera casi continuamente (S. Casadio, 2024). Históricamente se alimenta con quemadores de gas natural, representando ~32% de las emisiones directas del proceso cerámico. Ante esto, es evidente que hace falta una descarbonización de este proceso; por ello en este apartado se estudiarán las dos principales

opciones de electrificación de los atomizadores: el atomizador eléctrico y el cambio de vía húmeda a vía seca.

5.1.4.1.1 Atomizador eléctrico

Una opción prometedora es sustituir los quemadores de gas por resistencias eléctricas que calientan el aire de entrada del atomizador. Empresas como SACMI (Italia) han desarrollado atomizadores híbridos capaces de funcionar con aporte eléctrico variable de 0% hasta 100% (totalmente eléctrico). En el congreso de Qualicer de 2024 se presentó este trabajo (S. Casadio, 2024), en el cual se estudian 3 tipos de funcionamiento: 100% gas natural, 30% energía eléctrica, y 100% energía eléctrica.

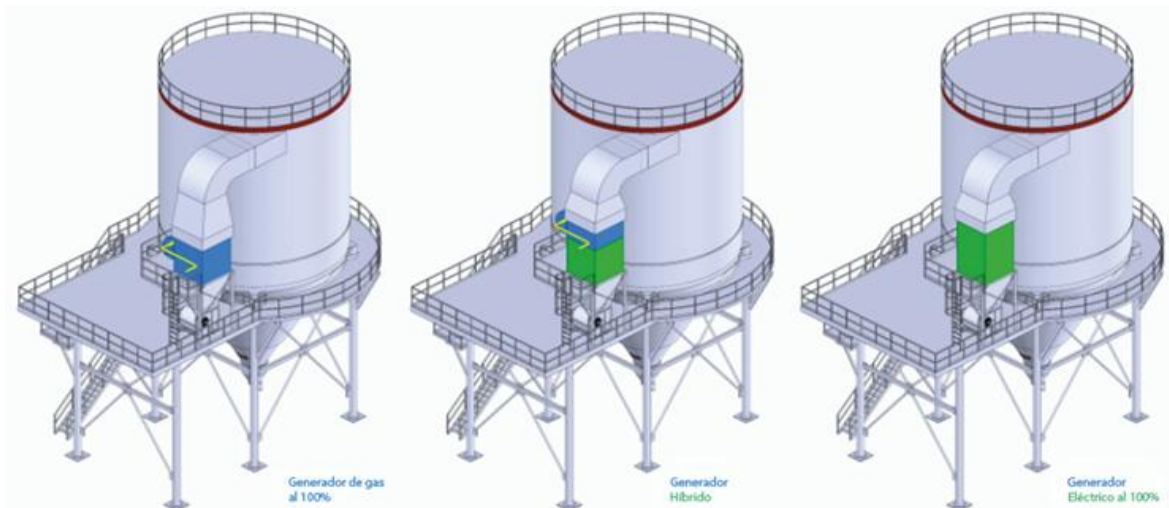


Figura 24: Diferentes configuraciones de un atomizador híbrido

Este enfoque modular incorpora bancos de resistencias en los módulos de aire del atomizador. Esto permite que la incorporación de resistencias se pueda aplicar tanto a atomizadores nuevos como existentes, garantizando en ambos casos una inalterada productividad y calidad de las baldosas y placas cerámicas obtenidas de esta manera. Una de las principales ventajas de este atomizador híbrido es que el porcentaje de energía eléctrica se puede ajustar de manera automática en función de la energía renovable disponible en cada momento (Cofindustria ceramica, 2024).

El informe de Qualicer incluye una tabla en la que se comparan las principales características y prestaciones del atomizador híbrido en cada una de las configuraciones estudiadas.

Tipo de generador		Full carbon (Carbono total)	Hybrid (Híbrido)	Full electric (Eléctrico total)
Cuota de la parte eléctrica	%	0	30	100
Potencia nominal total	kW	8.720	8.720	8.720
Potencia nominal quemador de gas	kW	8.720	6.100	0
Potencia nominal resistencias eléctricas	kW	0	2.620	8.720
Caudal aire ambiente	kg/h	63.300	63.300	63.300
Temperatura de trabajo	°C	550	550	550
Producción de polvo (*)	kg/h	21.200	21.200	21.200
Potencia utilizada total	kW	7.850	7.850	7.850
Coeficiente de carga térmica	%	90	90	90
Potencia utilizada quemador de gas	kW	7.850	5.230	0
Emisión de CO ₂ (**)	t/año	11.460	7.630	0
(*) con humedad de barbotina 34% y humedad a la salida 6%				
(**) considerando 7.000 horas de trabajo/año				

Tabla 15: Principales características de cada configuración

A partir del análisis de los datos presentados en la tabla, se observa que la integración de fuentes de energía renovable resulta plenamente compatible con el proceso de atomización, dado que tanto la temperatura de trabajo como el caudal de aire ambiente se mantienen constantes en todos los escenarios considerados.

En una configuración completamente electrificada, se logra la eliminación total del consumo de gas natural, remplazándose por el mismo consumo eléctrico, y, en consecuencia, eliminando el 100% emisiones asociadas de CO₂, alcanzando así la neutralidad en términos de emisiones directas. °

La tecnología asociada a los atomizadores híbridos eléctricos se encuentra en una fase demostrativa avanzada (TRL 7-8), con prototipos actualmente en operación y patentes ya registradas.

Además de su potencial para eliminar completamente las emisiones de CO₂, estos equipos presentan una eficiencia energética, cercana al 98%, bastante superior con respecto al 60-70% del atomizador tradicional, al permitir una transmisión prácticamente íntegra de la energía eléctrica al aire de proceso, sin pérdidas asociadas a la combustión. Asimismo, su diseño mantiene la compatibilidad con sistemas de recuperación de calor ya existentes.

No obstante, una de las principales barreras para su implementación es la elevada demanda de potencia eléctrica. Un atomizador de gran capacidad puede requerir potencias del orden de varias decenas de megavatios (por ejemplo, 8,72 MW en el caso analizado), lo que implica la necesidad de reforzar y adaptar las infraestructuras eléctricas de las plantas.

5.1.4.1.2 Vía seca y granulación avanzada

Como se ha mencionado al principio de este estudio, el proceso más utilizado en la fabricación de los soportes de baldosas cerámicas en Europa es el denominado “vía húmeda”, que consiste en la molienda con agua de la mezcla de materias primas y el secado por atomización de la suspensión para obtener un granulado esférico. Otra solución para descarbonizar esta etapa es eliminar el proceso de vía húmeda e implementando el proceso de vía seca, evitando la evaporación de agua mediante molienda en seco de las materias primas y posterior granulación del polvo seco. Esta tecnología de *granulación sostenible* reduce drásticamente el consumo energético y las emisiones al suprimir la etapa de atomización convencional.

Se han realizado estudios (F.J, 2012) para evaluar las características de los gránulos obtenidos por un proceso de vía seca, eliminando el posterior secado por atomización. Los resultados de estos estudios presentan unos gránulos obtenidos por vía seca con unas características muy similares a las de los gránulos obtenidos por vía húmeda. Las principales diferencias son: una densidad superior al granulado obtenido por atomización; una granulometría algo mayor; y una mayor compacidad. Por otra parte, presentan una fluidez idéntica, una distribución aparente muy homogénea y valores muy similares de resistencia mecánica.

Las principales características están representadas en la siguiente tabla, siendo AT el proceso por atomización y GR el proceso de granulación por vía seca:

Composición	AT	GR
Humedad (%)	6,0	6,0
Presión (kg/cm ²)	275	275
Densidad aparente en seco media (g/cm ³)	1,96	2,09
Resistencia mecánica en seco (kg/cm ²)	22	23
Temperatura (°C)	1195	1195
Ciclo (min)	60	60
Densidad aparente en cocido (g/cm ³)	2,37	2,40
Contracción lineal (%)	7,0	5,7
Absorción de agua (%)	<0,1	0,4
Resistencia mecánica (kg/cm ²)	460±12	510±15

Tabla 16: Características del granulado por ambas vías (García-Ten, 2012)

La principal ventaja de esta tecnología es la reducción de consumo de agua, térmico y de emisiones de CO₂ en comparación con el tradicional método de vía húmeda. En la siguiente tabla (A. Mezquita, 2017) se puede ver el ahorro del consumo hídrico y de energía en este proceso:

Parameters	Process		Difference (W-D)/W (%)
	Wet (W)	Dry (D)	
Water consumption (m ³ /Mg d.s.)	0.47–0.59	0.12–0.16	74%
Electrical energy consumption (kWh/Mg d.s.)	50–54	31–35	36%
Thermal energy consumption (kWh/Mg d.s.)	442–462	88–108	78%
CO ₂ direct emissions (kg CO ₂ /Mg d.s.)	80–84	16–20	

Tabla 17: Comparativa de consumos entre los procesos vía seca y vía húmeda

En general, se aprecia una reducción significativa en el consumo de agua y en el consumo de energía térmica, puesto que el procesado vía seca con granulación avanzada requiere una etapa de secado posterior a la granulación, aunque la demanda térmica de este secado es muy inferior a la del proceso de secado por atomización, ya que la cantidad de agua a eliminar es sensiblemente menor.

Sin embargo, y a pesar de los avances técnicos logrados, para los productos de muy baja porosidad en cocido la preparación de las composiciones del soporte por procesos vía seca presenta mayores dificultades técnicas. Por tanto, será la tipología de producto fabricado y los requerimientos de calidad exigidos los parámetros que determinarán cuál es el proceso de preparación de las materias primas más adecuado en cada caso. (Salvador Ferrer Castán, 2022)

5.1.4.2 Secado

Tras la conformación (prensado o extrusión), las piezas cerámicas crudas contienen humedad que debe eliminarse antes de la cocción. El secadero suele ser un túnel o cámara donde circula aire caliente (~150-250 °C) que evapora el agua de las piezas. Actualmente, el calor proviene de quemadores de gas directos o indirectos, muchas veces usando el aire caliente recuperado del enfriamiento de los hornos (este aire limpio ~200 °C cubre buena parte de la demanda térmica del secadero). Un estudio presentado en 2012 por Qualicer (A. Mezquita, 2012) muestra cómo se pueden recuperar estos gases y utilizarlos en el secado de baldosas, reduciendo entre el 60% y 90% del consumo de gas natural.

Aunque el secado consume menos energía que la atomización o la cocción, sigue representando una proporción notable del consumo térmico total. En este apartado se presentarán las posibilidades de electrificación del proceso de secado, como el uso de bombas de calor, microondas, infrarrojos o resistencias eléctricas.

5.1.4.2.1 Secado eléctrico por bombas de calor de alta temperatura

Una de las opciones que se estudian para descarbonizar el proceso de secado es el uso de bombas de calor a alta temperatura. La principal razón es que estas bombas permitirían recuperar calor industrial a baja temperatura (60°C-120°C), aumentar la temperatura con energía eléctrica (compresor), y reutilizarlo en otros procesos. El uso de energía eléctrica descarbonizada en el compresor es lo que califica esta medida como generador renovable.

El funcionamiento de una bomba de calor es un circuito cerrado por el que circula un fluido refrigerante, uno de los componentes más importantes del proceso. Este líquido comienza en estado de líquido a baja temperatura, y al ponerse en contacto con el calor residual (a través de un evaporador), este se evapora y genera vapor a baja temperatura. Este vapor entra en el compresor, accionado con energía eléctrica, y aumenta considerablemente su temperatura. Este vapor a alta temperatura se pone en contacto, a través de un condensador, con el fluido que queremos calentar y le transfiere su calor aumentando su temperatura. El fluido refrigerante se condensa y se hace pasar por una válvula de expansión para obtener, de nuevo, líquido a baja temperatura. A continuación, se muestra un esquema de funcionamiento de una bomba de calor (Boer, 2020).

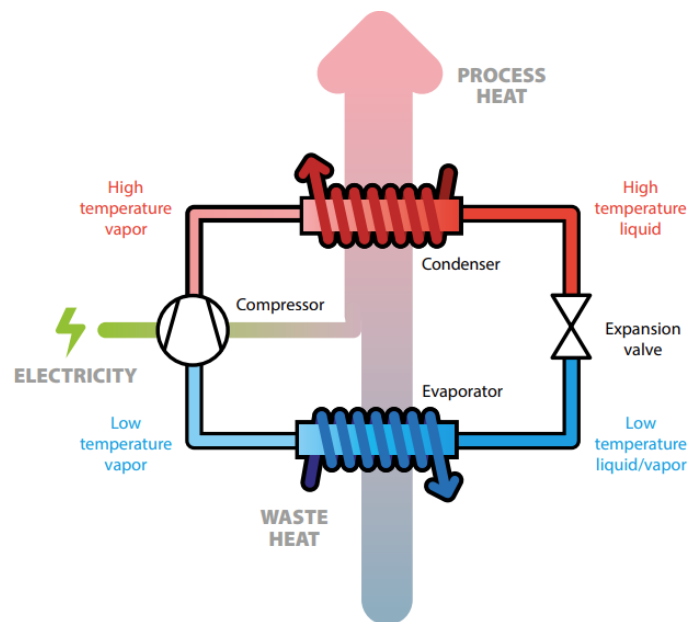


Figura 25: Esquema funcionamiento bomba de calor

Debido a que estos equipos entregan en forma de calor un múltiplo de la cantidad de electricidad consumida, su aplicación hace que aumente significativamente la eficiencia energética de los procesos, desplazando el consumo térmico a eléctrico.

La relación entre el calor suministrado (Q_d) y la entrada de electricidad (W) se conoce como el coeficiente de rendimiento (COP por sus siglas en inglés, “coefficient of performance”) y

es un parámetro importante que caracteriza la eficiencia de la bomba de calor. Este valor normalmente está en el rango de 2 a 6, dependiendo de las temperaturas del calor residual y del proceso (Salvador Ferrer Castán, 2022).

$$COP = \frac{Qd}{W}$$

El principal mercado de estas bombas de calor es para aquellos procesos que operan a temperaturas inferiores a 200°. La tecnología actual de bombas de calor permite conseguir temperaturas de hasta los 100°, pero en procesos con necesidades entre los 100°C y los 200°C (el secado) todavía existen retos tecnológicos para cubrir las necesidades del mercado.

En el caso de la cerámica las bombas de calor se podrían aplicar a este proceso de secado, ya que las temperaturas necesarias rondan los 150°C-200°C. En este contexto se plantean dos opciones para recuperar el calor y utilizarlo en este procesos (Qualicer, 2022):

1. Valorizar el calor residual procedente de la chimenea del secadero, que generalmente se encuentra a una temperatura alrededor de 100 °C, conducirlo a una bomba de calor, aumentar su valor energético y utilizarlo para precalentar el aire aportado en los quemadores del secadero, reduciendo de este modo el consumo de gas natural en los mismos, o si es posible, mediante un intercambiador de calor, precalentar el aire de renovación del secadero.
2. Analizar las posibilidades de sustituir los quemadores existentes en las recirculaciones del secadero, y que el salto térmico necesario para calentar los gases recirculados sea generado por la bomba de calor. Para tal fin, se debería estudiar alguna fuente de calor residual del proceso de fabricación de baldosas cerámicas como, por ejemplo, el calor residual de baja temperatura procedente del horno, para utilizarlo como fuente de entrada a la bomba de calor.

La opción 1 se puede considerar más como una mejora de la eficiencia energética que como una opción de descarbonización, ya que se consigue reducir el consumo de gas, pero no eliminarlo por completo.

La segunda opción sí que conseguiría eliminar por completo el uso de gas natural y utilizar estas bombas de calor para dar el salto térmico necesario, sustituyendo a los quemadores. Estas bombas de calor se incluirían en los circuitos de recuperación de gases en los secadores, se puede ver un ejemplo en la siguiente figura:

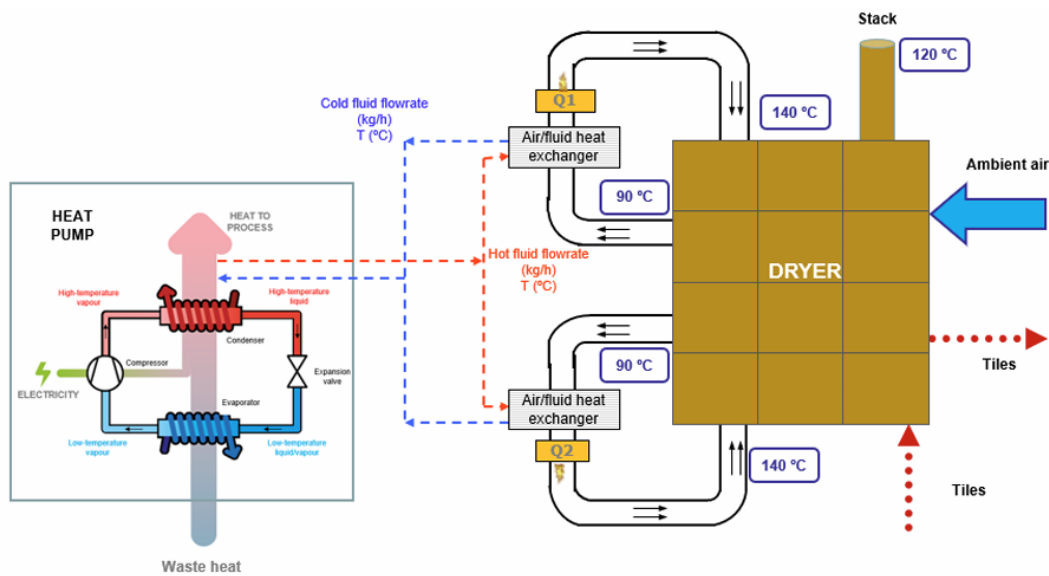


Figura 26: Integración de una bomba de calor en un secadero

Esta opción sería adecuada en secaderos que trabajan en temperaturas cercanas a los 140°C, donde podrían ser integradas bombas de calor ya comerciales, como las ofrecidas por Rank® (Rank, 2024), empresa española de base tecnológica, ubicada en la provincia de Castellón. Por otra parte, según la comisión europea (European Commission, 2024), ya se han encontrado algunas bombas de calor que alcanzan los 200°C para algunos procesos de secado. Hoy en día existe un Programa de Colaboración Tecnológica (TCP) (HPT, 2025) en el que la Agencia Internacional de la Energía (IAE) y el Heat Pump Center (HPC) trabajan juntos para ofrecer nuevas opciones tecnológicas de bombas de calor.

Los estudios de Heat Pumping Technologies by IEA (HPT, 2024) muestran que existe una amplia variedad de tecnologías de bombas de calor de alta temperatura (HTHP) ofrecidas por distintos proveedores, con niveles de madurez tecnológica (TRL) y costes muy variables, dependiendo de la aplicación específica y del tamaño de la bomba de calor. La mayoría de las bombas de calor provienen de fabricantes europeos y japoneses. Los TRL varían entre 4 y 9, lo que abarca desde pruebas validadas en laboratorio hasta sistemas operativos reales probados en entornos industriales. Los costes de inversión específicos oscilan entre 200 €/kW y 1200 €/kW, y las capacidades térmicas van desde 30 kW hasta 100 MW. La temperatura máxima de suministro varía entre 100 °C y 280 °C.

5.1.4.2.2 Secado eléctrico mediante calentamiento por microondas

La tecnología de secado por microondas ha sido desde hace muchos años unas de las más prometedoras en su uso para el secado de productos cerámicos (Agrafiotis & Tsoutsos, 2001) (Cárdenas, et al., 2009) (Segeer, 1998). El secado por microondas es muy eficaz en la conversión térmica y tiene mínimas pérdidas por conducción, ya que el secadero no se calienta. Debido a esto, requiere un 36% de energía menos que el secado convencional utilizando gases calientes (D. EARL, 1995). Por otra parte, se ha demostrado que, mediante este tipo de secado, los procesos llegan a ser casi el doble de rápidos, con duraciones de unos 13 minutos (European Commission, 2024).

El principal problema de esta tecnología es el rápido calentamiento que consigue en la pieza a secar. El secado por microondas funciona de tal manera que una onda entra en contacto con el material, haciendo que las partículas de agua se mueven rápidamente y generan calor, calentándose el material desde dentro hacia fuera. Al permitir aplicar de una forma instantánea una gran cantidad de potencia, se pueden generar puntos de sobrecalentamiento e incluso se puede generar vapor en el interior de la pieza, que, al superar la presión de poro permisible, pueden causar roturas en las piezas a secar (Skansi, et al., 1995) (Kowalski & Mielniczuk, 2007).

Hay estudios (López-Buendía, et al., 2018) que ponen de manifiesto la necesidad de adaptar el diseño del equipo de microondas a la evolución de las propiedades dieléctricas y a la dinámica de secado para obtener un perfil de calentamiento homogeneizado sin problemas de roturas, y con resulta dos equivalentes al sistema de secado convencional.

Hoy en día no existe en el mercado un equipo de secado por microondas que pueda cubrir las necesidades de producción de la industria cerámica. Por estos motivos, aunque el secado de materiales cerámicos por microondas sea una tecnología muy prometedora, todavía queda mucho trabajo por hacer para que sea una tecnología madura aplicable a nivel industrial (Salvador Ferrer Castán, 2022).

5.1.4.2.3 Secado eléctrico mediante calentamiento por infrarrojos

La radiación infrarroja se diferencia de los mecanismos de conducción y convección en que no requiere un medio para propagarse. En su lugar, actúa directamente sobre la superficie de los cuerpos, elevando su temperatura de forma inmediata. Esta tecnología presenta múltiples ventajas, entre las que destacan:

- Facilidad de instalación y puesta en marcha inmediata, ya que las lámparas alcanzan su máxima potencia sin retardo
- Reducción del tiempo durante el proceso de secado
- Alta calidad del producto final
- Entorno de trabajo más limpio y respetuoso con el medioambiente
- Posibilidad de monitorizar con precisión los parámetros del proceso

A pesar de estos beneficios, la aplicación de la radiación infrarroja al secado de baldosas cerámicas ha sido poco explorada. En España, el Instituto de Tecnología Cerámica ha liderado dos proyectos relevantes en esta línea, CerOh (IVACE, 2021) y Demo-Electrics (ITC, 2023). En el marco de estos proyectos, se desarrolló un equipo a escala semi-industrial que permitió realizar ensayos experimentales.



Figura 27: Ejemplo de secado por infrarrojos

Los resultados obtenidos demostraron que el secado con radiación infrarroja puede lograrse en tiempos considerablemente menores que con los métodos convencionales. No obstante, el consumo energético fue bastante superior. Esto se puede ver en los resultados obtenidos (IVACE, 2021) durante el proyecto CerOh, representados en la siguiente tabla:

	t _{secado} (min)	kWh/ton sólido seco	kWh/ton agua evap.	KWh/m ² solido seco
*Secado convencional	25	136	2077,78	2,64
**Microondas	13	85	1298,61	2,60
IR (Prototipo laboratorio)	16	609	9304,17	9,33
IR (Equipo piloto)	15	420	6019,19	8,15

Tabla 18: Consumos energéticos de distintas opciones de descarbonización del proceso de secado

Como se puede apreciar en la siguiente tabla, el consumo por infrarrojos del equipo piloto se dispara. Los estudios concluyen que esta tecnología no es todavía apta a nivel industrial

y que haría falta un estudio en profundidad para introducir mejoras constructivas en el equipo.

5.1.4.2.4 Secado eléctrico mediante resistencias eléctricas

Una alternativa similar a la ya analizada en el proceso de atomización consiste en sustituir los quemadores de gas natural por resistencias eléctricas. Esta opción presenta una implementación relativamente sencilla, ya que permite adaptar los equipos existentes sin necesidad de grandes modificaciones. Sin embargo, su principal limitación se encuentra en el alto consumo eléctrico, ya que se reemplaza directamente el consumo de gas natural por electricidad, sin que ello suponga una mejora significativa en términos de eficiencia energética.

En este contexto, la empresa SACMI ha presentado (Asociación Española de Técnicos Cerámicos, 2024) varias soluciones enfocadas a la electrificación total del secado. Uno de los casos más representativos es el desarrollo e instalación en Portugal (Ceramic world web, 2024) de un secadero horizontal totalmente eléctrico, adaptado a partir de un modelo convencional mediante la integración de resistencias eléctricas en los circuitos de recirculación del aire.

Este prototipo cuenta con las siguientes características técnicas:

- Cinco planos de secado
- Longitud total de 11,2 metros
- Capacidad de 5.500 kg/h
- Temperatura máxima de 250°C
- Humedad de entrada del material: 6%

En la siguiente figura se muestra el diseño del secadero horizontal electrificado y la ubicación de las resistencias en el sistema de recirculación.

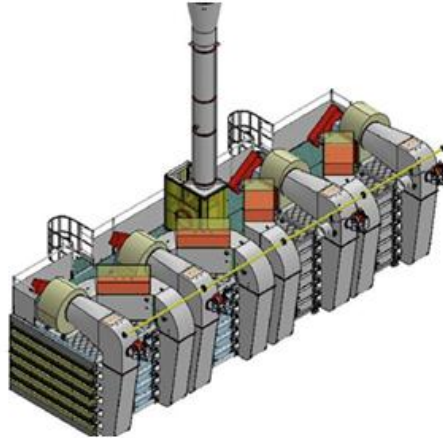


Figura 28: Secadero horizontal electrificado

Por su parte, la Tabla recoge las principales especificaciones aportadas por SACMI, incluyendo los valores de producción, potencia instalada, consumo en modo 100% eléctrico y consumo bajo un esquema híbrido con recuperación de calor.

Secadero eléctrico	
Producción (kg/h)	5.500
Humedad entrada (%)	6
Potencia instalada (kW)	800
Potencia de trabajo en modo 100% eléctrico (kW)	530
Potencia de trabajo funcionando con recuperación de calor desde el horno (kW)	310

Tabla 19: Descripción del secadero horizontal. Fuente: SACMI

Teniendo en cuenta los valores de producción y potencia de trabajo, se pueden obtener unos valores de consumo específicos representativos:

$$\text{Consumo específico} \left(\frac{kWh}{t} \right) = \frac{\text{Potencia eléctrica} (kW)}{\text{Producción} \left(\frac{kg}{h} \right)} * 1000$$

Para un funcionamiento 100% eléctrico el consumo específico sería de 96,36 kWh/t de producto, y en el caso de estar trabajando con recuperación de calor el consumo sería de 56,36 kWh/t de producto.

5.1.4.3 Cocción

La cocción eléctrica mediante hornos de resistencias se considera una alternativa tecnológicamente viable y madura para descarbonizar la fabricación de baldosas cerámicas, tal como señala el estudio de ASCER “Análisis de las posibilidades de electrificación de la cocción de baldosas cerámicas” (ASCER, 2022). Su principal ventaja operativa radica en la ausencia de emisiones directas de CO₂ durante el proceso de cocción. Sin embargo, su adopción industrial ha sido muy limitada hasta la fecha, debido a diversas barreras tecnológicas y económicas. A continuación, se presentan distintos proyectos para la electrificación de los hornos de cocción.

SACMI

Un prototipo ilustrativo es el horno de laboratorio presentado por **SACMI** (longitud de 8,4 m, potencia de 100 kW y temperatura máxima de 1230 °C), creado a modo de demostración.



Figura 29: Horno eléctrico de laboratorio de SACMI

KERAjet

Por otro lado, la **empresa KERAjet** (KERAjet, 2025), ubicada en Almassora, ha implantado una línea de fabricación completamente eléctrica. De hecho, el estudio de electrificación de ASCER recoge los valores de consumo proporcionados por esta compañía, estimados en torno a 7 kWh/m² para su horno prototipo; no obstante, se advierte que, a mayor espesor de la baldosa, se incrementará el consumo energético.

Vernis y Levantina Techlam junto con ASCER

Diversos estudios han evaluado el desempeño técnico de los hornos eléctricos actuales, y todo apunta a que son más eficientes desde el punto de vista energético que los hornos convencionales de gas. Así, se ha observado que un horno eléctrico industrial puede consumir alrededor de un 30% menos de energía que un horno de combustión equivalente. En ensayos experimentales concretos, realizados por ASCER en colaboración con las empresas Vernis (Vernis, 2025) y Levantina Techlam (Levantina Techlam, 2025)), un horno eléctrico de rodillos registró consumos específicos entre un 14% y un 22% inferiores (por unidad de masa cocida) respecto a la media de los hornos de gas, llegando a ser un 55–68% menores si la comparación se hace por unidad de superficie producida. Ciertamente, reflejado por ASCER en su estudio de electrificación de hornos (ASCER, 2022), que hay una relación lineal entre el consumo y el peso específicos por m² (espesor) de baldosa. Estos resultados reflejan una transferencia de calor más eficiente en la cocción eléctrica, con rendimientos en la zona de calentamiento y cocción del 69–76%, aproximadamente un 28% superiores a los de hornos de combustión equivalentes.

Systemfoc

Por último, la empresa **Systemfoc** ha fabricado un horno eléctrico de baldosas cerámicas (Systemfoc, 2025) que actualmente se encuentra operando a pleno rendimiento en Equipe

Cerámicas. Este horno se caracteriza por su sistema de resistencias, encargado de conseguir que el horno pueda alcanzar los 1200 °C de temperatura de trabajo en un breve período de tiempo, y que ofrecen un ahorro energético de hasta un 50% respecto a un horno de gas convencional. A continuación, se presenta una tabla con una comparativa entre diferentes modelos de hornos industriales de diferentes capacidades productivas, mostrándose varios parámetros clave como son sus dimensiones, producción máxima teórica, los ciclos de cocción que se pueden establecer, así como una estimación del consumo específico para cada uno de ellos y su potencia nominal. Estos tamaños corresponden a los modelos más utilizados en el sector y, por lo tanto, pueden considerarse como representativos o estándar.

HORNO	1500	3000	6000	9000	12000	UNIDADES
Longitud del horno	30.870	50.400	84.000	113.400	123.900	m
Anchura del horno	1.500	1.800	2.200	2.500	3000,00	mm
Superficie útil del horno	46.305	90.720	184.800	283.500	371.700	m ²
Producción máxima a 36' (±80% aprox.)	1537	3012	6024	9185	12043	m ² /día
Temperatura máxima de trabajo*	1200 - 1250	1200 - 1250	1200- 1250	1200 - 1250	1200 - 1250	°C
Consumo (estimado) a 1150°C Wh/kg	450	435	420	410	410	Wh/Kg
Potencia nominal	1000	2000	3000	4500	5000	KW
Atmosfera	Oxidante	Oxidante	Oxidante	Oxidante	Oxidante	
Fuente energética	100% ELÉCTRICO					

Tabla 20: Características básicas del horno eléctrico fabricado por Systemfoc

Se puede apreciar, como para un tamaño de horno medio (6000 m² al día), el horno presenta un consumo energético de 420 kWh/t, lo que representa un gran ahorro comparado con el consumo energético de un horno de gas tradicional (792 kWh/t).

Como se puede observar, actualmente se están desarrollando diversos proyectos orientados a analizar la viabilidad de la cocción de baldosas utilizando hornos eléctricos. Aunque cada estudio presenta diferentes cifras, todos coinciden en que el consumo energético de los hornos eléctricos es menor en comparación con los hornos de gas convencionales. A partir

de estos trabajos, se estima que el ahorro energético logrado con los hornos eléctricos se sitúa entre un 20% y un 50%.

Un aspecto crítico desde el punto de vista técnico es la demanda eléctrica adicional que supondría la electrificación masiva de la cocción. Actualmente, esta etapa consume alrededor del 51% de la energía térmica total en la fabricación de baldosas, con un promedio cercano a 792 kWh/t. Por tanto, sustituir los hornos de gas por sistemas eléctricos trasladaría dicha demanda energética desde el gas natural hasta la red de suministro. Es cierto que, debido a la general mejora de eficiencia energética en los hornos eléctricos, la demanda eléctrica sería inferior a la demanda energética de gas. Suponiendo una mejora de eficiencia del 25%, la demanda eléctrica de gas para electrificar el 100% de los hornos actuales sería de alrededor de 5.200 GWh anuales, lo que representa alrededor del 12% de la generación solar fotovoltaica de 2024, 44.520 GWh según un informe de Red Eléctrica (Red eléctrica, 2025).

Estas magnitudes evidencian la necesidad de infraestructuras eléctricas adaptadas (red de distribución, subestaciones, etc.) y suficiente capacidad de generación para sostener esta conversión tecnológica.

En síntesis, los hornos eléctricos ofrecen ventajas técnicas notables —eliminan las emisiones directas y permiten ahorrar energía— y, para determinados espesores de baldosas, ya han alcanzado la madurez necesaria para una implantación progresiva. Aun así, siguen enfrentándose a varios desafíos que condicionan su adopción industrial a gran escala. Entre las principales barreras identificadas, según la Guía de Tecnologías Hipocarbónicas (Salvador Ferrer Castán, 2022) se encuentran:

- El elevado coste de la electricidad, que encarece la operación frente al gas natural
- La limitada oferta de proveedores de hornos eléctricos industriales y la escasa experiencia en el sector

- Las restricciones de infraestructura eléctrica, tanto a nivel interno (instalaciones de fábrica) como externo (capacidad de la red de distribución)
- La falta de datos concluyentes sobre el rendimiento real y la fiabilidad de hornos eléctricos a gran escala y en operación continuada
- La necesidad de contar con fuentes renovables suficientes para garantizar un suministro eléctrico sostenible y competitivo

Estos factores deberán abordarse de manera coordinada para facilitar la adopción extensiva de hornos eléctricos en la industria cerámica y, de ese modo, avanzar en la descarbonización del proceso de cocción.

5.1.4.4 Fritas

Por último, pero no menos importante, hay que analizar la posible electrificación de las fabricación de las fritas cerámicas. Como se ha mencionado previamente, el aporte de calor en estos hornos se realiza mayoritariamente por combustión de gas natural empleando aire u oxígeno como agente comburente.

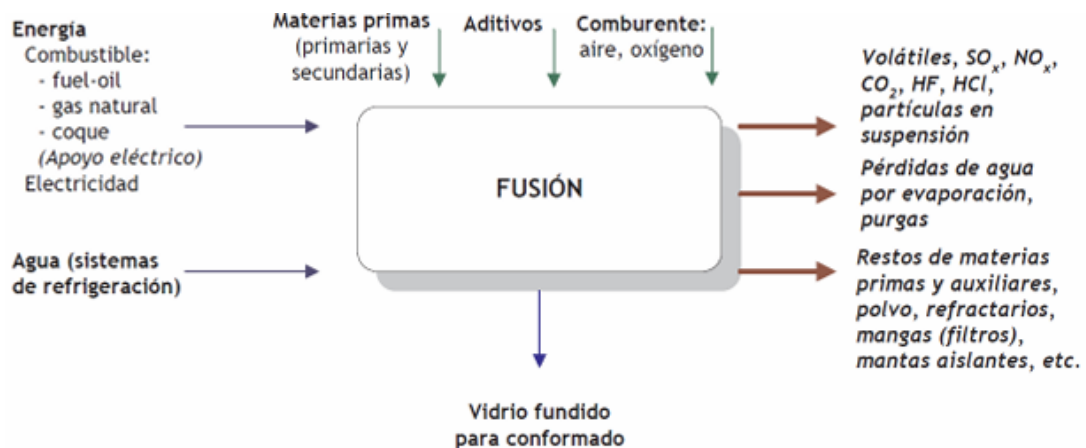


Figura 30: medioambientales en la etapa de fusión del proceso de fabricación del vidrio (Anon., 2013)

La electrificación es una alternativa prometedora para la descarbonización de este proceso, la cual puede abordarse de diferentes formas como, por ejemplo, el calentamiento por efecto Joule con resistencias eléctricas, la generación de calor en el seno del material a fundir por

efecto de un campo de microondas, la utilización de electrodos sumergidos en el fundido o el calentamiento por efecto de la inducción electromagnética. Actualmente no existen en el mercado equipos eléctricos específicos para la fusión de fritas cerámicas que utilicen alguna de estas tecnologías (Aguilella, et al., 2024).

A pesar de existir todas estas opciones de electrificación, la realidad es que solo se han encontrado estudios para una de ellas, la inducción electromagnética. Qualicer presentó un estudio (Aguilella, et al., 2024) en 2024 junto con el ITC sobre la posibilidad de fusión de fritas mediante inducción electromagnética. A continuación, se presentan algunos aspectos mencionados en este estudio.

La inducción electromagnética se emplea ampliamente en procesos de fusión de metales; sin embargo, su aplicación en la fabricación de materiales vítreos, como las fritas cerámicas, resulta más compleja debido a la elevada resistividad eléctrica de las materias primas en estado sólido. Esta característica dificulta la inducción de corrientes de calentamiento en el seno del material, de modo que el polvo cerámico, a temperatura ambiente, se comporta inicialmente como un aislante. Aun así, se investiga este método de calentamiento por sus ventajas respecto a otras tecnologías: alta productividad al calentar directamente el producto, eficiencia energética elevada, automatización sencilla mediante lazos de control de temperatura, preservación de la calidad final al evitar el contacto con llamas o elementos extraños y posibilidad de emplear fuentes de energía sostenibles.

Para conseguir una fusión continua de fritas a partir de calentamiento por inducción, es preciso superar el obstáculo fundamental de la naturaleza aislante del material cerámico a baja temperatura. Esto significa que la inducción electromagnética, por sí sola, no puede calentar directamente el polvo precursor. Sin embargo, tal como indica la bibliografía disponible, ciertas composiciones vítreas adquieren suficiente conductividad eléctrica una vez fundidas, lo que les permite calentarse por inducción a frecuencias de trabajo específicas en el inductor (Haimbaugh, 2015). Esto implica que la fusión inicial debe llevarse a cabo de forma indirecta.

De este estudio se extraen varias conclusiones relevantes:

- Se han fundido con éxito tres composiciones distintas de frita mediante inducción electromagnética, combinada con iniciadores de la fusión. No obstante, cuando se retiraron los iniciadores, solo una de las tres composiciones logró mantenerse en régimen de calentamiento por inducción
- Existe una relación directa entre la resistividad eléctrica de la muestra y su capacidad para retener y absorber calor una vez que alcanza el estado líquido
- La resistividad eléctrica del fundido varía en función de la temperatura y de la composición química del material

Las evidencias señalan que la inducción electromagnética es una alternativa prometedora para la fusión directa de fritas cerámicas. Con todo, los ensayos iniciales demuestran que la viabilidad de esta tecnología depende críticamente de la composición de cada muestra y su resistividad eléctrica en la zona de fusión. Serán necesarias más investigaciones para determinar los límites y las aplicaciones reales de este método.

5.1.5 RESUMEN

A continuación, se presenta una tabla resumen que sintetiza los resultados del análisis técnico realizado sobre las principales opciones de descarbonización en cada una de las etapas energéticas de la industria cerámica en España. En esta tabla se incluyen, para cada tecnología evaluada, sus ventajas, desventajas, nivel de madurez tecnológica (TRL), impacto potencial en la reducción de emisiones de CO₂, eficiencia energética, consumo específico y principales requerimientos técnicos. Esta visión global permite comparar de manera estructurada las diferentes alternativas y facilita la identificación de aquellas tecnologías con mayor potencial de implantación a corto y medio plazo.

Basado en los resultados obtenidos y en los criterios técnicos analizados, se han descartado para el análisis económico las siguientes tecnologías:

- **La tecnología de vía seca en la atomización**, debido a sus limitaciones técnicas para la producción de soportes de baja porosidad, lo que restringe su aplicabilidad en ciertos productos, condiciona su viabilidad industrial, y no garantiza unos niveles de calidad adecuados.
- **Las tecnologías de infrarrojos, microondas y resistencias eléctricas en el secado**, ya que presentan consumos energéticos superiores o problemas técnicos no resueltos (como riesgos de rotura o falta de equipos industriales a escala), lo que las hace inviables actualmente para su implantación masiva en la industria cerámica.
- **La fusión por inducción electromagnética en la fabricación de fritas**, porque su viabilidad depende en gran medida de la composición química de las fritas y, según los ensayos realizados, solo es aplicable a una parte limitada de las formulaciones estudiadas, además de requerir desarrollos adicionales para su escalado industrial.

Por tanto, el análisis económico posterior se centrará únicamente en aquellas tecnologías que, según la comparativa técnica, presentan una combinación favorable de madurez tecnológica, impacto en la reducción de emisiones, eficiencia energética y viabilidad de integración en las plantas cerámicas actuales

Tecnología	Aplicación / Descripción técnica	Ventajas	Desventajas	Nivel TRL	Impacto CO ₂	Eficiencia energética	Consumo específico	Requisitos técnicos
Gas natural	Combustión de gas en quemadores de aire caliente para evaporar el agua de la barbottina en la torre de atomización. Tecnología convencional dominante.	-Tecnología madura y fiable; alto poder calorífico del gas; -Infraestructura existente y operación continua 24h; -Eficiencia moderada con recuperación (hasta 60-70% del calor se usa en secar agua).	-Emisiones directas de CO ₂ altas (combustible fósil); genera NOx; -Dependencia de precios volátiles y suministro de gas; -Proceso muy intensivo en energía (~476 kWh/ss de polvo seco producido).	9 (comercial)	Alto (elevadas emisiones de CO ₂ fósil por combustión).	~60-70% del calor aportado se destina a evaporar agua (resto pérdidas a chimenea).	~476 kWh/t ss de polvo seco obtenido (energía térmica).	Ninguno (es el estándar actual; equipos ya diseñados para gas).
Biometano	Uso de biometano (gas renovable purificado de biogás) en los mismos quemadores de atomización en reemplazo directo del gas natural.	-Combustible casi idéntico al gas natural, sin necesidad de modificar equipos (sustitución inmediata); -Fuente renovable; reducción de huella de CO ₂ .	-Disponibilidad limitada y producción minoritaria en España; - Alto coste de producción (upgrading del biogás); difícil cubrir demanda del sector.	9 (uso comercial, combustible emergente)	Bajo-neto (emisiones de CO ₂ biogénico, neutras en balance de carbono).	Similar a gas natural (misma eficiencia de combustión ~60-70%).	Igual al gas (~476 kWh/t ss), dado su poder calorífico equivalente.	Ninguno significativo (requiere biometano de calidad ref; uso en quemadores existentes).
Hidrógeno	Combustión de H ₂ (hidrógeno verde) en quemadores adaptados para generar el aire caliente de secado en el atomizador.	- Cero CO₂ en uso (el H ₂ no contiene carbono, no emite CO ₂ al quemar); -Posibilidad de eliminar 100% de las emisiones de esta etapa con H ₂ verde; -No afecta la calidad del polvo hasta al menos 50% de mezcla H ₂ (ensayos de laboratorio).	-Necesita 3,5 veces más caudal de gas que con CH ₄ para igual energía (baja densidad energética volumétrica); - Llama no visible (dificultad de detección); - a partir de 20% H ₂ en mezcla, requiere nuevos quemadores y adaptar tuberías por seguridad; tecnología aún en demostración (no comercial).	~7-8	Nulo en punto de uso (0 CO ₂ directo). Potencial -100% emisiones en esta etapa si H ₂ verde (eliminación total de CO ₂ fósil).	Similar a gas, ~60-70%.	Oscilan a 476 kWh/t ss en energía (se requiere similar cantidad de energía suministrados como H ₂).	Quemadores específicos para H ₂ ; detección de fugas y seguridad por llama invisible; suministro de H ₂ (tanques, tuberías, etc.).
Atomizado	Atomización eléctrica: calentamiento del aire de secado mediante resistencias eléctricas (o otro sistema eléctrico) en lugar de combustión.	- Sin emisiones directas (no combustión; CO ₂ depende de la electricidad usada); -Alta precisión de control de temperatura; calor inmediatamente disponible; -Posible integración con energía renovable.	- Enorme demanda eléctrica (sustituir la energía térmica por ~315 kWh eléctricos/ss); implicaría un incremento del consumo eléctrico total de la planta y necesidad de potencia muy elevada; - Coste operativo alto si la electricidad es cara; -Tecnología no disponible comercialmente a gran escala (cambio tecnológico radical).	~8 (tecnología conocida, pero sin aplicaciones a gran escala)	Depende de la fuente eléctrica (cero CO ₂ con electricidad verde; podría trasladar emisiones a la generación).	Alta eficiencia de conversión (>98% de la electricidad se convierte en calor); posibilidad de recuperar calor con sistemas ya existentes.	~315 kWh eléctricos/t ss (para evaporar la misma agua).	Suministro eléctrico de gran potencia (refuerzo de red); refuerzo del atomizador para integrar calentadores eléctricos; fuente inversión (APEX/OPPEX).
Via seca	Granulación en seco: proceso alternativo que elimina la atomización húmeda . Consiste en moler las materias primas en seco y aglomerar el polvo con mínima adición de agua para obtener granulado prensable, evitando el secado.	- Elimina el gasto térmico de esta etapa (no se evapora agua); ahorro energético muy elevado (reducción drástica del consumo térmico y eléctrico vs vía húmeda); -Reduce uso de agua; sin emisiones de combustión.	- Desafío en calidad : requiere ajustes específicos para lograr mismas propiedades del polvo; puede ser difícil igualar la calidad del prensado húmedo en algunos casos; -Inversión en nueva maquinaria; -Tecnología no aplicada universalmente; cada composición necesita estudio para alcanzar propiedades equivalentes.	~6-7 (empleada en puntales; requiere validación caso a caso)	Muy bajo en esta etapa (se eliminan las emisiones de CO ₂ de atomización).	Muy alta eficiencia global (evita pérdidas por evaporación). Ahorro térmico >75% respecto al proceso húmedo.	Se reduce el consumo en la atomización, pero el nuevo proceso, el consumo térmico es de alrededor de 105 kWh/t ss. Balance muy favorable	Nuevos equipos de molinera fina y granulación en seco; adaptación de recetas de pasta y parámetros de prensa para mantener calidad.

Tecnología	Aplicación / Descripción técnica	Ventajas	Desventajas	Nivel TRL	Impacto CO ₂	Eficiencia energética	Consumo específico	Requerimientos técnicos
Gas natural	Secaderos industriales (verticales u horizontales) alimentados con aire caliente generado por quemadores de gas. Temperatura de secado tipo, 100-200°C para eliminar la humedad de las piezas tras el moldeo.	- Tecnología establecida y confiable; secado rápido gracias a alto flujo de aire caliente.- Integra recuperación de calor: a menudo aprovecha calor residual de hornos mejorando la eficiencia.	- Emite CO ₂ en la etapa de secado; contribuye a la huella de carbono.- Eficiencia limitada si no se recupera calor.- Dependencia de gas fósil con costo y disponibilidad variables.	9 (comercial)	Alto (combustión de gas; emisiones significativas de CO ₂ fósil en secado).	Moderada, alrededor del 50% (secaderos modernos recuperan calor del horno, mejorando eficiencia; sin recuperación, mucho calor se desaprovecha).	Alrededor de los 125 kWh/t ss para secar el producto	Ninguno especial (quemadores de gas en secaderos existentes; operación convencional).
Biometano	Uso de biometano en los quemadores del secadero en lugar de gas natural, manteniendo el mismo sistema de aire caliente.	- Sin cambios en equipos de secado (sustitución directa por un gas equivalente).- Reducción del CO ₂ fósil; emisiones neutras en carbono (biogas purificado).	- Limitado por la disponibilidad de biometano y su costo alto (similar problemática que en atomizador/ococión).- Emite CO ₂ en chimenea (aunque biogénico).	9 (uso comercial; combustible limitado)	Bajo-neto (CO ₂ biogénico neutro, aunque mismas emisiones físicas de CO ₂ que gas).	Igual que con gas natural, 50% (si se recupera calor, eficiencia buena; biometano no altera eficiencia).	Igual que gas, 125 kWh/t ss para secar la misma cantidad de agua (mismas necesidades energéticas).	Ninguno, salvo garantizar suministro de biometano con calidad adecuada; sistemas de combustión idénticos.
Hidrógeno	Combustión de hidrógeno en el secadero, reemplazando gas. Se quemaría H ₂ en los generadores de aire caliente para secar las baldosas.	- Cero CO₂ directo en secado (el H ₂ sólo produce vapor de agua al quemar).- Compatible con descarbonización total si H ₂ verde; aprovecha infraestructura de quemadores con adaptaciones.	- Necesita 3,5 veces más caudal de gas que con CH ₄ para igual energía (baja densidad energética volumétrica).- Llama no visible (dificultad de detección).- a partir de 20% H ₂ en mezcla, requiere nuevos quemadores y adaptar tuberías por seguridad; tecnología aún en demostración (no comercial).	~7-8	Nulo en punto de uso (0 CO ₂ directo). Potencial -100% emisiones en esta etapa si H ₂ verde (eliminación total de CO ₂ fósil).	Similar a gas en términos de secado, 50%; eficiencia térmica parecida.	Similar a gas; 125 kWh/t ss, -misma energía requerida por kg de agua evaporada.	Quemadores específicos para H ₂ ; detección de fugas y seguridad por llama invisible; suministro de H ₂ (tanques, tuberías, etc.).
Bombas de calor	Secadero con bomba de calor : una fuente de aire húmedo se realimenta mediante un ciclo frigorífico, recuperando el calor latente de la evaporación. Sistema cerrado que condensa el agua extraída y reutiliza el calor.	- Altísima eficiencia energética: aportan 3-5 kWh de calor (COP elevado) al reciclar calor latente; gran reducción del consumo energético.- Sin combustión directa; sin emisiones locales de CO ₂ ; apto para electricidad renovable.- Puede operar a menor temperatura de secado constante; evitando choques térmicos en las piezas.	- Límite de temperatura : las bombas de calor industriales típicas entregan calor <80-120°C, para secados rápidos a >120°C podrían requerir apoyo adicional.- Inversión inicial alta para modificar el secadero (circuitos de refrigerante, condensadores, etc.).- Tecnología emergente en cerámica; aún pocos casos aplicados.	~7 (pilotos en desarrollo)	Indirecto (0 CO ₂ directo; emisiones según la electricidad usada). Ahorro de CO ₂ por menor energía requerida.	Muy alta (COP 3-5; cada unidad eléctrica aporta 3-5 de calor útil; recupera calor de condensación).	Gracias a su alto COP, puede reducir drásticamente su consumo hasta los 15 kWh/t ss	Integrar un circuito bomba de calor al secadero; modificar conductores para circuito cerrado; condensador para extraer agua de GHE; compresor y equipo frigorífico; requeriría espacio e integración en la línea.
Microondas	Secado asistido por microondas : aplicadores de microondas irradian las piezas húmedas; calentando el agua interna por excitación molecular.	- Calentamiento volumétrico : el agua en el interior de la pieza absorbe energía y evapora desde dentro, logrando secado más rápido y homogéneo (menores gradientes de humedad).- Reduce tiempos de secado significativamente; sin combustión (electricidad).	- Penetración limitada de microondas en materiales muy gruesos o densos; en baldosas de bajo espesor es viable, pero en cerámica de mayor espesor sería más complejo.- Inversión alta en equipos de microondas industriales; actualmente secaderos microondas son de pequeña escala piloto.	~4-5	Nulo directo (eléctrico). Ahorro potencial de CO ₂ si usa renovables (emisiones dependen de la fuente eléctrica).	Alta: la energía se dirige principalmente a evaporar el agua dentro de la pieza (menos pérdidas por calentar aire o paredes).	Debido a su eficaz conversión térmica y mínimas pérdidas por conducción, 36% menos de energía que secado convencional. Alrededor de 80 kWh/t ss	Integración de microondas en el secadero o etapa separada; protección contra fugas de microondas; necesidad de escalar equipos (hoy solo tamaños pequeños).
Infrarrojos	Secado mediante radiación infrarroja : lámparas o paneles infrarrojos calientan las baldosas por radiación electromagnética, evaporando la humedad superficial rápidamente.	- Calentamiento rápido y dirigido de la superficie; útil para eliminar agua superficial rápidamente (evita defectos por agua en cara visible).- Fuente eléctrica sin combustión (cero emisiones directas); elementos IR con respuesta casi instantánea.	- Alcance superficial : la radiación IR penetra poco, por lo que puede secar antes la superficie que el interior, requiriendo control para evitar tensiones.- Puede requerir mover las piezas para exponer uniformemente.- Consumo eléctrico muy elevado si se usa como único método.	~2-3	Nulo directo (eléctrico). Sin impacto CO ₂ si la electricidad es verde.	Según los equipos piloto estudiados, muy baja eficiencia y un alto consumo.	Bastante superior al secado convencional, llegando a valores de entre 420 y 600 kWh/t ss.	Instalación de módulos de lámparas o paneles IR en el secadero; control de potencia para evitar sobrecalentamiento; necesidad de suministro eléctrico adecuado.
Resistencia s eléctricas	Secado puramente eléctrico mediante resistencias : calentadores eléctricos calientan el aire de secado (o las paredes del secadero) por efecto Joule, sustituyendo a los quemadores de gas.	- Implementación sencilla y conocida (similar a hornos eléctricos); puede reaprovechar el diseño de secadero existente cambiando quemadores por calefactores.- Sin emisiones directas de CO ₂ ; calor limpio y fácil de controlar.	- Consumo eléctrico muy elevado para grandes caudales de aire caliente (menor energía que quemando gas, pero en forma eléctrica).- Sin recuperación de calor; la eficiencia global es similar a la de gas (solo cambia la fuente).	~7-8	Nulo directo (solo emisiones indirectas de generación eléctrica).	Conversión eléctrica a calor (la mayor parte de la energía eléctrica se transforma en calor útil).	Según las fuentes consultadas, consumos específicos entre 100 kWh/t ss y 60 kWh/t ss en caso de recuperación de calor	Sustituir quemadores por bancos de resistencias/elementos calefactores; adecuar el sistema eléctrico para la alta potencia; controles para regular la temperatura del aire.

Tecnología	Aplicación / Descripción técnica	Ventajas	Desventajas	Nivel TRL	Impacto CO ₂	Eficiencia energética	Consumo específico	Requerimientos técnicos
Gas natural	Horno túnel a gas: combustión de gas natural en quemadores a lo largo del horno (temperaturas ~1100-1200°C) para sintetizar baldosas. Es el método estándar (hornos de rodillos en gres porcelánico, etc.).	- Tecnología totalmente madura; permite altas temperaturas de forma continua.- Potencia térmica elevada y controlada por secciones; existe extensa experiencia operativa.- Recuperación de calor: gases calientes del enfriamiento se reutilizan en secado/precalentamiento, mejorando eficiencia.	- Principal fuente de CO₂ del proceso (combustible fósil): altas emisiones directas: ~60% del CO ₂ de fábrica proviene del horno.- Emisiones de CO ₂ sin cambiar de combustible.- Pérdidas térmicas considerables: mucho calor sale con humos y enfriamiento (aunque se recupere parte).	9 (comercial)	Muy alto (combustión de gas: toneladas de CO ₂ por hora en grandes hornos).	Baja: hornos modernos ~10-20% de eficiencia térmica efectiva; el resto se pierde en chimenea y enfriamiento.	Altos consumos energéticos debido a la alta temperatura necesaria para conseguir las reacciones (500-700°C). Alrededor de 792 kWh/t	Ninguno (es la tecnología ligera; infraestructura existente).
Biometano	Horno a biometano: uso de biometano en los quemadores del horno cerámico, en sustitución total o parcial del gas fósil.	- Sustitución inmediata sin cambios en quemadores ni instalación (biometano ≠ gas natural).- Reduce enormemente la huella de carbono del horno al ser energía renovable (CO ₂ neutralizado en ciclo biológico).	- Disponibilidad muy limitada para cubrir el gran consumo del horno, difícil de abastecer con biometano actual; Emisiones de CO ₂ biogénico en chimenea (aunque neutras en balance).	9 (uso factible ya que es químicamente equivalente)	Bajo-neto (CO ₂ neutralizado al ser biogénico, 0 neto en balance; emisiones físicas iguales a gas).	Igual que horno a gas, 10-20% (misma eficiencia térmica y posibilidades de recuperación de calor).	Igual que gas, 792 kWh/t.- mismo consumo energético por tonelada (biometano tiene poder calorífico similar).	Suministro continuo de biometano (mezclado en red o dedicado); asegurar pureza del biometano para no dañar quemadores (debe estar libre de impurezas).
Hidrógeno	Horno a hidrógeno: combustión de hidrógeno (puro o mezclado) en el horno cerámico. Implica adaptar quemadores y control de atmósfera para sintetizar usando H ₂ como combustible.	- Sin CO₂ de combustión (elimina emisiones directas del horno).- Permite descarbonizar la cocción manteniendo procesos similares ya se han logrado cocciones con hasta 50% de H ₂ sin afectar la calidad del azulejo.	- Requiere rediseño de quemadores/sistema: >20% H ₂ demanda sustituir quemadores y parte de tuberías; riesgos de fugas y seguridad.- Llamano visible: puede alterar el perfil térmico del horno, requiriendo más quemadores o secciones para igualar el aporte de calor; suministro de H ₂ verde a gran escala no disponible aún (limitado hasta ~2050 según previsiones).	~7-8	Nulo en punto de uso (0 CO ₂ directo). Potencial-100% emisiones en esta etapa si H ₂ verde (eliminación total de CO ₂ fósil).	Similar a gas en teoría, 10-20% la eficiencia global dependerá del diseño de quemadores H ₂ .	Igual que gas, 792 kWh/t.- mismo consumo energético pero mayor caudal de hidrógeno debido a su menor poder calorífico.	Quemadores específicos para H ₂ ; seguridad de fugas y seguridad por llama invisible; suministro de H ₂ (tanques, tuberías, etc.).
Horno eléctrico	Horno eléctrico (total): cocción de las baldosas mediante resistencias eléctricas u otro calentamiento eléctrico (arco, plasma, etc.), sin combustión. El horno de rodillos se calentaría con elementos eléctricos en las distintas zonas en vez de quemadores.	- Cero emisiones directas en cocción (no se genera CO ₂ en el horno).- Permite un control muy preciso de la temperatura por zonas; posibilidad de atmósfera más limpia (sin productos de combustión que puedan afectar esmaltes).- Potencial para recuperar más fácilmente el calor intercambiadores (circuitos cerrados), dado que no hay gases de combustión que diluirían el calor.	- Demanda energética enorme: electrificar todos los hornos del sector azulejero requeriría un gran aumento de energía eléctrica, implicando refuerzo masivo de la red eléctrica; dificultad técnica para obtener resultados positivos en baldosas con mayor espesor.	~7-8	Depende 100% de la fuente eléctrica (0 CO ₂ directo; podría ser cero neto con renovables o alto si la red es fósil).	Teóricamente alta eficiencia térmica en el horno, llegando hasta el 50% (no hay pérdidas por chimenea de combustión); sin embargo, gran parte del calor sigue yendo al enfriamiento de producto y debe disiparse (a menos que se recupere). Eficiencia global estimada bastante superior al gas.	Un consumo o mucho menor ya que la eficiencia aumenta significativamente. Hay diversos estudios que lo sitúan entre los 420 kWh/t y 600 kWh/t	Requiere rediseño completo de hornos industriales; elementos calefactores resistentes a 1200°C, sistemas eléctricos robustos, sistemas de control nuevos; costo de inversión alto y modificación de fábrica (posiblemente nuevas líneas); disponibilidad de potencia eléctrica en planta muy superior a la actual.

Tecnología	Aplicación / Descripción técnica	Ventajas	Desventajas	Nivel TRL	Impacto CO ₂	Eficiencia energética	Consumo específico	Requerimientos técnicos
Gas natural	Horno de fusión a gas para fritas: hornos continuos (~1500°C) o rotatorios donde la mezcla de materias primas se funde con quemadores de gas. El vidrio fundido se vierte en agua para granulado (frita).	- Tecnología utilizada universalmente en la industria de fritas: alcanza de alta temperatura a asegurado con gas.- Permite producción continua: equipos e ingenierías disponibles.	- Intensivo en energía: la fusión vítreo requiere gran aporte térmico y en hornos pequeños la eficiencia de combustión es baja.- Emisiones de CO ₂ muy elevadas (combustión de gas a 1500°C).- Dificultad para recuperar calor residual: los gases salen a alta T° y el propio enfriamiento en agua desperdicia el calor del fundido.	9 (comercial)	Muy alto (combustión a 1500°C: gran emisor de CO ₂ ; la fracción contribuye significativamente a las emisiones del sector esmaltes).	Baja a moderada: en hornos de pequeña escala, la eficiencia de uso de la energía fósil disminuye drásticamente (gran parte del calor se pierde en humos y en el enfriamiento súbito).	La fusión de fritas tiene un alto consumo energético, de alrededor de los 1200 kWh/L. Su contribución a las emisiones totales es menor ya que se producen muchas menos toneladas de fritas que de producto cerámico final	Ninguno particular (proceso convencional): uso de quemadores de gas y materiales refractarios resistentes.
Biometano	Horno a biometano: igual proceso de fusión de frita pero alimentando los quemadores con biometano en vez de gas natural.	- Misma operativa y rendimiento térmico que con gas (biometano ~ CH ₄); no requiere rediseño de hornos.- Reducción de la huella de carbono de la frita (CO ₂ biogénico).	- Problemas de abastecimiento: dado el consumo energético por tonelada de frita, el suministro de biometano sería un cuello de botella (limitado a disponibilidad en red). CO ₂ biogénico en china.	9 (técnicamente listo, pendiente de recurso)	Bajo-nulo (CO ₂ neutral en ciclo; aún emite CO ₂ localmente).	Igual que con gas (la eficiencia del proceso de fusión no cambia por el tipo de metano).	Igual consumo energético por tonelada fundida (sustituye m ³ de gas por m ³ de biometano equivalente).	Ninguno en el equipo, solo garantía de suministro constante de biometano de alta pureza; misma operación del horno.
Fritas	Horno a hidrógeno: adaptación de los quemadores del horno de frita para usar hidrógeno como combustible. La llama de H ₂ calentaría la mezcla vítreo hasta fundirla, reemplazando al gas natural.	- Sin CO₂ de combustión: eliminaría totalmente las emisiones directas en la fusión de fritas; podría mejorar la calidad del vidrio al ser una combustión "limpia" (sin carbono, menos impurezas).	- Adaptación compleja en hornos pequeños: riesgo de sobrecalentamiento localizado por la alta energía de la llama de H ₂ , que podría dañar refractarios; requeriría posiblemente quemadores especiales.	~7-8	Nulo directo (0 CO ₂ en horno de fritas). Reducción ~100% de emisiones de combustible en esta etapa si H ₂ verde (quedaría solo CO ₂ de materias primas carbonatadas).	Similar que con el gas natural, los estudios no muestran un cambio relevante en la eficiencia del proceso.	El consumo energético sería el mismo que con gas natural; haría falta mayores cantidades de hidrógeno debido a su menor poder calorífico.	Quemadores específicos para H ₂ ; detección de fugas y seguridad por llama invisible; suministro de H ₂ (tanques, tuberías, etc.).
Inducción electromagnética	Horno eléctrico por inducción: fusión de frita mediante calentamiento inductivo. Un campo electromagnético calienta un elemento susceptible (ej. un conductor o aditivos metálicos mezclados) que transfiere calor al material vítreo, fundiéndolo sin llama.	- Sin combustión: cero emisiones directas de CO ₂ .- Alta eficiencia potencial: el calor se genera directamente en el material f, reduciendo pérdidas.- Controlable eléctricamente, con rampas de temperatura rápidas y precisión.	- Desarrollo inicial: No existen equipos comerciales específicos para fritas aún, está en fase de I+D (pruebas piloto de concepto en laboratorio).- Dificultad técnica: la mezcla de frita en polvo es aislante eléctrica a baja T°, por lo que la inducción no la calienta directamente; se requieren elementos metálicos para acoplar el campo y transmitir calor al vidrio.- Inversión y rediseño total del proceso para la industria.	~4-5 (prueba de concepto piloto)	Nulo directo (eléctrico). De lograrse, ~100% CO ₂ de reducción en fritas (solo quedaría CO ₂ de materias primas carbonatadas).	Muy alta: el calentamiento eléctrico tiene mayor eficiencia y mayor capacidad de fusión por unidad de superficie que la combustión fósil; se minimizarían las pérdidas térmicas por el tamaño compacto.	Se espera un consumo específico menor que con gas. Todavía no ha cifras, pero la mayor eficiencia podría compensar el mayor costo de la electricidad.	Necesario desarrollar hornos de inducción; uso de conductores o carga inicial; conductor; aislamiento térmico superior; integración en producción continua; capacidad técnica para operación eléctrica avanzada.

Capítulo 6. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS

OPCIONES DE DESCARBONIZACIÓN

El análisis económico es el factor decisivo que determina si una empresa cerámica apuesta, o no, por una tecnología de descarbonización. Por ello, este Trabajo de Fin de Grado se centra en un estudio de Coste Nivelado (CN) que cuantifica todos los gastos relevantes (CAPEX y OPEX) y permite comparar de forma homogénea el coste de alternativas como la electrificación directa, el hidrógeno verde o el biometano en cada etapa del proceso (atomización, secado, cocción y fusión de fritas). Al convertir cada opción en una cifra única actualizada, el CN ofrece la base numérica sobre la que las empresas deciden invertir o esperar.

El enfoque CN aporta dos ventajas esenciales frente a métricas de coste más simples:

1. Visión integral del ciclo de vida:

El CN integra la inversión inicial (CAPEX), los costes operativos (OPEX), las reposiciones de equipos, los impuestos sobre el carbono, los ahorros energéticos y los costes de mantenimiento. Esto evita sesgos que se producen al considerar solo CAPEX u OPEX por separado y permite comparar tecnologías con perfiles de gasto muy distintos (por ejemplo, hornos eléctricos con alta inversión y bajo OPEX frente a quemadores de hidrógeno con menor CAPEX inicial pero combustible más caro).

2. Consistencia con la planificación de inversiones a largo plazo:

Las empresas cerámicas toman decisiones con horizontes de 15-30 años; el CN convierte esas decisiones en números comparables en el presente. Esto es clave para diseñar una ruta de descarbonización gradual que minimice los costes para las empresas.

El análisis se llevará a cabo para tres momentos estratégicos: 2025, 2040 y 2055, considerando horizontes de 15 años, que corresponden aproximadamente a la vida útil de la mayoría de los equipos cerámicos. Este enfoque facilita evaluar el rendimiento económico de cada inversión a lo largo de su ciclo de vida real y planificar una ruta de descarbonización escalonada.

6.1.1 CN: EL MÉTODO Y LOS DATOS

El **Coste Nivelado** es una metodología que traduce **todas** las salidas de caja asociadas a un activo, a lo largo de su vida útil, a **valor presente**. El objetivo es responder a la pregunta clave: *¿cuánto me cuesta realmente esta tecnología desde que la compro hasta que la retiro?*

La fórmula del CN que se va a usar en este estudio, para cada tecnología t, en un año de inversión y, es:

$$CN_t \left(\frac{EUR}{t} \right) = \frac{\left(\sum_{n=0}^N \frac{E_{t,n} + P_{t,n} + O\&M_{t,n}}{(1+d)^n} \right) + CAPEX - \frac{VR_t}{(1+d)^N}}{T_t * N}$$

En esta fórmula N corresponde con el número de años en el que la tecnología está en uso, E es el coste del combustible/electricidad, P es el coste por emisiones de CO₂, O&M son los costes de operación y mantenimiento, CAPEX es coste inicial de cada tecnología, VR es el valor residual de la tecnología actual de gas natural al principio del periodo de tiempo considerado, d es la tasa de descuento, y T son las toneladas de producto producidas cada año.

De esta manera el CN de cada tecnología (t) en cada año de inversión (y) se calcula como el valor presente de cada tecnología (CAPEX), restando el valor residual al final del periodo de estudio (VR), y sumando todos los costes de operación durante el periodo de tiempo considerado. Según información proporcionada directamente por el ITC, la vida útil de las tecnologías actuales para la fabricación de cerámica es de alrededor de 15 años, por ello,

para la facilidad del estudio, se evaluará el CN para periodos de 15 años, permitiendo así dar una visión a largo plazo de los costes totales de cada tecnología.

Uno de los elementos más importantes en este estudio es la tasa de descuento. Este es un concepto financiero que representa el porcentaje o tasa de interés que se aplica a un capital o flujo de efectivo futuro para calcular su valor en el presente. Es decir, permite traducir el valor del dinero que se recibirá o pagará en el futuro a su equivalente actual, teniendo en cuenta que el dinero hoy vale más que el dinero en el futuro debido a factores como la inflación, el riesgo y el costo de oportunidad (INEAF BUSINESS SCHOOL, 2025).

A continuación, se analizará el papel de cada uno de los componentes de este CN.

6.1.2 DATOS

6.1.2.1 CAPEX

Los costes de inversión son decisivos cuando se comparan varias tecnologías a largo plazo. A continuación, se resumen los valores de CAPEX y capacidades productivas facilitados — en su mayoría— por **SACMI**, a partir de un estudio real para una planta nueva dimensionada a **15 000-18 000 m²/día** (123420 t, asumiendo una densidad media de 22 kg/m²). Las máquinas térmicas consideradas fueron:

- Atomizador de gas natural ATM-200
- Horno de gas natural FMS-355/201,6 m
- Secador de gas natural ECP-350/31,1 m

Atomizador

El atomizador de gas natural que utiliza SACMI para su estudio tiene un valor de compra de 3.2 M€, el mismo valor que un atomizador que utilice biometano como combustible alternativo. Con respecto a la alternativa de hidrógeno, el precio se eleva un 20%, hasta los

3.84 M€. La alternativa de un atomizador eléctrico hoy en día la estiman como un 60% más cara, alcanzando un valor de 5.12 M€.

Combustible	CAPEX	Capacidad anual
Gas natural	3,2 M€	123420 t
Biometano	3,2 M€	123420 t
Hidrógeno	3,84 M€	123420 t
Eléctrico	5,12 M€	123420 t

Tabla 21: CAPEX de los atomizadores

Secador

SACMI utiliza un secador de gas natural con un valor de 2.4 M€, que otra vez es el mismo para un secador que utilice biometano como alternativa. Al igual que con el atomizador, el secador de hidrógeno es un 20% más caro, es decir, 2.88 M€.

Con respecto a las alternativas eléctrica para el secado de baldosas (bombas de calor, microondas, infrarrojos, y resistencias eléctricas) solo se han encontrado datos económicos de las bombas de calor. Una bomba de calor con una capacidad productiva de 80 kT de producto al año está valorada en 2.28 M€.

Finalmente, una de las opciones más interesantes que se van a estudiar, es la posibilidad de recuperación de calor de la zona de cocción para su uso en el secado de baldosas. Para ello SACMI ha llevado a cabo estudios y propone la siguiente solución: “Duplicando la longitud del secadero (ECP-350/62,2m) podemos realizar el proceso sin ningún consumo energético adicional, simplemente recuperando calor residual del horno. Al aumentar la longitud, disponemos de mayor tiempo de secado, y podemos realizar el proceso a menor temperatura.

La inversión, lógicamente, se debe considerar como el doble de la original.” Por lo que el coste de inversión de esta opción se situaría en 4.8 M€.

Tecnología	CAPEX	Capacidad anual
Gas natural	2,4 M€	123420 t
Biometano	2,4 M€	123420 t
Hidrógeno	2,88 M€	123420 t
Bomba de calor (eléctrica)*	3,52 M€	123420 t
Secado con recuperación de calor (secador duplicado a 62,2 m)	4,8 M€	123420 t

Tabla 22: CAPEX de los secadores

* Se ha ajustado el precio multiplicándolo por un factor que iguala la capacidad anual, con el fin de facilitar una mejor comparación del CAPEX.

Cocción

Para la etapa más importante de la cadena de producción, SACMI dispone de un horno de gas natural de 201,6 m con un valor de 6.4 M€, otra vez, el mismo valor para un horno que utilice biometano como combustible. De la misma manera que en las etapas anteriores, el coste de un horno que utilice hidrógeno es un 20% más caro, alcanzando un valor de 7.68 M€.

En el caso del horno eléctrico, se ha contactado con Systemfoc, el desarrollador del horno eléctrico de cerámica utilizado en L’EQUIPE. Se trata de un horno con una producción diaria de 4000 m² con una inversión inicial de 2.26 M€, valor que Systemfoc ha proporcionado personalmente.

Combustible	CAPEX	Capacidad anual
Gas natural	6,4 M€	123420 t
Biometano	6,4 M€	123420 t
Hidrógeno	7,68 M€	123420 t
Eléctrico (Systemfoc)**	9,32 M€	123420 t

Tabla 23: CAPEX de los hornos

** Se ha ajustado el precio multiplicándolo por un factor que iguala la capacidad anual, con el fin de facilitar una mejor comparación del CAPEX.

Fritas

Con respecto a la fabricación de fritas no se han conseguido datos económicos que permitan realizar el estudio. De todas maneras, se ha realizado una estimación tomando como referencia la industria del vidrio, una de las más similares a la producción de fritas.

Los hornos tradicionales de vidrio, con un consumo de 4 GJ/t = 1111 kWh/t cuestan alrededor de 1.5 millones de euros. El consumo tradicional para la fabricación de fritas es de 1200 kWh/t, muy parecido al del vidrio, por lo que podemos asumir que el coste de estos aparatos es parecido. (*This results in an energy use of approx. 4GJ/t for a container batch containing 76% cullet. It allows high thermal efficiencies and preheat temperatures at a theoretical maximum of 1480oC, and the hot flue gases exit the regenerator at 450–550oC (TNO, 2007). The capital cost for heat recovery in air/fuel furnaces reaches EUR 1.5 million*) (I. Papadogeorgos, 2019)

6.1.2.2 Opciones de financiación

Se ha realizado un análisis de convocatorias públicas que fomentan y hacen atractiva la sustitución de los procesos cerámicos convencionales por nuevas alternativas de fabricación con menor huella de carbono.

Las empresas cerámicas disponen de distintos mecanismos de financiación pública que pueden aprovecharse para financiar la transición hacia estas rutas productivas descarbonizadas. A continuación, se describen las características esenciales de los programas de ayuda más relevantes identificados.

Es importante señalar que estas ayudas de financiación no se han incorporado en la fórmula del Coste Nivelado; sin embargo, se han detallado y explicado debido a su relevancia, ya que pueden tener un impacto significativo en la planificación de inversiones y deberían ser consideradas por las empresas al tomar decisiones.

6.1.2.2.1 PERTE Descarbonización Industrial (GOBIERNO DE ESPAÑA, 2022)

El PERTE de Descarbonización Industrial es un plan del Gobierno español, aprobado el 27 de diciembre de 2022, que quiere acelerar la transición de las fábricas hacia procesos con menos emisiones y así llegar a la neutralidad climática en 2050. Cuenta con 3.100 millones de euros de dinero público y aspira a mover hasta 11.800 millones en total. Si todo va según lo previsto, permitirá recortar unos 13 millones de toneladas de CO₂ al año, aumentar la competitividad industrial cerca de un 10 % y crear alrededor de 8.000 empleos.

Para lograrlo, el PERTE ofrece 4 líneas de ayuda: ayudas integrales a la descarbonización, apoyo a proyectos IPCEI de hidrógeno renovable, fondo piloto de contratos por diferencias de carbono y financiación de nuevas plantas altamente eficientes. La más interesante para la cerámica es la Línea 1, que financia proyectos que reduzcan emisiones de forma directa, por ejemplo:

- Electrificar hornos, secaderos o atomizadores, sustituyendo el gas por electricidad de origen renovable.
- Instalar sistemas de gestión energética o recuperar calor residual.
- Introducir hidrógeno verde u otras tecnologías limpias.

Las empresas pueden obtener entre un 30 % y un 50 % del coste de inversión (según su tamaño) en forma de subvenciones y préstamos blandos. Con estas ayudas, la cerámica española puede rebajar su consumo de gas, cumplir la normativa climática europea y ganar ventaja en los mercados que piden productos con baja huella de carbono. En definitiva, el PERTE se convierte en una palanca clave para que el sector cerámico dé el salto hacia una producción más eficiente y sostenible.

En este aspecto, cabe indicar que la empresa Equipe Cerámicas ha sido una de las empresas beneficiarias de la línea 1 del PERTE de descarbonización industrial. En su caso, esta subvención tiene el objetivo de alcanzar una reducción de 1.154,46 toneladas de CO₂ en emisiones directas e indirectas, y para ello ha obtenido una ayuda de 478.457 euros (MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO, 2025).

6.1.2.2.2 Certificados de ahorro energético (CAEs)

El sistema de Certificados de Ahorro Energético (CAE) (MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2023), regulado por el Real Decreto 36/2023 y la Orden TED/815/2023, es un documento electrónico que certifica el ahorro energético obtenido a través de actuaciones de eficiencia energética. Cada CAE representa 1 kWh de ahorro energético. Estos certificados permiten a empresas y particulares monetizar los ahorros logrados, recuperando parte del coste de las inversiones en eficiencia energética.

Cuando una fábrica cerámica sustituye equipos basados en combustibles fósiles por alternativas que reduzcan su consumo energético, por tanto, puede generar CAE. El titular

de ese ahorro tiene la opción de ceder los certificados a un Sujeto Obligado o Delegado a cambio de una compensación económica. Por ejemplo, un proyecto que ahorre 500 kWh al año obtendría 500 CAE.

Es muy importante destacar que este tipo de financiación solo aplica a aquellos nuevos procesos que reduzcan el consumo energético. En el caso de la cerámica, sustituir el gas natural por biometano o hidrógeno, no reduce su consumo energético, por lo que no generaría CAE. En cambio, soluciones como los atomizadores eléctricos, los secadores con bombas de calor, por microondas o resistencias eléctricas, o los hornos eléctricos, sí que reducen el consumo de energía, por lo que serían aplicables para la obtención de CAE.

Los CAE se pueden obtener aun cuando el proyecto haya recibido otras subvenciones, salvo si estas se financian con cargo al Fondo Nacional de Eficiencia Energética (FNEE).

Procedimiento básico

1. Informe técnico: cuantifica el ahorro conforme a la metodología oficial.
2. Verificación ENAC: una entidad acreditada comprueba los datos.
3. Solicitud al Ministerio: una vez verificado el proyecto, se piden los CAE.
4. Registro y cobro: los certificados se inscriben y se paga la contraprestación pactada.

Usos y ventajas de los CAE

- Venta de certificados a empresas que necesiten cumplir objetivos de ahorro, generando ingresos adicionales.
- Cumplimiento propio de metas de eficiencia o emisiones.
- Puerta a incentivos extra: algunos programas fiscales o de ayudas valoran la posesión de CAE.

En definitiva, el sistema de CAE convierte los ahorros energéticos derivados de las nuevas tecnologías bajas en carbono de la industria cerámica en un ingreso tangible, mejorando el retorno de la inversión y acelerando la transición hacia una producción más limpia.

6.1.2.2.3 Innovation Fund de la EU.

El Innovation Fund es el instrumento con el que la Unión Europea impulsa tecnologías de cero emisiones netas en sectores industriales y energéticos. Se nutre de la venta de derechos del EU ETS y dispondrá de unos 40 000 M € entre 2020 y 2030 para repartir en convocatorias y subastas competitivas (EUROPEAN COMMISSION, 2025).

A diferencia de otros programas, el fondo puede cubrir hasta el 60 % de los costes relevantes de un proyecto, e incluso adelantar parte de la ayuda conforme se van cumpliendo hitos. Las convocatorias se lanzan cada año para proyectos grandes, medianos y pequeños; la última (IF24) moviliza 2400 M € solo para tecnologías net-zero.

¿Por qué interesa a la industria cerámica?

La cerámica forma parte de las industrias intensivas en energía contempladas por la Comisión Europea. Esto significa que cualquier iniciativa que rebaje de manera novedosa sus emisiones, por ejemplo:

- Sustitución del gas natural por combustibles libres de emisiones
- Hornos cerámicos eléctricos
- Atomizadores eléctricos
- Secado con bombas de calor, por microondas o resistencias eléctricas.

puede presentarse al Innovation Fund si demuestra una reducción sustancial de CO₂ y un enfoque tecnológico pionero.

Además del apoyo económico, obtener la etiqueta Innovation Fund refuerza la credibilidad ante inversores y clientes, y coloca a la cerámica europea en la primera línea de la transición climática. Así, el programa se convierte en una palanca esencial para financiar y escalar las nuevas rutas de descarbonización que el sector necesita para seguir siendo competitivo en un mercado cada vez más exigente en huella de carbono.

6.1.2.3 OPEX

6.1.2.4 Precio del combustible/energía

La fabricación de azulejos, fritas y otros productos cerámicos es **una de las ramas más intensivas en energía de toda la industria europea**; la propia Comisión Europea la incluye entre los sectores “energy-intensive” que dependen fuertemente de combustibles para el secado y la cocción, y de electricidad para molienda, atomización y servicios auxiliares (EUROPEAN COMMISSION, 2025).

El precio de la energía es altamente volátil y representa un riesgo significativo para las empresas; algunos ejemplos de esta situación son:

- El precio europeo del gas TTF pasó de 18 €/MWh a un récord de 345 €/MWh en cuestión de 1 año, un salto del 1600% (Trading economics, 2025)
- Solo entre diciembre-2024 y febrero-2025 el gas repuntó más del 53 %, según ANFFECC, erosionando de nuevo los márgenes del esmalte y las fritas (ANFFECC, 2025).
- La Comisión Europea subraya que, aun tras la caída de 2023-24, los precios industriales de gas y electricidad siguen de 2 a 4 veces por encima de los niveles previos a 2021, comprometiendo la competitividad de los sectores intensivos en calor (European Commission, 2025).

Esta volatilidad no depende de la eficiencia de la fábrica, sino de factores externos — mercado TTF/MIBGAS, tensiones geopolíticas, tipo de cambio, ETS— que la empresa no

puede controlar. Modelar diferentes escenarios de precio es, por tanto, un requisito para cualquier decisión de inversión a 15 años.

Como conclusión, el combustible y la electricidad no son un coste más: determinan la viabilidad económica de la cerámica y son, a la vez, el vector de mayor incertidumbre. Un estudio de sensibilidad bien diseñado es necesario para estudiar las inversiones en basadas en diferentes escenarios.

A continuación, se presenta la información recolectada para el estudio.

Gas Natural

Como se ha mencionado a lo largo de todo este estudio, el gas natural es el combustible que se usa actualmente para la mayor parte de la producción de baldosas cerámicas. Analizando el precio del gas natural en Dutch TTF (Trading Economics, 2025), se estima que, desde mediados de 2023, el gas natural se mantiene estable con un precio medio de unos 30 €/MWh. Por otra parte, según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), 2024) realizado por el PNIEC, estima que el precio del gas natural se mantendrá constante en valores medios anuales durante las próximas décadas. Para un futuro estudio de sensibilidad se estimarán otros dos casos: el primero con un precio constante más elevado, de 40 €/MWh, y el segundo con un precio inferior, de 20 €/MWh.

Es importante destacar que los precios mencionados corresponden al mercado mayorista, para poder hacer una mejor representación del coste de la energía, es necesario hablar en términos de precio final del consumidor. Al precio mayorista hay que añadirle los peajes necesarios, y en este caso se añade la tarifa RL.4 del gas (consumos de 50.000 a 300.000 kWh/año), con un precio establecido de 14,5 €/MWh.

Teniendo esto en cuenta, el valor final medio de gas se estima en unos 44,5 €/MWh, con un tope de 54,5 €/MWh y un límite inferior de 34,5 €/MW hasta el año 2070.

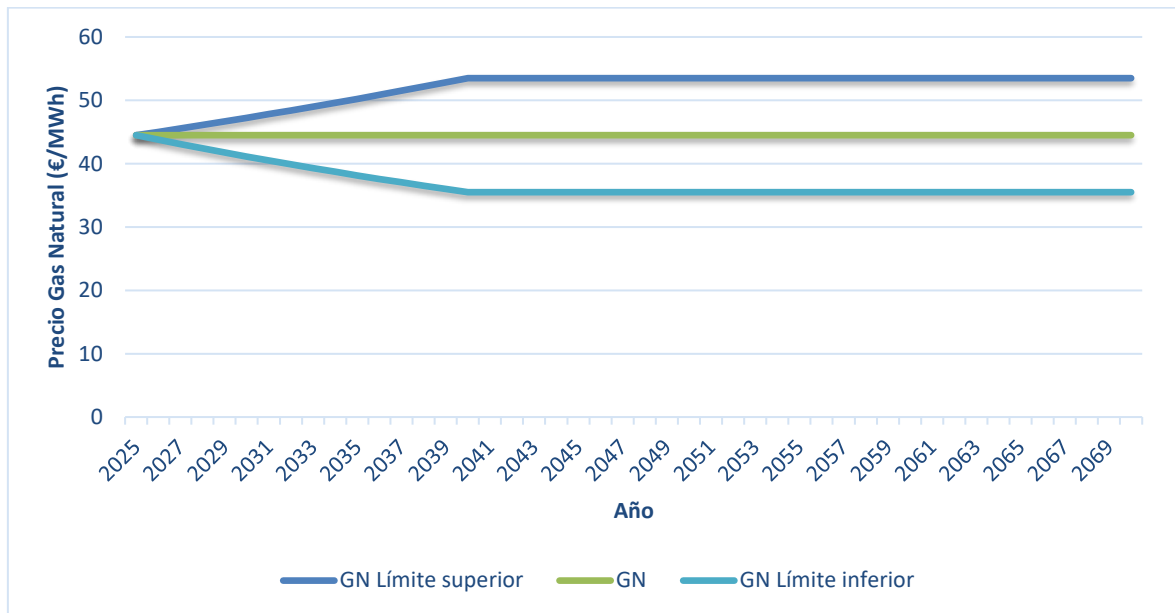


Figura 31: Proyección del precio del gas natural hasta 2070

Biometano

La evolución histórica de los precios del biogás ha estado vinculada a las proyecciones del gas natural fósil, ya que el biogás se presenta como una alternativa descarbonizada y el sobreprecio que los clientes están dispuestos a pagar refleja el valor asignado a la reducción de emisiones de CO₂ u otros incentivos a la descarbonización (Bergnes, 2023). Sin embargo, a lo largo de la década de 2030, el biogás y el biometano podrían empezar a cotizar en función de sus propios costes de producción, y no como un recargo sobre el gas fósil, para competir con los vehículos eléctricos e impulsados por hidrógeno. Además, las reglas más estrictas de la Directiva (UE) 2023/2413 (European Parliament, 2023) sobre el origen de las materias primas harán que aumente el precio de los feedstocks destinados a la producción de biocarburantes y biogás.

Para establecer unos precios estimados del biometano hasta el año 2070, se han evaluado informes como “European Carbon Neutrality: The Importance of Gas” (Warner ten Kate, 2020) y “Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050” (Jessie BIRMAN, 2021). Los dos estudios coinciden en que el precio del biometano será igual o un

poco más caro que en la actualidad. El primero proyecta un precio cercano a 74 €/MWh para 2050, mientras que el segundo lo sitúa en torno a 90 €/MWh.

También se ha tenido en cuenta el estudio de Linares (Linares, 2025), donde explica que el coste final del biometano se construye por capas: primero, el sustrato, cuyo precio oscila entre 7 €/MWh (gas de vertedero) y 63 €/MWh (purines o cultivos intermedios); luego el enriquecimiento para retirar CO₂ (\approx 12 €/MWh) y la inyección en red (\approx 6 €/MWh). Con estos tres bloques Linares sitúa el rango de precios entre 26 €/MWh para mezclas baratas y 72 €/MWh para las más caras; añadir la garantía de origen y, en el futuro, la verificación de sostenibilidad eleva el techo a unos 80 €/MWh.

Al igual que el gas natural, los precios que se comentan en este apartado corresponden al mercado mayorista, y hace falta añadir un peaje para hablar en términos de precio final del consumidor. Para este peaje se ha considerado el mismo que el del gas natural (14,5 €/MWh) ya que se tratan de dos gases de iguales características y distribuidos por los mismos sistemas de transporte.

Con estas referencias se ha definido un rango de precios potenciales del biometano hasta 2070.

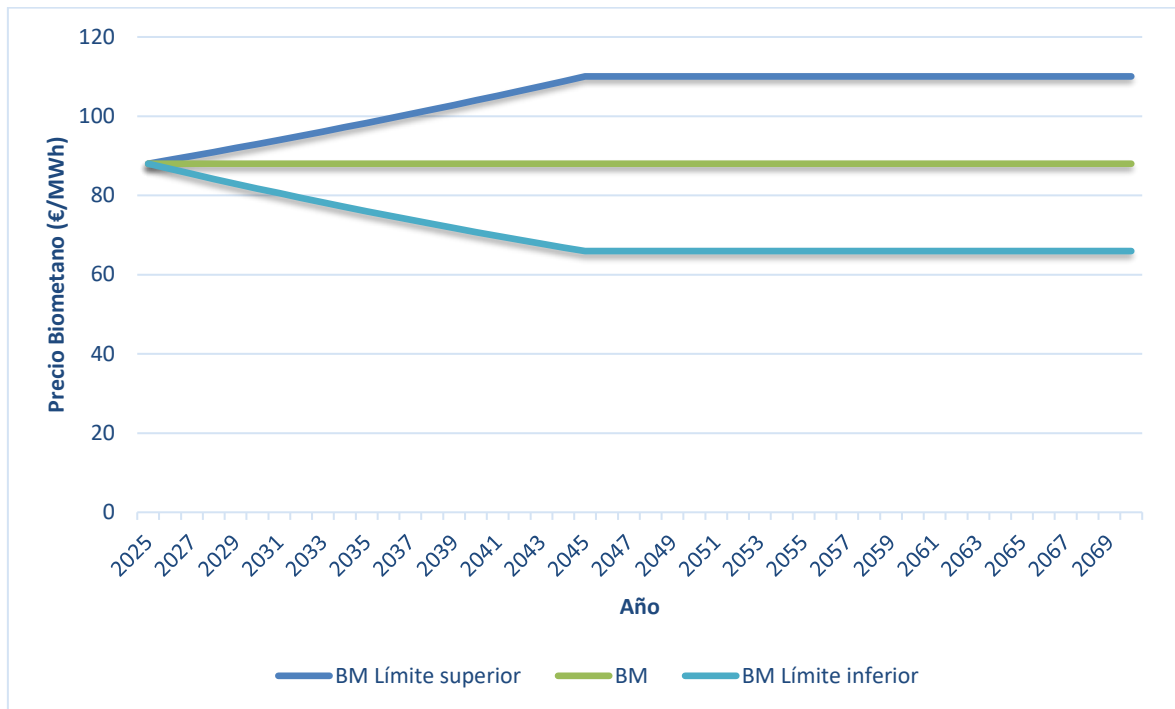


Figura 32: Proyección del precio del biometano hasta 2070

Hidrógeno Verde

La trayectoria futura del precio del hidrógeno verde en Europa es muy incierta. Se están anunciando numerosos proyectos dentro y fuera del continente, y cada uno presenta estimaciones distintas de los costes de producción. Estas diferencias se deben, sobre todo, a la variabilidad en la inversión inicial de los electrolizadores (CAPEX) y al precio de la electricidad según el tipo de contrato, ya sea con plantas renovables, acuerdos de compra de energía (PPA) o la compra directa en el mercado eléctrico (Manuel Pérez-Bravo, 2024).

A finales de 2024, MIBGAS publicó el primer índice ibérico de hidrógeno renovable, situando su precio inicial en 5,85 €/kg (148,36 €/MWh). Diversos estudios prevén un descenso significativo durante la próxima década: para 2030 estiman un rango de 2,5-7,5 €/kg (Hank, 2023). Concordante con estas previsiones, Weißenburger (Weißenburger, 2024), incluye proyecciones del precio del hidrógeno en Alemania hasta 2050. Según sus cálculos, el coste medio del hidrógeno se reducirá en torno a un 60 % entre 2030 y 2040. Por

ello, se prevé que para 2035 el precio se sitúe entre 4,1 y 9,5 €/kg, y que en 2040 baje a un rango de 2,4 a 5,5 €/kg.

Las estimaciones más allá de 2050 son escasas, pero Bloomberg (Bloomberg, 2024) prevé que el hidrógeno seguirá siendo caro durante décadas. Por ello, el presente trabajo adopta un valor de referencia de 3,3 €/kg (83,76 €/MWh) para 2050 y asume su estabilización a partir de entonces.

De la misma manera que en el caso del gas natural y el biometano, las estimaciones existentes del precio del hidrógeno se tratan de precios mayoristas, y no los que tendría que pagar el consumidor final. Debido a la escasez de datos y a la similitud de la distribución del hidrógeno con el gas natural y el biometano se ha considerado que el hidrógeno estará sometido a un peaje similar al de gas natural, de 14,5 €/MWh.

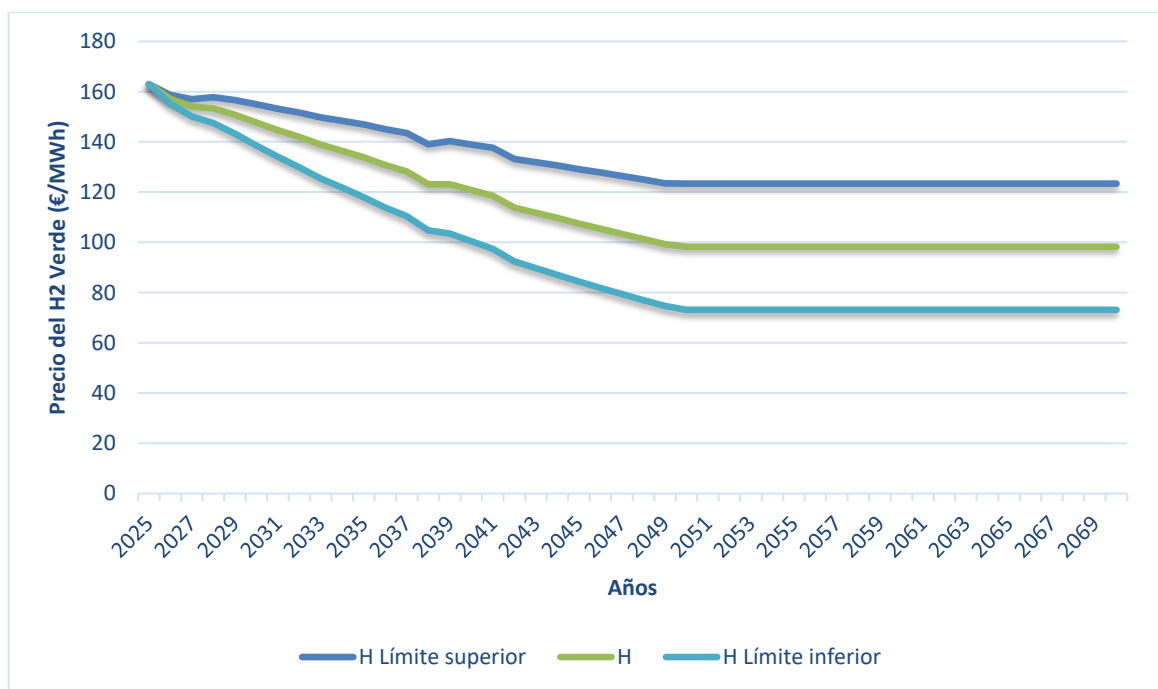


Figura 33: Proyección del precio del hidrógeno verde hasta 2070

Electricidad

El precio de la electricidad es uno de los factores más importante y relevantes para las opciones de electrificación de la industria de la cerámica. Hay muchas estimaciones e hipótesis sobre cuál será el precio de la electricidad en un futuro, para este estudio se ha decido utilizar una estimación de AFRY (Antonio de Juan, 2023), donde proyecta una bajada del coste final hasta unos 65 €/MWh en 2050. La tendencia es bajista hasta 2050, por lo que para este estudio se va a proyectar una bajada del precio hasta los 60 €/MWh para 2070. Este valor actúa como suelo razonable de un sistema plenamente descarbonizado, y no existen señales robustas que justifiquen descensos adicionales estructurales.

Ilustración 5. Precios de electricidad en mercado mayorista, bajo el escenario Central, en términos reales 2021

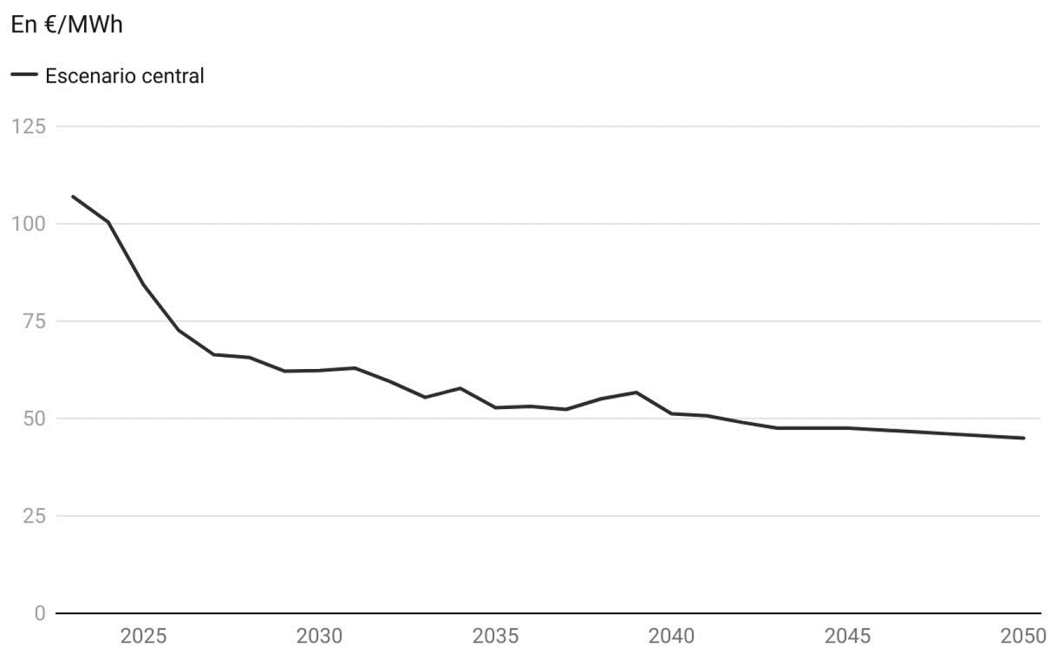


Figura 34: Proyección del coste final de la electricidad (AFRY)

La grafica representa el precio mayorista de mercado, pero para calcular el precio final del consumidor hay que tener en cuenta en coste de términos como los impuestos, peajes y los cargos. Para estimar estos costes extras se ha recurrido a los datos proporcionados por Eurostat, observando el precio por componente de la electricidad. En base a estos datos se

ha extraído el dato de 50,3 €/MWh, que tiene en cuenta los costes de la red, los cargos y los impuestos por capacidad y de medio ambiente.

Con todos estos datos, se ha calculado una estimación del precio de la electricidad hasta el año 2070. Se han incluido otros escenarios superiores e inferiores para poder hacer diferentes estudios de sensibilidad.

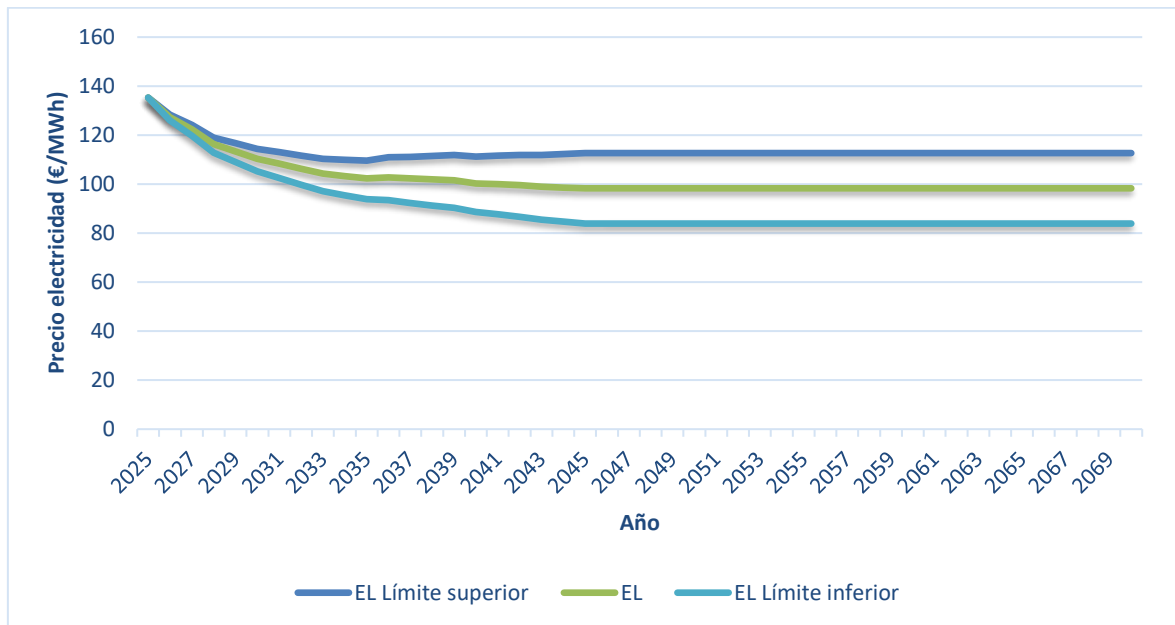


Figura 35: Proyección del precio de la electricidad hasta 2070

6.1.2.5 Precio de las emisiones de CO₂

El precio de las emisiones de CO₂ constituye un parámetro crítico para evaluar la viabilidad económica de tecnologías dependientes del gas natural en la industria cerámica. En el contexto actual (junio de 2025), el mercado europeo de derechos de emisión (EU ETS) registra valores en torno a 82 €/t CO₂, con proyecciones consolidadas que anticipan una trayectoria alcista hasta alcanzar máximos de 150 €/t CO₂ en 2030 según los escenarios de transición acelerada. Para los años siguientes se estima que el precio de las emisiones siga aumentando, llegando a valores de los 400€/t CO₂ en 2050 y 500 €/t CO₂ para 2070.

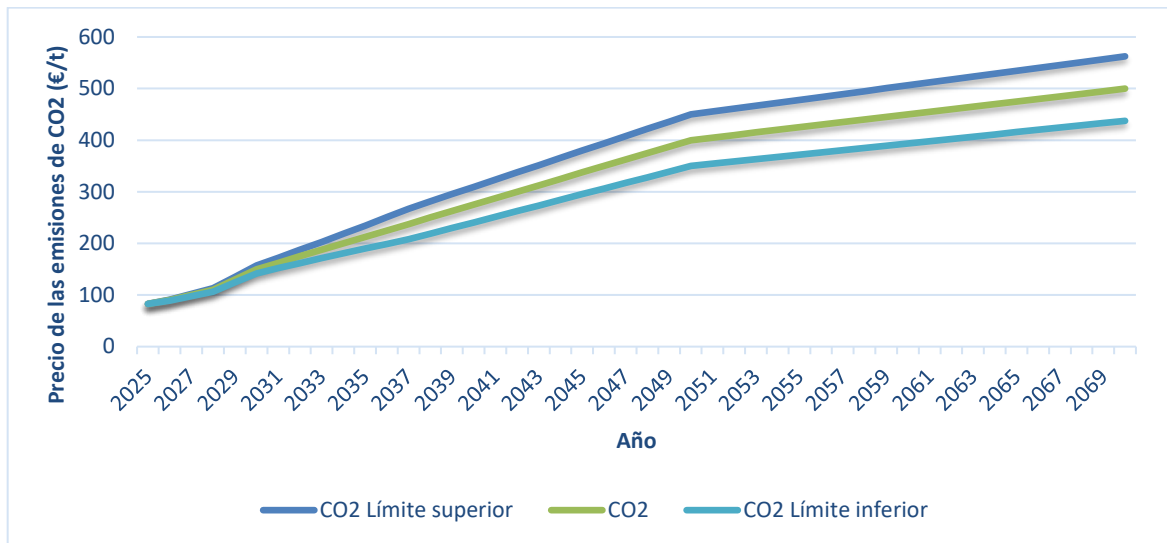


Figura 36: Proyección del precio de las emisiones de CO2 hasta 2070

6.1.2.6 Costes de operación y mantenimiento

Los costes de operación y mantenimiento se han considerado iguales en porcentaje para cada uno de los casos estudiados, siendo alrededor de un 2% del CAPEX.

6.1.3 RESULTADOS

Este trabajo ha analizado desde un punto de vista tecnológico y económico las diferentes alternativas disponibles para descarbonizar la industria cerámica en España. El estudio se ha centrado en las cuatro etapas principales del proceso de fabricación: atomizado, secado, cocción y fusión de fritas, y para cada una de ellas se han evaluado tres vías de descarbonización:

- Sustitución del gas natural por **biometano**.
- Sustitución del gas natural por **hidrógeno verde**.
- Sustitución por **nuevas tecnologías eléctricas**.

Ruta de descarbonización

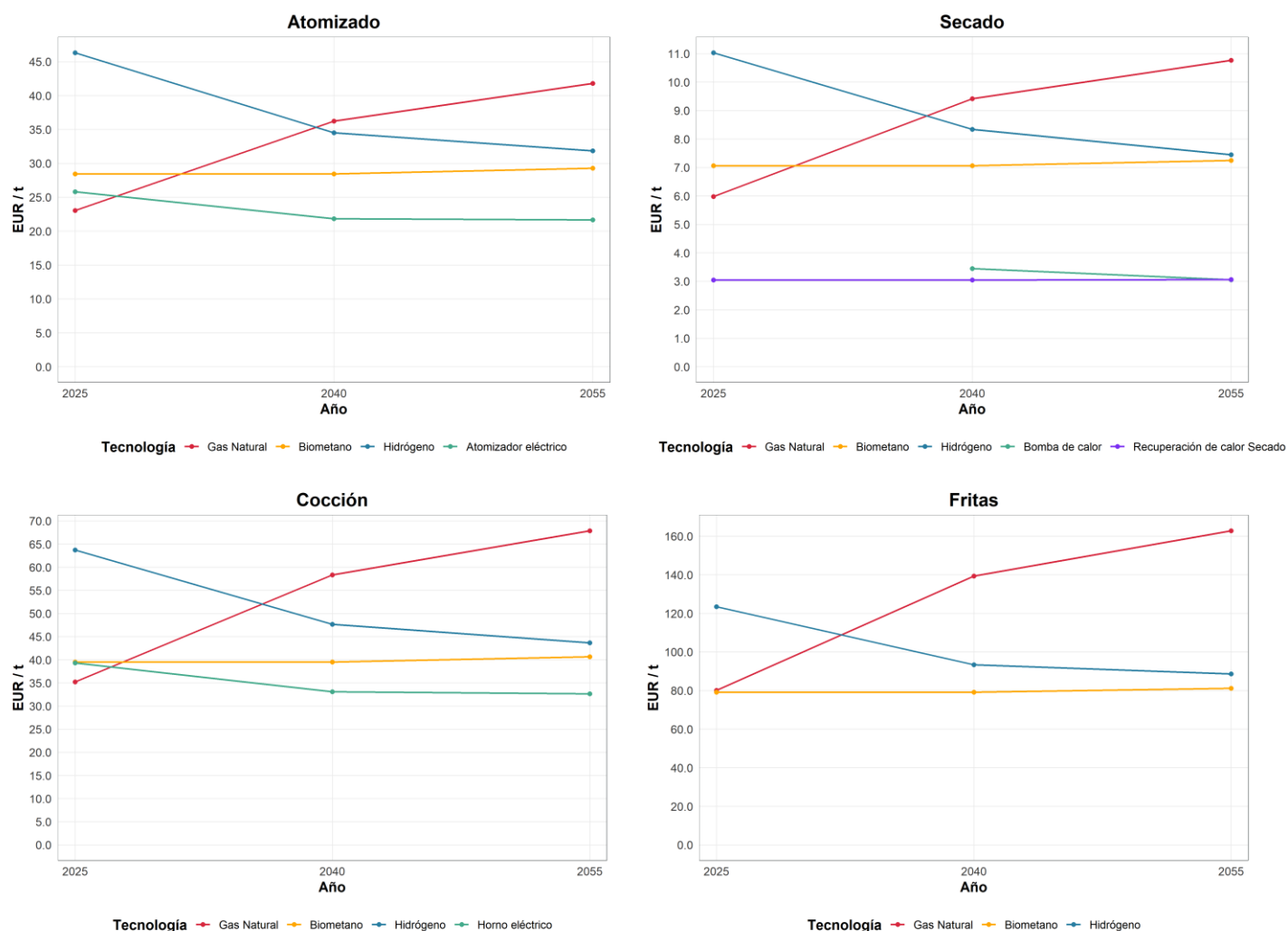


Figura 37: Resultados del coste nivelado para cada tecnología en las distintas etapas del proceso de fabricación, considerando escenarios de inversión en los años 2025, 2040 y 2055.

Estas gráficas muestran la evolución del coste nivelado por tonelada (EUR/t) para cada tecnología disponible en las distintas etapas energéticas de la cadena productiva (atomizado, secado, cocción y fritas), considerando tres momentos clave de inversión: 2025, 2040 y 2055. En cada gráfico se comparan únicamente las opciones tecnológicamente viables para cada etapa y año, permitiendo visualizar de manera clara qué tecnologías resultan más competitivas en términos económicos a lo largo del tiempo.

Atomizado

En el proceso de atomizado, se observa una tendencia creciente en el coste del gas natural, que pasa de ser una de las opciones más económicas en 2025 a la más cara en 2055. El hidrógeno, aunque comienza con un coste elevado, muestra una reducción significativa a lo largo del tiempo, acercándose a los costes del atomizador eléctrico y del biometano en 2055. El atomizador eléctrico mantiene un coste constante y competitivo, mientras que el biometano se mantiene prácticamente estable durante todo el periodo analizado. Así, para 2055, la alternativa eléctrica se sitúa como la más competitiva, situándose el biometano y el hidrógeno con precios muy parecidos un poco por encima de los de la electricidad.

Secado

En el secado, el gas natural también experimenta un notable incremento de costes, superando al resto de tecnologías en 2055. El hidrógeno, aunque parte de un coste alto, reduce su valor significativamente y se sitúa por debajo del gas natural al final del periodo. La bomba de calor (previsión de que sea técnicamente viable en 2040) y la recuperación de calor presentan los costes más bajos y estables, posicionándose como las tecnologías más eficientes y económicas a largo plazo. El biometano mantiene un coste intermedio y estable, sin grandes variaciones. Cabe señalar que existe una línea de investigación pendiente sobre la viabilidad de recuperar calor en hornos eléctricos, aspecto que podría ser determinante para la adopción de bombas de calor en el futuro.

Cocción

En la etapa de cocción, que representa aproximadamente el 50% del consumo y las emisiones, se observan patrones diferenciados entre las tecnologías analizadas, con implicaciones importantes para la estrategia de descarbonización.

El gas natural presenta la evolución de costes más desfavorable, partiendo de aproximadamente 35 EUR/t en 2025 y experimentando un incremento sostenido hasta alcanzar 67 EUR/t en 2055. Este aumento del 90% lo convierte en la tecnología menos competitiva al final del período analizado.

El biometano mantiene una notable estabilidad de costes, oscilando entre 38-42 EUR/t sin variaciones significativas. Esta estabilidad muestra como con el paso de los años el biometano se aleja de la opción eléctrica y se acerca más a los posibles precios del hidrógeno

El hidrógeno muestra la evolución más prometedora en términos de reducción de costes, comenzando en aproximadamente 64 EUR/t en 2025 (el valor más alto) y descendiendo progresivamente hasta 44 EUR/t en 2055. Esta reducción del 31% indica una mejora sustancial en su competitividad, aunque aún no logra igualar al horno eléctrico.

Por último, el horno eléctrico se consolida como la opción más estable y económica, reduciendo su coste desde los 40EUR/t en 2025 hasta prácticamente constante en torno a 32-33 EUR/t a partir de 2040. Esta estabilidad, combinada con su bajo coste, lo posiciona como la alternativa más atractiva para la descarbonización de la cocción cerámica.

Fritas

En la fabricación de fritas, el gas natural evidencia el mayor incremento de costes, alcanzando el valor más alto entre todas las tecnologías en 2055. El hidrógeno reduce su coste a lo largo del tiempo, situándose en 2055 con un coste un 12% más caro que el biometano, que se mantiene prácticamente constante y se consolida como la opción más competitiva y estable en este proceso.

Análisis complementario de sensibilidad

Adicionalmente al estudio base, se realizó un análisis de sensibilidad para cuantificar el impacto de variables clave en el coste final de cada tecnología. Este enfoque permite identificar los factores con mayor influencia y volatilidad en los resultados, tal como se visualiza en los gráficos asociados.

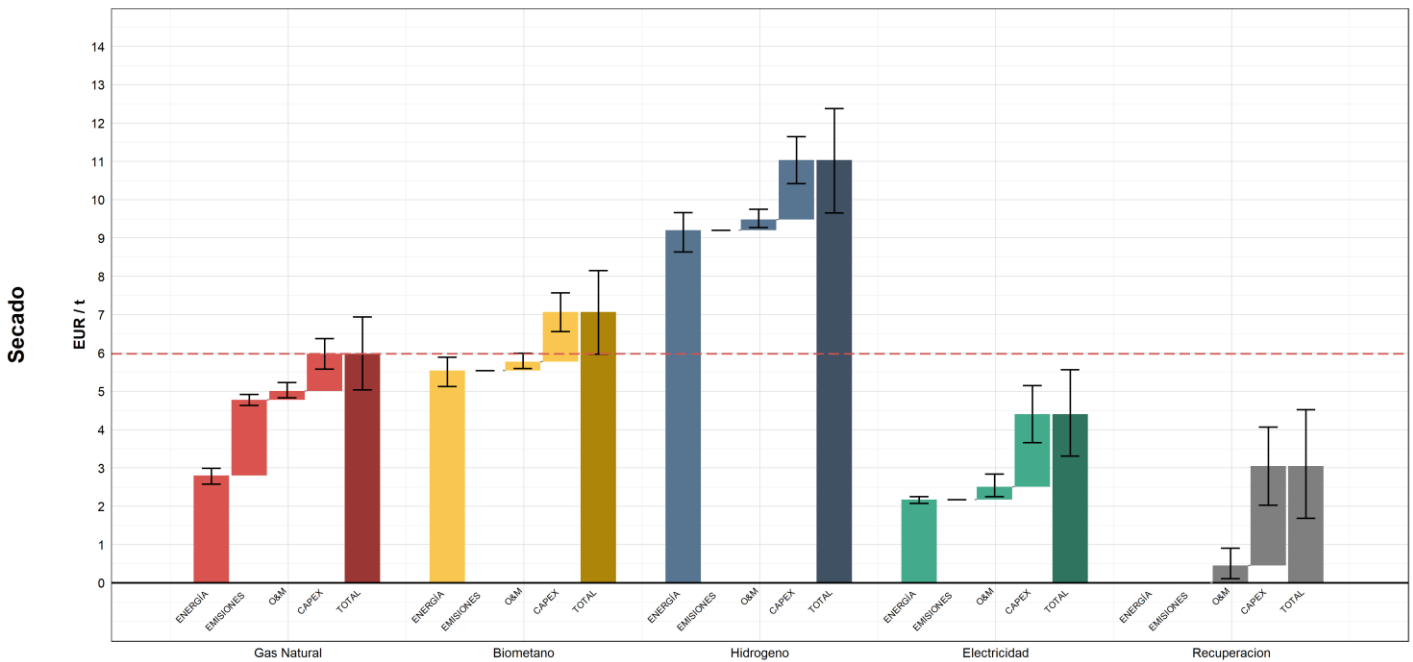
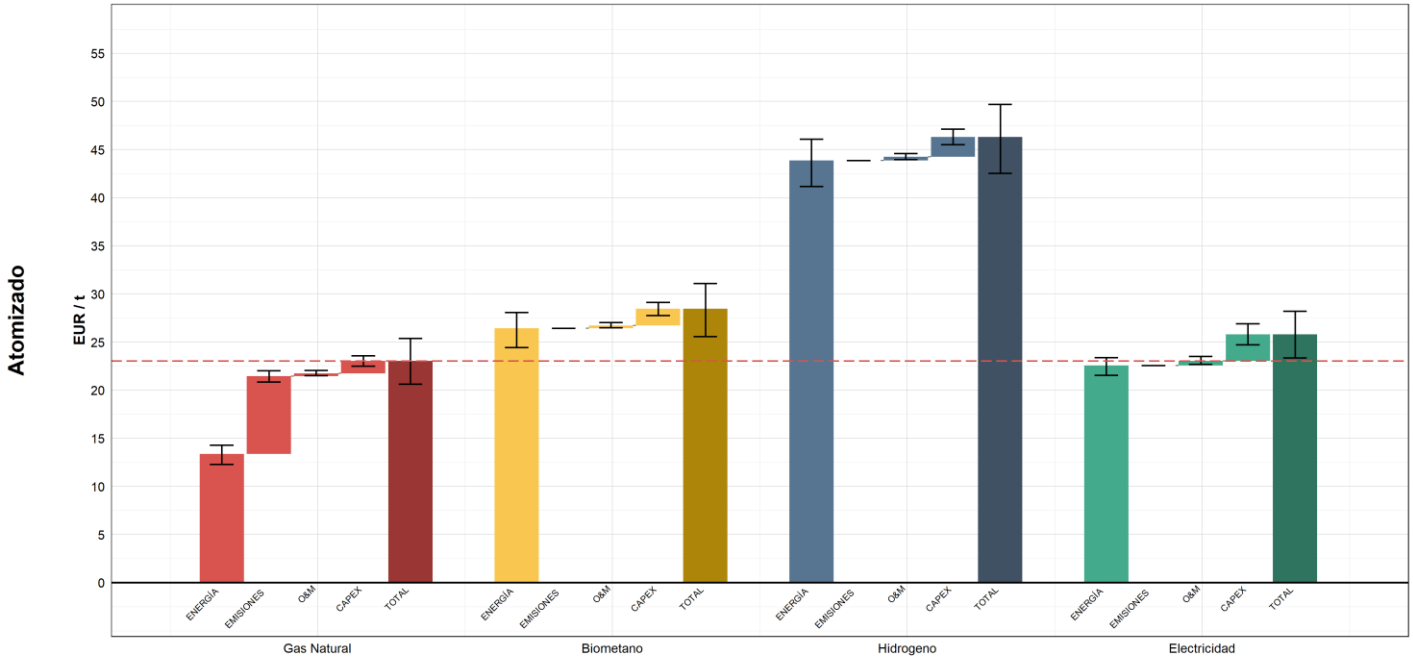
VARIABLES ANALIZADAS

- Precios energéticos: Variaciones de $\pm 30\%$ respecto a las estimaciones iniciales
- Precio de emisiones de CO₂: Variaciones de $\pm 12.5\%$ sobre los valores base.

- Consumo energético de equipos: Variaciones de $\pm 25\%$ respecto a los datos técnicos utilizados
- Inversión inicial (CAPEX): Variaciones de $\pm 20\%$ sobre los costes de equipamiento
- Costes de operación y mantenimiento (O&M): Rango entre 0.5% (límite inferior) y 4% (límite superior) del CAPEX anual, considerando 2% como valor base

Este primer gráfico tiene como objetivo ilustrar la contribución y la variabilidad de cada uno de los componentes que conforman el coste nivelado. No está diseñado para comparar tecnologías ni para mostrar resultados finales, sino para visualizar el peso relativo de cada componente en el coste total. De este modo, permite identificar qué elementos requieren un análisis de sensibilidad más detallado en estudios posteriores.

Comparación de costes por componentes y tecnología



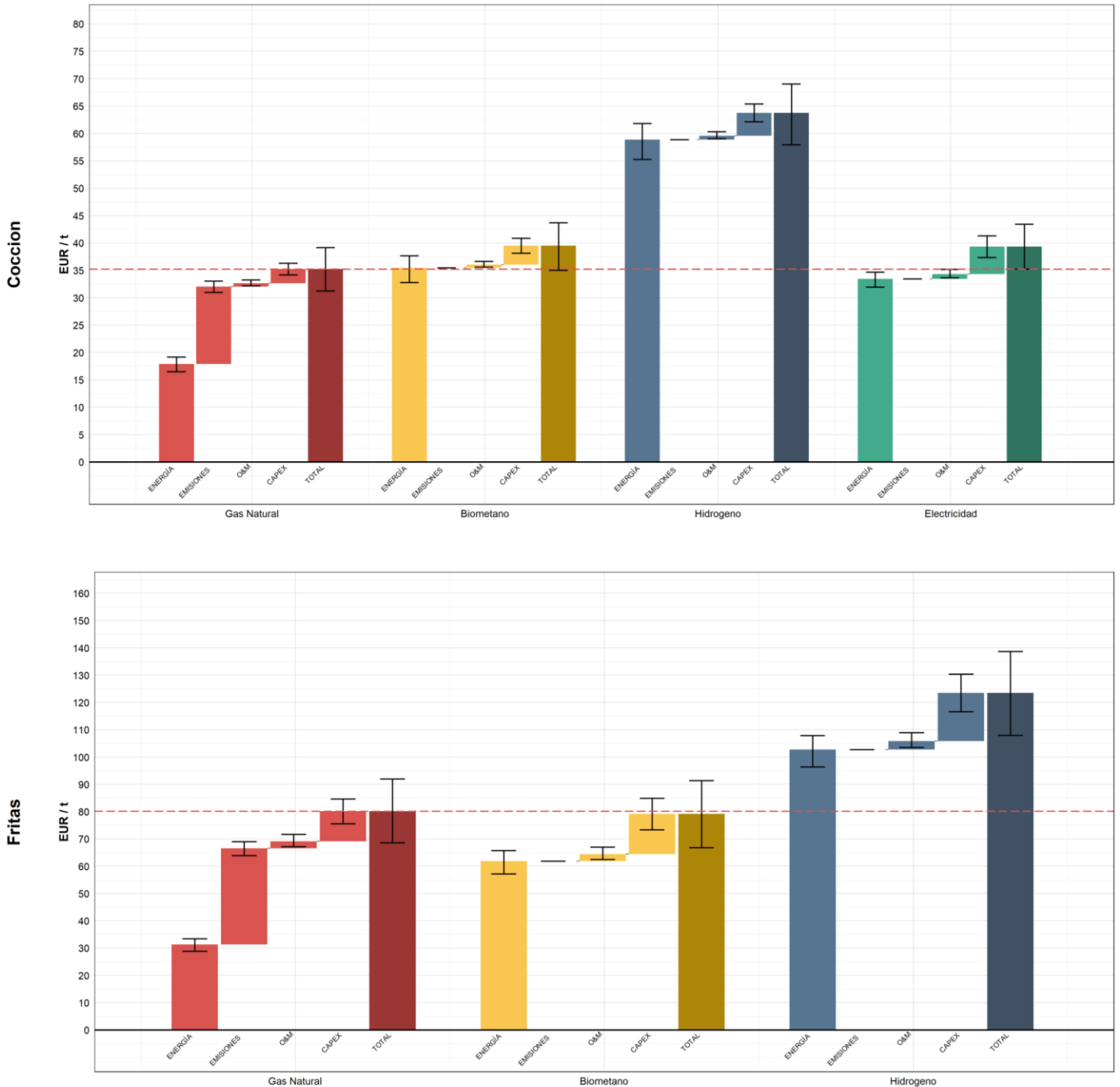


Figura 38: Distribución y variabilidad de los componentes del coste nivelado. Peso y volatilidad de cada componente en el coste total, permitiendo identificar cuáles influyen más y requieren un análisis de sensibilidad más detallado.

En este gráfico se puede apreciar a la perfección cuáles de los componentes del coste final

de cada tecnología son más o menos relevantes.

En el análisis de los costes por componentes y tecnología para cada etapa del proceso (atomizado, secado, cocción y fritas), se observa un patrón común en todas las alternativas: el coste total de la energía es el factor dominante en la mayoría de los casos. Exceptuando las opciones basadas en gas natural, el coste de la energía representa aproximadamente el 90% del coste final de cada tecnología. Este componente integra tanto el consumo energético de los equipos —particularmente incierto— como el precio de mercado de la energía asociado a cada uno, que se prevé muy volátil en los próximos años. Ambas variables son determinantes para la competitividad de cada opción.

Esta alta dependencia del coste energético pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el análisis de sensibilidad sobre el precio de la energía y los consumos específicos de los equipos, ya que pequeñas variaciones en estos parámetros pueden alterar significativamente el resultado económico de cada tecnología.

En el caso concreto del gas natural, además del peso del coste energético, destaca la relevancia del coste de las emisiones de CO₂, que supone una fracción considerable del coste total. Sin embargo, la volatilidad de este componente es relativamente baja, como reflejan los intervalos de variación (whiskers) en el gráfico, debido a la previsibilidad al alza del precio de las emisiones en los próximos años.

Por otro lado, el CAPEX (coste de inversión inicial) representa entre un 15% y un 20% del coste final, pero no constituye el principal factor de coste ni muestra una incertidumbre significativa en comparación con la energía. No obstante, se incluirán gráficos adicionales para confirmar y visualizar estas tendencias de manera más detallada.

En el siguiente gráfico se muestra la sensibilidad del coste nivelado de cada tecnología en cada una de las etapas con respecto al consumo específico de los equipos correspondientes, y al precio de la energía (dos gráficos distintos):

Sensibilidad al consumo de los equipos

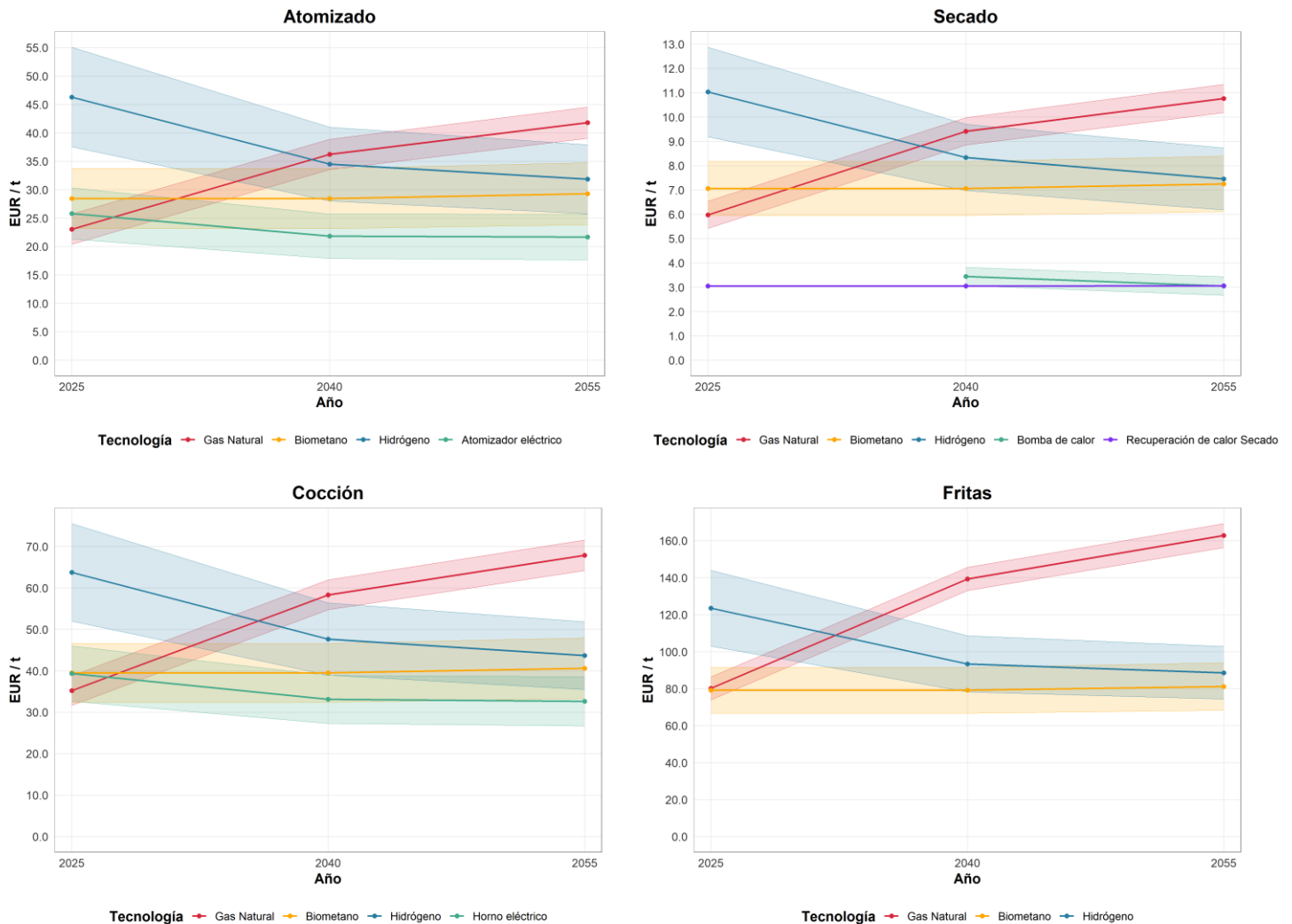


Figura 39: Coste nivelado de cada tecnología en función del consumo específico de los equipos correspondientes a cada una de ellas

Sensibilidad al precio de la energía

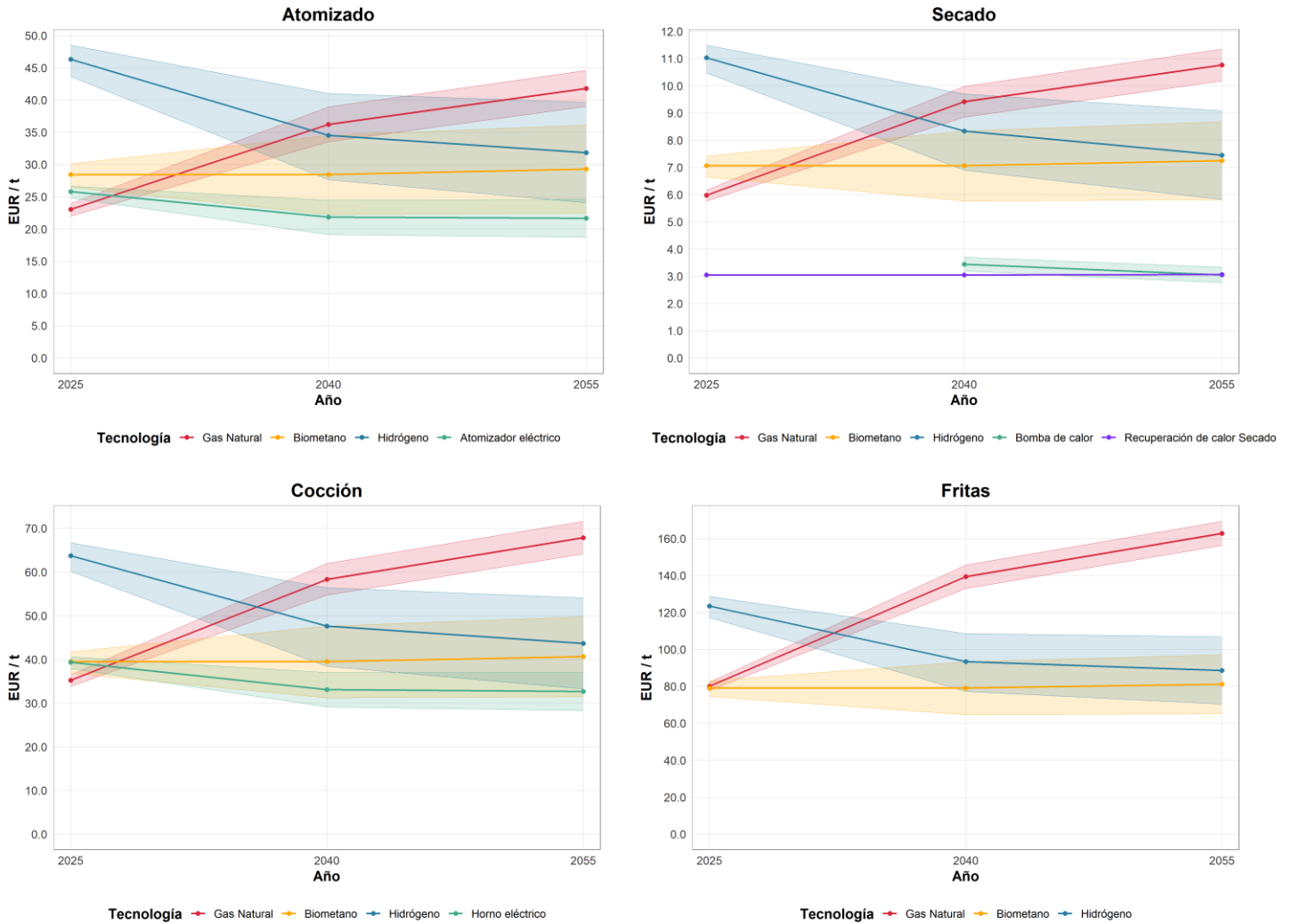


Figura 40: Coste nivelado de cada tecnología en función del precio de mercado del gas natural, biometano, hidrógeno, y electricidad

De estas gráficas se han obtenido los siguientes resultados:

Atomizado

La etapa de atomizado presenta una elevada sensibilidad tanto al consumo de los equipos

como al precio de la energía, lo que genera considerable incertidumbre en la selección de la tecnología más competitiva a lo largo del horizonte temporal analizado.

Sensibilidad al consumo de los equipos

El análisis de sensibilidad al consumo energético pone de manifiesto que las variaciones en el rendimiento de los equipos pueden modificar de forma significativa el orden de competitividad a partir de 2025. Ese año, las bandas de incertidumbre ($\pm 25\%$) muestran un solapamiento considerable entre el gas natural, el biometano y el atomizador eléctrico, lo que implica que pequeñas diferencias en el consumo real pueden cambiar las conclusiones sobre cuál es la opción más competitiva. A partir de 2040, el hidrógeno podría alcanzar niveles de competitividad similares al biometano, y en 2050 ambos competirían por el segundo lugar, tras el horno eléctrico. Cabe destacar que una mejora en la eficiencia de los atomizadores eléctricos, o un aumento en el consumo de las tecnologías basadas en gas, podría hacer que la opción eléctrica se consolidase como la más competitiva incluso en el corto plazo.

Sensibilidad al precio de la energía

El impacto de las fluctuaciones en los precios energéticos ($\pm 30\%$) se intensifica progresivamente hacia 2040 y 2055. Mientras que en 2025 las variaciones de precio no alteran sustancialmente el orden competitivo entre las principales alternativas, en los años posteriores estas fluctuaciones adquieren mayor relevancia. El análisis muestra una gran incertidumbre al precio de la energía ya que las bandas se entrecruzan en muchas de las etapas.

Líneas futuras de trabajo

La alta sensibilidad observada en ambos parámetros subraya la importancia de obtener datos precisos sobre consumos reales de equipos y de monitorizar continuamente la evolución de los precios energéticos para una toma de decisiones informada en esta etapa del proceso. De

todas maneras, hay una parte que no se puede controlar, y lo que interesa es tomar decisiones lo más robustas posibles frente a la incertidumbre.

Secado

La etapa de secado presenta la mayor estabilidad y claridad en la definición de la ruta de descarbonización, mostrando una baja sensibilidad tanto a las variaciones en el consumo de equipos como a las fluctuaciones en los precios energéticos.

Sensibilidad al consumo de los equipos

El análisis revela que la recuperación de calor de los hornos de cocción mantiene una posición dominante con una banda de incertidumbre muy estrecha. Esta tecnología se muestra prácticamente insensible a cambios en la eficiencia de los equipos, ya que su consumo energético es prácticamente nulo, consolidando su ventaja competitiva a lo largo de todo el horizonte temporal. Las bombas de calor se posicionan como la segunda alternativa más viable, aunque presentan una mayor sensibilidad al consumo, evidenciada por bandas de incertidumbre más amplias que no comprometen significativamente su competitividad.

Sensibilidad al precio de la energía

Las fluctuaciones en los precios energéticos ($\pm 30\%$) confirman el patrón observado en el análisis de consumo. La recuperación de calor mantiene su estabilidad económica prácticamente inalterada ante variaciones de precios, dado que aprovecha energía residual que de otro modo se desperdiciaría. Las bombas de calor, dependientes del precio de la electricidad, muestran mayor sensibilidad, pero conservan su posición como segunda opción competitiva en todos los escenarios analizados.

Líneas futuras de trabajo

Tal como se ha mencionado anteriormente, la recuperación de calor en hornos de gas natural es una opción completamente viable. Sin embargo, permanece como una línea de investigación pendiente el estudio de la viabilidad de esta recuperación en un escenario futuro en el que los hornos eléctricos de cocción sean los más utilizados.

Cocción

La etapa de cocción constituye el proceso más crítico de la cadena productiva cerámica, concentrando aproximadamente el 50% del consumo energético y las emisiones del sector. Los resultados del análisis de sensibilidad revelan una complejidad particular en la selección tecnológica para esta etapa.

Sensibilidad al consumo de los equipos

El análisis evidencia una elevada incertidumbre entre las principales alternativas competitivas: gas natural, biometano y horno eléctrico. Las bandas de sensibilidad muestran un solapamiento significativo entre estas tres tecnologías en 2025, lo que indica que variaciones en el consumo real de los equipos ($\pm 25\%$) pueden alterar el ranking competitivo.

Sin embargo, el gas natural presenta una mayor estabilidad en su comportamiento energético, mientras que la tecnología emergente del horno eléctrico muestra un mayor potencial de optimización, con expectativas de reducción de consumos respecto a los valores establecidos.

Sensibilidad al precio de la energía

Similar al comportamiento observado en atomizado, el impacto de las fluctuaciones en los precios energéticos es menos determinante a corto plazo comparado con las variaciones en el consumo de equipos. No obstante, la influencia de los precios energéticos se intensifica progresivamente, incrementando la incertidumbre en las alternativas de descarbonización hacia 2040 y 2055.

Los resultados reflejados en este gráfico permiten extraer varias conclusiones relevantes. En primer lugar, se confirma que el gas natural no representa una alternativa competitiva a largo plazo, incluso bajo escenarios extremos de precios energéticos. Por el contrario, el biometano muestra una alta sensibilidad al precio de la energía, lo que se traduce en una creciente incertidumbre conforme avanza el horizonte temporal. En el caso del hidrógeno, también se observa una notable sensibilidad al coste energético, lo que podría permitirle posicionarse como una opción competitiva frente al biometano y al horno eléctrico en torno a 2055. Finalmente, el horno eléctrico destaca por su baja sensibilidad en comparación con el resto de las tecnologías, manteniendo en todo momento una tendencia claramente descendente en términos de coste.

Líneas futuras de trabajo

Al igual que en la etapa del atomizado, la alta sensibilidad observada en esta etapa crítica subraya la necesidad de realizar pruebas piloto para obtener datos precisos de consumo y monitorizar continuamente la evolución tecnológica, especialmente en hornos eléctricos, donde el potencial de mejora es más pronunciado.

Fritas

La etapa de fritas presenta características particulares en términos de sensibilidad, mostrando una evolución progresiva hacia la convergencia tecnológica a lo largo del horizonte temporal analizado.

Sensibilidad al consumo de los equipos

El gráfico muestra que el gas natural presenta una baja sensibilidad al consumo (banda estrecha), pero un coste creciente y elevado, lo que lo descarta como opción competitiva desde 2040. El biometano es la tecnología más estable frente a variaciones en el consumo, con una banda muy estrecha y costes consistentemente bajos en todo el periodo. El hidrógeno verde muestra una alta sensibilidad al consumo, reflejada en la amplitud de su banda. No

obstante, su coste disminuye progresivamente, y en 2055 podría competir con el biometano en escenarios de consumo reducido.

En conjunto, el análisis sugiere que una mejora en la eficiencia de los equipos podría hacer al hidrógeno competitivo a largo plazo, mientras que el biometano se mantiene como la opción más robusta ante variaciones de consumo.

Sensibilidad al precio de la energía

El gráfico muestra que el gas natural presenta una baja sensibilidad al precio de la energía, pero también una evolución claramente no competitiva, con costes crecientes que lo descartan como alternativa viable desde el corto plazo. El biometano se mantiene como la opción más estable y competitiva, con una ligera tendencia descendente y una sensibilidad moderada. El hidrógeno verde muestra la mayor sensibilidad, con una amplia banda de incertidumbre. Aunque parte de costes elevados, su proyección mejora significativamente y en 2055 puede llegar a competir con el biometano en escenarios de precios bajos.

En conjunto, se prevé una pérdida de relevancia del gas natural y una convergencia entre biometano e hidrógeno verde en el largo plazo.

Líneas futuras de trabajo

Los resultados sugieren la necesidad de estrategias flexibles que permitan adaptarse a la dinámica tecnológica cambiante, especialmente considerando el potencial disruptivo del hidrógeno verde hacia 2055. Esta flexibilidad abre diversas líneas futuras de trabajo específicas para la etapa de fritas, como desarrollos de infraestructura híbrida que permita la transición gradual entre tecnologías conforme evolucionen los costes relativos o el análisis de viabilidad técnica para alternativas de electrificación de esta etapa.

Finalmente, se presenta el análisis de sensibilidad correspondiente al CAPEX de los equipos con el objetivo de confirmar la hipótesis de que este componente tiene una influencia limitada en el coste nivelado total de las tecnologías analizadas.

Sensibilidad al CAPEX de los equipos

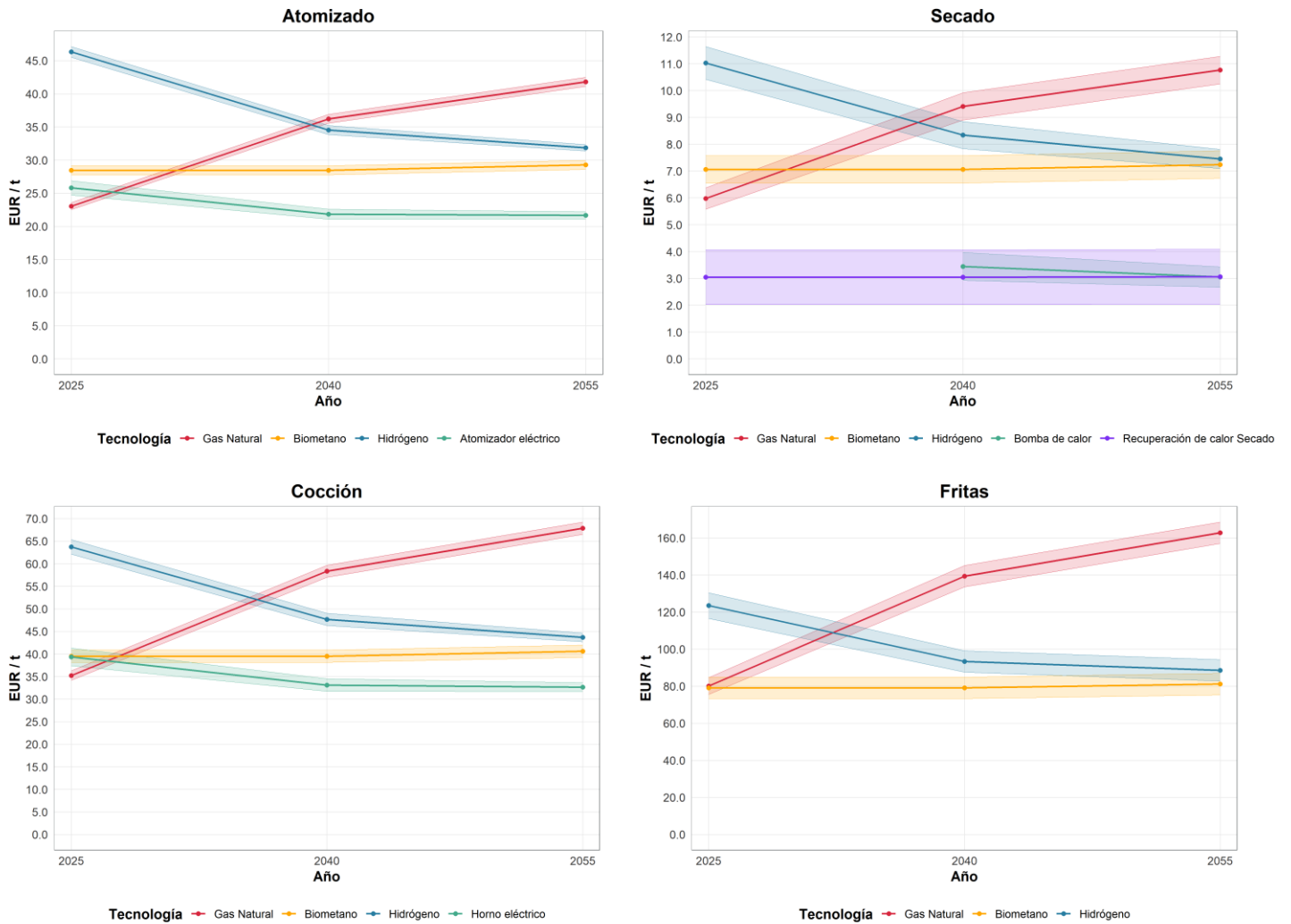


Figura 41: Impacto del CAPEX en el coste nivelado total

El análisis del gráfico confirma que las variaciones en el CAPEX tienen un impacto limitado sobre el coste nivelado total en todas las etapas del proceso (atomizado, secado, cocción y fritas). Las bandas de sensibilidad asociadas al CAPEX son estrechas y las diferencias entre tecnologías se mantienen prácticamente constantes a lo largo del tiempo, sin alterar el orden de competitividad entre las alternativas. Esto demuestra que los cambios en la inversión inicial no modifican de manera significativa las decisiones de inversión, validando la

hipótesis de que el CAPEX no es un factor determinante frente a otros componentes del coste.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

La industria cerámica es uno de los sectores más relevantes para la economía española, especialmente para la provincia de Castellón, en la Comunidad Valenciana. A nivel energético y climático, su impacto es muy significativo: concentra el 55 % del consumo de gas industrial de la comunidad y el 7 % del total nacional y genera alrededor del 30% de todas las emisiones de CO₂ del sector industrial en la Comunidad Valenciana y el 5 % del total nacional. Además, su contribución socioeconómica es clave: el sector de las baldosas cerámicas generó en 2023 un valor de 6.500 millones de euros (el 3,4 % del PIB industrial español) y más de 91.000 empleos directos e indirectos, representando el 3,8 % del empleo industrial del país.

A lo largo del trabajo se ha demostrado con claridad que la descarbonización de esta industria no solo no es una necesidad urgente, sino que es posible y económicamente viable a medio plazo si los precios del CO₂ siguen aumentando. Además, presenta importantes oportunidades de empleo y de creación de industria en la zona ya que los pioneros en la fabricación de hornos eléctricos están radicados en la provincia.

El encarecimiento progresivo de los derechos de emisión de CO₂ seguramente provoque que el uso del gas natural deje de ser competitivo a medio plazo. Por ello, los esfuerzos deben centrarse en transformar las etapas del proceso con mayor consumo energético: el atomizado, el secado, la cocción, y la producción de fritas. Estas cuatro fases, que concentran prácticamente el 100 % del consumo energético y de las emisiones del proceso, marcan la hoja de ruta de la descarbonización. Además, como se ha analizado en este estudio, se trata de procesos independientes entre sí, lo que permite aplicar soluciones distintas en cada uno, sin que una elección condicione a las demás. Esto abre un amplio abanico de alternativas tecnológicas.

En este contexto, la industria vive una auténtica transformación, con el desarrollo de nuevas tecnologías que buscan sustituir al gas natural de forma eficaz y viable. Las principales líneas de trabajo son el uso de biometano o del hidrógeno verde como combustible alternativo y la electrificación de los procesos mediante nuevos equipos. Todo indica que este cambio avanza a gran velocidad: la descarbonización ha dejado de ser un objetivo lejano para convertirse en una necesidad inmediata, que abre una oportunidad única para desarrollar las tecnologías del futuro. Cualquier inversión que se decida ahora y se implante en los próximos años llegará a 2040 o 2050 por lo que hay un fuerte incentivo a que estas tecnologías sean descarbonizadas.

Tras analizar técnica y económicamente todas las alternativas de descarbonización, la electrificación se posiciona, en general, como la opción más competitiva en prácticamente todas las etapas del proceso productivo. La única excepción sigue siendo la fabricación de fritas, donde aún no se ha desarrollado una tecnología eléctrica viable. En el resto de las fases, los equipos actuales basados en gas natural pierden competitividad año tras año, dejando de ser una opción competitiva en medio, y largo plazo. Bajo los supuestos centrales de costes y consumos, el uso de biometano, por su parte, suele situarse ligeramente por encima de la electrificación en términos de coste, lo que lo convierte en una alternativa posible, aunque con ciertas limitaciones por su potencial limitado. En cuanto al hidrógeno verde, aunque hoy por hoy está lejos de ser competitivo, comienza a contemplarse como una opción a futuro en donde la electrificación no sea una opción, conforme avance su desarrollo tecnológico y disminuyan sus costes.

Es fundamental destacar que los resultados obtenidos en este estudio están fuertemente condicionados por la sensibilidad a ciertos factores clave. En concreto, se ha comprobado que aproximadamente el 90 % del coste final de cada alternativa de descarbonización está determinado por el coste de la energía consumida, el cual depende tanto del consumo energético de los equipos como del precio de mercado de dicha energía. Ambos factores presentan una elevada incertidumbre, y variaciones del orden del 25 % en cualquiera de ellos pueden alterar significativamente el resultado final, situando a cualquiera de las tres

alternativas —electrificación, biometano o hidrógeno verde— como la más competitiva según el escenario considerado.

Ante este nivel de sensibilidad, se vuelve especialmente relevante priorizar inversiones en tecnologías que permitan reducir el consumo energético de los equipos. Disminuir el consumo no solo mejora la eficiencia, sino que tiene un impacto directo en el coste total de las soluciones, pudiendo inclinar la balanza a favor de una u otra opción. Además, se ha evidenciado la necesidad urgente de mejorar las proyecciones sobre los precios futuros de la energía. La elevada incertidumbre en los escenarios a medio plazo dificulta una toma de decisiones clara y fundamentada; sin embargo, es imprescindible tomar las decisiones más robustas posibles frente a esta incertidumbre inevitable.

La posible electrificación de los procesos productivos implicaría sustituir por completo el consumo actual de gas natural por energía eléctrica, lo que conllevaría un aumento muy significativo de la demanda eléctrica del sector. Un cambio de esta magnitud no solo transforma los procesos industriales, sino que también plantea exigencias importantes sobre las infraestructuras eléctricas del entorno. En este sentido, se ha identificado la necesidad crítica de reforzar y adaptar la red eléctrica para poder hacer frente a este nuevo escenario.

Dado que la gran mayoría de la industria cerámica española se concentra en la provincia de Castellón, si la electrificación es la opción elegida, resulta imprescindible planificar e impulsar un proyecto estratégico de ampliación y modernización de la red eléctrica en esta zona. Este proyecto debería tener como objetivo garantizar la disponibilidad, estabilidad y capacidad suficiente para abastecer la electrificación total del sector, así como facilitar la integración de nuevas tecnologías de generación renovable y almacenamiento que puedan apoyar esta transición. Sin una red eléctrica robusta, moderna y dimensionada para estas nuevas necesidades, la electrificación del sector no será viable en la práctica, por muy competitiva que resulte en términos técnicos o económicos. Por otra parte, es imprescindible planificar el desarrollo de redes con suficiente antelación, ya que este proceso lleva muchísimos años y no se puede esperar a la demanda eléctrica para empezar a desarrollar

proyectos. Un horno eléctrico se puede desarrollar en 1 o 2 años, pero el desarrollo de redes para ampliar su capacidad puede tardar 5 o 10 años en aparecer. Es importante destacar que este proyecto de modernización está sujeto a mucha incertidumbre y hay que hacerlo de forma robusta y flexible.

Por último, es imprescindible prestar una atención especial al proceso de fabricación de fritas, ya que, hoy en día, no existe una alternativa eléctrica técnicamente viable que permita sustituir el uso de gas natural en esta etapa. La clara tendencia hacia la electrificación del resto de fases del proceso productivo sugiere que una solución eléctrica también para las fritas podría llegar a ser, a medio plazo, la opción más competitiva, tanto en costes como en sostenibilidad. Este proceso representa en torno al 8 % del consumo energético total del sector, por lo que su descarbonización es clave para completar la transición energética de toda la industria cerámica. En este contexto, se hace imprescindible invertir en I+D y fomentar proyectos de desarrollo tecnológico que permitan crear nuevas soluciones eléctricas competitivas y específicas para la producción de fritas.

En definitiva, la descarbonización de la industria cerámica no es solo un desafío tecnológico y económico, sino una oportunidad estratégica para transformar un sector esencial para la economía española. Apostar por soluciones viables, acelerar la electrificación (sujeto a incertidumbres) y asegurar el desarrollo de infraestructuras energéticas adecuadas permitirá no solo cumplir con los compromisos climáticos, sino también reforzar la competitividad, proteger el empleo y garantizar la sostenibilidad del sector a largo plazo. Las decisiones que se tomen hoy serán determinantes para el futuro de esta industria durante las próximas décadas.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

A. Mezquita, E. M. E. V. S. F. M. A., 2012. *OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN LA FABRICACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS MEDIANTE EL USO DE ACEITE TÉRMICO*, Castellón: s.n.

A. Mezquita, E. S. F. D. G.-E., 2017. *How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: Dry versus wet route*, s.l.: s.n.

Agrafiotis, C. & Tsoutsos, 2001. *Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. Applied Thermal Engineering*, s.l.: s.n.

Aguilella, M. y otros, 2024. *FUSIÓN DE FRITAS CERÁMICAS MEDIANTE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA*, Castellón: s.n.

ANFFECC, 2023. [En línea]

Available at: <https://www.anffecc.com/es/cifras-del-sector>

ANFFECC, 2024. [En línea]

Available at: <https://www.anffecc.com/es/noticia/buenos-resultados-en-las-primeras-pruebas-con-hidrogeno-para-la-produccion-de-fritas-ceramicas#:~:text=la%20modificaci%C3%B3n%20del%20combustible%20en,las%20propiedades%20los%20vidriados%20obtenidos>

ANFFECC, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.anffecc.com/es/noticia/el-sector-de-esmaltes-preocupado-por-la-subida-de-los-precios-del-gas>

ANFFECC, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.anffecc.com/es/>

ANFFECC, s.f. *ANFFECC*. [En línea]

Available at: <https://www.anffecc.com/es/cifras-del-sector>

Anon., 2013. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass*, s.l.: s.n.

Anon., 2023. *INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD QUE IMPULSAN LA ECONOMÍA*, s.l.: ASCER.

Anon., 2024. *El sector de los azulejos y pavimentos cerámicos en 2023: impacto socioeconómico y relevancia para la provincia de Castellón*, s.l.: ASCER.

Anon., s.f. [En línea]

Available at: <https://sacmi.com/es-ES/ceramics/Azulejos/Preparacion-de-polvos-ceramicos>

Anon., s.f. [En línea]

Available at: https://ceramica.fandom.com/wiki/Inversi%C3%B3n_del_cuarzo

Anon., s.f. *MIBGAS*. [En línea]

Available at: <https://www.mibgas.es/>

Anon., s.f. *Panorama Minero 2022*, s.l.: Instituto Geológico y Minero de España, IGME.

Anon., s.f. *PROCESOS DE FABRICACIÓN*, s.l.: Universidad Francisco de Paula Santander (Colombia).

Antonio de Juan, A. S. J. A. L. Q. S. L., 2023. *¿Verde, competitiva y segura? Prospectivas de la Transición Energética Española*, s.l.: s.n.

ASCER, 2022. *Análisis de las posibilidades de electrificación de la cocción de baldosas cerámicas*, Castellón: s.n.

ASCER, 2023. *Informe ASCER. Sector español de fabricación de baldosas cerámicas*, s.l.: ASCER.

Asociación Española de Técnicos Cerámicos, 2024. [En línea]
Available at: <https://atece.org/el-futuro-de-la-electrificacion-en-la-ceramica-y-los-caes/>

BANCO DE ESPAÑA, 2024. *El impacto de las energías renovables sobre el precio mayorista de la electricidad*, s.l.: s.n.

Bergnes, C., 2023. *Gas Guarantees of Origin: An overview of European market*. [En línea]
Available at: <https://magnuscmd.com/gas-guarantees-of-origin-an-overview-of-european-market/>

Bloomberg, 2024. *Green Hydrogen Prices Will Remain Stubbornly High For Decades*, s.l.: s.n.

Boer, R. d., 2020. *Strengthening Industrial Heat Pump Innovation*, s.l.: s.n.

Cárdenas, C. y otros, 2009. *LAS MICROONDAS COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL SECADO DE MATERIALES CERÁMICOS TRADICIONALES*, s.l.: s.n.

CASTÁN, S. F., 2016. *Análisis energético y exergético del proceso de cocción de composiciones cerámicas*, Castellón: s.n.

Ceramic world web, 2024. [En línea]
Available at: <https://ceramicworldweb.com/en/news/primus-ceramics-installs-first-zero-impact-dryer-collaboration-sacmi>

Cerámica.name, s.f. *HORNOS CERÁMICOS*, s.l.: s.n.

CEUPE, 2025. [En línea]

Available at: <https://ceupe.com.ar/blog/descubre-la-importancia-crucial-de-la-tasa-de-descuento-en-el-mundo-de-las-finanzas/>

CIRCE, 2021. *Informe de tecnologías de descarbonización para la Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos cerámicos (ASCER)*, s.l.: CIRCE.

CIRCE, 2021. *Informe de tecnologías de descarbonización para la Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos cerámicos (ASCER)*, s.l.: CIRCE.

Clúster Andaluz del Hidrógeno, 2024. [En línea]

Available at: <https://hidrogenoandalucia.org/anffecc-ultima-el-inicio-de-pruebas-con-hidrogeno-en-hornos-de-fritas#:~:text=ANFFECC%20ultima%20el%20inicio%20de,ANFFECC%20ha%20sido>

Cofindustria ceramica, 2024. [En línea]

Available at: <https://confindustriaceramica.it/w/en/soluzioni-green-per-la-ceramica#:~:text=all%E2%80%99efficienza%20energetica%2C%20ha%20una%20potenza,A%20ridurre>

CWW, 2019. [En línea]

Available at: <https://www.ceramicworldweb.com/en/economics-and-markets/world-production-and-consumption-ceramic-tiles-2023>

D. Carlos Gonzalvo Lucas, D. M. I. M., 2006. *LA FABRICACIÓN DE FRITAS, ESMALTES Y COLORES CERÁMICOS. RETOS SOCIALES, ECONÓMICOS Y MEDIOAMBIENTALES EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL*, s.l.: s.n.

D. EARL, D. C. y. R. S., 1995. *Microwave energy versus convected hot air for rapidly drying ceramic tile*, s.l.: s.n.

E Monfort, A. M. G. M. R. G. E. V., 2011. *GUÍA DE AHORRO ENERGÉTICO EN EL SECTOR DE BALDOSAS CERÁMICAS DE LA COMUNIDAD VALENCIANA*, s.l.: s.n.

E&M Combustión, s.f. [En línea]

Available at: <https://emcombustion.es/quemadores-de-hidrogeno-sistemas-de-combustion-de-hidrogeno/>

El Periódico de la energía, 2024. [En línea]

Available at: <https://elperiodicodelaenergia.com/luz-bajaria-50-adicional-2030-si-se-cumplen-hitos-renovables-pniec/>

ENAGÁS, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.enagas.es/es/sala-comunicacion/actualidad/notas-prensa/demanda-gas-natural-2024/>

Energía Estrategia, 2024. [En línea]

Available at: <https://energiaestrategica.es/las-renovables-y-la-flexibilidad-de-la-red-reduciran-los-precios-de-la-electricidad-en-una-cuarta-parte-para-2030-y-en-un-tercio-para-2040/>

ETEKINA, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.etekina.eu/>

European Parliament, 2023. *DIRECTIVE (EU) 2023/2413 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*, s.l.: s.n.

European Biogas Association, 2023. *EBA Statistical Report 2023*, s.l.: s.n.

European Commission, 2024. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ceramic Manufacturing Industry*, s.l.: s.n.

EUROPEAN COMMISSION, 2025. [En línea]

Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en

European Commission, 2025. [En línea]

Available at: https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-prices-and-costs-europe_en

EUROPEAN COMMISSION, 2025. [En línea]

Available at: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/related-industries/non-metallic-products-and-industries/ceramics_en

F.J, G.-T., 2012. *Preparación de granulados de gres porcelánico mediante procesos más sostenibles Medioambientalmente*, s.l.: s.n.

Galindo, A. M., 2015. *Instalación para la recuperación de calor residual y depuración de los gases de combustión de un horno cerámico.*, Castellón: s.n.

García-Ten, F. ., Q. M. ., V. M. J. ., G. C. ., 2012. *Preparación de granulados de gres porcelánico mediante procesos más sostenibles medioambientalmente*, s.l.: s.n.

GOBIERNO DE ESPAÑA, 2022. [En línea]

Available at: <https://planderecuperacion.gob.es/como-acceder-a-los-fondos/pertes/perte-de-descarbonizacion-industrial>

Haimbaugh, R. E., 2015. *Induction Heat Treating 2nd edition*, Ohio: s.n.

Hank, C. H. M. C. T. K. C. L. S. S. A. S. T., 2023. *Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries.*, s.l.: s.n.

HPT, 2024. *High-Temperature Heat Pumps Final Report*, s.l.: s.n.

HPT, 2025. *Heatpumptechnologies*. [En línea]

Available at: <https://heatpumpingtechnologies.org/>

I. Papadogeorgos, K. S., 2019. *DECARBONISATION OPTIONS FOR THE DUTCH CONTAINER AND TABLEWARE GLASS INDUSTRY*, s.l.: s.n.

IAG, 2023. *ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LAS APLICACIONES DEL USO DE HIDRÓGENO Y ELECTRIFICACIÓN EN EL SECTOR CERÁMICO*, s.l.: s.n.

INEAF BUSINESS SCHOOL, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.ineaf.es/glosario-juridico/tasa-de-descuento>

INGENEO, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.ingeneo.tech/hornos-de-frita-ceramica>

International Energy Agency, 2024. *Global Hydrogen Review 2024*, s.l.: s.n.

Inycom Energy, 2025. [En línea]

Available at: <https://inycomenergy.com/hidrogeno-azul-e-hidrogeno-verde/#:~:text=El%20Hidr%C3%B3geno%20Azul%20se%20obtiene,90%25%2C%20haci%C3%A9ndolo%20menos%20contaminante.>

ITC, 2023. [En línea]

Available at: <https://www.itc.uji.es/en/itc-aice-busca-procesos-industriales-ceramicos-sostenibles-con-demo-electrics/>

IVACE, 2021. [En línea]

Available at: <http://py.itc.uji.es/fichaPY.aspx?idProy=%272063%27>

IVACE, 2021. *Resumen de los resultados del año 2021*. [En línea]

Available at: <http://py.itc.uji.es/Content/docDifusion/PY180025/Resultados%202021.pdf>

Jessie BIRMAN, J. B. , H. D. P. , G. E. , M. F. , P.-L. L., 2021. *Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050*, s.l.: s.n.

KERAjet, 2025. [En línea]

Available at: <https://kerajet.com/es/inicio/>

Kowalski, S. & Mielniczuk, B., 2007. *Analysis of Effectiveness and Stress Development during Convective and Microwave Drying.*, s.l.: Drying Technol.

Levantina Techlam, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.levantina.com/techlam/>

Linares, J. I., 2025. *El potencial para la generación y el consumo de biometano en España*, s.l.: s.n.

López-Buendía, A., Guaita-Delgado, V., Aguilera-Forés, M. & Boix-Palomero, J. G.-B. B., 2018. *Secado eco-eficiente de baldosas cerámicas recién prensadas mediante tecnología microondas*, s.l.: Qualicer.

Manuel Pérez-Bravo, S. S. R. C. P. L., 2024. *Economies of scale matter: how infrastructure policy affects the viability of alternative fuel trucks*, Madrid: s.n.

MIBGAS, 2024. [En línea]

Available at: <https://www.mibgas.es/es/news/mibgas-ibhyx-el-primer-indice-iberico-del-precio-del-hidrogeno-renovable-se-publica-partir-de>

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.mintur.gob.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/2025/paginas/adjudicacion-proyectos-perte-descarbonizacion-industrial.aspx>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), 2024. *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)*, s.l.: s.n.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), 2020. *Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable*, s.l.: s.n.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2023. [En línea]

Available at: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/cae.html>

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2024. *BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO*, s.l.: s.n.

Ortega, L., 2024. *ValenciaPlaza*. [En línea]

Available at:

<https://valenciaplaza.com/valenciaplaza/lapatronaldefritasyesmaltesculminaelmontajedelproyectedehidrogenoverdeeeiniciarapruebasenunmes#:~:text=,la%20investigaci%C3%B3n%20de%20la>

Pérez, A., 2024. *El Español*. [En línea]

Available at: https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20241216/espana-lanza-primer-indice-hidrogeno-verde-precio-euroskg/909159224_0.html

Plaza cerámica, 2023. Altadia prevé reducir un 14% las emisiones de CO2 en la fabricación de fritas hasta 2025. *Castellón Plaza*, 27 Junio.

Qualicer, 2022. *PARTIAL ELECTRIFICATION OF A CERAMIC TILE DRYER BY INTEGRATING HEAT PUMPS*, s.l.: s.n.

Rank, 2024. [En línea]

Available at: <https://www.rank-orc.com/es/rank-hp/>

Red eléctrica, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/sol/generacion/solar-fotovoltaica-solgeneracion>

RETEMA, 2022. [En línea]

Available at: <https://www.retema.es/actualidad/soria-tendra-primera-planta-biogas-disenada-su-inyeccion-directa-red>

S. Casadio, D. C. C. R. A. B., 2024. *DESCARBONIZACIÓN DEL PROCESO CERÁMICO CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO PROCEDENTE DE FUENTES RENOVABLES*, Castellón: s.n.

Salvador Ferrer Castán, A. M. M. E. M. G. J. V. L., 2022. *GUÍA DE TECNOLOGÍAS HIPOCARBÓNICAS PARA LA INDUSTRIA DE BALDOSAS CERÁMICAS*, Castellón: s.n.

Sedigás, 2023. *Estudio de la capacidad de producción de biometano en España*, s.l.: s.n.

Seegerer, H., 1998. *Producing technical ceramics by microwave drying*. American Ceramic Society, Nürnberg: American Ceramic Society Bulletin.

Skansi, D., Tomas & S., 1995. *Microwave drying kinetics of a clay-plate*, s.l.: Ceramics International.

Smartrec, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.smartrec.eu/>

System ceramics, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.systemceramics.com/es>

Systemfoc, 2025. *Horno eléctrico*, s.l.: s.n.

Titan Industrial Ceramic, 2023. [En línea]

Available at: <https://www.wear-ceramics.com/news/the-principle-and-advantages-and-disadvantages-64572784.html>

Trading economics, 2025. [En línea]

Available at: <https://es.tradingeconomics.com/>

Trading Economics, 2025. [En línea]

Available at: <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>

TRADING ECONOMICS, s.f. [En línea]

Available at: <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas/>

Ueckerdt, F. V. P. A. R. B. C. B. F. L. T. R. S., 2024. *On the cost competitiveness of blue and green hydrogen*, s.l.: s.n.

Valdehita, B., 2024. *Hidrógeno Verde*. [En línea]

Available at: <https://hidrogeno-verde.es/deposito-hidrogeno-natural-en-huesca/>

Vernis, 2025. [En línea]

Available at: <https://www.vernis.es/>

Vicente, D., 2024. El azulejo prevé otro recorte del 14% en sus emisiones de CO2 gratuitas. *El Mundo*, Diciembre.

Vicente, D., 2024. Las fritas fian el 20% de las ventas exteriores a países ‘inestables’. *El Mundo*, Agosto.

Warner ten Kate, A. v. d. N. M. V. O. Ö., 2020. *European Carbon Neutrality: The Importance of Gas*, Groningen: s.n.

Weißburger, B. W. M. L. B. R. M., 2024. *The long term price elastic demand of hydrogen– A multi-model analysis for Germany*, s.l.: s.n.

World bank group, 2025. *World Bank Commodities Price Data (The Pink Sheet)*, s.l.: s.n.