

Depuración de emisiones ácidas en un horno de ladrillos que usa coque de petróleo como combustible

Eusebio Moro (Talleres Movigi, S.L.)

Eliseo Monfort, Salvador Gomar e Irina Celades y Jesús Martínez (Instituto de Tecnología Cerámica)

Eduardo Márquez (Heredados de Márquez Villar, S.L.)

En el trabajo que se presenta se ha estudiado un sistema de depuración de emisiones gaseosas de compuestos ácidos basado en el uso de hidróxido cálcico como reactante y filtros de mangas como sistema separador gas-sólido. Concretamente, el sistema se ha instalado en la empresa Herederos de Márquez Villar, S. L., dedicada a la fabricación de ladrillos cerámicos.

El horno estudiado utiliza como combustible gas natural (precalentamiento) y coque de petróleo micronizado (en las zonas de mayor temperatura). Operando en esas condiciones, aparte del material particulado, el contaminante más crítico para cumplir los requisitos medioambientales impuestos a la empresa en su Autorización Ambiental Integrada son los óxidos de azufre (SO_x). La aplicación de estos sistemas de depuración basados en el uso de hidróxido de calcio y filtros de mangas es muy común para la depuración de compuestos ácidos (HF, HCl y SO_x). En el caso de los compuestos de flúor, suelen presentar elevados rendimientos (>90%), pero según la bibliografía [1] presenta un rendimiento menor y muy variable en la depuración de compuestos de azufre (7-80%), por lo que el diseño del sistema debe realizarse de forma más detallada para obtener rendimientos adecuados que permitan

cumplir las especificaciones impuestas por la normativa medioambiental.

El trabajo que se presenta es fruto de la colaboración de la empresa Márquez, en cuyas instalaciones de Bailén se ha realizado el estudio; de la empresa Talleres Movigi, S.L., que ha desarrollado las actividades de diseño y construcción del sistema de depuración, y del Instituto de Tecnología Cerámica, que ha realizado la caracterización de las emisiones gaseosas y del material residual recogido en los filtros de mangas, y también ha participado en el diseño y definición de los parámetros de operación del sistema de filtración estudiado.

❖ Introducción

El principal impacto medioambiental asociado a la cocción de productos de cerámica estructural son las emisiones gaseosas a la atmósfera. Estas emisiones pueden contener material particulado y contaminantes en fase gaseosa de naturaleza ácida [2][3][4], en forma de compuestos de flúor, cloro y azufre.

El flúor procede principalmente de las arcillas, donde el ión flúor se encuentra sustituyendo a los grupos OH- en la estructura cristalina de la mica, así

como de otros muchos minerales arcillosos (montmorillonita, illita, caolinita, ...). Los aportes de compuestos de cloro pueden ser mucho más variados y provenir de los cloruros presentes en el agua utilizada como materia prima, de los aditivos utilizados en los procesos de preparación de las materias primas, etc. Los compuestos de azufre pueden generarse por el uso de combustibles y/o materias primas que contengan este elemento como impureza, fundamentalmente en forma de pirritas (sulfuro de hierro) o yeso (sulfato cálcico), y de los aportes de azufre de las aguas utilizadas en la humectación de la composición (sulfatos en disolución).

La emisión de estos compuestos ácidos se produce a temperaturas elevadas. En el caso de compuestos de flúor, el inicio de la emisión suele coincidir con la deshidroxilación de los minerales arcillosos a temperaturas del orden de los 500 °C-700 °C. En el caso del cloro y del azufre, la emisión comienza a temperaturas entre 600 °C y 800 °C.

En la zona de Bailén (Jaén) existe una elevada densidad de empresas dedicadas a la fabricación de cerámica estructural (ladrillos, tejas, etc.), fabricándose sobre el 18% de la producción española de este material.

Esta elevada concentración de industrias, junto con una legislación ambiental relativamente obsoleta, ha provocado en los últimos años una alternación significativa de la calidad de aire de la zona. Para corregir esta situación se ha elaborado y puesto en marcha un Plan de Mejora de la Calidad del Aire del municipio de Bailén [5]. En este Plan se establece que las Administraciones competentes y los agentes económicos implicados han de tomar coordinadamente las medidas necesarias con el fin de proteger el medio ambiente contra los efectos adversos de las actividades humanas, así como mantener niveles admisibles de calidad del aire para salvaguardar las condiciones de salubridad y, cuando sea posible, recuperar aquellas zonas que se hayan visto afectadas negativamente.

Las medidas de mejora propuestas en el Plan de Calidad de Aire pasan por reducir los niveles de partículas y SO_2 en fuentes canalizadas. Para ello se propone la utilización de combustibles más limpios (que generen menor cantidad de partículas y con un bajo contenido en azufre) y la instalación de sistemas de depuración de partículas con o sin adición de reactivos para la eliminación conjunta de las emisiones gaseosas, dependiendo del contenido de azufre en el combustible. Asimismo, en el Plan se indica que cuando el combustible utilizado es coque de petróleo, con un contenido en azufre superior al 4%, es necesario recurrir a técnicas de desulfuración junto con las técnicas de eliminación de partículas.

En la Tabla 1, extraída del propio Plan de Mejora, se resume el comportamiento de algunos de los sistemas de depuración propuestos, destacándose el grupo en el que se incluye el sistema de depuración instalado en Márquez.

❖ Descripción del sistema de depuración

El desarrollo experimental que se presenta en este trabajo se ha realizado con la instalación que se esquematiza en la Figura 1, mediante las vistas de alzado y planta. Este sistema de depuración está conectado a un horno túnel de cocción de ladrillos cerámicos.

TÉCNICAS CONJUNTAS DE ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS Y DESULFURACIÓN			
Técnica	Partículas en salida (mg/Nm ³)	Rendimiento de desulfuración (%)	Pérdida de carga (mmH ₂ O)
Electrofiltro + desulfuración vía seca	< 50	60-70	50
Filtro de mangas + desulfuración vía seca	< 50	60-70	100-400
Electrofiltro + desulfuración vía semiseca	< 50	80	50
Filtro de mangas + desulfuración vía semiseca	< 50	80	100-400
Venturi scrubber + desulfuración vía húmeda	< 50	95	200-800

(1) Las concentraciones de salida indicadas responden a valores medios recogidos en la literatura técnica y en las ofertas y catálogos de fabricantes.
 (2) Los reactivos utilizados comúnmente en los procesos de desulfuración considerados son: Desulfuración seca: hidróxido sódico ($\eta = 60\%$). Desulfuración seca: bicarbonato sódico ($\eta = 70\%$). Desulfuración semiseca: hidróxido cálcico. Desulfuración húmeda: sosa, hidróxido amónico.

Tabla 1. Técnicas conjuntas de eliminación de partículas y desulfuración recogidas en el Plan de Mejora de la Calidad del Aire del municipio de Bailén.

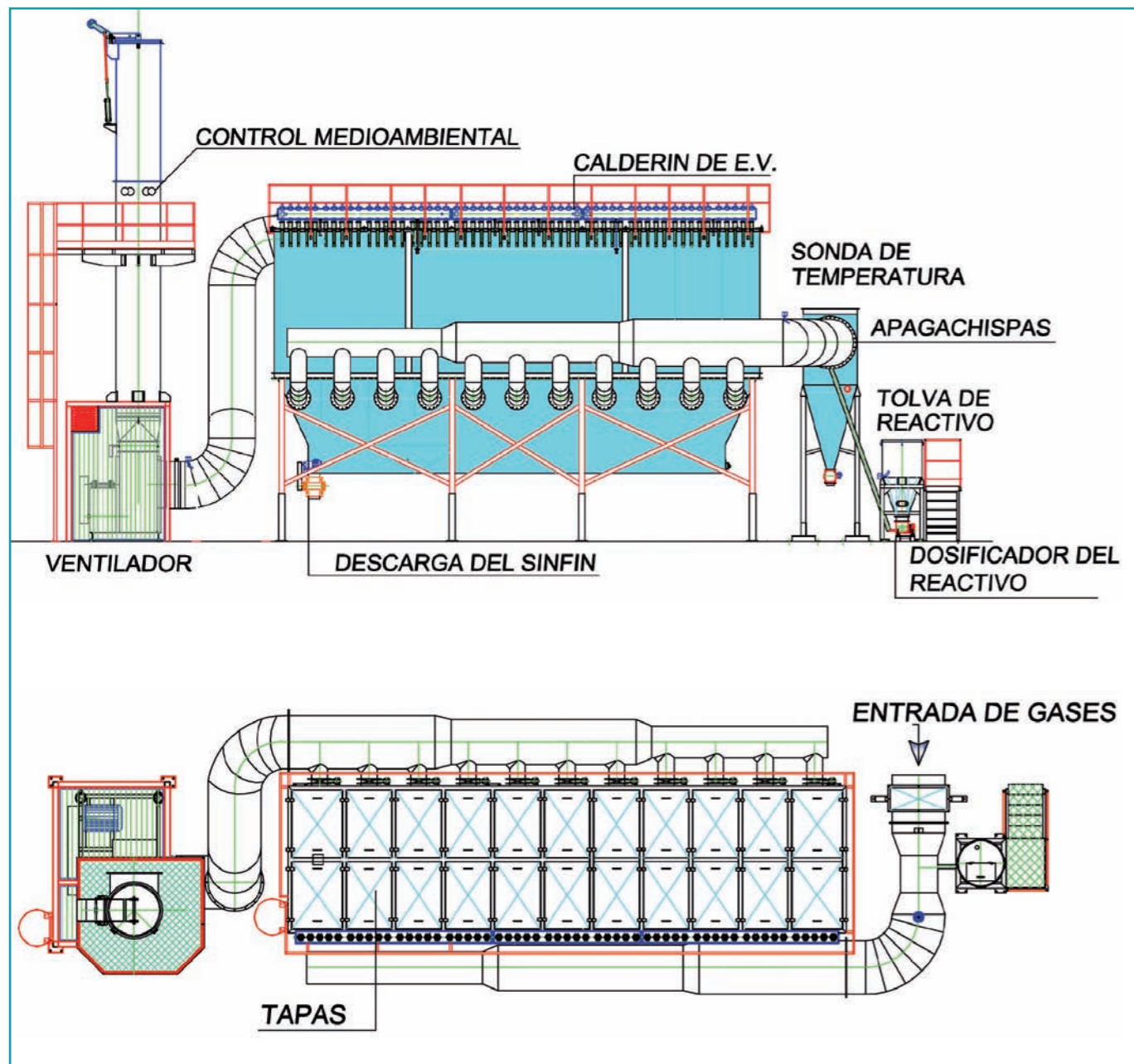


Figura 1. Esquema básico de la instalación industrial estudiada.

En rasgos generales, la instalación de depuración estudiada es un filtro de mangas con adición de reactivo adsorbente situado en serie después de la chimenea de humos de un horno túnel de cocción de ladrillos. Como característica especial, destaca la instalación de un sistema de acondicionamiento de la temperatura de la corriente de entrada de gases para depurar que tiene como finalidad mantener dicha temperatura por en-

cima de la temperatura de rocío de los contaminantes ácidos (para prevenir efectos de corrosión) e inferior a la temperatura máxima de operación de las mangas, por lo que para satisfacer ambas condiciones se estableció un intervalo de trabajo entre 150 °C y 160 °C.

Para ello, el sistema está provisto de un quemador encargado de aumentar la temperatura de la corriente

cuando ésta se sitúa por debajo de la temperatura de consigna, y una válvula de entrada de aire ambiente encargada de disminuir la temperatura cuando se encuentra por encima del intervalo fijado. En la Figura 2, se muestra una vista general del sistema de acondicionamiento de la temperatura.



Figura 2. Vista general del sistema de acondicionamiento de la temperatura de entrada de la corriente a depurar.

A continuación del sistema de acondicionamiento de la temperatura, se ha instalado un sistema de seguridad para la retención de partículas incandescentes (o apagachispas) que puede evitar daños causados por quemados en la tela de las mangas filtrantes e incluso producir un incendio.

Por último, se encuentra el propio filtro de mangas, que se muestra en la Figura 3. Este filtro es de tipo modular de células, de sección rectangular, y realiza la separación de las partículas sólidas de la corriente gaseosa. Las mangas filtrantes instaladas son de Nómex teflonado y disponen de un sistema de limpieza por inyección de aire comprimido. La secuencia de limpieza viene comandada por un medidor de diferencia de presión (ΔP) ubicado entre la salida y la entrada de la primera cámara de separación. En cada ciclo de limpieza, el polvo retenido en las mangas cae en un tornillo sinfín que lo conduce hasta un depósito de almacenamiento.

El reactivo adsorbente se alimenta al sistema de depuración desde una tolva de almacenamiento situada junto a la entrada de gas para depurar en el filtro de mangas. Dicha tolva está equipada con una sonda de nivel, un vibrador y una válvula dosificadora que permite regular el caudal másico de re-



Figura 3. Vista general del filtro de mangas.

activo suministrado al sistema de depuración. En la Figura 3 se puede ver en un primer plano de dicha tolva.

Este tipo de sistemas ofrece la posibilidad de utilizar diferentes reactivos (en función de su coste, disponibilidad, contaminante de interés, etc.). En la Tabla 2 se resumen los reactivos

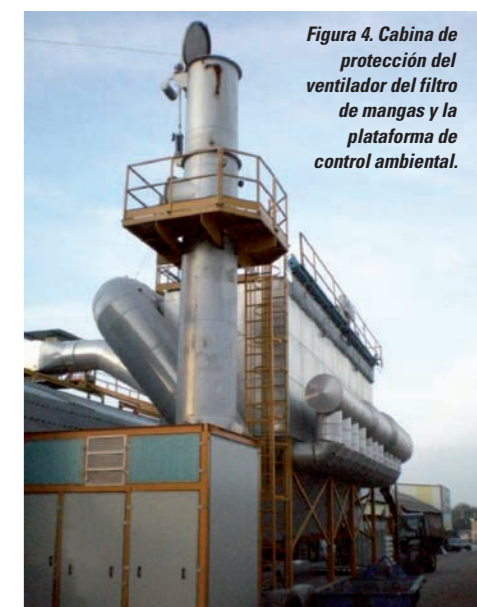


Figura 4. Cabina de protección del ventilador del filtro de mangas y la plataforma de control ambiental.

Reactivo	Reacción principal de neutralización	Rendimiento (%)
Carbonato cálcico	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$	30 ÷ 85
Hidróxido cálcico	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	10 ÷ 80
Bicarbonato sódico	$2 \text{NaHCO}_3 + \text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	> 90 %

Tabla 2. Reactivos habituales en el tratamiento de emisiones de SO_2 .

habituales en la depuración vía seca de compuestos de azufre, así como las reacciones químicas y el rendimiento esperado según la referencia [1]. De estos reactivos, por razones de coste, los más usados en la industria cerámica son la cal apagada o hidróxido cálcico (utilizada en este estudio) y el carbonato cálcico.

Por último, en la Figura 4, se muestra cómo el sistema de depuración dispone de una chimenea provista de un ventilador encargado de regular la pérdida de carga de la instalación y de la impulsión de la emisión final. Este ventilador se sitúa en una cabina aislada térmica y acústicamente. Antes del punto de emisión se encuentra una plataforma de trabajo adecuada para la realización de las medidas de control y seguimiento de las emisiones de la totalidad del sistema de depuración.

La totalidad del sistema viene gobernada por un controlador automático que, mediante la utilización de un variador de frecuencia conectado al ventilador del sistema de depuración, consigue regular la presión en el horno (tiro) de forma autónoma, según las necesidades del conjunto horno tú-

nel - sistema de depuración. De este modo, el sistema integra el control del tiro del horno consiguiendo, a su vez, un importante ahorro energético en el motor del ventilador. En la Figura 5 se muestra un detalle del sistema de control automático.

Objetivos y alcance

Los objetivos del trabajo son:

1. Diseño, implantación y puesta a punto de una planta de depuración de compuestos ácidos en las emisiones de un horno túnel de fabricación de ladrillos, basándose en el uso de filtros de mangas con adición de hidróxido cálcico.
2. Estudio del funcionamiento de la planta de depuración instalada, cuantificando y caracterizando los residuos sólidos originados, así como las emisiones generadas en los hornos antes y después de la etapa de filtración.
3. Análisis del rendimiento de la planta de depuración y comparación con los límites legales existentes en materia de depuración de gases ácidos.

El estudio se ha llevado a cabo en la planta de Herederos Márquez Villar, S.L., dedicada a la fabricación de ladrillos, que dispone de un horno túnel que utiliza como combustible una mezcla de gas natural y coque de petróleo micronizado.

Desarrollo experimental

Caracterización de las emisiones gaseosas

Los puntos de toma de muestras para la caracterización de las corrientes gaseosas se han situado:

- **Antes del filtro:** Se ha utilizado la plataforma y el punto de medida existente en la salida del horno de cocción aprovechando las instalaciones de la fábrica.
- **Después del filtro:** El punto de muestreo se sitúa antes de la salida de humos en la chimenea de emisión del propio filtro de mangas.

En la Figura 6 se observan en detalle los dos puntos de tomas de muestra utilizados.

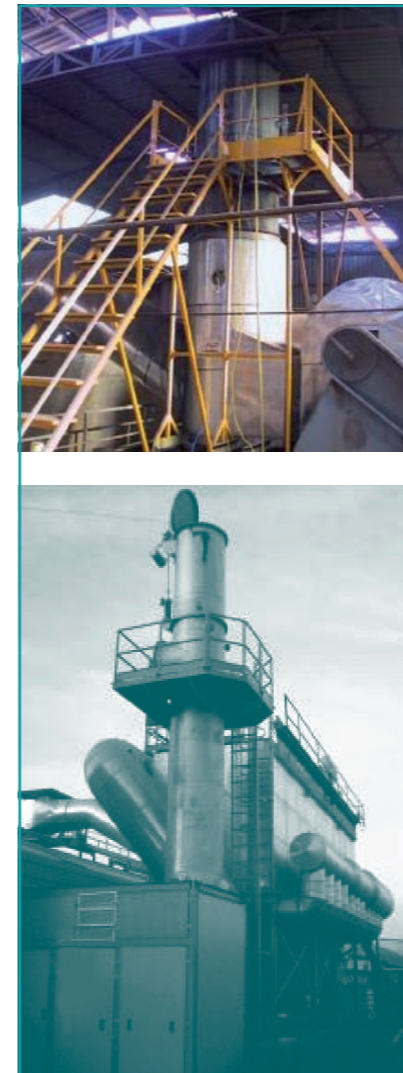


Figura 6. Puntos de toma de muestra para la caracterización de las emisiones. Arriba, salida del horno, toma antes del filtro; abajo, toma tras el filtro.

La metodología utilizada para la determinación de los contaminantes gaseosos considerados (flúor, cloro y azufre) se basa en la extracción mediante una sonda adecuada de un volumen conocido de gases que se hacen pasar por un sistema de absorción que capte dichos compuestos; posteriormente se lleva a cabo la determinación del contaminante de interés presente en la disolución captadora y se calcula su concentración en la corriente gaseosa.

El ITC se encuentra acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación

(ENAC) para realizar la determinación de la concentración de flúor, cloro y azufre, siguiendo procedimientos internos.

También se ha determinado el caudal de gases en las corrientes de estudio y se han realizado medidas en discontinuo de los gases de combustión, concretamente O_2 , CO_2 , CO , NO , NO_2 y SO_2 . Para ello, se ha utilizado un analizador de gases que utiliza sensores electroquímicos. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en hacer pasar una muestra a través de una celda, en la que los gases objeto de análisis, tras atravesar una barrera de difusión, llegan al cátodo donde se produce una reducción específica para cada compuesto, generando un voltaje proporcional a la concentración de contaminantes.

Caracterización del producto fabricado y combustible utilizado

Para complementar la caracterización de las emisiones gaseosas del horno de cocción de ladrillos objeto del estudio, se ha realizado un análisis de la composición química tanto del producto fabricado como del combustible utilizado.

En la planta de fabricación estudiada se elaboran diferentes modelos de ladrillos que se diferencian en la forma final. Esto es así dado que las materias primas utilizadas para la elaboración de todos ellos son comunes y provienen de las minas cercanas al municipio de Bailén.

En cuanto al combustible utilizado, tal y como se ha comentado anteriormente, en las zonas de precalentamiento se utiliza gas natural y, en la zona de cocción, coque de petróleo micronizado.

En muestras del material procesado y de coque de petróleo tomadas aleatoriamente se determinó su contenido en azufre tras someter la muestra a un calentamiento en horno de

inducción con atmósfera de O_2 y determinando el SO_2 desprendido mediante un detector infrarrojo.

Verificación del sistema de alimentación del reactivo adsorbente

Como acción previa a la realización de los ensayos es necesario estudiar las características del sistema de alimentación del reactivo. En concreto se ha determinado la relación entre la cantidad de reactivo dosificada al sistema de depuración mediante el dosificador y la posición de la válvula dosificadora. El reactivo utilizado durante este estudio ha sido hidróxido de calcio de fórmula química Ca(OH)_2 .

El sistema de alimentación funciona de forma manual mediante la válvula de dosificación de la tolva de reactivo aunque también es posible regular la dosificación mediante el sistema informático (SCADA) que controla la totalidad de la instalación. Durante la realización del presente estudio, los cambios de dosificación se realizaron en todo momento de forma manual.

Caracterización del reactivo y del residuo obtenido en el filtro de mangas

Se han tomado muestras del reactivo y del material sólido resultante de la filtración de la corriente gaseosa, tras las etapas de limpieza del filtro de mangas, para ser caracterizados.

Determinaciones a las que se sometieron estos materiales:

- **Distribución de tamaño de partícula (DTP):** La DTP se ha determinado utilizando un equipo de difracción de láser. En este equipo, las partículas atraviesan un haz de luz láser, y la luz que dispersan es recogida en 40 detectores. La distribución de tamaños se ha calculado con el software que incorpora el equipo, utilizando el modelo de difracción de Fraunhofer para interpretar la señal de luz dis-



Figura 5. Control automático del sistema de depuración.

persada recogida por los detectores. El polvo se alimenta al equipo con aplicación de vacío e inyección de aire y atraviesa a alta velocidad un sistema de conducciones, donde los impactos y esfuerzos de cizalla a los que es sometido rompen los aglomerados e individualizan las partículas.

• **Análisis mineralógico:** Para la determinación cualitativa de las especies minerales presentes en los residuos se ha utilizado un equipo de análisis por difracción de rayos X (difractómetro BRUKER Theta-Theta modelo D8 Advance). La técnica consiste en hacer incidir un haz de rayos X, de longitud de onda conocida sobre una muestra en polvo. El haz de rayos se difracta y se refleja con ángulos característicos de los planos de los cristales, obteniéndose el correspondiente difractograma, a partir del cual se identifican las especies mineralógicas presentes utilizando las fichas JCPDS para fases cristalinas puras. Este análisis, complementado

con el análisis químico, permite estimar la emisión de materiales en fase cristalina y en fase vítrea.

♦ Rendimiento en la depuración del sistema de depuración estudiado

A partir de los datos obtenidos en la caracterización de las emisiones gaseosas de la corriente tratada antes y después del sistema de depuración funcionando con diferentes dosis de reactivo adsorbente, se ha calculado el rendimiento de desulfuración.

RESULTADOS

♦ Caracterización de la corriente gaseosa a depurar

La caracterización de la corriente de gases para depurar se ha realizado en las condiciones de funcionamiento y

con el producto que se muestran en la Tabla 3.

Con las condiciones expuestas, se realizaron varias caracterizaciones de esta corriente, y los resultados obtenidos y la comparación con los valores límite establecidos en la AAI concedida a Márquez [6], se resume en la Tabla 4.

De la Tabla 4 se puede concluir que el contaminante más crítico en la corriente de gases para depurar son los compuestos de azufre (SO_2), por lo que el estudio se ha centrado en este contaminante. En este sentido, cabe destacar que la temperatura de emisión (121°C) se encuentra por debajo de la temperatura de condensación del SO_2 para la composición de esta corriente (valor teórico de 140°C), por lo que se tuvo que instalar el sistema de regulación de la temperatura comentado en la descripción del sistema de depuración.

♦ Caracterización del producto fabricado y combustible utilizado

Para complementar la caracterización de las emisiones gaseosas del horno de cocción de ladrillos para estudiar, se ha realizado un análisis de la composición química tanto del material fabricado como del combustible utilizado. En la Tabla 5 se muestra el contenido de azufre total tanto de la materia prima utilizada como en el coque micronizado utilizado como combustible. En este caso, el contenido de azufre del gas

Parámetro	Valor
Tipo de combustible	Gas natural + coque micronizado
Temperatura máxima de cocción	$860-890^\circ\text{C}$
Producción en cocido	15-18 toneladas/hora
Producto fabricado	Macizo perforado
Pérdidas por calcinación	7 %

Tabla 3. Producto fabricado y condiciones de funcionamiento de la instalación.

Parámetro	Unidades	Valor obtenido	Valor límite AAI
Contenido en oxígeno y humedad	Contenido de O_2	% en volumen	11 - 13
	Contenido en H_2O	% en volumen	8,6 - 9,9
Compuestos ácidos (expresados al 18% de oxígeno)	Contenido de SO_2	mg/Nm^3	359 - 376
	Contenido de HF	mg/Nm^3	<1
	Contenido de HCl	mg/Nm^3	12 - 14
Caudal y Temperatura	Gases secos	Nm^3/h	15500 - 18000
	Temperatura	$^\circ\text{C}$	121 ± 4

Tabla 4. Resultados de la caracterización de la corriente gaseosa a depurar y comparación con los valores límite establecido en la AAI concedida a Márquez el 13 de marzo de 2007.

natural no se ha considerado, dado que resulta despreciable frente al del coque.

Según los datos mostrados en la Tabla 5, el contenido de azufre más significativo es el del coque micronizado. Sin embargo, el aporte total de azufre al proceso de fabricación de ladrillos depende de la producción y del consumo de coque. En este trabajo, estas variables se han mantenido constantes y no se ha modificado el tipo de composición, ni el caudal, ni el tipo de coque micronizado.

♦ Verificación del sistema de alimentación del reactivo adsorbente

Para conocer las características del sistema de alimentación del reactivo, se ha determinado la relación entre la cantidad de reactivo dosificada al sistema de depuración mediante el dosificador y la posición de la válvula dosificadora. Los resultados de esta determinación se muestran en la Figura 7.

♦ Caracterización del reactivo y del residuo obtenido en el filtro de mangas

El reactivo utilizado en el sistema de depuración ha sido hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La caracterización del reactivo y del residuo ha consistido en la realización de un análisis granulométrico y mineralógico de ambos materiales. En la Tabla 6, se compara el análisis granulométrico del reactivo y del residuo obtenido en el sistema de depuración cuando éste trabaja a una dosificación de $38,7 \text{ kg/h}$.

En dicha figura, se puede apreciar que en la muestra residuo hay un mayor número de partículas finas, lo cual se puede corresponder con la formación de sulfatos y a la retención de partículas finas procedentes de los inquemados del coque de petróleo utilizado como combustible. No obstante, las diferencias no son muy acusadas debido probablemente al exceso de reactivo utilizado (ratio estequiométrico 2,1).

Muestra	Contenido de azufre total (%)
Composición de ladrillo crudo	$0,153 \pm 0,005$
Coque micronizado	$5,8 \pm 0,1$

Tabla 5. Contenido de azufre total en la composición del material fabricado y del combustible utilizado.

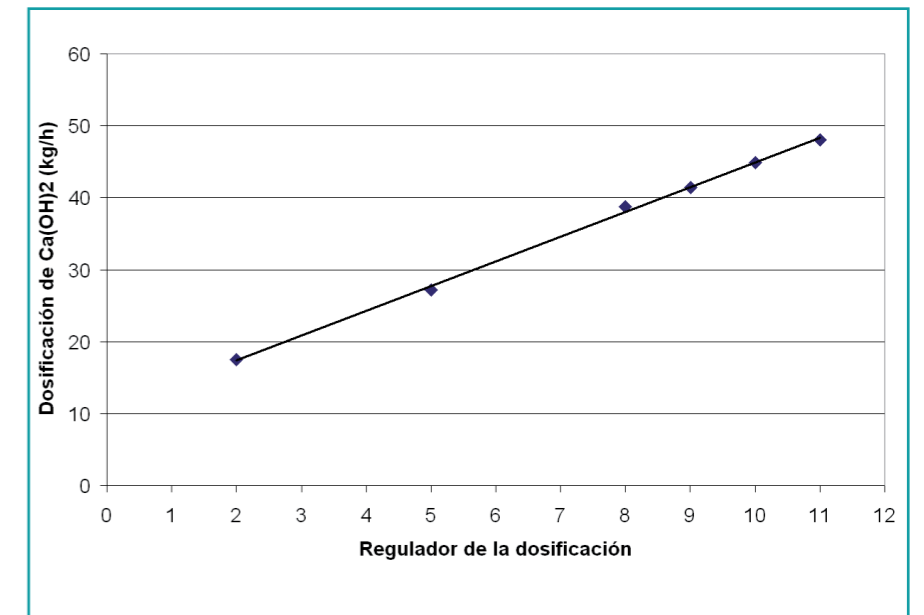


Figura 7. Relación entre dosificación real (kg/h) y la posición del regulador de dosificación.

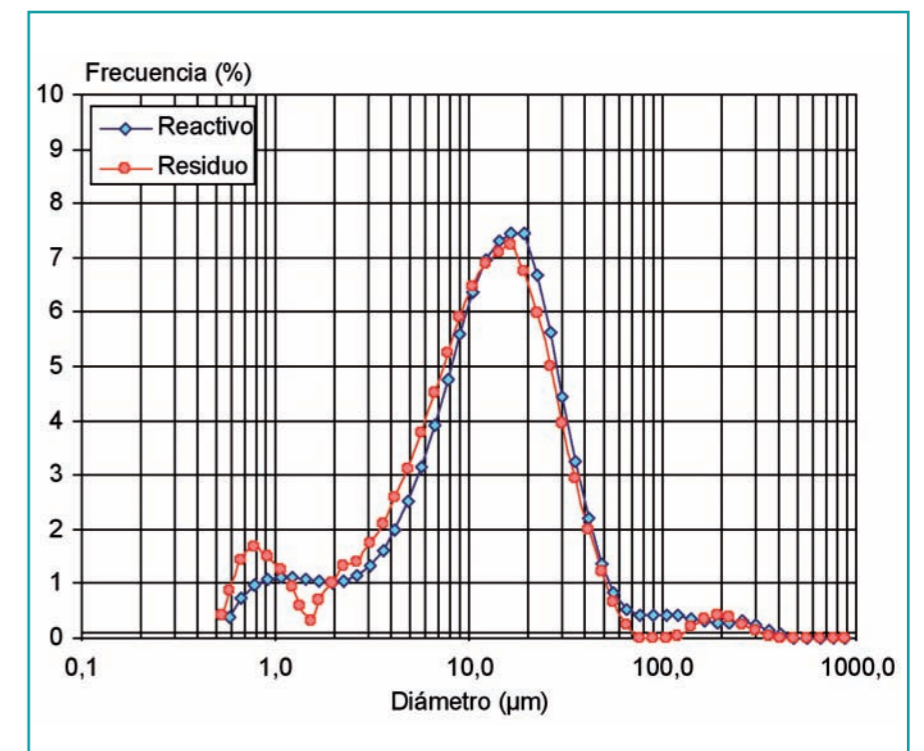


Figura 8. Frecuencia de tamaño de partícula de las muestras de reactivo y del residuo del filtro de mangas.

Muestra	d ₁₀ (μm)	d ₅₀ (μm)	d ₉₀ (μm)
Reactivo de un filtro de mangas	2,39	12,5	33,2
Residuo de un filtro de manga	1,97	10,9	29,1

Tabla 6. Valores de tamaño de partícula de las distribuciones 90, 50 y 10% de las partículas.

Muestra	Fases cristalinas
Reactivo de un filtro de mangas	Por = Portlandita (Ca(OH) ₂) Anh = Anhidrita (Ca(SO ₄))
Residuo de un filtro de mangas	Ca = Calcita (CaCO ₃)

Tabla 7. Estructuras cristalinas identificadas en las muestras de reactivo y residuo.

En la Tabla 7 se muestran las estructuras cristalinas identificadas para ambas muestras, siendo éstas las mismas pero variando la intensidad de pico de cada estructura cristalina.

En la Figura 9 se comparan los resultados obtenidos por difracción de rayos X para las dos muestras. En dicha figura se puede apreciar que la anhidrita (sulfato de calcio) formada, por reacción con el hidróxido de calcio, posee una cristalinidad baja debido a que probablemente presente un tamaño de cristal muy pequeño, este fenómeno

provoca además un ensanchamiento del pico de difracción. Además, se puede observar que en la muestra residuo, aún queda una proporción elevada de hidróxido de calcio, esto es debido a que para alcanzar elevados rendimientos es necesario trabajar con una cantidad de reactante muy superior a la estequiométrica (esta muestra se corresponde con el ensayo efectuado a un ratio estequiométrico de 2,1). La calcita (carbonato cálcico) presente se puede atribuir a una carbonatación del hidróxido de calcio y el porcentaje es bajo y similar en ambas muestras.

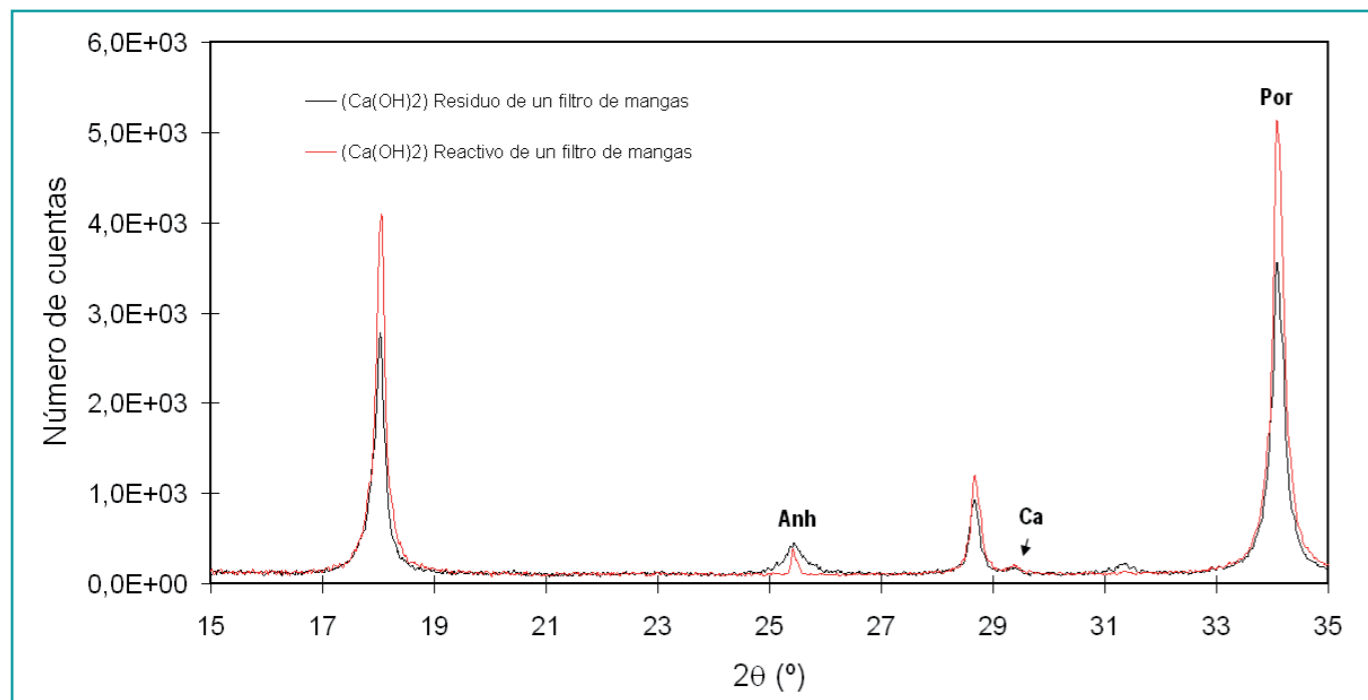


Figura 9. Difracción de rayos X de la muestra de reactivo y de residuo del filtro de mangas.

❖ Rendimiento en la depuración del sistema de depuración estudiado

Para poder calcular el rendimiento del sistema de depuración, se ha realizado una caracterización de las emisiones del sistema de depuración alimentando al sistema diferentes dosis de reactivo.

Las principales características del horno de cocción se han mantenido estables en las condiciones detalladas en la Tabla 3. Con estas características de funcionamiento, se han realizado diferentes medidas de concentración de SO₂ en fase gas para diferentes dosis de reactivo.

El método de medida utilizado coincide con el seguido en la fase inicial. La realización de las medidas de SO₂ en discontinuo mediante el método químico se iniciaba un vez alcanzado el régimen estable en cuanto a la emisión de dicho contaminante.

En la Tabla 8, se resumen los resultados de la emisión de SO₂ para las diferentes dosificaciones estudiadas, así como los rendimientos calculados.

Dosificación de reactivo (kg/h)	Ratio estequiométrico	Concentración final SO ₂ (mg/Nm ³ al 18% O ₂)	Rendimiento (%)	
			Variación	Valor medio
27,2	1,5	205 ± 34	25-44	35
38,7	2,1	149 ± 24	46-60	53
48,0	2,6	92 ± 11	67-75	71

Tabla 8. Concentración de SO₂ según la dosificación de reactivo en el sistema de depuración.

En la Figura 10 se representa la variación del rendimiento de depuración de SO₂ en función del ratio estequiométrico.

Los experimentos realizados no permiten realizar una extrapolación fiable de los rendimientos que se obtendrían a dosis superiores a las estudiadas, por ello no es posible conocer el rendimiento máximo del sistema.

❖ Comparación de resultados con los requisitos legales

Finalmente, en la Tabla 9 se compara los resultados obtenidos con el filtro estudiado y los valores recogidos en los siguientes documentos técnicos y legales: Plan de Mejora de Calidad de Aire del municipio de Bailén [5], el documento BREF sobre la industria cerámica [1] y la Autorización Ambiental Integrada concedida a la empresa Márquez [6].

De los valores recogidos en la tabla se observa que el equipo estudiado al-

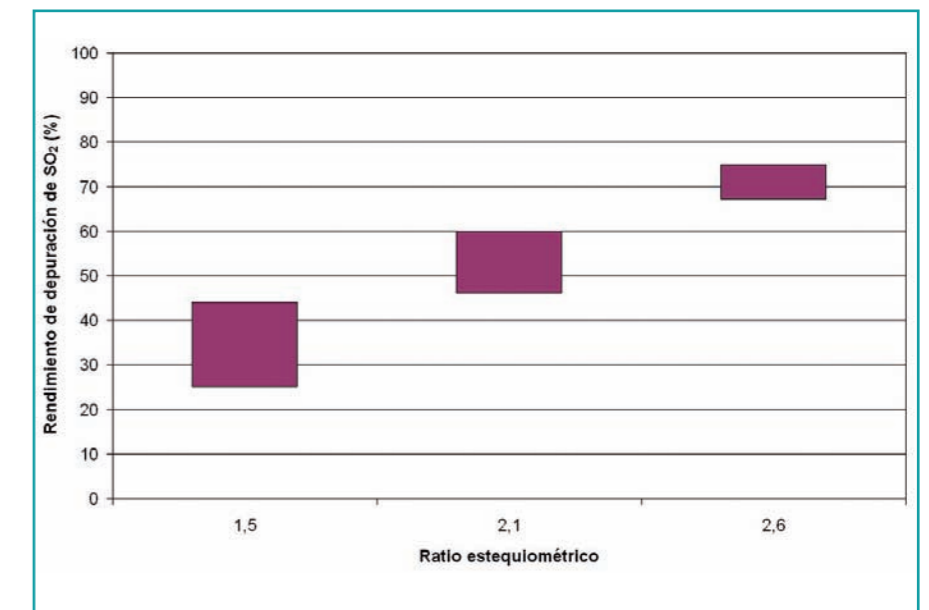


Figura 10. Rendimiento en % de depuración de SO₂ en función de la dosificación de reactivo.

canza un rendimiento elevado en la depuración de SO₂ (67-75%) cercano a los valores superiores indicados en la bibliografía para estos sistemas (30-80%), y que permite cumplir el valor

límite de emisión más restrictivos exigidos en la AAI concedida a Márquez, con unas pérdidas de carga inferiores a los valores habituales según la bibliografía. ♦

Referencia	Contaminante (mg/Nm ³ al 18% O ₂)		Rendimiento de desulfuración (%)	Pérdida de carga (mmH ₂ O)
	Partículas	SO ₂		
BREF industria cerámica	< 20	< 500 (*)	7 - 80	-
Plan de Calidad de aire Bailén	< 50	< 400	60-80	100 - 400
AAI - Márquez	< 26	< 260	-	-
Filtro estudiado al rendimiento máximo obtenido	< 20	< 100	67 - 75	35 - 55

Tabla 9. Concentración de SO₂ según la dosificación de reactivo en el sistema de depuración.

(*) Si el contenido de azufre en las materias primas es ≤0,25%, como es el caso de la instalación estudiada.

CONCLUSIONES

- Se ha caracterizado las emisiones gaseosas de un horno túnel dedicado a la fabricación de ladrillos cerámicos que utiliza como combustible una mezcla de gas natural y coque de petróleo micronizado, en la que se ha observado que el contaminante gaseoso más crítico son los compuestos de azufre (SO_2).
- Se ha diseñado, implantado y puesto a punto un sistema de depuración de las emisiones de azufre (SO_2) basado en la adición de hidróxido cálcico a la corriente destinada a ser depurada para formar sulfato cálcico, y en la posterior separación del material particulado mediante el uso de un filtro de mangas. Debido a que la emisión presenta una temperatura relativamente baja (sobre 120°C), y con la finalidad de evitar condensaciones ácidas, el equipo ha sido dotado de un sistema de regulación de la temperatura consistente en un quemador que utiliza gas natural como combustible.
- La caracterización del reactivo y de los residuos generados ha permitido saber que el hidróxido cálcico elimina los compuestos de azufre mediante la formación de sulfato cálcico (anhidrita), de acuerdo con lo esperado según la información bibliográfica.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las emisiones gaseosas depuradas indican que, optimizando la dosificación de reactivo, se alcanza un rendimiento elevado (sobre el 70%) cercano a los valores superiores indicados en la bibliografía para estos sistemas (30-80%), y que permite cumplir los límites de emisión más restrictivos exigidos a esta actividad, con unas pérdidas de carga relativamente bajas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IPTS. EUROPEAN COMMISSION. Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry. August 2007. 232 pp (<http://eippcb.jrc.es>).
- [2] GONZÁLEZ, I.; APARICIO, P.; GALÁN, E.; FABBRI, B. A proposal for reducing F and Cl emission in the brick industry using new formulations. *App. Clay Sci.*, 22, 1-7, 2002.
- [3] GONZÁLEZ, I.; GALÁN, E.; MIRAS, A. Fluorine, chlorine and sulphur emissions from the Andalusian ceramic industry (Spain). Proposal for their reduction and estimation of threshold emission values. *App. Clay Sci.*, 32, 153-171, 2006.
- [4] GAZULLA, M.F.; GÓMEZ, P.; CABRERA, M.J.; MONFORT, E. Determinación de flúor en las arcillas utilizadas en la fabricación de baldosas cerámicas. *Técnica Cerámica*, 243, 298-302, 1996.
- [5] DECRETO 31/2006, de 14 de febrero, por el que se aprueba el plan de mejora de la calidad del aire en el municipio de Bailén. BOJA núm. 56/2006, de 23 de marzo.
- [6] RESOLUCIÓN de 13 de marzo de 2007 de la Delegación Provincial de la Consejería de Medio Ambiente de Jaén relativa a la solicitud de Autorización Ambiental Integrada presentada por Herederos Márquez Villar S.L. (AAI/JA/030).