

Viabilidad de la implantación de sistemas de cerramiento total para reducir las emisiones difusas de partículas

V. SANFELIX¹, A. LÓPEZ-LILAO², J. GARCÍA-TEN¹, S. PALLARES¹, E. MONFORT¹

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

²Departamento de Ingeniería química. Universitat Jaume I. Castellón. Spain

Tras la entrada en vigor de la Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (Directiva IPPC) las actividades afectadas por la misma, incluidas las del sector cerámico, se han visto obligadas a controlar la emisión de partículas difusas mediante la implantación de medidas correctoras, que en muchos casos suponen un impacto económico significativo. En los casos más exigentes, las Autorizaciones Ambientales Integradas (AAIs) otorgadas a empresas del sector cerámico requieren el cerramiento total de las operaciones de gestión de materias primas. En el presente trabajo se evalúa la **viabilidad técnica, económica y ambiental** de la implantación de un **sistema de cerramiento o confinamiento total** como medida de reducción de emisiones difusas al considerarse una de las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs). El estudio se ha realizado sobre una instalación de fabricación de gránulo atomizado considerando las operaciones de recepción, gestión y almacenamiento de materias primas.

Palabras clave: emisiones difusas de partículas, PST, PM_{10} , Mejores Técnicas Disponibles, sistema de cerramiento.

Feasibility of the implementation of total enclosure systems to reduce fugitive particle emissions

Following the entry into force of the IPPC directive, the activities that it affects, which include the ceramic sector, have needed to control fugitive particle emissions by implementing corrective measures that often entail significant economic costs. In the most demanding cases, the Integrated Environmental Authorisations (IEA) awarded to companies in the ceramic industry require total enclosure of the raw materials handling operations.

This paper evaluates the **technical, economic, and environmental feasibility** of the implementation of a **total enclosure or containment system** as a way of reducing fugitive particle emissions, as this is considered one of the Best Available Techniques (BAT). The study was carried out on the raw materials reception, handling, and storage operations at a ceramic company that manufactures spray-dried powder granules.

Keywords: fugitive particle emissions, TSP, PM_{10} , Best Available Techniques, enclosure systems.

1. INTRODUCCIÓN

Tras la entrada en vigor de la legislación derivada de la Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (Directiva IPPC) (1) las actividades afectadas por la propia directiva, como son las empresas del sector cerámico, para llevar a cabo su actividad deben obtener una Autorización Ambiental Integrada (AAI) en la que se establecen valores límite de emisión en función de las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs) para cada sector industrial. Además en el año 2010 se aprobó la Directiva de Emisiones Industriales (2), esta directiva refunde la Directiva IPPC junto con otras cinco directivas sectoriales. La nueva Directiva de Emisiones Industriales (DEI) promueve una mayor exigencia de aplicación y control de la implantación de MTDs, proporcionando un papel fundamental a los documentos de referencia aprobados por la Comisión Europea, denominados Reference Documents on Best Available Techniques (BREFs) que elaborarán grupos técnicos especializados.

Como consecuencia de los requerimientos de control de las emisiones difusas exigidos en las AAIs, las empresas se han visto obligadas a llevar a cabo la implantación de medidas correctoras, algunas de las cuales suponen un impacto económico significativo.

Dentro del marco del sector de fabricación de baldosas cerámicas, la fabricación de gránulo atomizado es la actividad que presenta mayor flujo de emisión de material particulado por focos difusos. Esto es consecuencia de la elevada cantidad de materias primas a granel que tradicionalmente se han manipulado al aire libre para llevar a cabo el mezclado de arcillas previamente al proceso de fabricación. El método más utilizado para el mezclado y formación de composiciones consiste en la realización de acopios de cada materia prima, posteriormente se forma la pila de composición dosificando cada materia prima procedente de los acopios primarios mediante máquina pala y finalmente se lleva a cabo la

nivelación del terreno una vez formada la primera capa (este proceso se repite tantas veces como sea necesario hasta alcanzar la altura deseada del acopio). Esta actividad (considerando recepción y preparación de materias primas) realizada sin medidas correctoras o con poca implantación de medidas de bajo rendimiento genera en torno a 0.3-0.5 kg de PM_{10} por tonelada de producto atomizado (PM_{10} : partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico igual o inferior a $10 \mu m$) (3). Con la finalidad de reducir dichas emisiones se propone la implantación de medidas correctoras, recogidas en los Planes de Mejora de Calidad del Aire (3, 4, 5) y en los documentos BREFs, entre los que se incluyen uno específico para el almacenamiento de materiales pulverulentos (6) y uno específico para la industria cerámica (7). Entre estas medidas propuestas cabe destacar las siguientes:

- Confinar las actividades generadoras de emisiones difusas.
- Almacenado de materias primas en silos dotados de aspiración y filtración del aire depurado con filtros de mangas.
- Manipulación de materias primas en recintos cerrados y en depresión, con filtración posterior del aire evacuado con filtros de mangas.
- Almacenamiento de materias primas en compartimentos o celdas.
- Pavimentación de viales.
- Riego de viales no asfaltados y barrido de viales pavimentados.

La elección de una u otra medida dependerá de las características de la instalación y de su ubicación. En algunos de los Planes de Mejora de la Calidad del Aire en zonas de alta concentración de industrias cerámicas (3,4) se propone establecer requisitos diferentes en función de la distancia de la instalación a un núcleo urbano. Concretamente estos planes establecen como criterio que las instalaciones ubicadas a una distancia inferior o igual a 1000 metros de un núcleo urbano de población o cualquier núcleo residencial, deben realizar estas operaciones en recintos cerrados. Por el contrario, a distancias superiores se pueden llevar a cabo en instalaciones abiertas o al aire libre adoptando una serie de medidas correctoras o preventivas.

2. OBJETIVOS

Como consecuencia de la creciente exigencia en las AAI de adoptar medidas correctoras de alto rendimiento para la reducción de las emisiones difusas de partículas, se plantea la realización del presente estudio, que pretende evaluar la viabilidad del cerramiento total del parque de recepción, almacenamiento y gestión de materias primas de naturaleza pulverulenta. En este sentido, los objetivos específicos del presente estudio son:

- Estudiar la viabilidad técnica de dicho sistema mediante la evaluación de una serie de parámetros de calidad de producto.
- Valorar su viabilidad ambiental (entendida como la eficacia en la reducción de emisiones difusas de partículas) mediante la estimación de tasas de emisión específicas de PST (partículas en suspensión totales) y PM_{10} (partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico igual o inferior a $10 \mu m$).

- Evaluar su viabilidad económica, comparando su coste con el asociado al sistema tradicional de manipulación y gestión de materias primas a cielo abierto.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la realización del estudio se ha tomado como referencia una empresa tipo del sector de fabricación de gránulo atomizado de coloración roja en cocido, con una producción media diaria de 2750 toneladas de gránulo atomizado.

Con el fin de realizar el análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica, se han definido tres escenarios tecnológicos con diferente grado de implantación de medidas correctoras para la disminución del impacto asociado a las emisiones difusas de partículas, y con la aplicación de diferentes métodos de homogenización de la composición. La clasificación del rendimiento de las medidas correctoras implantadas se basa en las referencias (8-10), y en los resultados obtenidos en trabajos previos específicos de la industria cerámica (11-17). A continuación se detallan los escenarios tecnológicos considerados, que se encuentran esquematizados en la figura 1:

- **ET1 (recepción, almacenamiento y gestión de materias primas al aire libre):** En este escenario las medidas correctoras implantadas son de bajo-medio rendimiento: riego de viales no asfaltados, barrido de viales asfaltados, cierre parcial de la gestión de residuos de filtros de mangas (finos) y de la operación de trituración, y cierre total de la operación de carga de gránulo atomizado. Las materias primas, principalmente arcillas, están constituidas por arcillas homogeneizadas, que son las que se acopian en la mina y provienen de la mezcla de varias capas del yacimiento, y arcillas sin homogeneizar, que son las que proceden directamente de capas individuales del propio yacimiento. Posteriormente se realiza una homogeneización en la propia instalación mediante la formación de acopios con las distintas materias primas que forman la composición, y finalmente se realiza la trituración de la composición y la alimentación a molinos.

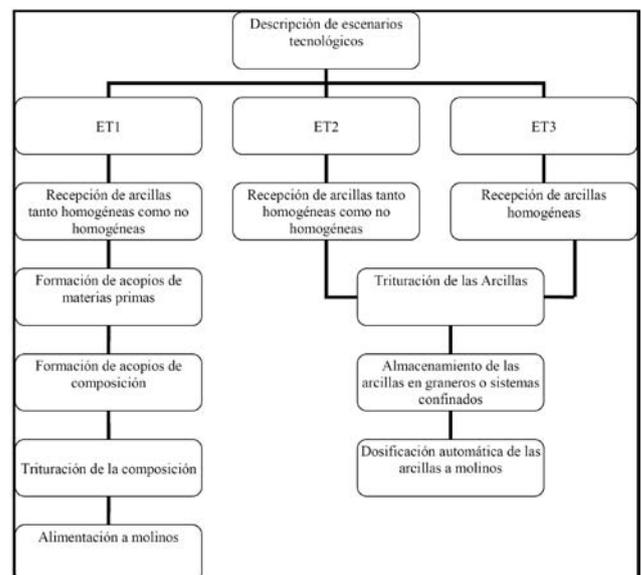


Figura 1: Descripción de los escenarios tecnológicos considerados

Es uno de los sistemas más habituales en las plantas de fabricación de gránulo atomizado de coloración roja antes de la entrada en vigor de la Directiva IPPC (1).

- **ET2 (recepción, almacenamiento y gestión de materias primas en naves cerradas):**
En este escenario las medidas correctoras implantadas son de alto rendimiento, realizándose las actividades de recepción, almacenamiento y gestión de materias primas en naves cerradas dotadas de aspiración y posterior filtración del aire aspirado con filtros de mangas. Las materias primas, al igual que en el escenario ET1, están constituidas tanto por arcillas homogeneizadas como por arcillas sin homogeneizar, pero en este caso, son directamente trituradas y almacenadas en graneros para su posterior dosificación automática a los molinos.
- **ET3 (almacenamiento, recepción y gestión de materias primas en naves cerradas):** En este escenario las materias primas se reciben en su totalidad homogeneizadas y, posteriormente, son gestionadas de igual forma que en el escenario ET2.

3.1 Estudio de viabilidad técnica

Para considerar viable técnicamente el sistema de cerramiento total del parque de recepción, almacenamiento y gestión de materias primas se ha considerado que este debe igualar o mejorar las condiciones de seguridad y calidad del producto que se obtienen con el escenario tradicional (ET1). Por este motivo, se ha realizado la evaluación de una serie de parámetros de calidad que posteriormente, mediante la aplicación de un tratamiento estadístico, han permitido determinar si la homogenización de las composiciones alcanzada a partir de las metodologías de trabajo descritas en los escenarios ET2 y ET3, es equivalente a la obtenida en ET1. Los parámetros que se han evaluado, siguiendo los procedimientos descritos en la bibliografía (18-19), son:

R63 µm: Resíduo a 63 µm (%)

D: Densidad de la suspensión cuando el tiempo de caída en la Copa Ford se encuentra entre 28-32 s (g/cm³)

D_{ap}: Densidad aparente en seco (g/cm³)

RM: Resistencia mecánica en seco (N/mm²)

CL: Contracción lineal de cocción (%)

3.1.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

En primer lugar, se ha determinado la desviación porcentual o relativa (S*) de los distintos parámetros de calidad evaluados, en las composiciones obtenidas mediante los diferentes sistemas de gestión de materias primas considerados (ET1, ET2 y ET3). Este parámetro se ha considerado un indicador de la homogeneidad de las composiciones obtenidas en cada uno de los escenarios, sin embargo no permite evaluar si las diferencias detectadas pueden ser consideradas aceptables.

Por este motivo, se ha realizado un estudio estadístico que permite evaluar si existe homogeneidad entre las varianzas de los distintos escenarios. Concretamente, se ha realizado el test de Levene (con un nivel de significancia de 0.05), mediante la aplicación del programa "SPSS Statistics". Esta herramienta permite evaluar si la hipótesis (varianzas homogéneas) es cierta, esto es así cuando la probabilidad asociada al estadístico de Levene es superior al nivel de significancia (20).

3.2 Estudio de viabilidad ambiental

La viabilidad ambiental del sistema propuesto se ha evaluado a partir de la reducción de emisiones difusas de partículas alcanzada en la instalación con la implantación de las medidas adoptadas en ET3 respecto a las emisiones generadas en el escenario tradicional (ET1). Para alcanzar este objetivo, se ha realizado una estimación de las emisiones de PST y PM₁₀ generadas en los distintos escenarios tecnológicos. La estimación se ha realizado aplicando un método analítico basado en el uso de factores de emisión y ecuaciones semiempíricas (8-10) validado en estudios anteriores (11-17). La aplicación de las ecuaciones propuestas, requiere el conocimiento de una serie de parámetros que deben determinarse experimentalmente. A partir de estos parámetros experimentales y mediante la aplicación de las ecuaciones semiempíricas, los factores de emisión y los rendimientos teóricos asociados a cada una de las medidas correctoras implantadas en la instalación (Tabla I) se obtienen las tasas de emisión de PST y PM₁₀ en los escenarios tecnológicos considerados.

TABLA I: RENDIMIENTO TEÓRICO DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS IMPLANTADAS EN LOS ESCENARIOS TECNOLÓGICOS CONSIDERADOS (11-12)

Operación	Medidas correctoras implantadas			
	ET1	Rendimiento (%)	ET2 y ET3	Rendimiento (%)
Transporte zona asfaltada	Barrer	70	Barrer	70
Transporte zona no asfaltada	Riego con camión cuba	50	No aplica	-
Manipulación	Cerramiento parcial manipulación finos + filtros de mangas	83	Cabina de cerramiento total + filtros de mangas ^a	99
	Cerramiento total carga atomizado+ filtros de mangas	99		
Trituración	Cerramiento parcial+ filtros de mangas	83	Cerramiento total+ filtros de mangas	99
Erosión	No se aplica ningún control	-	No aplica	

a) Esta medida se aplica en la recepción y gestión de finos y arcillas así como en la operación de carga de gránulo atomizado.

TABLA II: COSTES E INVERSIONES UNITARIOS

Coste	Concepto	Precio	Unidades
Operación, mantenimiento y materias primas	Agua	0.3	€/m ³
	Energía eléctrica	0.14	€/kW•h
	Mano de obra	20000	€/operario/año
	Mantenimiento de la máquina pala	51 730	€/año
	Mantenimiento del camión-cuba	13 242	€/año
	Precio medio materias primas ET1	9.5	€/t
	Precio medio materias primas ET3 ^a	9.8	€/t
Inversión	Lavadero camiones (ET1)	64 042	€/unidad
	Lavadero camiones (ET3) ^b	40 000	€/unidad
	Filtros de mangas	128 084	€/unidad
	Gestión de finos y rechazos (ET1)	640 418	€/unidad
	Gestión de finos y rechazos (ET3) ^c	214590	€/unidad
	Silos de alimentación a molinos	16 010	€/unidad
	Máquina pala	513 199	€/unidad
	Cuba de riego	76 850	€/unidad
	Pavimentación	21.3	€/m ²
	Terreno	50	€/m ²
	Nave cerrada	213	€/m ²

a) A partir de datos del sector se ha considerado que las materias primas homogeneizadas presentan un coste un 10% superior a las no homogeneizadas. Asimismo se ha considerado que un 30% de las materias primas necesitan homogeneización adicional en ET3.

b) Se ha considerado que en ET3, puesto que todos los viales se encuentran pavimentados, el lavadero de camiones con agua a presión (ET1) se sustituye por un sistema de limpieza de ruedas por traqueteo y lavado sin presión.

c) Se ha asumido que mientras que en ET1 es necesario un sistema específico para la gestión de finos y rechazos por vía seca, en ET3 los finos se almacenarán en una de las celdas de la nave (asumiendo para el diseño de dicha celda un stock de 45 días de finos).

TABLA III: CONSUMO ASOCIADO A LA RECEPCIÓN, GESTIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS EN LOS ESCENARIOS ET1 Y ET3.

Consumo	ET1	ET3
Agua (m ³ /d)	87.6	30
Energía eléctrica (kW•h)	335	225
Operarios (número)	5	3
Máquinas pala (unidades)	2	1
Lavadero de camiones (unidades)	1	1
Filtro de mangas (unidades)	1	3
Gestión de finos y rechazos por vía seca (unidades)	1	1
Silos alimentación a molinos (unidades)	16	20
Cuba de riego (unidades)	1	0
Pavimentación (m ²)	0	600 ^a
Nave cerrada (m ²)	0	19 000 ^b
Terreno (m ²)	80 000 ^c	20 000 ^c
Materias primas (t/d)	2750	2750

a) En la pavimentación se ha considerado que se lleva a cabo el asfaltado de los viales no asfaltados en ET1.

b) La dimensión de la nave se ha estimado a partir de la producción considerada, los días de stock de materias primas asumidos (45 días) y la capacidad de almacenamiento de la nave (a partir de estudios realizados en empresas del sector se asume un valor de 6.7 t/m²).

c) El terreno necesario para ambos escenarios se ha estimado a partir de datos proporcionados por empresas del sector.

3.3 Estudio de viabilidad económica

Se ha realizado un análisis de los costes asociados a la inversión, ejecución y mantenimiento de las operaciones de recepción, gestión y almacenamiento de materias primas para el escenario tecnológico tradicional con implantación de medidas de bajo-medio rendimiento (ET1) y para el escenario tecnológico, exigido en algunas AAI, con implantación de medidas de alto rendimiento (ET3).

La estimación de los costes totales, expresados como €/tonelada de gránulo atomizado producido, se ha calculado a partir de los costes unitarios de inversión, operación y mantenimiento especificados en la tabla II y del consumo de cada uno de estos conceptos detallados en la tabla III, considerando la amortización anual asociada a los valores de inversión. El cálculo de la amortización se ha realizado aplicando la ecuación 1 (21).

$$A = I \cdot \frac{(1+p)^t}{(1+p)^t - 1} \cdot p \quad [1]$$

Siendo:

A: Amortización (€/año)

I: Inversión (€)

p: interés (%)

t: tiempo de amortización (años)

Los costes e inversiones unitarios recogidos en la tabla II corresponden a datos proporcionados por empresas del sector en el año 2011.

4. RESULTADOS

4.1 Estudio de viabilidad técnica

En la tabla IV se muestra la desviación relativa alcanzada para los diferentes parámetros de calidad estudiados en dos composiciones de azulejo. Las composiciones se han obtenido aplicando los diferentes métodos de homogeneización, definidos para cada uno de los escenarios tecnológicos considerados.

En dicha tabla, se observa que el ET1 presenta una menor dispersión de los resultados obtenidos, lo que indica que la operación de homogeneización y mezclado en acopios garantiza una buena uniformidad de las composiciones.

TABLA IV: PARÁMETROS DE CALIDAD EVALUADOS PARA LAS COMPOSICIONES OBTENIDAS

Composiciones ^a		S* (%)				
		R63 μm	D	Dap	RM	CL
Composición azulejo 1	ET1 (n=36)	7.1	0.4	0.7	6.8	28.8
	ET2 (n=22)	10.8	0.7	1.0	7.8	62.1
Composición azulejo 2	ET1 (n=20)	8.4	0.5	0.5	6.4	26.4
	ET3 (n=10)	9.5	0.6	0.5	5.1	32.1

n= número de muestras

a) Las condiciones de preparación de materias primas a escala industrial fueron ligeramente diferentes durante la obtención de la composición 1 y la composición 2.

Si comparamos la variación que presentan ET2 y ET3 respecto a ET1 se aprecia que ET2 da lugar a mayores diferencias. De todos modos, para determinar de forma sistemática si las diferencias detectadas en ET2 y ET3 pueden ser aceptables, como se ha comentado previamente, se ha realizado un estudio estadístico que permite evaluar si existe homogeneidad entre las varianzas de los distintos escenarios propuestos respecto al escenario tradicional (ET1). Estos resultados se recogen en la tabla V.

A partir de los resultados obtenidos se puede apreciar que para ET2 las varianzas obtenidas, en 4 de 5 de los parámetros evaluados, son significativamente diferentes respecto a las obtenidas mediante el método tradicional (ET1). En ET3, por el contrario, para la totalidad de los parámetros evaluados las varianzas son homogéneas respecto a ET1. Estos resultados indican que si todas las materias primas que forman la composición son homogéneas (ET3) se obtienen composiciones con calidad similar a la obtenida con el método tradicional de mezclado y homogeneización en la propia instalación.

Según las premisas iniciales, el criterio para implantar un nuevo escenario es que la calidad de las composiciones (producto) debe ser como mínimo igual a la obtenida con ET1, concluyéndose a partir de los resultados obtenidos que las composiciones en ET2 son significativamente menos homogéneas que en ET1.

En consecuencia, dado que este criterio de calidad técnica se considera excluyente, se descarta este sistema, y el estudio de viabilidad ambiental y económica se centrará únicamente en ET3.

4.2 Estudio de viabilidad ambiental

En la tabla VI se especifican los valores de los diferentes parámetros, determinados experimentalmente, para poder aplicar la metodología analítica de estimación de emisiones difusas de partículas.

En la tabla VII se presentan las tasas de emisión de PST y PM_{10} para las diferentes operaciones generadoras de emisiones difusas de partículas en ET1 y ET3, así como el rendimiento individual y global alcanzado en ET3 respecto a ET1.

A partir de los resultados mostrados en la tabla VII se puede apreciar que los rendimientos globales en ET3 respecto a ET1

TABLA V: RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTADÍSTICO PARA EVALUAR LA HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS

Propiedad	Homogeneidad de varianzas respecto a ET1 ^a	
	ET2	ET3
R 63 μ m	NO	SÍ
D	NO	SÍ
Dap	NO	SÍ
RM	SÍ	SÍ
CL	NO	SÍ

a) Las varianzas se han considerado homogéneas cuando el resultado obtenido en el test de Levene es mayor de 0.05 (nivel de significación que se considera como aceptable). En estos casos las varianzas del escenario propuesto (ET2 o ET3) y el escenario tradicional (ET1) no presentan diferencias significativas.

son de un 91% y un 94.5 % para PST y PM_{10} respectivamente. Por otro lado, se puede observar que se produce una mejora significativa en todas las operaciones salvo en el transporte por zona asfaltada como consecuencia de que se incrementa la longitud de los viales asfaltados en ET3.

Por otro lado, teniendo en cuenta las tasas de emisión obtenidas en estudios anteriores (3,16) para empresas con distinto grado de implantación de medidas correctoras se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La implantación de medidas de alto rendimiento de mejora en las operaciones de manipulación y trituración provoca que el transporte de materiales pulverulentos en el interior de la empresa, aún realizándose por viales asfaltados, sea la actividad con mayor impacto en la generación de emisiones difusas de partículas, cuando el transporte no se encuentra confinado en su totalidad.
- ET1 presenta una tasa de emisión de PM_{10} de 206 gramos por tonelada de gránulo atomizado, valor que se encuentra ligeramente por debajo del rango para este tipo de instalaciones (220-240 gramos por tonelada de gránulo atomizado).

TABLA VI: PARÁMETROS MEDIOS RECOPIADOS EN INSTALACIONES DE FABRICACIÓN DE GRÁNULO ATOMIZADO

Parámetro	Valor	Unidades
Contenido en finos en viales de zonas asfaltadas	1.9-2.2	g/m ²
Contenido en finos en viales de zonas no asfaltadas	4.3-17.3	%
Velocidad media del viento	0.3	m/s
Longitud de viales asfaltados (zona de paso de camiones) ET1	2.2	km
Longitud de viales asfaltados (zona de paso de camiones) ET3	2.8	km
Longitud de viales no asfaltados (zona de paso de camiones) ET1	0.6	km
Longitud que recorren las palas en ET1	180	km/d
Longitud que recorren las palas en ET3	90	km/d
Días de stock de materias primas en ET1	90	d
Días de stock de materias primas en ET3	45	d

- En ET3 la tasa de emisión es de 11 gramos por tonelada de gránulo atomizado y se corresponde con la propia de una instalación con sistema de confinamiento total (7-11 gramos por tonelada de gránulo atomizado). Cabe comentar que el rendimiento correspondiente a la manipulación de materias primas es superior al 99% respecto a ET1 puesto que por un lado, la gestión de materias primas se lleva a cabo en sistemas confinados, y por otro, se eliminan las operaciones de mezclado y homogeneización (formación de acopios).

4.3 Estudio de viabilidad económica

4.3.1 COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En la figura 2 se muestra la distribución de costes de operación y mantenimiento para el escenario tradicional (ET1) y para el cerramiento total del parque de recepción, almacenamiento y gestión de materias primas (ET3).

El coste total de operación y mantenimiento en ambos escenarios es muy similar, debido a que en ET3 el ahorro en costes de mano de obra, mantenimiento de la máquina-pala, electricidad y agua se contrarrestan con el ligero aumento del precio medio de las materias primas.

4.3.2 COSTES DE INVERSIÓN

En la figura 3 se muestran los costes de inversión totales para los dos escenarios estudiados, ET1 y ET3, así como el porcentaje que corresponde a cada uno de los factores considerados.

A pesar de que se reduce notablemente la inversión asociada al terreno necesario como consecuencia de la eliminación de la operación de mezclado y de la reducción de stock, la inversión total del escenario ET3 es superior debido fundamentalmente a la inversión en obra civil para la construcción de la nave cerrada.

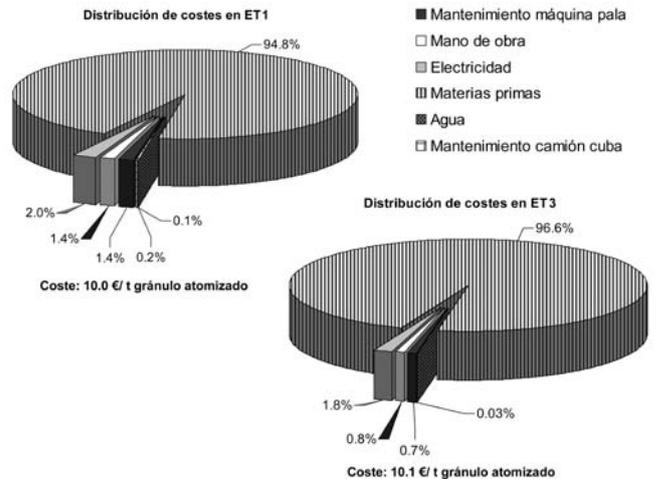


Figura 2: Distribución de los costes de operación y mantenimiento en escenarios ET1 y ET3.

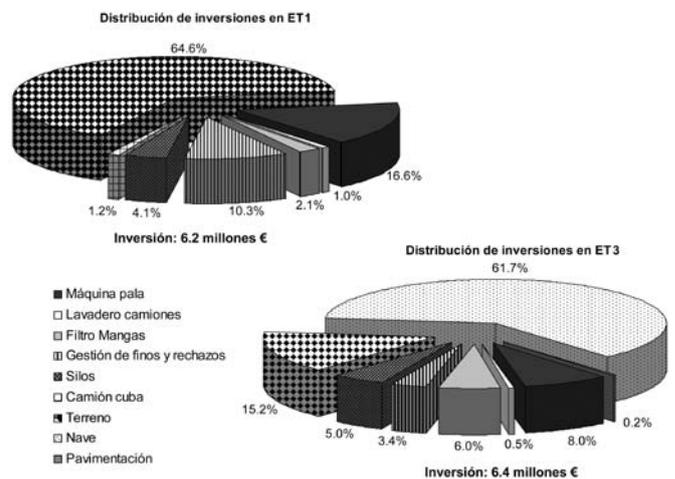


Figura 3: Distribución de inversiones en los escenarios ET1 y ET3.

TABLA VII: ESTIMACIÓN DE EMISIONES DIFUSAS DE PST Y PM₁₀ Y RENDIMIENTOS DE MEJORA

Fracción	Operación	Emisiones (g/t gránulo atomizado)		Rendimiento ^a (%)
		ET1	ET3	ET3
PST	Transporte zona asfaltada	49	51	-4
	Transporte zona no asfaltada	101	0	100
	Manipulación	368	3	99.3
	Trituración	94	3	96.7
	Erosión	21	n.a. ^b	100
	Total		634	57
PM ₁₀	Transporte zona asfaltada	9	10	-4
	Transporte zona no asfaltada	28	0	100
	Manipulación	144	1	99.3
	Trituración	13	0.5	96.7
	Erosión	10	n.a. ^b	100
	Total		206	11

a) Rendimientos calculados respecto a las emisiones generadas en ET1.

b) n.a.: no aplica, se ha asumido que la emisión es nula.

4.3.3 COSTES UNITARIOS TOTALES

A partir de los costes de operación, mantenimiento y amortización de las inversiones se han determinado los costes unitarios asociados a ambos escenarios. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla VIII.

Se observa que en las condiciones consideradas, el coste por tonelada de producto en el ET1 es menor que en el ET3. Sin embargo, las condiciones de trabajo en el ET3 permiten mayor flexibilidad en cuanto a la disponibilidad de materias primas que permitan cubrir la demanda de producción durante un determinado periodo (días de almacenamiento de stock). Esto se debe a que, por una parte no es necesaria la operación de mezclado y homogenización de las materias primas, pues se asegura que se ha llevado a cabo una homogenización previa, y por otra parte las pérdidas de materias primas que pueden tener lugar en ET1 se eliminan con el cerramiento total de la instalación. En la figura 4 se muestra la variación del coste asociado a ET3 al modificar los días de almacenamiento (de stock) en comparación con el coste de ET1 (que se considera constante). En la figura 4 se puede apreciar que en el diseño de las naves el tiempo equivalente de almacenamiento es un factor crítico para el ET3. En concreto, en el caso estudiado se observa que si las naves se diseñan para tiempos de almacenamiento por debajo de 27 días, la aplicación de las medidas propuestas en el ET3 supone una incidencia en el coste específico menor que en ET1 por lo que este factor se considera crítico para asegurar la viabilidad económica.

5. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada en este trabajo para el estudio de la viabilidad técnica, ambiental y económica de escenarios puede ser extrapolada a otras empresas y subsectores con una problemática medioambiental similar y con distinto grado de implantación de medidas correctoras. Por otro lado, tanto la metodología como las conclusiones generales obtenidas pueden aplicarse a procesos alternativos de preparación de materias primas que puedan surgir de las interesantes investigaciones que están apareciendo recientemente sobre procesos de preparación de materias primas granuladas (22-25).

A partir de la aplicación de este procedimiento de cálculo a los escenarios tecnológicos estudiados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

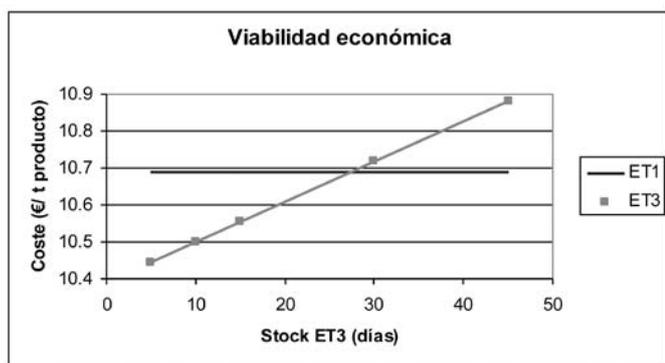


Figura 4: Determinación del coste en ET3 en función de los días equivalentes de almacenamiento comparado con los costes del sistema tradicional (ET1).

TABLA VIII: COSTES UNITARIOS EN LOS ESCENARIOS ET1 Y ET3.

Concepto	ET1 (stock 90 días)	ET3 (stock 45 días)
Coste (€/t producto)	10.0	10.1
Amortización ^a (€/t producto)	0.67	0.74
Coste total (€/t producto)	10.67	10.84

a) Para el cálculo de la amortización se ha empleado un tiempo de amortización de 10, 20 y 50 años para equipos, obra civil y terrenos respectivamente y un interés del 4.5%.

- Respecto a la viabilidad técnica, los resultados indican que para poder asegurar la estabilidad de las composiciones de las que se dispone en ET1, es indispensable que en el ET3 (sistema de gestión confinada), se lleve a cabo una adecuada y exhaustiva pre-homogeneización de todas las materias primas.
- En cuanto a viabilidad ambiental, el ET3 presenta un rendimiento respecto a ET1 del 91% y del 94.5% para PST y PM₁₀ respectivamente. Este incremento en el rendimiento se traduce en una reducción muy elevada de las emisiones difusas de partículas, no obstante en estos materiales el ahorro económico en materias primas es apenas imperceptible, aunque podría serlo en materias primas de mayor coste.
- En cuanto a la viabilidad económica cabe destacar la menor necesidad de terreno de ET3 con la contrapartida de un aumento en los costes de fabricación e inversión. El incremento de coste en ET3 (suponiendo un stock de 45 días) es de aproximadamente 0.2 € por tonelada de producto, con respecto a ET1 (stock de 90 días) lo que supone un incremento de coste significativo en este tipo de producto. En este sentido, cabe señalar que existen varios parámetros críticos, entre los que destacan el grado de homogeneización de las materias primas de partida, el coste de las materias primas homogeneizadas, así como la superficie de naves para confinar el material. Este último parámetro es uno de los más críticos en el diseño, ya que al requerir una elevada inversión debe optimizarse para minimizar su coste, en la medida de lo posible. Por este motivo, en este trabajo se ha realizado el diseño de una instalación minimizando la superficie de naves a instalar. En el caso estudiado las naves deben diseñarse para almacenar como máximo materias primas para 27 días equivalentes de producción, por debajo de este valor el ET3 presenta un coste inferior a ET1. En términos prácticos, y haciendo una generalización a otras empresas equivalentes, este valor se traduce en un almacenamiento de materias primas inferior a un mes de producción, para mantener los costes del sistema tradicional (ET1).

Como conclusión general se puede establecer que el sistema con cerramiento total (ET3) propuesto en algunas AAI, ofrece ventajas indudables desde el punto de vista ambiental, al minimizar las emisiones difusas de material particulado. No obstante, para asegurar la viabilidad técnica y económica del proceso, al menos en la fabricación de

productos de coloración roja en cocido, es necesario en cada caso evaluar exhaustivamente el diseño de las instalaciones y las condiciones de operación, puesto que si no se implementan las modificaciones adecuadas, se pueden producir incrementos de costes que en algunos casos pueden ser prohibitivos.

AGRADECIMIENTOS

Los tres organismos que han prestado su apoyo económico en distintos proyectos, en el marco de los cuales se ha podido llevar a cabo el presente trabajo son:

- IMPIVA (Instituto de la Pequeña y Mediana Industria de la Generalitat Valenciana) por su colaboración en la financiación del proyecto de sostenibilidad ambiental de la industria cerámica con referencia IMIDIC/2009/3; IMIDIC/2010/77.
- Ministerio de Ciencia e Innovación por su apoyo en el proyecto de investigación "Cuantificación y caracterización de emisiones difusas de partículas en la gestión y transporte de materiales pulverulentos" dentro del Plan Nacional de I+D+I (2008-2011) con referencia CGL 2009-14680-C02-01.
- Fondo Europeo de desarrollo Regional por la cofinanciación del proyecto citado previamente (CGL 2009-14680-C02-01).

BIBLIOGRAFÍA

1. Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación.
2. Directiva 2010/75/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).
3. Plan de Mejora de la Calidad del Aire de la Zona ES 1003: Mijares-Penyagolosa (A. Costera) y Aglomeración ES 1015: Castelló. Valencia: Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. 2008. <<http://cma.gva.es/web/indice.aspx?nodo=58812&idioma=C>> (Consulta: 10/01/2012)
4. Plan de Mejora de la Calidad del Aire de L'Alacantí Occidental. Zona ES 1013: Segura-Vinalopó (A. Costera) y Aglomeración ES 1017: Alacant. Valencia: Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. 2010. <<http://cma.gva.es/web/indice.aspx?nodo=67213&idioma=C>> (Consulta: 10/01/2012)
5. Plan de Mejora de la Calidad de Aire en el municipio de Bailén. 2006. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.a5664a214f73c3df81d8899661525ea0/?vgnnextoid=fc7439dcfd700110VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=3259b19c7acf2010VgnVCM1000001625e50aRCRD&lr=lang_es (Consulta: 10/01/2012)
6. IPTS. European Commission, 2006. Reference document on Best Available Techniques on Emission from Storage. (http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/esb_bref_0706.pdf). (Consulta: 20/12/2011)
7. IPTS. European Commission, 2007. Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry. http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf (Consulta: 20/12/2011)
8. US EPA . AP 42. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Volume I, Stationary Point and Area Sources*, 5th ed. 1995, Chapter 13: Miscellaneous Sources PM. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/index.html> (Consulta: 20/12/2011)
9. Environment Australia, 2012. *Emission Estimation Technique Manual for Mining*. <http://www.npi.gov.au/publications/emission-estimation-technique/mining.html> (Consulta 15/02/2012)
10. J.A Orlemann et al. *Fugitive dust control technology*. Columbus Ohio. Data Corporation 1983.
11. E. Monfort , I. Celades, V. Sanfélix , S. Gomar, J.L. López, V. Calpe. Estimación de emisiones difusas de PM₁₀ y rendimiento de MTD's en el sector cerámico. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 48 (1), 15-24, 2009.
12. E. Monfort, I. Celades, S. Gomar, M.F. Gazulla, V. Sanfelix, F. Martín, A. de Pascual, B. Aceña. Control de las emisiones difusas de material particulado en la industria cerámica. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico (QUALICER 2006) Castellón, 12-15 febrero, 2006. Publicado en: Qualicer 2006: IX Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2006. pp. P.BC137-PBC150 (ISBN: 84-95931-17-6 O.C.)
13. E. Monfort, I. Celades, V. Sanfélix, S. Gomar, F. Martín, B. Aceña, A. de Pascual. Estimates of fugitive PM₁₀ emissions from the ceramic tile industry. En: HEINRICH, J.G.; ANÉZIRIS, C.G. (EDS.) Proceedings of the 10th International conference of the european ceramic society. Baden-Baden: Göller, 2008. pp. 1804-1809
14. E. Monfort, I. Celades, V. Sanfélix, S. Gomar, F. Martín, B. Aceña, A. de Pascual. Experimental fugitive PM₁₀ emission factors from solid bulk handling areas in the open air. En: CEM 2007: 8th International Conference on Emissions Monitoring: proceedings. Dubendorf: EMPA, 2007. pp. 245-250.
15. M.C. Minguillón, X. Querol, A. Alastuey, E. Monfort, J.V. Miró. PM sources at highly industrialised area in process of implementation of PM abatement technology: quantification and time evolution. *J. Environ. Monit.*, 9(11), 1071-1081, 2007.
16. E. Monfort, V. Sanfelix, I. Celades, S. Gomar, F. Martín, B. Aceña, A. de Pascual. Diffuse PM₁₀ emission factors associated with dust abatement technologies in the ceramic industry. *Atmos. Environ.* 45, 7286-7292, 2011.
17. M. Santacatalina, C. Reche, M.C. Minguillón, A. Escrig, V. Sanfelix, A. Carratala, J.F. Nicolás, E. Yubero, J. Crespo, A. Alastuey, E. Monfort, J.V. Miró, X. Querol. Impact of fugitive emissions in ambient PM levels and composition. A case study in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, 408(21), 4999-5009, 2010.
18. J.E. Enrique, F. Negre, A. Blasco, V. Beltrán. *Controles de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos*. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica-AICE, 1989.
19. J.L. Amorós, J. García-Ten, M. Monzó, E. Sánchez, V. Sanz. *Manual para el Control de la Calidad de las Materias Primas Arcillosas*. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica-AICE, 1998.
20. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods 2003. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> (Consulta 15/02/2012)
21. IPTS. European Commission, 2006. Reference document on economics and cross-media effects. http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/ecm_bref_0706.pdf (Consulta 20/12/2011)
22. Z. Shu, E. Monfort, J. Garcia-Ten, J. Zhou, J.L. Amorós, Y.X. Wang. A new cleaner process to prepare pressing-powder. *Bol. Soc. Esp. Ceram. V. Vol 50*, 5, 235-244 (2011).
23. C. Gil, D. Silvestre, J. Piquer, J. García-Ten, F. Quereda, M. J. Vicente. Preparation of porcelain tile granulates by more environmentally sustainable processes. *Bol. Soc. Esp. Ceram. V. Vol 51*, 2, 67-74 (2012).
24. Shu, Z.; Monfort, E.; García-Ten, J.; Amorós, J.L.; Zhou, J.; Wang, Y. Cleaner production of porcelain tile powders. Fired compact properties. *Ceram. Int.*, 38(2), 1479-1487, 2012.
25. Shu, Z.; Monfort, E.; García-Ten, J.; Amorós, J.L.; Zhou, J.; Wang, Y. Cleaner production of porcelain tile powders. Granule and green compact characterization. *Ceram. Int.*, 38(1), 517-526, 2012.

Recibido: 24/02/2012
Aceptado: 18/09/2012