
Sede UJI

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

Sede Almassora

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

Instituto de Tecnología Cerámica

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

E5.1. Informe de resultados de aptitud y de eficacia del material filtrante

Castellón, diciembre 2025.



Financiado por
la Unión Europea



Índice

1. Antecedentes	3
2. Sistemas de filtración	3
2.1. Sistema de filtración de laboratorio - Reactor monomanga.....	3
2.2. Sistema de filtración piloto - Reactor multimanga.....	5
3. Caracterización de los sistemas de filtración	6
4. Resultados	8
4.1. Permeabilidad a la corriente de aire	8
4.2. Resistencia mecánica y choque térmico.....	10
4.2.1. Determinación de la resistencia mecánica	10
4.2.1. Determinación de la resistencia al choque térmico	10
4.3. Reactor monomanga – Filtración a temperatura ambiente	13
4.3.1. Eficacia de eliminación de partículas.....	13
4.3.2. Eficacia de eliminación de fracciones granulométricas legisladas en calidad de aire.....	16
4.3.3. Eficiencia de eliminación en relación a la saturación del filtro	16
4.3.4. Capacidad de limpieza.....	17
4.4. Reactor multimanga – Filtración a alta temperatura	19
4.4.1. Eficacia de eliminación de partículas.....	19
4.4.2. Eficacia de eliminación de fracciones granulométricas legisladas en calidad de aire.....	21
4.4.3. Eficacia de eliminación en relación a la saturación del filtro.....	22
4.4.4. Capacidad de limpieza.....	22
4.5. Interpretación de los resultados	24
5. Otras consideraciones	25
5.1. Aplicación de sistemas de filtración con mangas cerámicas en hornos de cocción de baldosas con/sin sistema de eliminación de ácidos	25
5.2. Balance técnico-económico de un sistema de filtración	25
6. Conclusiones.....	27
Anexo 1. Equipamiento utilizado.....	28
Generador de partículas	28
Reactor monomanga y multimanga	29
Calefactor	29
Sistema de medida de partículas.....	29
Sistema de muestreo de partículas.....	31

Expresión de los resultados	32
-----------------------------------	----

1. Antecedentes

El presente informe corresponde al Entregable E5.1. del proyecto titulado “Sistema de eliminación de material particulado resistente a la temperatura” que tiene como acrónimo: CERAMIX AIRA y que se ha desarrollado por parte del Instituto de Tecnología Cerámica (ITC-AICE) dentro de su línea de I+D general denominada. *Calidad ambiental en entornos industriales* y, concretamente, en la sublínea *Tecnologías limpias en procesos industriales. MTDs* (LE 5.1). Esta actuación está cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional y por el IVACE con el número de expediente IMDEEA/2024/95.

El proyecto CERAMIX AIRA pretende desarrollar materiales filtrantes de naturaleza cerámica y de bajo coste, capaces de separar el material particulado presente en las corrientes de gases de escape de procesos industriales que tienen lugar a elevada temperatura.

Durante la realización del proyecto, se han obtenido composiciones cerámicas capaces de generar materiales filtrantes que se han podido conformar en forma de manga, un elemento filtrante cilíndrico de material cerámico diseñado para retener partículas en corrientes de gas, para ser utilizadas en un sistema de filtración.

En el presente informe se recogen los resultados correspondientes a la determinación de la capacidad del sistema de eliminación de material particulado resistente a la temperatura y de su eficacia de filtración de material particulado.

2. Sistemas de filtración

Durante el desarrollo del presente proyecto se han utilizado dos sistemas de filtración diferenciados. El primero es un sistema de laboratorio que equipa una sola manga. El segundo sistema ha sido diseñado y construido durante el desarrollo del proyecto y permite la utilización de un máximo de nueve mangas de forma simultánea. A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de estos sistemas filtrantes.

2.1. Sistema de filtración de laboratorio - Reactor monomanga

Este dispositivo se ha utilizado para realizar las campañas experimentales de evaluación del comportamiento de los elementos filtrantes desarrollados en CERAMIX AIRA a nivel de laboratorio. Para ello, se somete al elemento filtrante a una exposición controlada a corrientes gaseosas que presentan elevadas concentraciones de material particulado. Esta configuración permite realizar una caracterización preliminar del rendimiento y de la integridad de una única manga filtrante bajo condiciones representativas de operación de forma sencilla.

El sistema neumático del reactor integra una línea de ensayo por la que se hace circular una corriente de gas impulsada mediante una bomba soplante (Figura 1). El gas de entrada y de salida del reactor se canaliza a través de conductos rectos específicamente diseñados para tal fin, garantizando un flujo estable y reproducible a través del medio filtrante. Además, los conductos de entrada y salida están instrumentalizados con sensores destinados a la monitorización de los principales parámetros de operación del sistema, incluyendo la velocidad de paso del gas, el caudal volumétrico y la temperatura. Esta instrumentación permite un control preciso de las condiciones de ensayo y facilita el análisis del comportamiento del filtro en función de las variables operativas establecidas.

Este reactor dispone de un sistema de limpieza del elemento filtrante mediante impulsos de aire comprimido a contracorriente (*pulse-jet*), diseñado para reproducir los ciclos de regeneración habituales en sistemas de filtración industrial.



Figura 1. Sistema de filtración de laboratorio - Reactor monomanga.

El elemento filtrante utilizado en el reactor presenta una forma cilíndrica, similar a las mangas comerciales. La manga cerámica se fija mediante un sistema de sujeción que garantiza su posicionamiento estable durante el paso de la corriente gaseosa y durante los ciclos de limpieza mediante el uso de aire comprimido a contracorriente (*pulse-jet*). El sistema de sujeción del elemento filtrante permite mantener el sellado necesario para separar la zona de entrada de la zona de salida de gases, asegurando la integridad del ensayo y evitando fugas que puedan perturbar la medición de parámetros críticos como la pérdida de carga y la eficiencia de filtración (Figura 2).



Figura 2. Sujeción de los elementos filtrantes cilíndricos.

En la Tabla 1 se recogen las características de funcionamiento del sistema de filtración de laboratorio.

Tabla 1. Variables consideradas en el reactor monomanga de laboratorio.

Variable	Intervalo
Caudal de gases (Nm ³ /h)	1 - 110
Velocidad de paso (m/min)	0,1 - 20
Temperatura (°C)	Ambiente

2.2. Sistema de filtración piloto - Reactor multimanga

El sistema de filtración piloto, o reactor multimanga, ha sido diseñado y construido específicamente en el marco del proyecto como sistema de filtración experimental destinado a la validación de los elementos filtrantes desarrollados en condiciones reales de uso (Figura 3).

En concreto, este reactor permite alojar, simultáneamente, hasta nueve mangas cerámicas y está equipado con resistencias internas que permiten llevar a cabo ensayos de filtración a altas temperaturas reproduciendo así condiciones próximas a las encontradas en emisiones industriales reales.

Sobre esta configuración experimental se puede evaluar, de manera reproducible y bajo condiciones de operación controladas, la respuesta de las mangas cerámicas frente a las variables de interés de este tipo de sistemas (eficiencia de filtración, pérdida de carga, temperatura de filtración y comportamiento frente a procesos de colmatación y limpieza). Este reactor también cuenta con un sistema de limpieza *pulse-jet* de las mangas mediante la inyección de aire comprimido a contracorriente.



Figura 3. Detalle del sistema de filtración piloto - Reactor multimanga.

Los elementos filtrantes con forma cilíndrica se disponen verticalmente y se sujetan, de forma alineada, sellada y estable, mediante un sistema de fijación durante el proceso de filtrado que se realiza en condiciones de ligera depresión. Dado que el número de mangas instaladas es variable, los orificios correspondientes a las posiciones no ocupadas se cierran de manera estanca para asegurar la uniformidad del flujo de gas a través de los filtros instalados (Figura 4).



Figura 4. Sujeción de los elementos filtrantes cilíndricos.

En la Tabla 2 se recogen las características de funcionamiento del sistema de filtración piloto.

Tabla 2. Variables consideradas en el sistema de filtración piloto - Reactor multimanga.

Variable	Intervalo
Caudal de gases (Nm ³ /h)	6 – 120
Velocidad de paso (m/min)	0,3 – 6,2
Temperatura (°C)	Ambiente – 600

3. Caracterización de los sistemas de filtración

Los materiales filtrantes fabricados durante el desarrollo del proyecto se han evaluado para su utilización en entornos de elevada temperatura. Para ello, se ha sometido el material a un conjunto de pruebas con la finalidad de conocer sus capacidades funcionales y de uso frente a variables tales como: resistencia mecánica, choque térmico y permeabilidad a la corriente de aire.

El estudio se ha complementado con la caracterización de la separación de partículas frente a la adherencia del mismo sobre el elemento filtrante y su capacidad de limpieza posterior, una vez colmatado el sistema. Para ello, se ha estudiado en detalle la diferencia de presión generada en el sistema de filtración con el fin de poder asociar el rendimiento de filtración al consumo energético del sistema.

El estudio de **permeabilidad a la corriente de aire** se ha realizado en los sistemas de filtración de laboratorio. Para ello, se ha monitorizado la diferencia de presión entre la cámara de entrada de aire, previa al elemento filtrante, y la cámara posterior. De manera simultánea, se han determinado los valores de temperatura y caudal de gas; que han permitido posteriormente determinar la

velocidad de paso del gas a través del elemento filtrante, que es el parámetro de diseño utilizado para caracterizar este tipo de proceso de filtración.

Por tanto, el estudio ha incluido la determinación del caudal de gases (Q (m^3/h)) que atraviesa el área filtrante expuesta (A (m^2)) y la pérdida de carga del sistema (ΔP (Pa)), que permite conocer la velocidad de paso del gas por el elemento filtrante, denominada velocidad de filtración (V_f (m/min)) calculada como el cociente del caudal y el área de filtración.

Las pruebas han tenido lugar sobre dos instalaciones diferenciadas. Por un lado, está el sistema de filtración de laboratorio - reactor monomanga -, donde se ha utilizado aire a temperatura ambiente para las pruebas realizadas. Por otra parte, el sistema de filtración piloto - reactor multimanga - permite configurar la temperatura de operación hasta $300\text{ }^\circ\text{C}$, adaptándose a las condiciones finales de uso previstas.

Además, se han llevado a cabo ensayos para evaluar la **capacidad de limpieza** de los filtros cerámicos. Estos ensayos consistieron en la exposición controlada de los elementos filtrantes a corrientes de gas con adición de material particulado en condiciones conocidas, monitorizando de manera continua la pérdida de carga hasta alcanzar el punto crítico de colmatación. Una vez alcanzado este estado, los filtros se sometieron a ciclos de limpieza mediante aire a contracorriente (*pulse-jet*), tras la limpieza se reanudaba la incorporación de partículas. Este procedimiento se repitió de forma cíclica para simular condiciones de operación, verificando que el filtro fuese capaz de recuperar de manera consistente la pérdida de carga inicial, lo que permite evaluar su capacidad de regeneración y durabilidad frente a múltiples ciclos de ensuciamiento y limpieza.

De igual modo, se ha determinado la **eficacia de filtración de material particulado** por parte de los elementos filtrantes de naturaleza cerámica. Para ello se ha comparado la emisión de material particulado antes y después de aplicar el sistema de separación.

Además de la eficacia de filtración, se ha determinado la distribución del tamaño de las partículas que atraviesan el filtro tanto en unidades de masa como en unidades de número de partículas y las características de la corriente de aire (velocidad, presión, temperatura, etc.).

Durante el ensayo de eficacia de filtración se ha comparado las características del polvo filtrado en dos momentos diferenciados. Por un lado, se ha estudiado el polvo que atraviesa el elemento cerámico cuando el filtro presenta una torta mínima, al inicio del ciclo de filtración, y, por otro, se ha estudiado el polvo que atraviesa el filtro cuando presenta una capa desarrollada de material retenido en la parte exterior del elemento filtrante. De este modo, es posible evaluar la influencia de la formación de la torta de filtración sobre la eficiencia de separación y sobre el nivel de emisiones de partículas alcanzado tras el proceso de filtrado.

El material particulado empleado en los ensayos ha consistido en una arcilla de fracción fina, seleccionada por ser representativa de las partículas habitualmente presentes en emisiones de procesos industriales cerámicos. Dicho material ha sido previamente caracterizado en la entrada del filtro utilizando el mismo sistema de monitorización de las emisiones de partículas (ELPI+).

Con el fin de poder comparar el comportamiento de diferentes elementos filtrantes, se ha establecido como parámetro de diseño la velocidad de paso del gas a través del filtro, conocida como velocidad de filtración. Esta variable depende tanto del caudal del gas como de la superficie de filtración de la manga cerámica y se establece en un valor de $1,5\text{ m/s}$.

Con el fin de caracterizar la microestructura de los elementos filtrantes y conocer su evolución tras ser sometido a las pruebas de uso descritas, se han realizado observaciones del material desarrollado con el microscopio electrónico de barrido (MEB). Estos resultados están descritos en el entregable “E1.1. Informe de los resultados de composición y caracterización de los materiales filtrantes diseñados”.

4. Resultados

4.1. Permeabilidad a la corriente de aire

Las mangas cerámicas desarrolladas en el marco de este proyecto han sido ensayadas para conocer el grado de permeabilidad a la corriente del aire que presentan en el sistema de filtración de laboratorio. En la Tabla 3 se identifica cada una de las mangas ensayadas y las principales diferencias que presentan según su composición o proceso de producción.

Tabla 3. Mangas cerámicas ensayadas para permeabilidad.

Nomenclatura ensayos	Nomenclatura según composición
ITC2	C11
ITC3	C12
ITC4	C12 v2
ITC5	C12 rec

El ensayo ha incluido la determinación del caudal de gases (Q (m^3/h)) que atraviesa el área filtrante expuesta ($A(m^2)$) y la pérdida de carga del sistema ($\Delta P(Pa)$), que permite conocer la velocidad de paso del gas por el elemento filtrante, denominada velocidad de filtración (V_f (m/min)) calculada como el cociente del caudal y el área de filtración. Al representar la pérdida de carga frente a la velocidad de filtración se puede comparar diferentes elementos filtrantes entre sí.

En la Figura 5 se muestra la variación de la pérdida de carga en función de la velocidad de filtración para las mangas cerámicas desarrolladas en el proyecto junto con una manga cerámica comercial caracterizada (MC) utilizada como referencia.

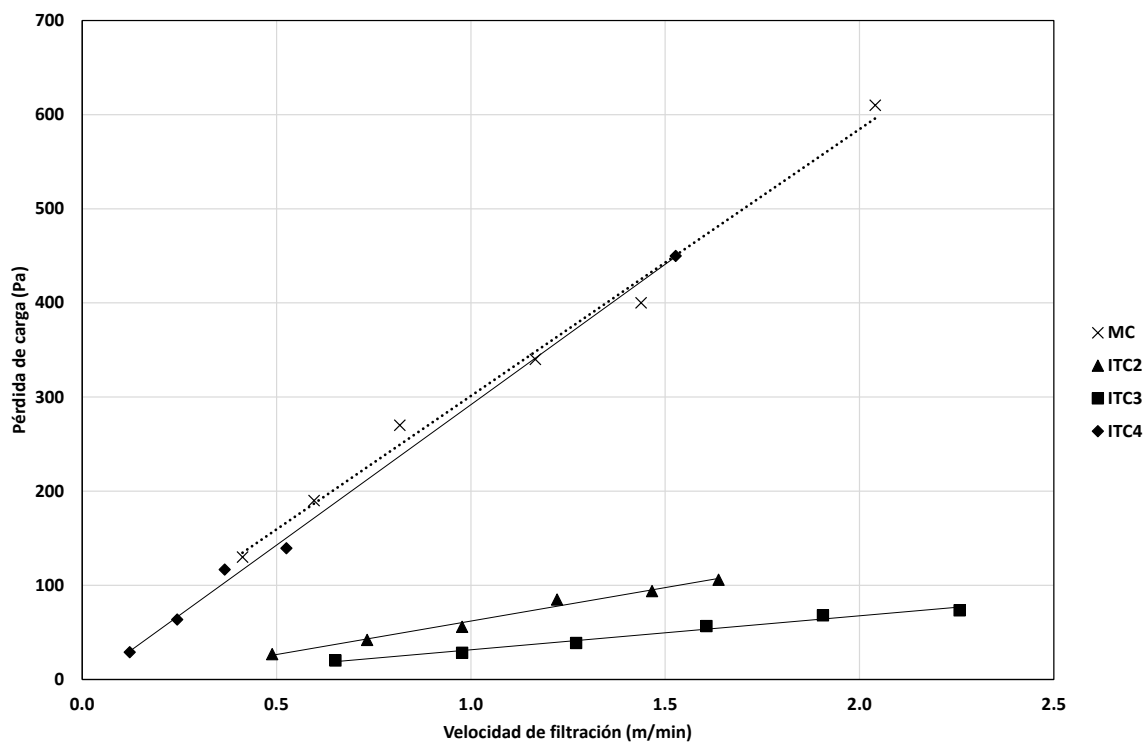


Figura 5. Comparación entre la pérdida de carga con la velocidad de filtración para las mangas cerámicas

Los resultados obtenidos en este ensayo muestran que los materiales cerámicos desarrollados, ITC2, ITC3 e ITC4 presentan una eficacia adecuada y en algunos casos mejoran los valores obtenidos por la manga comercial utilizada de benchmark.

La manga ITC5, correspondiente a un elemento filtrante con recubrimiento cerámico aplicado por pulverización, no se ha representado en la figura anterior debido a que muestra valores de pérdida de carga significativamente superiores al resto de mangas ensayadas. Esta diferencia se atribuye principalmente a la presencia de la capa superficial añadida, que reduce de forma notable la permeabilidad del material.

A partir de los resultados obtenidos en este ensayo, se seleccionó la manga de composición ITC4 para la realización de los ensayos de eficacia de filtración y capacidad de limpieza. Esta elección se fundamenta en que dicha manga presenta un comportamiento operativo más equilibrado, con valores de pérdida de carga y permeabilidad comparables a los de la manga comercial empleada como referencia. Las principales características de esta composición se muestran en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Características del elemento filtrante utilizado en el ensayo de filtración.

Características	ITC4
Densidad aparente (g/cm ³)	1,598
Porosidad abierta (%)	34,5
Tª Máxima (°C)	1170

En la Figura 6 se muestran una imagen de la manga cerámica ITC4 desarrollada durante el proyecto CERAMIX AIRA.



Figura 6. Imagen de la manga cerámica ITC4.

4.2. Resistencia mecánica y choque térmico

4.2.1. Determinación de la resistencia mecánica

La metodología y resultados asociados a los ensayos sobre la resistencia mecánica de los elementos filtrantes confeccionados en el marco del proyecto se recogen en el entregable “E1.1. Informe de los resultados de composición y caracterización de los materiales filtrantes diseñados”.

En la Tabla 5 se recogen los resultados sobre resistencia mecánica para las mangas cerámicas ensayadas.

Tabla 5. Resistencia mecánica a la compresión anula.

Ensayo	ITC 2 (C11)	ITC 3 (C12)	ITC 4 (C12 v2)	ITC 5 (C12 rec)
Resistencia mecánica compresión diametral de anillo (MPa)	0,73	0,77	0,77	0,77

La resistencia mecánica de todas las mangas se mantiene dentro del mismo orden de magnitud, sin diferencias significativas entre composiciones.

4.2.1. Determinación de la resistencia al choque térmico

4.2.1.1. Determinación de la resistencia al choque térmico.

Este ensayo se ha realizado basándose en el método descrito en la norma UNE-EN ISO 10545-9: 2013 "Baldosas Cerámicas - Parte 9: Determinación de la resistencia al choque térmico".

El ensayo consiste en introducir la muestra en una mufla a $400\pm5^{\circ}\text{C}$ hasta que alcance una temperatura uniforme un tiempo mínimo de 30 minutos. Una vez transcurrida esta etapa se saca la probeta de la mufla a una temperatura ambiente de $25\pm5^{\circ}\text{C}$ durante mínimo 15 minutos o una temperatura inferior a $50\pm5^{\circ}\text{C}$. Este proceso se repite 10 veces.

Además, cada probeta se examinó visualmente, advirtiéndose que permanecían intactas sin observarse grietas o fisuras internas ni externas (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados del ensayo sobre resistencia al choque térmico de las mangas cerámicas.

Ensayo	ITC 2 (C11)	ITC 3 (C12)	ITC 4 (C12 v2)	ITC 5 (C12 rec)
Resistencia al choque térmico	Sin observaciones destacables	Sin observaciones destacables	Sin observaciones destacables	Sin observaciones destacables

4.2.1.2. Análisis dilatómetro de una probeta cocida

Este ensayo se ha realizado sobre la composición ITC2 (C11) una vez cocida en forma de manga. De la misma se ha extraído una probeta de forma prismática de dimensiones aproximadas 30mm x 5mm x 5mm, la cual se secó en una estufa de laboratorio a 110°C, durante un mínimo de dos horas. Finalmente, se lijaron sus extremos hasta obtener caras planas y paralelas.

El equipo utilizado para la determinación fue un dilatómetro absoluto Netzsch, modelo 402-Expedis, calibrado con un patrón de zafiro. El ciclo térmico utilizado ha sido calentamiento a 5°C/min hasta la temperatura de 800°C. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7. Valores de dilatación y coeficientes de dilatación de la muestra ensayada.

Temperatura (°C)	Dilatación ($\Delta l/l_0(\%)$)	Coefficiente de dilatación $\alpha_{50-T}(\times 10^7 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
100	0,4	48
200	1,1	60
300	1,7	60
400	2,4	61
500	3,0	63
550	3,4	64
600	3,8	66
650	4,1	65
700	4,4	64
750	4,8	65
800	5,1	66

Tabla 8. Evolución de la dilatación en la muestra ensayada.

Coefficiente de dilatación	Valor ($^\circ\text{C}^{-1}$)
α_{50-300}	$60 \cdot 10^{-7}$
τ_{50-300}	$180 \cdot 10^{-7}$
$\alpha_{300-500}$	$66 \cdot 10^{-7}$
$\tau_{300-500}$	$198 \cdot 10^{-7}$
$\alpha_{500-650}$	$73 \cdot 10^{-7}$
$\tau_{500-650}$	$219 \cdot 10^{-7}$

Seguidamente, en la Figura 7 se ha representado en forma gráfica los resultados obtenidos.

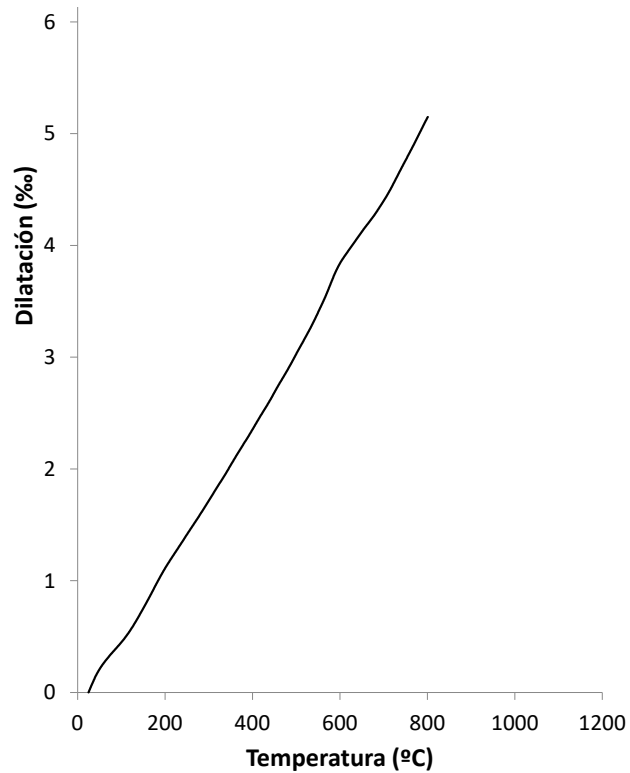


Figura 7. Análisis dilatométrico de la manga ITC2

El ensayo dilatométrico de la manga ITC2 (composición C11) muestra un comportamiento lineal y estable hasta 800 °C, sin evidencias de transformaciones de fase ni anomalías estructurales. Estos resultados avalan a utilización de esta composición en ambientes de trabajo de elevada temperatura.

4.3. Reactor monomanga – Filtración a temperatura ambiente

4.3.1. Eficacia de eliminación de partículas

Se ha determinado la eficacia de eliminación de partículas mediante la determinación de la emisión de partículas a la salida del sistema de filtración. Los resultados de emisión se han representado junto a la variación de la pérdida de carga del sistema. En concreto, en la Figura 8, se muestra la concentración de partículas en número, lo que permite analizar la relación entre el estado de colmatación del filtro y la emisión de partículas finas. Por su parte, en la Figura 9, se representa la emisión expresada en masa.

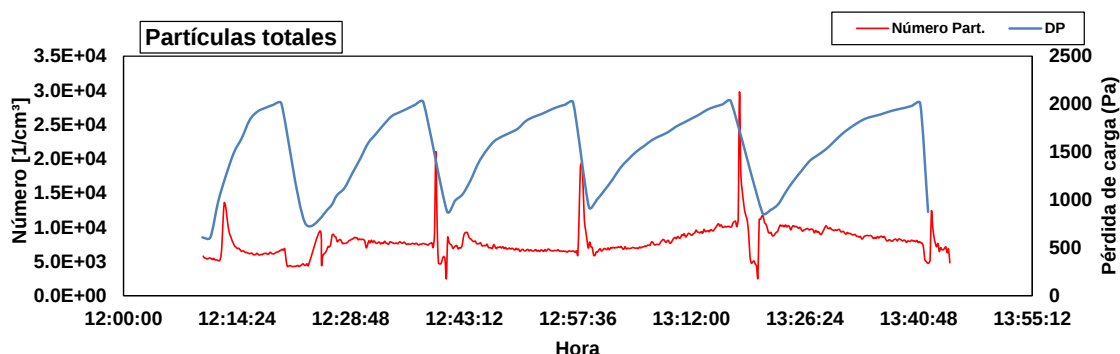


Figura 8. Evolución de la pérdida de carga durante los ciclos de ensuciamiento y limpieza y monitorización de la concentración de partículas en número a la salida del sistema de filtración.

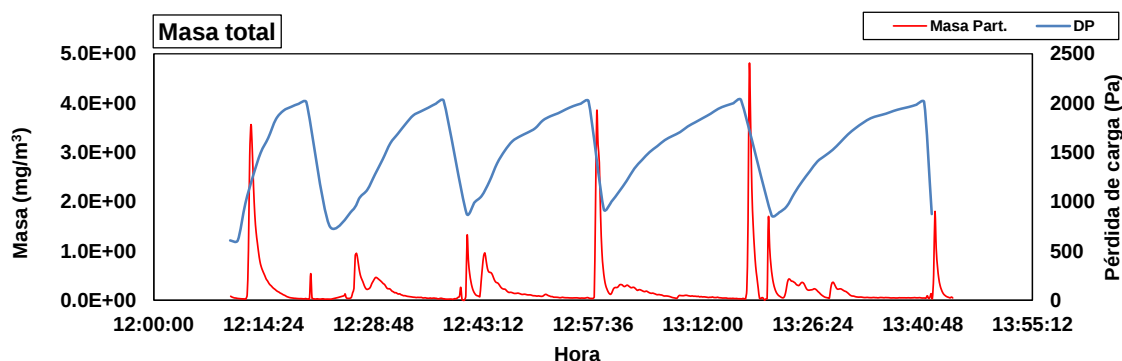


Figura 9. Evolución de la pérdida de carga durante los ciclos de ensuciamiento y limpieza y monitorización de la concentración de partículas en masa a la salida del sistema de filtración.

El comportamiento de la emisión medida en número y en masa presentan un comportamiento similar con un valor promedio estable. En las figuras también se observa la presencia de señales de emisión puntuales elevadas que aparecen durante el proceso de limpieza de la manga que obliga al equipo de monitorización a medir concentración ambiental momentáneamente para proteger al mismo del golpe de aire a contracorriente a elevada presión del pulse-jet. Por tanto, los picos de emisión observados en estas fases corresponden a una condición transitoria asociada al procedimiento de limpieza y a la configuración del sistema de medida, y no reflejan el comportamiento del filtro durante la operación normal de filtración.

Los datos de emisión adquiridos por el sistema ELPI se han estudiado en detalle con el fin de conocer la eficacia de filtración del elemento filtrante en función de la distribución del tamaño de partícula del material sólido alimentado al sistema de filtración. En la Figura 10 se ha representado la concentración de partículas, expresada en número y en masa, en función del tamaño de partícula en tres situaciones diferenciadas:

- Material particulado sin filtrar

- Material particulado filtrado al inicio del del ciclo, tras una operación de limpieza del elemento filtrante que, por tanto, no presenta torta de material sólido adherida.
- Material particulado filtrado al final del del ciclo, previo a la operación de limpieza del elemento filtrante que, por tanto, presenta torta de material sólido adherida.

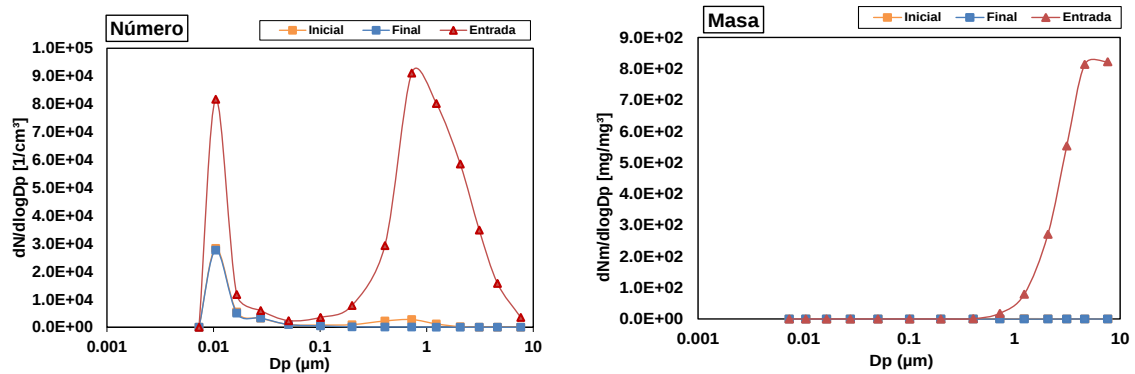


Figura 10. Concentración en número y masa en función del tamaño de partícula en la entrada y salida del reactor monomanga.

En la figura de la izquierda, se observa que el material particulado sin filtrar (entrada) presenta una concentración variable de partículas en función del tamaño, predominando las partículas de tamaño 0,01 μm y 1 μm . Cuando la corriente de gases atraviesa el elemento filtrante, la concentración de partículas disminuye, como cabe esperar, en todo el rango de tamaños estudiado, siendo más acusado el efecto en las partículas de mayor diámetro.

En cuanto al momento del ciclo de limpieza del elemento filtrante definido por la presencia o ausencia de torta, se aprecian diferencias en los niveles de emisión en la fracción granulométrica cercana a 1 μm , lo que pone de manifiesto la influencia de la formación de la torta de filtración sobre la eficiencia de retención de las partículas más finas.

Por su parte, en la representación en masa, a la derecha de la Figura 10, donde el peso de las partículas de mayor tamaño predomina, no se observan diferencias significativas de comportamiento del material filtrado en función del momento del ciclo de limpieza dado que el elemento filtrante es muy eficaz en la eliminación de partículas de mayor tamaño y masa.

A continuación, en la Figura 11, se ha representado la concentración acumulada de partículas tanto en unidades de número como de masa. La emisión acumulada en número muestra que la distribución de tamaño de partícula se modifica por el proceso de filtración aumentando de forma significativa la fracción fina de las partículas que atraviesan el filtro, siendo más evidente este cambio cuando se ha generado torta sobre la manga cerámica.

La distribución del tamaño de partícula en masa muestra el predominio de las partículas de mayor tamaño. El proceso de filtrado presenta un comportamiento diferenciado en función del momento del ciclo de filtración, así, al inicio del ciclo, sin torta en la manga, se retienen partículas más finas que con la presencia de la torta al final del ciclo.

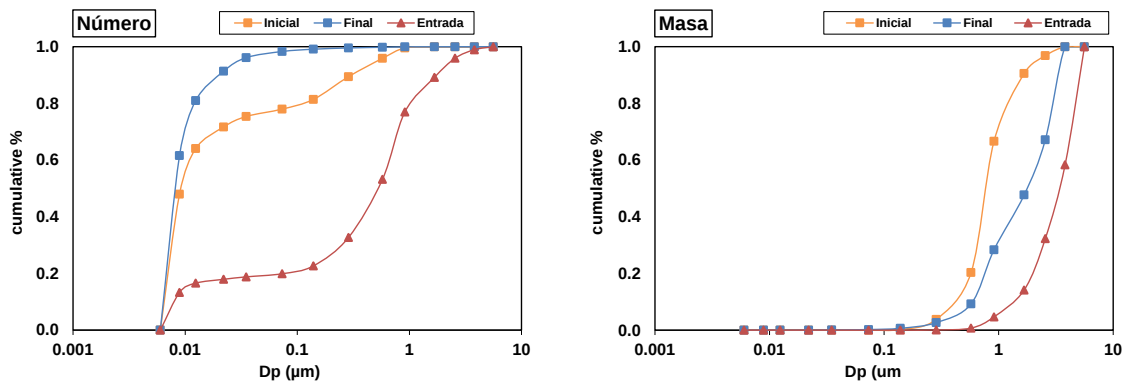


Figura 11. Emisión acumulada, en número y en masa, en función del tamaño de partícula.

En la Figura 12 se ha representado la eficacia de eliminación de partículas del sistema de filtración en función del tamaño de partícula, expresada tanto en concentración numérica como másica. Se han considerado los dos momentos representativos del ciclo de filtración, el inicio y el final del ensayo con el fin de conocer la influencia del estado de colmatación del filtro sobre la capacidad de retención de partículas. La eficacia de la filtración en unidades de número alcanza valores cercanos al 100% para tamaños de partícula superior a 3 μm al inicio del ciclo y de 0.3 μm al final de este, poniendo de manifiesto la importancia de la formación de la torta de material sólido sobre la manga y la mejora general del rendimiento al final del ciclo de filtración.

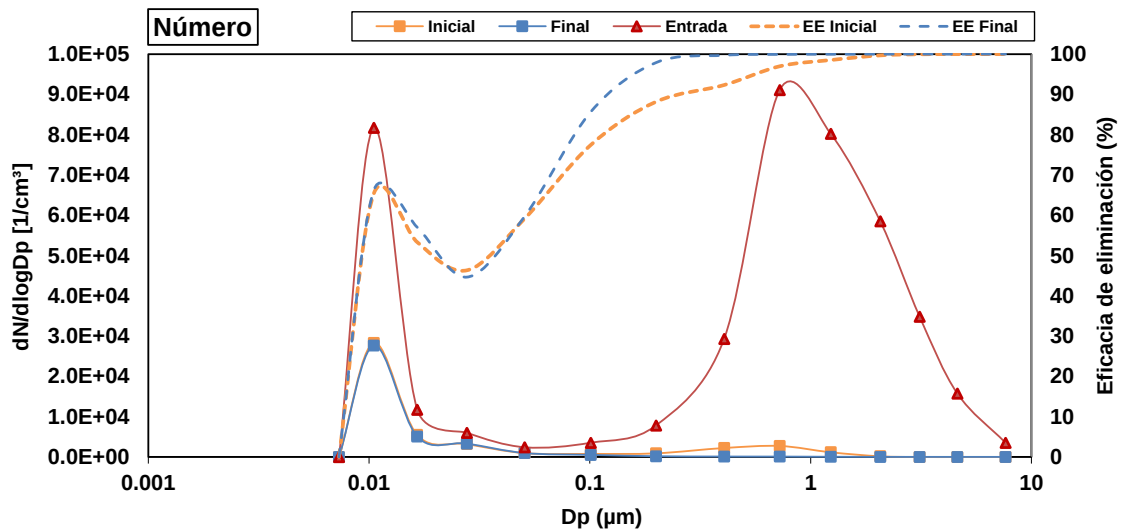


Figura 12. Eficacia de eliminación de partículas en función del tamaño de partícula al inicio y al final del ciclo de filtración.

4.3.2. Eficacia de eliminación de fracciones granulométricas legisladas en calidad de aire

Como último paso, se ha analizado la eficacia de eliminación de partículas del elemento filtrante ITC4 considerando aquellas fracciones granulométricas que presentan especial interés por estar legisladas en calidad de aire, es decir, las partículas de tamaño 10 μ m, 2.5 μ m y 1 μ m. El análisis se ha realizado considerando la concentración en número, Tabla 9, y en masa, Tabla 10.

Tabla 9. Eficiencia de eliminación de la manga ITC4 en función del tamaño de partícula (número).

Tamaño (μ m)	10	2.5	1
Entrada (1/cm ³)	88742	79126	47209
Salida – Inicio Ensayo (1/cm ³)	8495	8491	8146
Salida – Final Ensayo (1/cm ³)	6468	6467	6456
Eficiencia de eliminación - Inicio Ensayo (%)	90.43	89.27	82.74
Eficiencia de eliminación - Final Ensayo (%)	99.87	99.20	96.59

Tabla 10. Eficiencia de eliminación de la manga ITC4 en función del tamaño de partícula (masa).

Tamaño (μ m)	10	2.5	1
Entrada (mg/Nm ³)	527.1	74.7	3.9
Salida – Inicio Ensayo (mg/Nm ³)	0.661	0.599	0.135
Salida – Final Ensayo (mg/Nm ³)	0.049	0.023	0.005
Eficiencia de eliminación - Inicio Ensayo (%)	92.71	91.83	86.33
Eficiencia de eliminación - Final Ensayo (%)	99.99	99.97	99.88

Los resultados muestran que la eficacia de eliminación de partículas aumenta con el avance del ciclo de filtración para las fracciones granulométricas de interés. Este comportamiento se observa tanto en términos de concentración numérica como de concentración másica, y es especialmente acusado en las fracciones más finas.

El comportamiento de la eficacia de filtración en el rango de partículas legisladas (>1 μ m) difiere del encontrado en las partículas de menor tamaño. Desde este punto de vista, la aplicación de elementos filtrantes de naturaleza cerámica permite modular el comportamiento del proceso de filtrado en función de las necesidades de filtración y de las características del material particulado emitido.

4.3.3. Eficiencia de eliminación en relación a la saturación del filtro

El funcionamiento de un sistema de filtración con elementos filtrantes de naturaleza cerámica presenta un punto de equilibrio entre la eficiencia de captura de polvo, que mejora con la presencia de torta, y el consumo energético del ventilador utilizado para la movimentación de la corriente de gases, que depende de la presión diferencial del sistema asociada también a la torta.

Para conocer el punto de equilibrio, se ha determinado la eficacia de filtración, en número y en masa, en función de la pérdida de carga del sistema y se ha representado en la Figura 13.

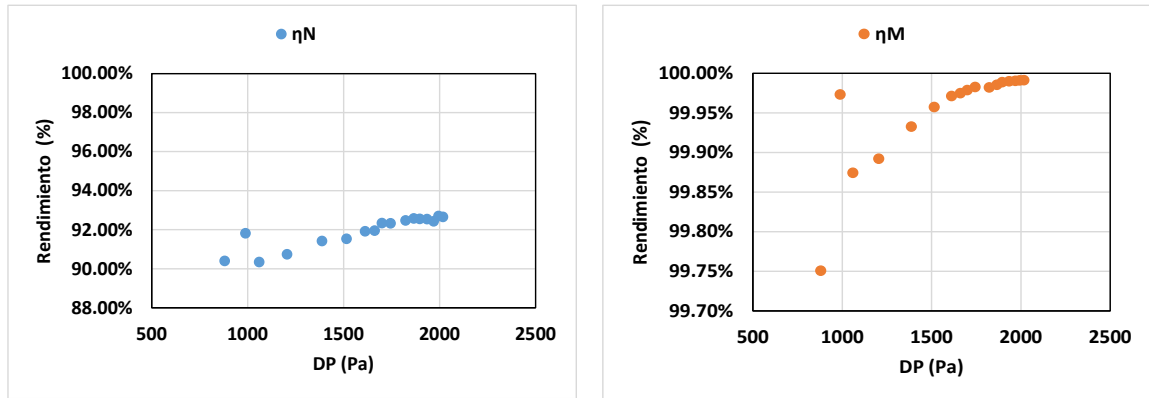


Figura 13. Eficacia de eliminación de partículas en número y masa en función de la pérdida de carga del filtro

Los resultados experimentales muestran que la eficiencia numérica global del filtro (η_n) aumenta progresivamente con la pérdida de carga en las etapas iniciales del ciclo de filtración, como consecuencia del crecimiento de la torta de polvo. Como se ha visto anteriormente, el aumento de ΔP conlleva una mejora efectiva de la capacidad de retención de partículas finas. No obstante, a partir de valores de pérdida de carga del orden de 1600 Pa, se generan mejoras marginales de la eficiencia de filtración.

El comportamiento de la eficacia de filtración medida en masa es elevada y cercana al 99,9% en todo el intervalo de pérdida de carga analizado. En valores de 1600 Pa, la eficacia es superior a 99.98% y presenta un comportamiento constante sin mejora aparente por el aumento de ΔP .

A la vista de los resultados, se puede definir el valor crítico operativo de pérdida de carga de 1800Pa, a partir del cual se puede iniciar la fase de limpieza de los elementos filtrantes.

4.3.4. Capacidad de limpieza

En la Figura 14 se ha representado la evolución de la pérdida de carga (ΔP) en función del tiempo, obtenida durante una serie de ensayos cíclicos de carga de mangas con material particulado (ensuciamiento) y su posterior limpieza. El elemento filtrante utilizado en esta serie de pruebas ha sido el ITC 4. El trabajo se realizó bajo condiciones controladas de dosificación de material particulado y de velocidad de filtración.

Se realizaron un total de cinco ciclos de operación con una duración individual que se sitúa en el intervalo de 10 a 20 minutos. Cada ciclo corresponde a fases sucesivas de acumulación de material particulado en el exterior de la manga y la regeneración posterior llevada a cabo mediante limpieza por aire a contracorriente (*pulse-jet*).

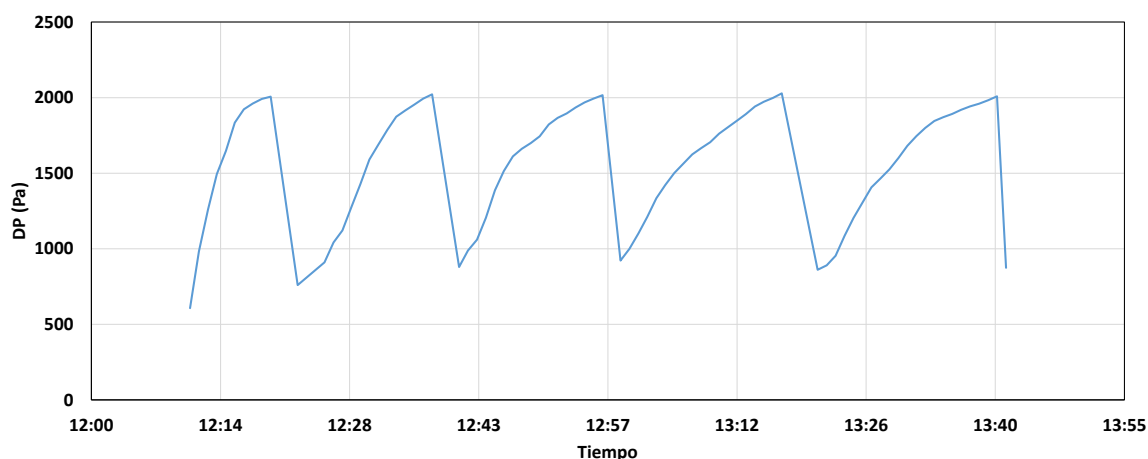


Figura 14. Comportamiento de la pérdida de carga frente al tiempo durante ciclos de ensuciamiento y limpieza de la manga cerámica.

En la figura se observa que cada uno de los ciclos implica un periodo de incremento de la pérdida de carga como consecuencia de la acumulación de material particulado y del desarrollo de la torta de filtración sobre la superficie de la manga. Cuando la pérdida de carga alcanza un máximo, fijado en un valor de 2000 Pa, se lleva a cabo la limpieza del elemento filtrante con aire a contracorriente. La limpieza permite desprender la torta de filtración y recuperar los valores de pérdida de carga iniciales.

La capacidad de limpieza se determina mediante el estudio de los ciclos de acumulación – limpieza, comprobando la recuperación de la pérdida de carga inicial tras cada ciclo.

En la figura se observa que el valor inicial de pérdida de carga del primer ciclo es inferior al resto de ciclos dado que la manga se instala limpia y sin presencia de torta de filtración. Tras los primeros ciclos, el valor mínimo de ΔP tras la limpieza tiende a estabilizarse, lo que indica que el sistema alcanza un comportamiento estacionario de operación asociado al establecimiento de una torta residual sobre el elemento filtrante que es una característica del funcionamiento habitual de los filtros de mangas.

La capacidad del elemento filtrante para recuperar valores de ΔP próximos a los iniciales en cada ciclo confirma la eficacia del proceso de limpieza y regeneración del elemento filtrante en sucesivos ciclos de ensuciamiento y limpieza.

4.4. Reactor multimanga – Filtración a alta temperatura

En los ensayos realizados en el reactor multimanga también se ha utilizado la manga de composición ITC4. En concreto, se introdujeron siete mangas cerámicas en el reactor. En este caso se ha determinado la eficacia de filtración utilizando una corriente de gas a alta temperatura (300°C).

4.4.1. Eficacia de eliminación de partículas

Siguiendo la metodología descrita previamente para los ensayos en el reactor monomanga, se ha determinado la eficacia de eliminación de partículas en el reactor multimanga. Para ello, se ha representado la concentración de partículas a la salida del sistema de filtración junto con la evolución de la pérdida de carga del sistema que está relacionada con la colmatación del filtro.

En la Figura 8, se presenta la concentración de partículas expresada en número, lo que permite analizar la relación entre el desarrollo de la torta de filtración y la emisión de partículas finas. Por su parte, en la Figura 9, se muestran los resultados de emisión en términos de concentración másica.

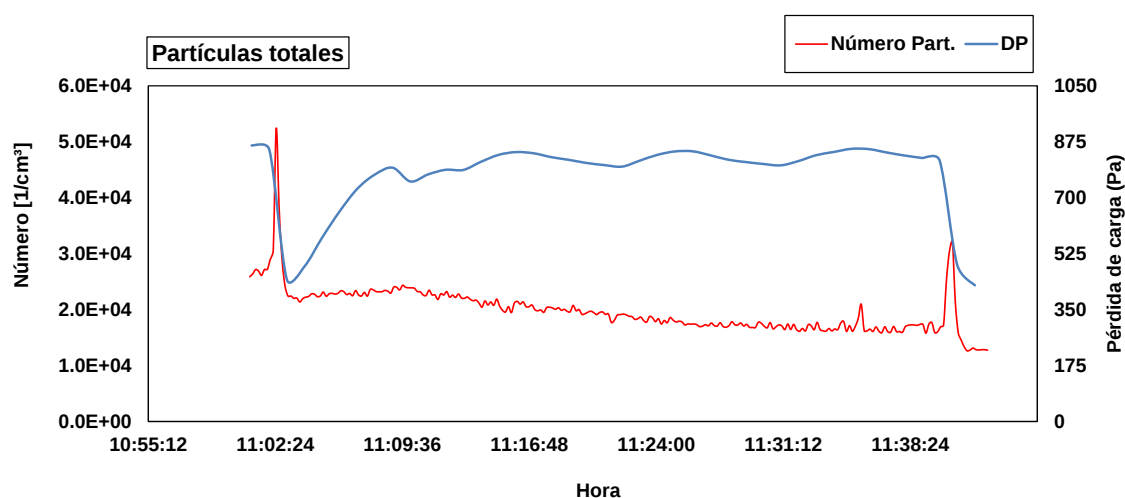


Figura 15. Evolución de la pérdida de carga durante un ciclo de ensuciamiento y limpieza y monitorización de la concentración de partículas en número a la salida del sistema de filtración multimanga.

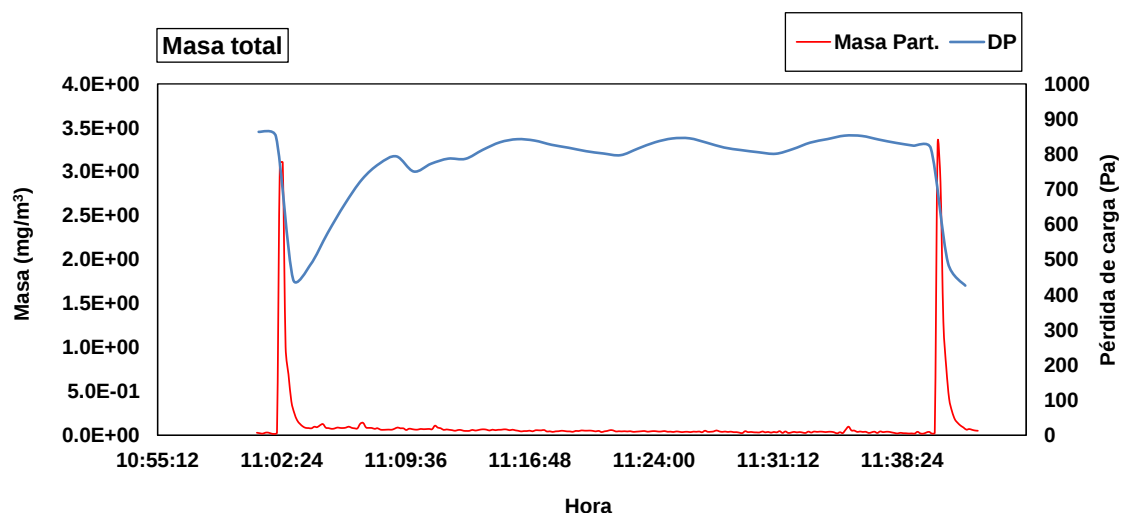


Figura 16. Evolución de la pérdida de carga durante un ciclo de ensuciamiento y limpieza y monitorización de la concentración de partículas en masa la salida del sistema de filtración multimanga.

El comportamiento de la emisión medida, tanto en número como en masa, es coherente con el observado en los ensayos realizados previamente en el reactor monomanga. En ambos casos se observa una emisión decreciente debida al desarrollo de la torta de filtración sobre la superficie de las mangas. Durante las operaciones de limpieza se observan incrementos puntuales en los niveles de emisión; sin embargo, estos valores elevados no modifican la concentración media del periodo evaluado.

A continuación, se ha estudiado la eficacia de filtración en el reactor multimanga. En la Figura 17 se representa la concentración de partículas, expresada tanto en número como en masa, en función del tamaño de partícula para tres situaciones representativas del ciclo de operación: material particulado sin filtrar, material filtrado al inicio del ciclo tras la limpieza del filtro (superficie sin torta desarrollada) y material filtrado al final del ciclo, previo a la limpieza, con la torta de filtración completamente desarrollada.

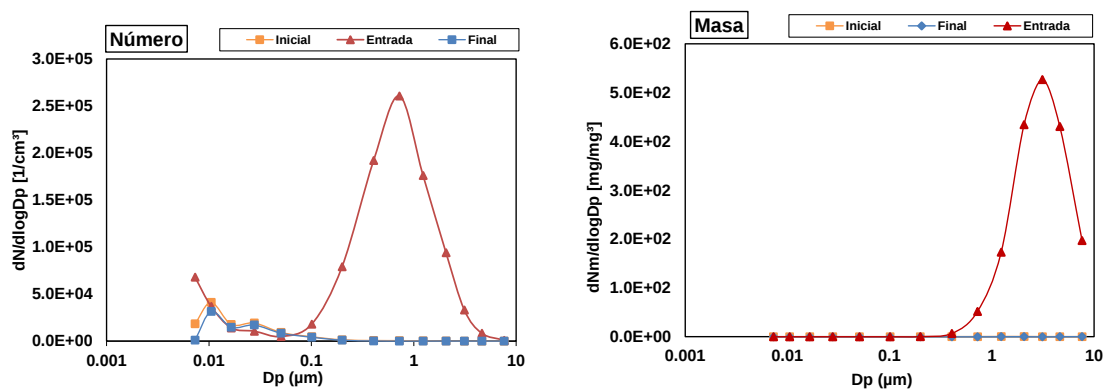


Figura 17. Concentración en número y masa en función del tamaño de partícula en la entrada y salida del reactor multimanga.

El comportamiento del reactor multimanga es similar al ofrecido por el reactor monomanga, es decir, una alta eficacia de filtración para las partículas más gruesas (a partir de 0,1 μm). En este caso se observan diferencias debidas al material de entrada, que presenta una mayor concentración de partículas de diámetro alrededor de 1 μm. La influencia de la torta de material sobre la eficacia de filtración es similar a la observada en el reactor monomanga.

La concentración acumulada, Figura 18, permite distinguir la influencia de la filtración sobre la distribución de tamaño de partícula, incrementando de forma relativa la fracción fina de las partículas que atraviesan el filtro. La emisión acumulada en masa presenta un comportamiento diferenciado entre los dos momentos de limpieza considerados, observándose que la emisión previa a la limpieza presenta una mayor influencia de las partículas de mayor tamaño.

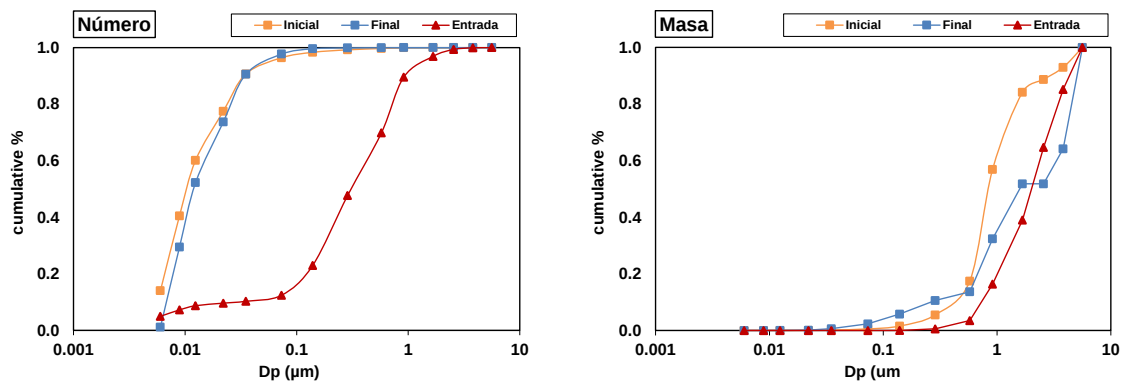


Figura 18. Emisión acumulada, en número y en masa, en función del tamaño de partícula.

En la Figura 26 se ha representado la eficacia de eliminación de partículas del sistema de filtración en función del tamaño de partícula. Los resultados muestran que la eficacia es prácticamente del 100 para todo el intervalo de tamaños de partícula, excepto en el intervalo $[0,01 - 0,1] \mu\text{m}$, donde, la granulometría del material alimentado presenta menor concentración que se traduce en valores negativos de la eficacia de filtración.

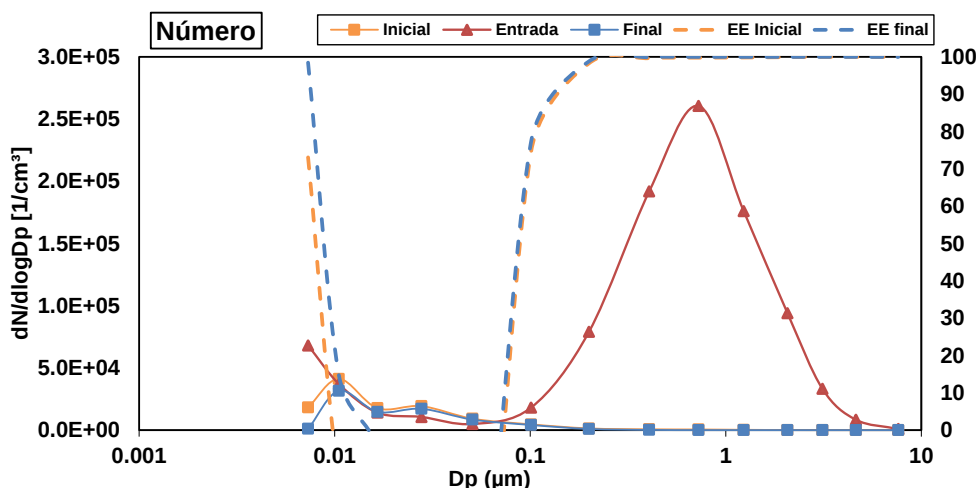


Figura 19. Eficacia de eliminación de partículas en función del tamaño de partícula al inicio y al final del ciclo de filtración en el reactor multimanga.

4.4.2. Eficacia de eliminación de fracciones granulométricas legisladas en calidad de aire

En cuanto a los tamaños de partícula legislados, incluidos en la Tabla 11 y Tabla 12, se observa que la eficacia de eliminación aumenta con el avance del ciclo de filtración y la formación de la torta para todas las fracciones granulométricas analizadas tanto en número como en masa.

Tabla 11. Eficiencia de eliminación de la manga ITC4 en función del tamaño de partícula (número) en el reactor multimanga.

Tamaño (μm)	10	2.5	1
Entrada ($1/\text{cm}^3$)	235280	227920	164230
Salida – Inicio Ensayo ($1/\text{cm}^3$)	22352	22351	22271
Salida – Final Ensayo ($1/\text{cm}^3$)	16045	16045	16037
Eficiencia de eliminación - Inicio Ensayo (%)	90.50	90.19	86.44
Eficiencia de eliminación - Final Ensayo (%)	93.18	92.96	90.24

Tabla 12. Eficiencia de eliminación de la manga ITC4 en función del tamaño de partícula (masa) en el reactor multimanga.

Tamaño (μm)	10	2.5	1
Entrada (mg/Nm^3)	354.5	138.3	12.5
Salida – Inicio Ensayo (mg/Nm^3)	0.174	0.146	0.030
Salida – Final Ensayo (mg/Nm^3)	0.036	0.019	0.005
Eficiencia de eliminación - Inicio Ensayo (%)	99.95	99.89	99.76
Eficiencia de eliminación - Final Ensayo (%)	99.99	99.99	99.96

4.4.3. Eficacia de eliminación en relación a la saturación del filtro

El comportamiento del reactor multimanga presenta un funcionamiento diferenciado respecto al reactor monomanga en cuanto al punto de equilibrio entre la eficiencia de captura de polvo y el consumo energético del ventilador del sistema. En la Figura 20 se observa que la eficacia de filtración en número, mayoritariamente fracciones muy finas, es constante hasta alcanzar valores situados alrededor de los 800 Pa donde la eficacia alcanza su máximo. En masa y, por tanto, fracciones más gruesas, el máximo de eficacia también tiene lugar a 800 Pa aunque su punto de partida es superior.

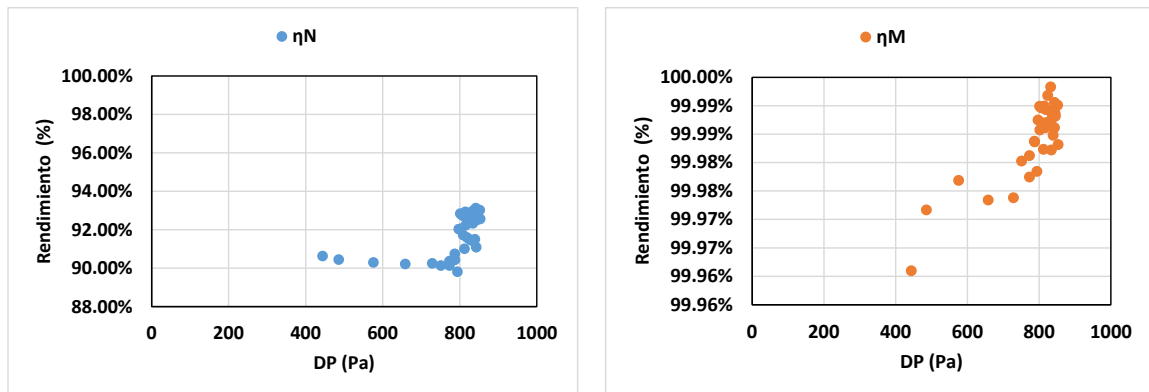


Figura 20. Eficacia de eliminación de partículas en número y masa en función de la pérdida de carga del filtro

4.4.4. Capacidad de limpieza

El estudio de la capacidad de limpieza del reactor multimanga ha consistido en el seguimiento del de la pérdida de carga durante varios ciclos de ensuciamiento y limpieza. El elemento filtrante utilizado en esta serie de pruebas también ha sido el ITC 4. El trabajo se realizó bajo condiciones controladas de dosificación de material particulado y de velocidad de filtración. El resultado de la monitorización de la pérdida de carga se muestra en la Figura 28. En la misma, se han representado un total de tres ciclos de operación con una duración individual que se sitúa en el intervalo de 30 a 40 minutos.

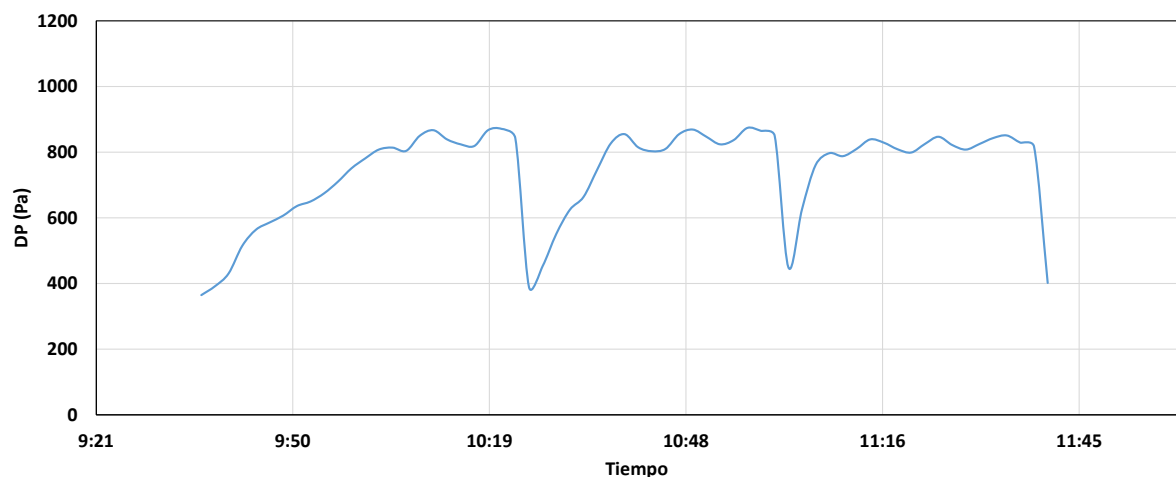


Figura 21. Comportamiento de la pérdida de carga frente al tiempo durante ciclos de ensuciamiento y limpieza de la manga cerámica en el reactor multimanga.

En este ensayo, se pretende conocer el comportamiento del filtro tras sucesivos periodos de limpieza. Para ello, se hace un seguimiento de la pérdida de carga mínima de cada ciclo. Este valor mínimo tiene lugar tras el proceso de limpieza. La evolución de la pérdida de carga mínima es

aparentemente constante, lo que significa que el comportamiento de la manga no empeora con el paso del tiempo, al menos en el periodo estudiado.

En cada ciclo, se observa un periodo de la estabilización de la pérdida de carga, sobre 850 Pa, que podría permitir alargar los periodos de limpieza asociado a la configuración del reactor multimanga que presenta un comportamiento diferenciado al reactor monomanga. Con el fin de evaluar el comportamiento del reactor multimanga, se ha intentado colmatar los elementos filtrantes en un ensayo de larga duración sin procesos de limpieza.

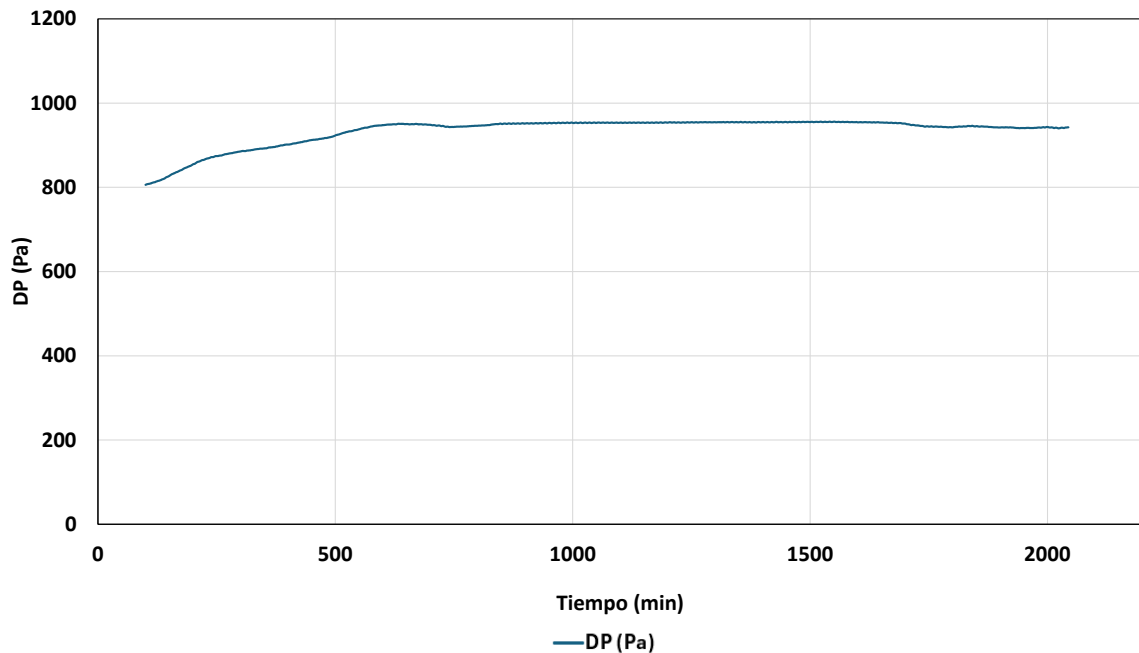


Figura 22. Comportamiento de la pérdida de carga frente al tiempo durante el ensayo de ensuciamiento de larga duración en el reactor multimanga.

En la Figura 22, se ha representado la evolución de la pérdida de carga a lo largo del ensayo de ensuciamiento de 2050 minutos (aproximadamente 34 horas) donde se observa que la pérdida de carga presenta del sistema se mantiene en un régimen estacionario de filtración y no se registran aumentos significativos de la pérdida de carga en el sistema.

4.5. Interpretación de los resultados

En la Tabla 13 se presenta la comparativa de los principales resultados obtenidos en los ensayos realizados tanto en el sistema de filtración de laboratorio (reactor monomanga) como en el sistema de filtración piloto (reactor multimanga).

Tabla 13. Comparativa resultados obtenidos en los ensayos realizados en el reactor monomanga de laboratorio y el reactor multimanga piloto.

Parámetro	Reactor monomanga	Reactor multimanga
Temperatura (°C)	17	300
Pérdida de carga máxima (Pa)	2050	970
Caudal aire tratado (Nm³/h)	6,3	29,1
Velocidad de filtración (m/min)	1,5	1,3
Ciclo de limpieza (min)	10-20	30-40
Emisión de másica de partículas PM ₁₀ (mg/Nm³)	0,05	0,04
Emisión de másica de partículas PM _{2.5} (mg/Nm³)	0,02	0,02
Emisión de másica de partículas PM ₁ (mg/Nm³)	0,005	0,005
Eficiencia de eliminación másica PM ₁₀ (%)	99,99	99,99
Eficiencia de eliminación másica PM _{2.5} (%)	99,97	99,99
Eficiencia de eliminación másica PM ₁ (%)	99,88	99,96
Emisión de numérica de partículas PM ₁₀ (1/cm³)	6468	16045
Emisión de numérica de partículas PM _{2.5} (1/cm³)	6467	16045
Emisión de numérica de partículas PM ₁ (1/cm³)	6456	16037
Eficiencia de eliminación numérica PM ₁₀ (%)	99,87	93,18
Eficiencia de eliminación numérica PM _{2.5} (%)	99,20	92,96
Eficiencia de eliminación numérica PM ₁ (%)	96,59	90,24

La comparación del uso de una manga o múltiples mangas presenta las siguientes características:

- La emisión en unidades de masa presenta valores similares en ambos sistemas en todas las fracciones granulométricas analizadas. De igual forma, las eficiencias de filtración son equivalentes.
- La emisión absoluta en número es muy diferente entre ambos sistemas lo que también se refleja en las eficiencias de filtración. No obstante, las diferencias no son significativas en términos de número de partículas si se comparan con valores habituales en calidad de aire.

5. Aplicación de sistemas de filtración con mangas cerámicas

En este apartado se discute cuales son los elementos a considerar en el uso de esta tecnología de filtración junto con un posible uso industrial aplicado a hornos de coacción de baldosas cerámicas. El objetivo es profundizar en su aplicación práctica.

5.1. Balance técnico-económico de un sistema de filtración

A continuación, se plantean las bases de un balance técnico-económico con el objetivo de evaluar la idoneidad de uso dentro de un contexto industrial real, integrando criterios operativos, económicos y relacionados con la sostenibilidad.

Desde el punto de vista técnico, la utilización de mangas cerámicas permite un comportamiento más estable del medio filtrante a lo largo del tiempo, con menor variabilidad operativa, especialmente en condiciones térmicas exigentes. La estabilidad estructural del material cerámico reduce la degradación progresiva asociada a temperatura, abrasión o determinados agentes químicos que pueden sufrir mangas confeccionadas con otros materiales. No obstante, la implementación industrial exige prestar especial atención al diseño del sistema de limpieza, dado que la naturaleza rígida del material requiere un control adecuado de vibraciones y sobrepresiones.

En términos económicos, el sistema con mangas cerámicas presenta, en general, una inversión inicial superior a la de soluciones convencionales con mangas textiles, debido al mayor coste unitario del medio filtrante. Sin embargo, el desarrollo de composiciones cerámicas de bajo coste, abordado en el marco del proyecto, permite plantear una estrategia orientada a la competitividad, reduciendo la diferencia económica respecto a soluciones textiles. La mayor durabilidad esperada, la menor frecuencia de sustitución y la reducción de paradas no programadas puede compensar parcialmente la inversión inicial a lo largo del tiempo.

Desde la perspectiva operativa, la mayor estabilidad del material contribuye a una gestión más predecible del consumo energético y del aire comprimido necesario para las operaciones de limpieza, siempre que el sistema esté correctamente dimensionado y ajustado.

Considerando el ciclo de vida completo del sistema, las mangas cerámicas presentan ventajas asociadas a su mayor vida útil frente a mangas textiles, reduciendo la frecuencia de sustituciones y la generación de residuos asociada. La posibilidad de incorporar materiales reciclados en su fabricación refuerza además su posicionamiento desde el punto de vista de la economía circular, mejorando indicadores de circularidad frente a soluciones textiles basadas mayoritariamente en materias primas vírgenes.

5.2. Aplicación de sistemas de filtración con mangas cerámicas en hornos de coacción de baldosas con/sin sistema de eliminación de ácidos

El contaminante atmosférico característico de los procesos industriales es el material particulado tanto en la industria cerámica como en la industria en general. En la actualidad, además, la utilización de filtros de mangas para el tratamiento de las emisiones de gases de salida está considerada como una mejor tecnología disponible (MTD).

La aplicación de elementos filtrantes desarrollados dentro de CERAMIX AIRA permite realizar el proceso de filtración del material particulado sin necesidad de llevar a cabo un proceso de dilución de la corriente de gases que tiene como finalidad disminuir la temperatura de esta antes de su filtrado.

Las características de las partículas presentes en la corriente de gases procedente de un horno de coacción de baldosas incluyen una distribución de tamaño de partículas que depende de la utilización o no de un sistema de eliminación de ácidos.

Cuando no se realiza el tratamiento de gases ácidos, la distribución del tamaño de partícula de la corriente de gases se caracteriza por presentar una distribución estrecha centrada en valores inferiores a $0.1\ \mu\text{m}$, Figura 23. Esta granulometría está asociada a procesos térmicos.

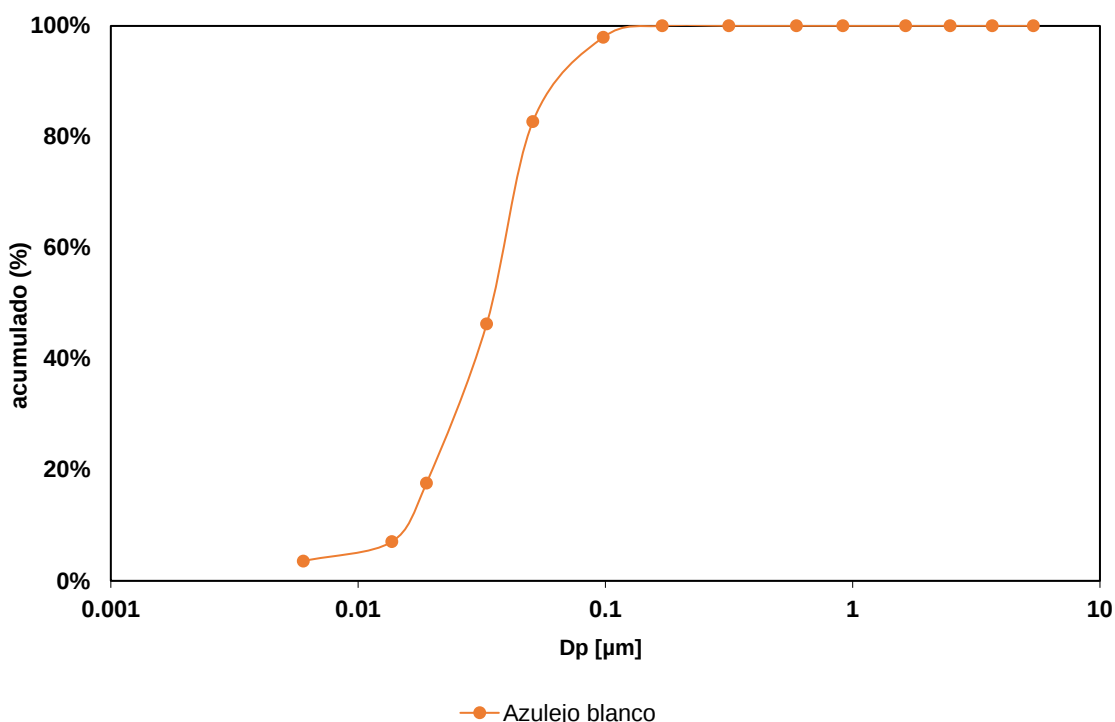


Figura 23. Distribución granulométrica de partículas en la corriente de gases de un horno cerámico.

Los resultados de las pruebas de eficiencia de los elementos filtrantes estudiados en el proyecto nos permiten asegurar que, para estas condiciones de la corriente de gases a tratar, el sistema puede alcanzar rendimientos del 99.9%.

Por su parte, si se implementa un sistema de eliminación de ácidos basado con la adición de un adsorbente sólido a la corriente gaseosa, las características de la misma se modificarían. En efecto, en función de la granulometría del adsorbente utilizado, la corriente de gases puede ver aumentado la cantidad de partículas en sus diferentes tamaños.

Si consideramos el uso de Sorbacal®, a modo de ejemplo, como reactivo para el tratamiento de ácidos, se deduce de su documentación técnica pública disponible que su tamaño medio inicial es del orden de $2\text{--}3\ \mu\text{m}$, lo que indica una fracción significativa de partículas finas y una alta reactividad frente a los gases ácidos. Además, tras el proceso de neutralización, el reactivo experimenta transformaciones fisicoquímicas significativas, dando lugar a productos como CaCl_2 o CaF_2 . Estas reacciones pueden provocar cambios relevantes en la morfología, densidad aparente y tamaño efectivo de partícula, dependiendo de las condiciones de proceso (temperatura, estequiometría Ca/ácido, tiempo de residencia y régimen de mezcla).

En este contexto, los resultados obtenidos con la manga cerámica ITC4 desarrollada en el marco del proyecto CERAMIX AIRA resultan relevantes. Los ensayos de eficacia de filtración realizados muestran que la manga cerámica presenta eficiencias de eliminación muy elevadas para partículas en el rango micrométrico, alcanzando valores superiores al 99% en masa para fracciones PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{1} .

6. Conclusiones

Se ha realizado la validación de los elementos filtrantes fabricados a partir de diferentes composiciones cerámicas determinando las capacidades del material en cuanto a su idoneidad mecánica, térmica y su eficacia de filtración de material particulado de granulometría compleja.

El estudio se ha llevado a cabo mediante la construcción de un sistema de filtración piloto (reactor multimanga) y la utilización de un sistema de filtración de laboratorio (reactor monomanga) que contienen los elementos filtrantes caracterizados y que han permitido realizar las pruebas de permeabilidad al aire, capacidad de limpieza y de eficacia de eliminación de material particulado.

Las conclusiones obtenidas en el trabajo de investigación se han agrupado según el ensayo desarrollado de la siguiente forma:

- Los elementos filtrantes desarrollados en forma de manga ITC2, ITC3, ITC4 presentan una permeabilidad al aire adecuada, así como valores de pérdida de carga comparables a los registrados por mangas comerciales de referencia bajo condiciones operativas equivalentes. En el caso de la manga ITC5, que incorpora un recubrimiento superficial, no se cumplen las condiciones adecuadas de uso debido a su elevada pérdida de carga.
- Las mangas desarrolladas presentan características estructurales adecuadas para el uso previsto con valores de resistencia mecánica inferiores a la que presentan las mangas comerciales y una alta resistencia al choque térmico que no presenta degradación estructural, fisuración ni pérdida apreciable de integridad tras la exposición repetida a ciclos de temperatura elevada, lo que confirma una estabilidad térmica adecuada para aplicaciones en procesos industriales con variaciones térmicas de todas las composiciones evaluadas.
- La adecuación al uso se ha evaluado mediante la determinación de la eficacia de eliminación de material particulado. En concreto se han realizado pruebas sobre la manga ITC4 (composición C12 v2) utilizando corrientes gaseosas con partículas de distribución granulométrica conocida. La eficacia de filtración obtenida es elevada tanto en fracciones granulométricas gruesas como en fracciones finas. Además, la formación de una capa superficial de material particulado acumulado ("torta de filtración") incrementa la eficiencia global del sistema, particularmente en las fracciones finas.
- El comportamiento de la manga ITC4 frente a la adhesión de partículas y la regenerabilidad del sistema es adecuado al recuperar los valores iniciales de pérdida de carga tras varios ciclos de ensuciamiento y limpieza en los tiempos ensayados.
- Finalmente, se ha evaluado el comportamiento del sistema de filtración en periodos largos de funcionamiento, 34 horas, donde se alcanza un régimen estacionario de filtración que no presenta aumentos significativos de la pérdida de carga.

Los sistemas de filtración que utilizan como elementos filtrantes mangas de composición ITC4 (C12 v2) presentan unas características de funcionamiento adecuadas para la filtración de corrientes de aire de alta temperatura que contienen material particulado.

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se plantea como recomendación de futura línea de investigación la evaluación del sistema de filtración multimanga en un escenario industrial mediante su conexión a corrientes de gases de salida de procesos productivos de interés donde poder estudiar la adecuación al uso y el comportamiento frente a la presencia de vibraciones, impactos o sobrepresiones, que puedan provocar fugas o roturas que afecten al rendimiento del sistema o a la calidad de la corriente de gases tratada.

Anexo 1. Equipamiento utilizado

Generador de partículas

Para llevar a cabo los ensayos de filtración de partículas y ensuciamiento del filtro de mangas, es necesario generar un flujo constante de partículas en la corriente de gases a tratar por los materiales filtrantes cerámicos desarrollados dentro del proyecto. Para ello se ha utilizado un lecho fluidizado de partículas.

Un lecho fluidizado es un estado particular de la materia en el cual un sólido granular, como, por ejemplo, partículas de polvo o gránulos, se comporta de manera similar a un líquido cuando se somete a un flujo de gas. Este proceso implica pasar una corriente de gas a través de un lecho de partículas sólidas que ocupan un volumen determinado, de modo que dicha corriente provoca que las partículas se muevan suspendidas en el aire dentro del recipiente que las contiene y se comporten como si estuvieran en un estado fluido.

El generador de partículas utilizado en los ensayos piloto se muestra en la Figura 24 y consta de una cámara de metacrilato cilíndrica y de un dosificador automático de sólidos. De esta forma se ha conseguido una alimentación de partículas al sistema de filtración controlada y reproducible. El dosificador acoge en su interior un volumen de arcilla fina, componente mayoritario utilizado en la fabricación de baldosas, que mediante la configuración del equipo se ajusta el caudal de material sólido que se aporta a la parte superior de la cámara de metacrilato.

A su vez, la cámara de metacrilato presenta una entrada de aire en su base de caudal controlado para generar el lecho fluido que controla la suspensión de las partículas en el cilindro contenedor, lo que permite una distribución uniforme de las partículas en el gas. La distribución de tamaño de partícula del polvo arrastrado desde el generador de partículas ha sido determinada durante la realización de los ensayos.

El polvo fluidizado en el lecho se conduce hacia el sistema de filtración a presión atmosférica mediante una abertura en la estructura que permite su salida.



Figura 24. Imagen del dosificador en continuo de partículas.

Reactor monomanga y multimanga

Para la determinación de la eficacia de filtración de material particulado de los elementos filtrantes cerámicos desarrollados, se han empleado dos configuraciones experimentales complementarias: el reactor monomanga y el reactor multimanga, previamente descritos en los apartados 2.1 y 2.2 de este entregable, respectivamente.

En una primera etapa, los ensayos se han realizado en el reactor monomanga, utilizado para la caracterización individual de las mangas cerámicas, permitiendo evaluar de forma controlada la eficiencia de eliminación de partículas y su comportamiento en función de la velocidad de filtración y la pérdida de carga generada.

Posteriormente, los ensayos se llevaron a cabo en el reactor multimanga, que permite la evaluación de varias mangas cerámicas y la realización de pruebas en condiciones de temperatura elevada, reproduciendo de forma más representativa el funcionamiento de un sistema de filtración industrial.

Calefactor

Para los ensayos de filtración a alta temperatura es necesario calentar tanto el caudal de aire que transporta el material particulado como el sistema de filtración, incluida la manga a ensayar. Para ello se ha utilizado un calefactor industrial Leister.

Este tipo de equipos calentadores de aire están indicados para el montaje en máquinas e instalaciones y han sido diseñados para el funcionamiento continuo del mismo. El principio de funcionamiento del calefactor es sencillo y hace pasar una corriente de aire por una resistencia eléctrica que permite modificar la temperatura de salida de forma controlada.

Este calefactor se muestra en la *Figura 25* y presenta una capacidad de calentar el aire con gran precisión hasta 650°C.



Figura 25. Imagen del calefactor de aire Leister.

Sistema de medida de partículas

La determinación de los niveles de emisión de partículas se ha realizado mediante la utilización del sistema de medida denominado ELPI+ (Electrical Low Pressure Impactor) y comercializado por la empresa DEKATI Ltd.

El ELPI+ es un impactador de cascada de baja presión que cuenta con 14 platos de diferente tamaño, desde 6 nm hasta 10 µm. Cada plato es capaz de caracterizar la concentración, distribución y carga de partículas de una corriente gaseosa en tiempo real con una frecuencia de hasta 10 Hz (*Figura 26*).



Figura 26. Esquema de la unidad principal del sistema ELPI+ y sus partes.

El principio de funcionamiento del ELPI+ puede dividirse en tres etapas: 1) Carga de partículas, 2) Clasificación del tamaño inercial de las partículas en un impactador de cascada y 3) Detección eléctrica de la carga de partículas con los electrodos de medida.

El sistema carga las partículas presentes en la corriente de gases en un cargador de corona antes de clasificarlas en función del diámetro aerodinámico en una columna impactadora (Figura 27). Se dispone de un total de 14 etapas de impacto, las partículas que no pueden seguir la trayectoria del flujo se impactan en un sustrato (placas sinterizadas) y la corriente eléctrica transportada por las partículas se mide y se convierte en concentración numérica.

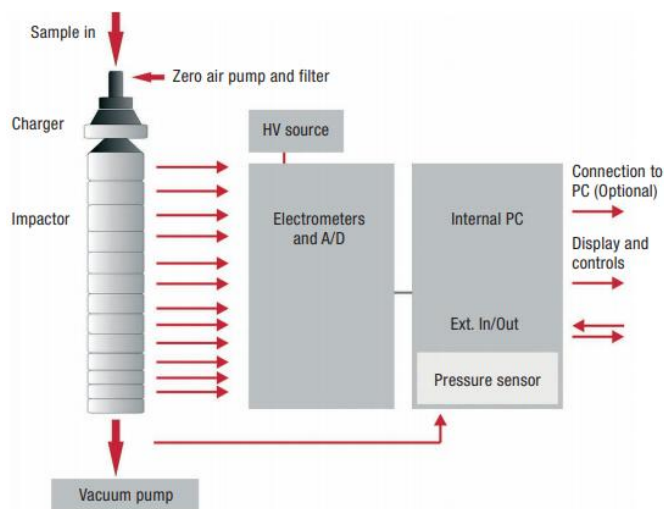


Figura 27. Esquema de funcionamiento del impactador del ELPI+.

Se han utilizado filtros sinterizados que son los recomendados para muestreos in situ ya que son capaces de evitar el efecto rebote de las partículas en el interior del impactador y minimizar su posibilidad de saturación. Así, el tiempo de saturación es una de las variables a determinar previamente a la utilización del sistema de medida (Figura 28).

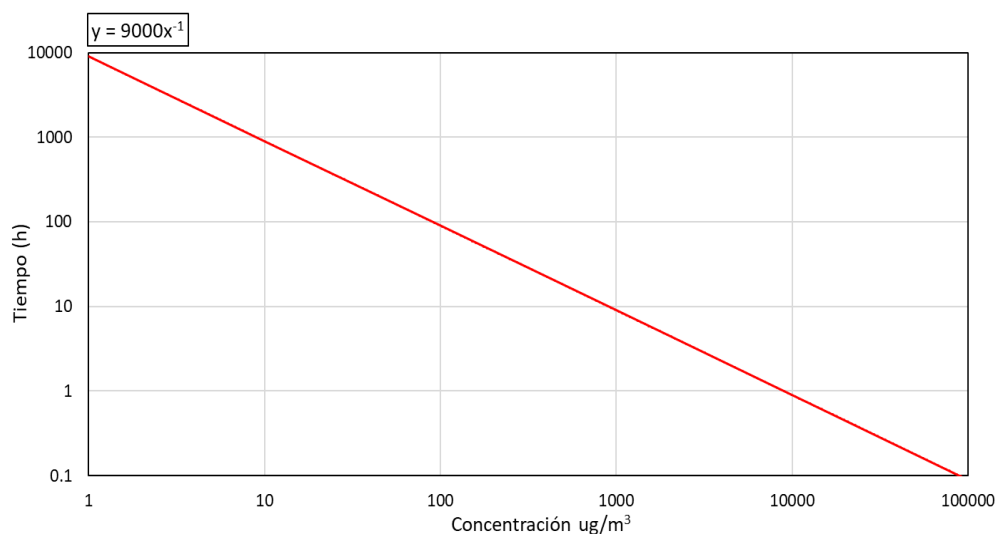


Figura 28. Tiempo de muestreo utilizando filtros sinterizados según la concentración en masa de la corriente de gases a estudiar.

Sistema de muestreo de partículas

Muestreos a temperatura ambiente

En la Figura 29 se muestra el equipo ELPI+ acoplado al sistema de muestreo de partículas. Dicho sistema consta de diferentes partes y tiene como finalidad obtener una muestra representativa del material particulado presente en la corriente de gases que circula por el interior del conducto.

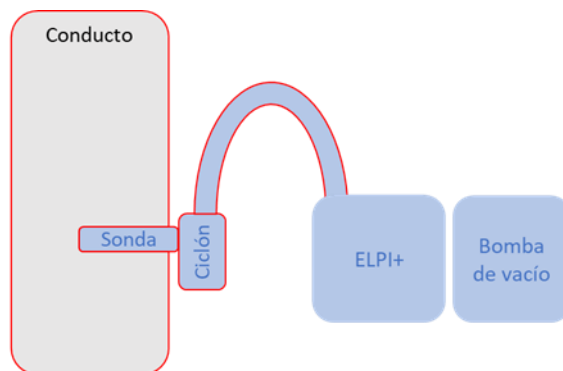


Figura 29. Esquema del tren de muestreo utilizado en los ensayos de filtración de partículas a temperatura ambiente.

En el sentido de aspiración del gas, el primer elemento del tren es la sonda de muestreo. La sonda dispone de una boquilla capaz de asegurar una velocidad igual en el conducto de extracción del tren de y en la conducción, lo que es conocido como isocinetismo. La condición de isocinetismo permite separar un volumen de gases que contine una concentración igual a la de la corriente de gases por lo que se obtiene una muestra representativa.

La corriente de gas extraída de forma representativa es conducida hasta un ciclón de corte. Este dispositivo permite realizar una separación de las partículas de mayor tamaño presentes en el flujo de la muestra, principalmente de las de tamaño superior a $10\mu\text{m}$. El principio de funcionamiento del ciclón se basa en la generación de un flujo tangencial que forma un vórtice que hace que las

partículas con suficiente inercia impacten contra las paredes de la cámara, desde donde caen al recipiente de recogida.

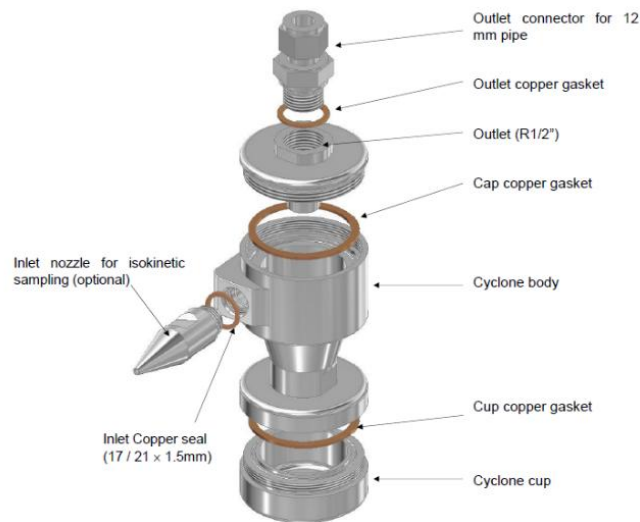


Figura 30 Esquema del ciclón de corte Dekati.

Muestreos a alta temperatura

Con el propósito de poder llevar a cabo determinaciones en dichas corrientes de elevada temperatura se ha utilizado el desarrollo de DEKATI denominado **HT-ELPI+**, que permite realizar muestreos de alta temperatura ya que calefacta toda la línea de muestreo a temperaturas en torno a 180°C. En la Figura 31 se muestra la configuración del equipo HT-ELPI+

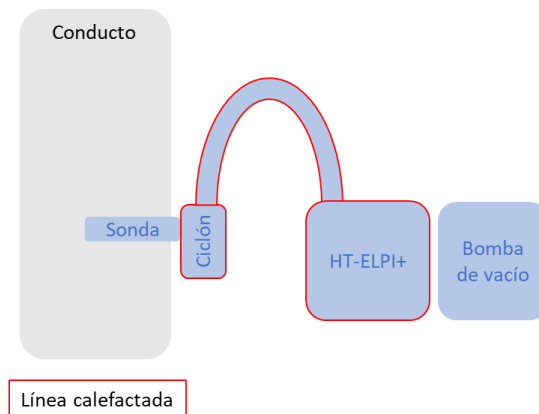


Figura 31. Esquema del tren de muestreo utilizado en los ensayos de filtración de partículas a alta temperatura.

La utilización de la variante HT-ELPI+ en sustitución de la ELPI+ posee la ventaja de evitar la necesidad de enfriar la corriente gaseosa mediante aporte de aire externo, de esta forma evita la posible pérdida de material particulado, posibles cambios en la distribución del tamaño de partícula, etc.

Expresión de los resultados

En general, el material particulado atmosférico se agrupa en partículas finas y gruesas. Se denominan partículas finas aquellas cuyo diámetro es inferior a 1 μm , subdividiéndose en nanopartículas (<0,05 μm) y en partículas ultrafinas (<0,1 μm). Se denominan partículas gruesas

aquellas con diámetro superior a 1 μm , subdividiéndose en aquellas con tamaños inferiores a 2,5 μm diámetro aerodinámico (llamadas partículas PM_{2,5}) y aquellas que presentan un tamaño inferior a 10 μm de diámetro aerodinámico (PM₁₀). Dentro de las partículas gruesas también se encuentran aquellas cuyo tamaño alcanza hasta los 100 μm .

Las propiedades físicas que presenta el material particulado se definen en función de la concentración másica (cantidad de material particulado por unidad de volumen de aire, mg/m^3) y del número de partículas (partículas por cm^3). La granulometría o distribución por tamaños, es otra de las propiedades relevantes de las partículas porque la masa o el número de partículas tiene típicamente una distribución modal, lo que significa que la masa o el número de las partículas tiende a agruparse en torno a varios diámetros.

La concentración másica está legislada en función del tamaño, estando reguladas las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5} tanto a nivel nacional como a nivel europeo. También se definen fracciones de PM₁ en algunos casos.

Con el sistema de medida descrito en apartados anteriores se han obtenido diferentes tipos de resultados. Por un lado, se ha determinado la distribución de partículas tanto en masa como en número de la corriente de gases antes y después del elemento filtrante. Por otro lado, se ha determinado la concentración en masa y en número de las fracciones de material particulado de interés.