



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE DISEÑO
DEPARTAMENTO DE MOTORES Y MÁQUINAS TÉRMICAS

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MODELO FLUIDODINÁMICO DE VALOR MEDIO PARA FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL (DPF)



TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA AEROSPAICIAL

AUTOR: ADRIÁN HERNÁNDEZ FORTE
DIRECTOR: DR. PEDRO PIQUERAS CABRERA
DIRECTOR EXPERIMENTAL: ENRIQUE JOSÉ SANCHIS PACHECO

VALENCIA, JULIO DE 2017

Resumen

Hoy en día, uno de los principales factores que contribuyen al aumento de los niveles de contaminación atmosférica, es el uso de motores de combustión interna alternativos (MCI) en medios de transporte. El origen de dichos contaminantes, es el proceso de combustión de los hidrocarburos, debido a que son el combustible más usado actualmente. En un intento por reducir los niveles de emisiones, y por tanto su impacto en el medio ambiente y sobre la salud de las personas, se han desarrollado una serie de normativas cada vez más estrictas y limitantes. En el caso de la Unión Europea, surgió la denominada Normativa EURO I en torno al año 1992. Actualmente, es la Normativa EURO V la que está en vigor, y ha impuesto una serie de restricciones sobre todo vehículo de nueva fabricación. Dicha normativa, hace necesaria la implantación de los denominados sistemas de post-tratamiento, situados en la carrera de escape del motor a fin de reducir las emisiones contaminantes. De entre todos los sistemas de post-tratamiento empleados en los motores diésel, los filtros de partículas diésel (DPF) tienen como objetivo reducir la cantidad de partículas emitidas, cuando los gases de escape lo atraviesan. Pese a que existen numerosas tipologías de filtros de partículas, los monolitos cerámicos de flujo de pared (objeto de estudio en este trabajo), son los más comunes en el ámbito automovilístico. Cuando los gases de escape atraviesan el monolito cerámico, las partículas quedan retenidas sobre su pared porosa. El aumento de la cantidad de partículas acumuladas, así como su distribución afectan sobre la manera de filtrar del monolito, además de provocar una penalización sobre las prestaciones del motor en cuanto a consumo y eficiencia; por lo tanto, es necesario el desarrollo de estrategias que permitan reducir dicha acumulación. A este tipo de procesos se les denomina regeneraciones y consisten en la oxidación del hollín. Existen numerosas maneras de llevar a cabo estos procesos, desde aportes externos de energía (regeneraciones activas), hasta métodos en los que por vía química se consigue la oxidación del hollín (regeneraciones pasivas), pasando por procesos mixtos que emplean parte de ambas técnicas. Con el objetivo de conocer y estudiar el comportamiento de los filtros de partículas diésel, así como de todos los fenómenos asociados a éstos, se hace necesario el uso de herramientas computacionales. De estas herramientas, se requiere que sean rápidas y que consuman los mínimos recursos computacionales posibles, con la finalidad de que su uso sea más económico y más rápido que un ensayo experimental. En este ámbito se enmarca el software VEMOD, desarrollado por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. Este trabajo surge con el fin de ajustar y validar el comportamiento de un modelo de valor medio para filtros monolíticos cerámicos de flujo de pared, implementado en el software VEMOD, a partir de diferentes datos experimentales.

Índice general

Nomenclatura	IX
I Memoria Técnica	1
1 Introducción	3
1.1 Motivación	3
1.2 Antecedentes	4
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodología	5
2 Marco teórico	7
2.1 Introducción	7
2.2 Emisiones de contaminantes y normativa	8
2.3 Sistemas de post-tratamiento diésel.	10
3 Herramientas computacionales. Modelo DPF	15
3.1 Submodelo de pérdida de presión	15
3.2 Submodelo de transmisión de calor	19
3.3 Submodelo de filtrado.	21
3.4 Submodelo de regeneración	24
4 Herramientas experimentales	29
4.1 Banco de flujo frío	29
4.2 Banco de flujo caliente y pulsante	31
4.3 Banco motor	32

5 Modelado y resultados	33
5.1 Validación submodelo de pérdida de presión	34
5.2 Validación submodelo de transmisión de calor	37
5.3 Validación submodelo de filtrado	58
5.4 Validación submodelo de regeneración pasiva	63
5.5 Validación ciclo WLTC	67
6 Conclusiones	69
6.1 Trabajos futuros	70
II Pliego de Condiciones	73
1 Condiciones de higiene y salud en el trabajo	75
III Presupuesto	81
1 Introducción	83
2 Desglose presupuestario	85
2.1 Reuniones	85
2.2 Desarrollo del proyecto	87
3 Presupuesto total	89
Anexos	91
A Casos transitorios, 10 haces	93

Índice de figuras

2.1. Evolución normativa EURO.	9
2.2. Ciclo de homologación NEDC.	10
2.3. Esquema de la disposición de un SCR en la línea de escape.	11
2.4. Recorrido del flujo en el interior de un DPF.	13
3.1. Crecimiento progresivo de la unidad colectora con la acumulación de hollín.	16
3.2. Sección transversal del canal de entrada.	18
3.3. Esquema de la discretización nodal del DPF.	20
3.4. Esquema de la discretización nodal del DPF.	20
3.5. Mecanismos de deposición de las partículas.	22
3.6. Evolución de la deposición de hollín durante el filtrado.	22
3.7. Regiones de acumulación de hollín.	24
4.1. Montaje de la instalación del banco de flujo.	29
4.2. Esquema ensayo ATS.	30
4.3. Esquema del banco de flujo caliente.	31
4.4. Esquema del frente de ondas producido.	32
5.1. Ajuste $\Delta P/Q$ para ambos equipos.	35
5.2. Valores de permeabilidad para ambos equipos.	36

5.3. Ajustes del gasto másico en ambos equipos.	37
5.4. Contribuciones a la pérdida de presión total en ambos equipos.	37
5.5. Ajuste de temperaturas.	39
5.6. Ajuste gasto másico.	39
5.7. Ajuste de temperaturas.	40
5.8. Ajuste gasto másico.	41
5.9. Ensayos a 33 Hz.	42
5.10. Ensayos a 100 Hz.	43
5.11. Ensayos a 33 Hz.	44
5.12. Ensayos a 100 Hz.	45
5.13. Ejemplo de presiones en fase.	46
5.14. Gasto másico de ensayo, 500 <i>kg/h</i>	47
5.15. Gasto másico de ensayo, 300 <i>kg/h</i>	47
5.16. Gasto másico de ensayo, 500 <i>kg/h</i>	47
5.17. Gasto másico de ensayo, 300 <i>kg/h</i>	48
5.18. Gasto másico instantáneo.	48
5.19. Proceso calentamiento 1.	50
5.20. Proceso calentamiento 2.	51
5.21. Proceso calentamiento 3.	52
5.22. Proceso enfriamiento 1.	53
5.23. Proceso enfriamiento 2.	54
5.24. Proceso enfriamiento 3.	55
5.25. Proceso calentamiento 2.	56
5.26. Proceso enfriamiento 2.	57
5.27. Ajuste discreto.	59
5.28. Ajuste de la correlación.	59
5.29. Ajuste de la correlación.	60

5.30. Ajuste del gasto másico.	61
5.31. Ajuste continuo frente a masa de hollín acumulada.	62
5.32. Ampliación de la evolución de la eficiencia de filtrado.	62
5.33. Ajuste continuo frente al tiempo.	63
5.34. Ampliación de la evolución de la eficiencia de filtrado.	63
5.35. Pérdida de presión impuesta.	64
5.36. Evolución temporal de las variables.	65
5.37. Evolución de las variables respecto a la masa de hollín.	66
5.38. Ensayo <i>WLTC</i>	68
A.1. Proceso calentamiento 1.	93
A.2. Proceso calentamiento 3.	94
A.3. Proceso enfriamiento 1.	95
A.4. Proceso enfriamiento 3.	95

Índice de tablas

4.1. Casos estudiados en el banco de flujo caliente.	32
4.2. Parámetros principales del motor.	32
5.1. Datos de los equipos ensayados.	33
5.2. Resultados del ajuste de la constante de fricción.	34
5.3. Resultados del ajuste de la permeabilidad.	35
5.4. Resultados del ajuste de la constante inercial.	36
5.5. Parámetros del ajuste.	38
5.6. Parámetros del ajuste.	40
5.7. Parámetros del ajuste.	41
5.8. Casos transitorios modelados.	49
5.9. Constantes de la correlación.	60
5.10. Ajuste del <i>sticking coefficient</i>	60
5.11. Ajuste de la porosidad de la capa de partículas.	61
5.12. Valor factor preexponencial.	64
2.1. Reuniones iniciales mantenidas entre doctor y doctorando.	85
2.2. Reuniones iniciales mantenidas entre doctor e ingeniero junior.	86
2.3. Reuniones iniciales mantenidas entre doctorando e ingeniero junior.	86

2.4. Reuniones mantenidas entre doctor, doctorando e ingeniero junior.	86
2.5. Reuniones mantenidas entre doctorando e ingeniero junior.	86
2.6. Presupuesto en relación a las reuniones mantenidas.	86
2.7. Coste de equipos empleados en las reuniones.	87
2.8. Costes de amortización de equipos.	87
2.9. Costes de material fungible empleado en las reuniones.	87
2.10. Costes de mano de obra.	88
2.11. Coste de equipos.	88
2.12. Costes de amortización de equipos.	88
2.13. Costes de material fungible empleado en las reuniones.	88
3.1. Presupuesto total del proyecto.	89

Nomenclatura

A_f	Área de filtrado
D_p	Coefficiente de difusión
D_{ef_n}	Difusión efectiva
D_{k_n}	Término difusión Knudsen
D_{mn}^*	Término difusión molecular
E_f	Eficiencia global de filtrado
K_n	Número de Knudsen
K_{KW}	Constante de Kuwabara
$K_{Kuwabara}$	Constante de Kuwabara
$K_{s,n}$	Constante de equilibrio de adsorción/desorción
L	Longitud del canal
N_{Ri}	Parámetro de intercepción
PM	Peso molecular
Pe	Número de Peclet
Q	Caudal de fluido
R_{rad}	Resistencia radial
S_c	Sticking coefficient
S_p	Superficie específica de hollín
St	Número de Stokes
T_{out}	Temperatura de salida
V_{DPF}	Volumen del filtro
X_n	Fracción molar
Y_n	Fracción másica

Φ_{ρ_s}	Factor de densidad de hollín
α	Lado del canal
β_F	Coefficiente de Forcheimer
χ	Factor de forma
\dot{m}	Gasto másico
\dot{w}_n	Término fuente
ϵ	Porosidad
η	Eficiencia
μ	Viscosidad dinámica del fluido
\overline{PM}	Peso molecular promedio
ϕ_n	Módulo de Thiele
ρ_s	Densidad de los agregados de hollín
θ_n	Isoterma de Langmuir
ξ_t	Coefficiente de pérdida de presión inercial
d_c	Diámetro de la unidad colectora
d_p	Diámetro del poro
d_{cell}	Diámetro de la unidad celular
d_{part}	Diámetro de partícula
$f(\epsilon)$	Función de porosidad (correlación de Kuwabara)
k	Permeabilidad
k_n	Constante cinética
k_{fr}	Constante de fricción
k_{rad}	Factor de corrección radial
m_s	Masa de hollín
$m_{c,Reg}$	Masa de hollín regenerada
u_w	Velocidad del flujo en el medio poroso o velocidad de filtrado
w_w	Espesor de la pared

Parte I

Memoria Técnica

Introducción

1.1 Motivación

En el ámbito industrial, uno de los sistemas de accionamiento más eficaces y más comúnmente empleados es el motor diésel, enmarcado en el campo de los motores de combustión interna alternativos (MCIA). Esto se debe a las grandes prestaciones que este tipo de motores ofrecen en aplicaciones industriales como maquinaria agrícola o plantas motrices de buques. En el ámbito automovilístico, este tipo de motores ha experimentado un notable incremento en cuanto a su uso se refiere. Con prestaciones similares a los motores de encendido provocado (MEP) o gasolina, los motores de encendido por compresión (MEC) o diésel, ofrecen una mayor eficiencia junto a un consumo menor, además de emplear un combustible ligeramente más económico.

En general, el uso de motores de combustión produce una serie de emisiones de gases contaminantes de gran impacto en el medio ambiente, así como en la salud de las personas. En lo que a motores de encendido por compresión se refiere, las emisiones más preocupantes son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas sólidas, denominadas *materia particulada (PM)*. La reducción de estas emisiones es un problema que ha originado la implementación de una normativa que cada vez es más exigente. En la Unión Europea, este conjunto de normas y leyes es conocida como normativa *EURO*, y su aplicación es de obligado cumplimiento en todos los vehículos nuevos vendidos en territorio europeo.

Estas limitaciones han hecho que tanto investigadores como fabricantes de automóviles hayan desarrollado diferentes sistemas, que parten desde el control y optimización del proceso de combustión, hasta sistemas de post-tratamiento situados en la línea de escape del motor. Tanto los filtros de partículas (DPF), como los catalizadores de oxidación (DOC), como los catalizadores de reducción selectiva (SCR), son sistemas de post-tratamiento de tipo pasivo que buscan reducir la nocividad de las emisiones. Este tipo de sistemas generan una contrapresión en la línea de escape, lo que se traduce en una disminución de la eficiencia del motor, así como en un aumento en el consumo.

En concreto, dentro de los filtros de partículas (DPF), el filtro monolítico de flujo de pared es el más extendido. Este tipo de filtros están compuestos por un monolito cerámico en el que los canales están sellados alternativamente. Cuando el flujo penetra en el filtro a través de uno de los canales, se ve obligado a atravesar la pared porosa del filtro para salir al exterior por el canal

contiguo y de esta manera se quedan retenidas las partículas en su interior. Esta acumulación de partículas en el interior del filtro tiene un efecto directo sobre la contrapresión a la salida del motor, así como en la eficiencia de filtrado del propio filtro. Por tanto, es necesario encontrar estrategias que permitan eliminar esta acumulación.

La regeneración del filtro, tal y como se conoce a este proceso, consiste en la oxidación de las partículas atrapadas, compuestas principalmente por hollín, hidrocarburos y sulfatos. Este proceso se puede conseguir aumentando de forma directa la temperatura de los gases de salida o del mismo filtro, mediante diversas actuaciones como post-inyecciones o elementos calefactores; estos métodos conllevan un aporte adicional de energía que penaliza en el consumo y en la eficiencia del motor. Otra estrategia empleada consiste en reducir la temperatura de oxidación del hollín mediante el uso de catalizadores, de esta manera no sería necesario un aporte extra de energía.

Con el fin de conocer a fondo y optimizar este tipo de estrategias, se hace necesario el desarrollo de modelos computacionales que se ajusten de forma precisa a la realidad. En este contexto, surge el presente trabajo que busca ajustar un modelo de valor medio que ajuste fielmente la pérdida de presión y la transmisión térmica de un DPF, así como el proceso de filtrado y regeneración. Este modelo, implementado en la herramienta de VEMOD, desarrollada por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, busca calcular y simular computacionalmente el comportamiento de un DPF, reduciendo al máximo el coste en materia computacional.

1.2 Antecedentes

El presente trabajo se sitúa en la línea de trabajos encaminados en desarrollar y mejorar el software VEMOD, desarrollado por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Este software se ha desarrollado a partir de otro software denominado OpenWAM, desarrollado también por el mismo departamento. Dentro de OpenWAM, se integra el modelo correspondiente al DPF, el cual a su vez está compuesto por diversos submodelos. Estos submodelos son los encargados de modelar los diferentes fenómenos que tienen lugar en el interior de un DPF. En este marco, se sitúan trabajos como los realizados por Piqueras P. [1] y Sanchis E. [2], centrados en mejorar el modelado de dichos fenómenos.

En la misma línea de investigación se encuentran los trabajos llevados a cabo por Serrano, J.R., Climent H., Piqueras P. y Torregrosa A.J. [4] y [6].

También relacionados de forma indirecta se encuentran los trabajos que estudian la posición óptima del filtro DPF a lo largo de la línea de escape, en este sentido destaca el trabajo de García-Afonso O. [3].

1.3 Objetivos

Partiendo de los trabajos realizados con anterioridad, este trabajo busca la validación del ajuste de un modelo de valor medio de un DPF, integrado en el software VEMOD. Este modelo será validado, de tal manera que consiga simular el comportamiento del DPF ante diferentes condiciones de funcionamiento, con el menor coste computacional posible, y ajustándose fielmente a los resultados experimentales obtenidos en estudios previos.

Los objetivos de este proyecto de forma organizada son los siguientes:

- Validación del ajuste del submodelo de pérdida de presión en un DPF sin carga.
- Validación del ajuste del submodelo de transferencia de calor en un DPF sin carga.
- Validación del ajuste del submodelo de filtrado del DPF en procesos de carga.
- Validación del ajuste del submodelo de regeneración pasiva del DPF en procesos de carga.

Los diferentes ajustes, y consecuentemente las validaciones, se pueden realizar de forma independiente; esto se debe a que el modelo de DPF está compuesto por diversos submodelos independientes. Al final, llevando a cabo todos estos objetivos, se consigue establecer una metodología de ajuste del modelo de forma aislada, para posteriormente validarlo frente a condiciones reales de funcionamiento.

1.4 Metodología

Una vez establecidos los objetivos que este proyecto abarca, resulta indispensable establecer una metodología de trabajo así como un orden de ejecución.

En primer lugar, es necesaria una revisión bibliográfica de trabajos anteriores enfocados en la misma línea de investigación. Partiendo de esta información, y de un modelo de DPF implementado en VEMOD, se ha realizado un análisis del mismo con la finalidad de ajustarlo a los datos experimentales obtenidos en las instalaciones del centro en proyectos de investigación anteriores. Las instalaciones que fueron empleadas en estos ensayos previos pertenecen todas ellas al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos y son las siguientes:

- Banco de flujo frío: instalación empleada para conocer la caída de presión en el DPF a partir del flujo másico impuesto.
- Banco de flujo caliente y pulsante: instalación empleada para conocer la respuesta del DPF ante un flujo pulsante y de altas temperaturas.
- Banco motor: instalación empleada para caracterizar el comportamiento del filtro en procesos de carga de hollín, filtrado y regeneración.

Partiendo de los datos experimentales, el siguiente paso es el de ajustar el modelo de DPF. El hecho de que el modelo esté formado en su conjunto por diferentes submodelos ha permitido que el ajuste de éstos se haya hecho de forma segregada e independiente. El orden seguido para realizar los ajustes es el establecido en los objetivos:

- Ajuste del submodelo de pérdida de presión en procesos estacionarios y transitorios sin carga.
- Ajuste del submodelo de transmisión de calor en procesos sin carga estacionarios y transitorios.
- Ajuste del submodelo de filtrado en procesos con carga transitorios.
- Ajuste del submodelo de regeneración en procesos transitorios con carga.

Marco teórico

2.1 Introducción

Actualmente, es impensable imaginar una sociedad sin motores de combustión interna. Desde el siglo XVIII que empezaron a desarrollarse las primeras máquinas de vapor, la evolución que han sufrido los motores de combustión ha sido continua hasta llegar al estado actual. Posiblemente, el tipo de motor térmico más desarrollado e implantado hoy en día es el denominado motor de combustión interna alternativo (MCIA). Este tipo de máquinas producen un movimiento mecánico rectilíneo y alternativo, a partir de la energía térmica obtenida por la combustión de un agente combustible, usualmente un hidrocarburo.

Dentro de los MCIA, destacamos dos tipos: los motores de encendido provocado (MEP) y los de encendido por compresión (MEC). Las diferencias principales entre ambos son: la forma de operar y el tipo de combustible empleado. Mientras que en los primeros, la combustión se produce a partir de un aporte externo de energía como el producido por una bujía, en los segundos, son las propias condiciones termodinámicas (altas presiones y temperaturas) las que producen el encendido del combustible. Este principio de funcionamiento condiciona el tipo de combustible que cada tipo de motor debe emplear, los MEP emplean gasolina mientras que los MEC, emplean diésel.

Ambos tipos de motores, están muy implantados en la sociedad en multitud de aplicaciones diversas. Este trabajo está centrado en el estudio de los filtros de partículas de los motores de encendido por compresión o diésel, y por lo tanto, a partir de ahora nos referiremos únicamente a este tipo de motor.

Los motores diésel, son muy empleados en el ámbito industrial. Destaca su uso en plantas generadoras de electricidad o en el accionamiento de maquinaria pesada como buques o ferrocarriles. El uso en automóviles también está muy extendido, alcanzando los mismos niveles que los motores de gasolina. Esto se debe a que los motores diésel alcanzan una mayor eficiencia de funcionamiento, además de emplear un combustible ligeramente más económico.

Sin embargo, el uso de los motores diésel, al igual que cualquier tipo de motor de combustión, lleva asociado irremediablemente la emisión de contaminantes, originados en el proceso de

combustión. Estas emisiones son nocivas para el medio ambiente y para la salud de las propias personas, con lo que es de interés reducirlas todo lo que sea posible.

Este capítulo hace un recorrido por las principales emisiones que se producen en el uso de motores diésel, la normativa existente en la actualidad así como los métodos desarrollados para reducirlas, haciendo especial hincapié en los sistemas de post-tratamiento.

2.2 Emisiones de contaminantes y normativa

Como ya se ha comentado, debido a la existencia de un proceso de combustión en el motor, se generan ciertas emisiones contaminantes que son peligrosas para la salud y el medio ambiente. Actualmente se estima que existen unos 1.200 millones de automóviles en circulación en todo el mundo, de los cuales gran parte son de tipo diésel. Por tanto, este tipo de motores constituye una parte muy importante de las emisiones de contaminantes a nivel mundial. Estas emisiones son causantes de fenómenos tales como: *smog* fotoquímico, destrucción del ozono estratosférico, lluvia ácida y efecto invernadero, con todas las consecuencias que traen consigo.

Las principales emisiones contaminantes que se generan con el uso de motores diésel son las siguientes:

- Óxidos de nitrógeno, comúnmente designados por NO_x . Principalmente se genera óxido nítrico (NO), debido a su cinética química dominante, como resultado de la oxidación del nitrógeno N presente en la atmósfera. En menor medida, se produce dióxido de nitrógeno (NO_2), sobre todo en zonas de baja temperatura y ricas en oxígeno O_2 y HO_2 .
- Óxidos de carbono. Se forma tanto monóxido de carbono (CO), como producto intermedio de la oxidación de hidrocarburos, como dióxido de carbono (CO_2). Cabe destacar que el CO_2 es un producto inevitable de la combustión de hidrocarburos, y por tanto, las normativas no suelen incluirlo en sus limitaciones. El CO se genera de tres formas diferentes:
 1. Disociación del CO_2 en zonas de altas temperaturas.
 2. En zonas pobres donde la llama no puede propagarse y por tanto, que no admiten una rápida combustión.
 3. En zonas excesivamente ricas donde no hay suficiente cantidad de aire, en las que no se puede producir correctamente la oxidación del combustible.
- Hidrocarburos (HC). La fuente principal de hidrocarburos sin quemar es la combustión incompleta del combustible. El hecho de que la combustión sea un proceso muy irregular, hace que hayan diferentes métodos de formación de hidrocarburos, y que la naturaleza de éstos sea muy heterogénea.
- Partículas (PM). Se considera partícula todo tipo de sustancia sólida o líquida presente en los gases de escape del motor, siendo su origen muy variado. Se deben diferenciar las partículas primarias, aquellas que se forman directamente en el proceso de combustión, de las secundarias, que se forman como resultado de algún proceso atmosférico como sedimentación, evaporación, condensación, etcétera. Las partículas suelen estar conformadas por hollín, sulfatos e hidrocarburos. La clasificación de éstas se hace de acuerdo a su tamaño, siendo las menores, las más peligrosas. Este se debe a:
 1. Mayor tiempo de residencia en la atmósfera, hecho que facilita su inhalación.

2. Mayor facilidad de filtración en el terreno, afectando a la calidad de las aguas subterráneas.
 3. Menor posibilidad de ser retenidas por las trampas y sistemas de retención, los cuales estudiaremos a continuación.
- Óxidos de azufre, comúnmente designados por SO_x . Los más comunes son el SO_2 y el SO_3 . La formación de estos óxidos se debe a la presencia del azufre en los combustibles líquidos. En este sentido, la normativa de combustibles se está volviendo más estricta con el fin de reducir la cantidad de azufre presente en ellos.

Éstas son las emisiones más comunes y abundantes que se dan en los motores diésel. Este tipo de motores destacan frente a los de gasolina en los niveles de emisión de NO_x y de partículas PM . Este hecho se debe a que la inyección de combustible en los motores diésel, se produce en un punto cercano al punto superior de la carrera de compresión, y por tanto, la mezcla no se realiza de forma completamente homogénea. De hecho, este tipo de motores acostumbran a trabajar con mezclas pobres lo cual es beneficioso de cara al consumo, pero contraproducente en cuanto a emisiones se refiere.

Con lo visto hasta ahora, es necesario que estas emisiones sean limitadas por los organismos y autoridades competentes. En el caso de la Unión Europea, surgió en el año 1992 la normativa *EURO*, estableciéndose por primera vez una limitación en las emisiones producidas por vehículos. Esta normativa, ha ido evolucionando con el paso de los años de acuerdo a los desarrollos tecnológicos disponibles.

Actualmente, y desde 2014, está vigente la normativa *EURO VI*, de obligado cumplimiento por cualquier coche nuevo vendido a partir de la fecha de aplicación. En el caso de los motores diésel o de encendido por compresión, las limitaciones se establecen sobre las cantidades emitidas de CO , $HC + NO_x$, NO_x y PM .

La evolución de la normativa *EURO*, puede apreciarse en la Figura 2.1, en cuanto a límites de NO_x y PM se refiere.

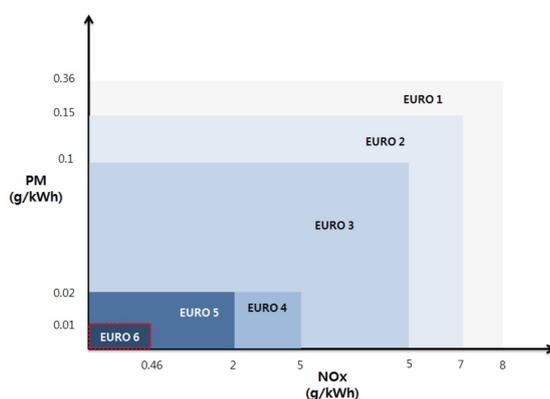


Figura 2.1: Evolución normativa EURO.

Las emisiones que produce un vehículo se evalúan mediante ciclos de homologación. Estos ciclos son ensayos de conducción que se realizan sobre los vehículos intentando reproducir al máximo la conducción real. En la Unión Europea se hace uso del ciclo NEDC (*New European Driving Cycle*), compuesto por una fase de conducción urbana (UDC) y otra extraurbana (EUDC).

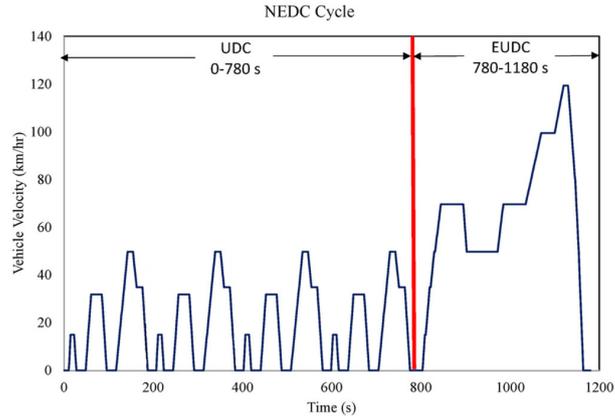


Figura 2.2: Ciclo de homologación NEDC.

2.3 Sistemas de post-tratamiento diésel

Vistas las principales emisiones de los motores diésel y la creciente exigencia en la normativa respecto a éstas, las empresas constructoras e investigadores han estudiado y diseñado diferentes estrategias con el fin de ajustarse a éstas. Algunas de las más empleadas son:

- Mejoras en el diseño de la cámara de combustión. Éstas buscan optimizar los procesos de combustión, y por ende hacerlos más eficientes, reduciendo así la formación de hidrocarburos y partículas.
- Mejoras en los sistemas de inyección de combustible. La finalidad de esta estrategia es muy similar a la comentada anteriormente. En esta línea destaca la sonda *lambda*, que analiza la presencia del dióxígeno (O_2) en los gases de escape, con el fin de optimizar la cantidad de combustible inyectada en la cámara de combustión.
- Recirculación de los gases de escape (EGR). Se trata de una técnica que reintroduce gases de escape en la admisión del motor. De esta manera se reduce la temperatura de combustión, y se consigue reducir las emisiones de gases NO_x . No obstante, el uso de esta técnica conlleva un aumento en la emisión de partículas (PM) y en la formación de hidrocarburos, pues en el proceso de combustión participa gas de escape.

Aparte de estas estrategias y sistemas, existen los denominados sistemas de post-tratamiento. Estos sistemas están situados en la línea de escape del motor y actúan directamente sobre las emisiones cuando éstas pasan a través de él, antes de su salida a la atmósfera. Algunos de estos dispositivos buscan la oxidación o reducción de ciertos componentes en otros menos nocivos, otros buscan la retención por vía química o física de parte de estas emisiones. El inconveniente que conlleva su uso es la pérdida de presión que generan en la carrera de salida de los gases de escape. Esto penaliza el consumo del motor y por tanto, su eficiencia.

A continuación se explican los principales sistemas de post-tratamiento, así como su principio de funcionamiento.

2.3.1 Reactor catalítico de oxidación Diésel (DOC)

Se trata de un sistema que favorece la oxidación de CO , de los hidrocarburos (HC) y la de NO a NO_2 .

La estructura de este tipo de reactores está formada por un monolito, a través del cual fluyen los gases de escape, que suele estar fabricado de un material cerámico como la cordierita. El monolito está recubierto por óxidos inorgánicos, con la finalidad de aumentar la superficie de contacto. Este recubrimiento se denomina *washcoat* y se suele emplear alúmina, Al_2O_3 . A su vez, sobre el *washcoat*, se emplean metales preciosos como platino Pt o paladio Pd como componente catalizador.

El monolito ha de ser capaz de soportar elevadas vibraciones mecánicas, flujos altamente pulsantes y elevados gradientes de temperatura, pues sobre su superficie tendrán lugar las diferentes reacciones químicas, en las que se puede liberar gran cantidad de energía. Estas reacciones químicas necesitan de elevadas temperaturas, por ello generalmente se sitúa el catalizador aguas abajo de la turbina, lo más cerca posible, para así aprovechar la alta temperatura de los gases de escape.

2.3.2 Sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR)

Se trata de un tipo de reactor químico compuesto de un sustrato cerámico. En este sustrato, que contiene una mezcla de óxidos de vanadio y de titanio, se combinan los gases de escape junto a otra sustancia, generando así una reacción que consigue reducir los óxidos de nitrógeno, así como oxidar los hidrocarburos y el monóxido de carbono CO .

Tradicionalmente, en la industria y motores marinos el aditivo empleado como agente reductor ha sido el amoníaco NH_3 . Sin embargo, debido a su toxicidad, en el ámbito automovilístico se suele emplear una solución acuosa de urea, que se trata de un compuesto no tóxico y biodegradable. La inyección de esta solución se realiza al inicio del SCR, dando lugar a una reacción de hidrólisis en presencia de un catalizador, obteniendo como resultado el amoníaco necesario. Además, con la finalidad de reducir la concentración de CO e hidrocarburos, suele instalarse a la entrada del SCR un catalizador de oxidación. Por tanto, la estructura de un SCR es una sucesión de varios catalizadores con una inyección de urea entre ellos, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.3.

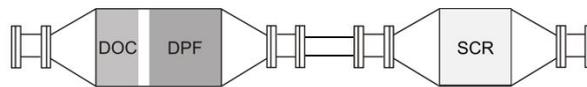


Figura 2.3: Esquema de la disposición de un SCR en la línea de escape.

Este tipo de sistemas es bastante más complejo que el resto, necesitando de un mayor y más costoso mantenimiento. Además, el uso de urea hace necesaria la instalación de un depósito adicional en el automóvil, el cual conlleva un desembolso económico en cada recarga de urea que se haga.

2.3.3 Filtros de partículas Diésel (DPF)

Tal y como se ha comentado anteriormente, una de las emisiones más preocupantes de los motores de encendido por compresión son las partículas (PM), compuestas principalmente por hollín, hidrocarburos y sulfatos. El DPF se emplea para retener estas partículas de forma física cuando pasan a través de él, junto con los gases de escape. Esta acumulación tiene efectos directos sobre la contrapresión en el motor y por tanto, es necesario eliminarla cada cierto tiempo. Ésto se lleva a cabo mediante procesos de regeneración.

Debido a las condiciones en las que operan este tipo de filtros, los requerimientos necesarios que han de cumplir son los siguientes:

- Resistencia a elevadas temperaturas así como a elevados gradientes térmicos.
- Elevada resistencia química.
- Elevada resistencia a vibraciones mecánicas y flujo pulsante.
- Elevada eficiencia de filtrado.
- Buen comportamiento en cuanto a pérdida de presión se refiere, cuando está cargado de partículas.

Pese a que hay numerosas tipologías de filtros de partículas diésel, los monolitos cerámicos de flujo de pared son los más extendidos.

Filtros metálicos

Se trata de un filtro conformado por canales metálicos irregulares y quebrados, de tal manera que el paso de los gases de escape sea lo más zigzagueante posible. Esto hace que las partículas queden atrapados en el interior del filtro. El hecho de que el material del filtro sea metálico favorece la regeneración debido a la alta conductividad, sin embargo son susceptibles de sufrir problemas de corrosión.

Filtros de espumas cerámicas

Este tipo de filtros están formados por una estructura cerámica repleta de poros esféricos abiertos. Sin embargo presentan muy baja eficiencia de filtrado y baja capacidad de retención de las partículas. Por tanto su aplicación en el mundo automovilístico está poco extendida.

Filtros cerámicos de flujo de pared

Están formados por un monolito cerámico, principalmente de cordierita y carburo de silicio. El monolito está surcado por canales sellados alternativamente, de esta manera los gases de escape al entrar en un canal (sellado en su extremo final) se ven obligados a atravesar la pared porosa del monolito hasta el canal contiguo (sellado en su extremo inicial), tal y como se muestra en la Figura 2.4. Conforme los gases de escape atraviesan la pared porosa, las partículas que están presentes en ellos se van quedando atrapadas. Adicionalmente, las paredes del monolito se recubren de metales nobles que actúan como catalizadores en la reacción de oxidación en los procesos de regeneración.

En primera instancia, las partículas quedan atrapadas en los orificios porosos de la pared del monolito y posteriormente se van depositando sobre las paredes del canal generando una capa

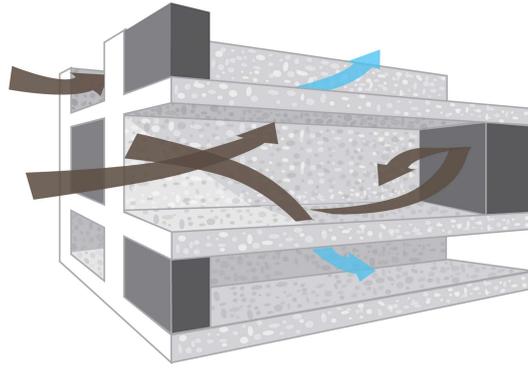


Figura 2.4: Recorrido del flujo en el interior de un DPF.

que aumenta de espesor. Esta retención de partículas hace que conforme se llena el filtro, la pérdida de presión que se da sea creciente, hecho que penaliza en las prestaciones del motor de forma notoria.

Algunos de los parámetros estructurales más importantes y que tienen un impacto directo en la eficiencia de filtrado así como en la transmisión de calor son los siguientes:

- Porosidad efectividad. Representa la cantidad de poros que contiene el monolito.
- Diámetro medio de los poros. Debido a la disparidad en los tamaños de los poros, se hace necesario un parámetro de caracterización de los mismo.
- Permeabilidad. Representa la capacidad del monolito de ser atravesado por un fluido.
- Estructura celular. La mayoría de monolitos están surcados axialmente por canales de sección cuadrada simétrica debido a que son más fáciles de fabricar. Sin embargo, secciones con forma hexagonal poseen mayor superficie de contacto por ejemplo. No obstante, los filtros de sección cuadrada simétrica son los más generalizados.

Tal y como se ha explicado antes, el proceso de colmatación del filtro diferencia dos regímenes de filtrado diferentes. El primero denominado de lecho profundo es el que se produce en los mismos orificios porosos de la pared mientras que el filtro se encuentra limpio. Una vez que estos orificios se han saturado, se comienza a generar una pequeña capa de partículas, en este momento el proceso de filtrado se denomina superficial. Ambos procesos se explican detalladamente en capítulos posteriores.

Debido al proceso de llenado del filtro, también se hace necesario encontrar estrategias de regeneración del filtro con el fin de reducir la cantidad de hollín acumulada. En los procesos de oxidación del hollín, se aprovecha la existencia de emisiones de NO_2 como portadores de oxígeno. Además la mayoría de automóviles, presentan conjuntamente un DOC y un DPF, dándose en el DOC procesos de oxidación del NO al NO_2 , aprovechándose la existencia de este NO_2 para la posterior regeneración del DPF. Dependiendo del tipo de estrategia empleada en el DPF, éstas se clasifican en: activas, pasivas y mixtas.

- Regeneración activa. Es un tipo de regeneración térmica que busca, mediante un aporte extra de energía, lograr temperaturas de funcionamiento elevadas. Estas altas temperaturas favorecen la oxidación del hollín debido al aumento de su reactividad. El aporte de energía se puede realizar mediante inyecciones post-combustión de combustible en la misma cámara de combustión, durante la etapa de escape, o en la misma línea de escape. Otra manera de conseguir estas temperaturas es mediante calentadores eléctricos, sin

embargo su implementación en el DPF es más compleja. Las estrategias de regeneración activa requieren de un consumo adicional de combustible, lo cual penaliza directamente sobre la eficiencia del motor.

- Regeneración pasiva. Es aquella en la que se baja la temperatura de oxidación del hollín mediante el uso de aditivos de oxidación como por ejemplo el NO_2 proveniente del DOC, o bien sustancias catalizadoras. De esta manera, el hollín se puede oxidar en regímenes normales de funcionamiento del motor, sin ser necesaria la post-inyección de combustible.
- Regeneración mixta o activo-pasiva. Se trata de una estrategia que combina las dos anteriores con el fin de controlar de forma precisa el proceso evitando excesos en el consumo de combustible. Es la técnica que actualmente más constructores de vehículos están incorporando en los automóviles.

Herramientas computacionales. Modelo DPF

Como herramienta computacional principal y con el fin de lograr la simulación de los procesos propios de un filtro de partículas diésel, se emplea el software VEMOD. Este software ha sido desarrollado por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, involucrándose numerosos departamentos del mismo. Este software implementa un modelo de DPF de valor medio, desarrollado principalmente por el departamento encargado del estudio del post-tratamiento de los motores de combustión interna.

El modelo de valor medio del DPF realiza los cálculos a partir de un valor representativo de las variables de entrada, sin tener en cuenta su variación en ninguna de las dimensiones, tal y como haría un modelo cero-dimensional. De esta manera el cálculo, y por lo tanto la simulación, es mucho más rápida y eficaz que en modelos que consideran algún tipo de discretización de las variables. No obstante, el uso de este tipo de modelos es válido para conocer el comportamiento global del DPF.

A su vez, el modelo del filtro de partículas diésel está compuesto de una serie de submodelos independientes que caracterizan todos los procesos que tienen lugar en el interior de un filtro. Éstos modelan la pérdida de presión, la transmisión de calor, el filtrado y la regeneración. El hecho de que sean independientes, permite su ajuste de forma segregada y desacoplada.

3.1 Submodelo de pérdida de presión

La pérdida de presión en un DPF se debe a tres contribuciones diferentes: la pérdida de presión debido a que un fluido atraviesa un medio poroso (contribución de Darcy), la debida a la fricción del fluido con las paredes de los canales y la debida a la contribución inercial en los conos de entrada y salida del DPF.

3.1.1 Unidad colectora

El modelo de DPF asume que el medio poroso del sustrato cerámico, queda representado por un lecho de unidades colectoras esféricas. Alrededor de estas unidades colectoras, se depositarían las partículas que lo atraviesan. Los poros que conforman el medio poroso, junto con estas unidades colectoras, conforman la unidad celular, también esférica. Durante la etapa de filtrado superficial, la unidad colectora cambia su microgeometría conforme se acumulan partículas en ella.

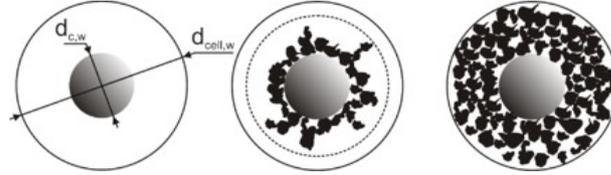


Figura 3.1: Crecimiento progresivo de la unidad colectora con la acumulación de hollín.

La Figura 3.1 muestra la variación de la microgeometría de la unidad colectora desde unas condiciones limpias (sin hollín acumulado), hasta la saturación.

$$d_{c,w0} = \frac{3}{2} \frac{(1 - \epsilon_{w0})}{\epsilon_{w0}} d_{p,w0} \quad (3.1)$$

La Ecuación 3.1 es la expresión, en condiciones limpias, del diámetro medio de la unidad colectora. Este diámetro depende de la porosidad en condiciones limpias ϵ_{w0} , y del diámetro medio del poro en condiciones limpias $d_{p,w0}$.

$$d_{cell,w0} = \frac{d_{c,w0}}{(1 - \epsilon_{w0})^{1/3}} \quad (3.2)$$

Conocido el diámetro medio de la unidad colectora, mediante la Ecuación 3.2, es posible calcular el diámetro de la unidad celular en condiciones limpias.

Tal y como se puede observar en la Figura 3.1, la microgeometría de la unidad colectora varía conforme aumenta la acumulación de partículas de hollín. De esta manera, se ve alterado el diámetro de la unidad colectora. Esta variación, dependerá de la cantidad de hollín depositada, así como de la forma en que se dé dicha deposición.

$$d_{c,w} = 2 \left(\frac{d_{c,w0}^3}{8} + \frac{3 m_{s,cell}}{4\pi \chi \rho_{s,w}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.3)$$

La Ecuación 3.3, permite calcular el diámetro de la unidad colectora cuando está cargada. Esta expresión depende de la masa de hollín acumulada $m_{s,cell}$, la densidad de los agregados de hollín en la pared porosa $\rho_{s,w}$, y también del factor de forma χ . El factor de forma, es un número que toma valores entre 0 y 1, y marca cuánto de irregular es la deposición de las partículas en la unidad celular; de esta manera, el valor mínimo indica una deposición totalmente irregular, mientras que el máximo indica que es perfectamente regular, y por tanto esférico.

$$\epsilon_w = 1 - \frac{d_{c,w}^3}{d_{cell,w}^3} \quad (3.4)$$

$$d_{p,w} = \frac{2}{3} \frac{\epsilon_w}{1 - \epsilon_w} d_{c,w} \quad (3.5)$$

Además del diámetro medio de la unidad colectora, la porosidad y el diámetro medio del poro van variando conforme se acumulan partículas de hollín. Las Ecuaciones 3.4 y 3.5, permiten calcular estas variables en condiciones de carga.

3.1.2 Pérdida de presión debida al paso del flujo a través del medio poroso

La pérdida de presión debida a la contribución de Darcy es aquella que se produce cuando un fluido atraviesa un medio poroso. Esta contribución está modelada a través de la ecuación 3.6. Esta ecuación expresada en función del caudal de los gases de escape Q y de los parámetros geométricos, viene determinada por la Ecuación 3.7.

$$\Delta p_{Darcy} = \frac{\mu u_w w_w}{k_w} \quad (3.6)$$

$$\Delta p_{Darcy} = \frac{\mu Q}{2V_{DPF}} (\alpha + w_w)^2 \frac{w_w}{k_w \alpha} \quad (3.7)$$

Un parámetro fundamental en el modelado de la pérdida de presión debida a la contribución de Darcy es la permeabilidad, k_w . Este parámetro es función del diámetro medio de las partículas d_c y de una función de porosidad $f(\epsilon)$ de acuerdo a la Ecuación 3.8. Para la función de porosidad, se ha hecho uso de la correlación propuesta por Kuwabara expuesta en la Ecuación 3.9. Esta correlación se emplea diferenciando la porosidad del filtro limpio y la del filtro cargado. En el primer caso, la porosidad ϵ es constante y conocida, pues es un parámetro característico del filtro; mientras que en el caso del filtro cargado, ésta varía durante el proceso de carga.

$$k_w = f(\epsilon) d_c^2 \quad (3.8)$$

$$f(\epsilon) = 0,02 \frac{K_{Kuwabara}}{1 - \epsilon} \quad (3.9)$$

$$K_{Kuwabara} = 2 - \frac{9}{5}(1 - \epsilon)^{1/3} - \epsilon - \frac{1}{5}(1 - \epsilon)^2 \quad (3.10)$$

Las Ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10 son válidas para condiciones limpias del filtro o cuando éste está cargado de hollín, haciendo uso de las correspondientes variables para cada caso.

Usualmente, la permeabilidad se suele corregir a través del factor corrector de *Stokes-Cunningham* (*SCF*), dado por la Ecuación 3.11. Este factor, introduce una corrección por no ser válida la condición de *no-deslizamiento* en un flujo de comportamiento molecular. El factor *SCF* es a su vez función del número de *Knudsen*, dado por la Ecuación 3.12.

$$SCF = 1 + K_n (1,257 + 0,4 e^{\frac{-1,1}{K_n}}) \quad (3.11)$$

$$K_n = \frac{2\phi}{d_c} \quad (3.12)$$

El número de *Knudsen*, es un número adimensional que en un fluido marca el cambio entre un comportamiento macroscópico y un comportamiento molecular. En nuestro caso, estamos tratando con un flujo molecular.

3.1.3 Pérdida de presión debida a la fricción

Esta contribución a la pérdida de presión es la debida a la fricción entre el fluido y las paredes de los canales que conforman el monolito. Esta fricción es diferente dependiendo del régimen de filtrado bajo el que esté operando el filtro. Mientras que éste se encuentra limpio funciona en régimen de filtrado de lecho profundo, hasta que los orificios se saturan. Una vez que se han colmatado los poros, comienza el proceso de filtrado superficial, pues se genera una capa de partículas sobre las paredes de los canales de entrada.

La Ecuación 3.13 es la encargada de modelar la pérdida de presión en el régimen de filtrado de lecho profundo, mientras que la Ecuación 3.14 modela la pérdida debida al filtrado superficial.

$$\Delta p_{Fr} = \frac{\mu Q}{V_{DPF}} (\alpha + w_w)^2 \frac{8F_w L^2}{3\alpha^2} \quad (3.13)$$

$$\Delta p_{Fr} = \frac{\mu Q}{V_{DPF}} (\alpha + w_w)^2 \frac{4F_w L^2}{3} \left[\frac{1}{(\alpha - 2w_p)^4} + \frac{1}{\alpha^4} \right] \quad (3.14)$$

La diferencia entre ambas ecuaciones reside en que en el régimen de filtrado superficial, la sección transversal del canal de entrada, se ve reducida con el espesor de la capa de partículas (w_p) de acuerdo a la Figura 3.2.

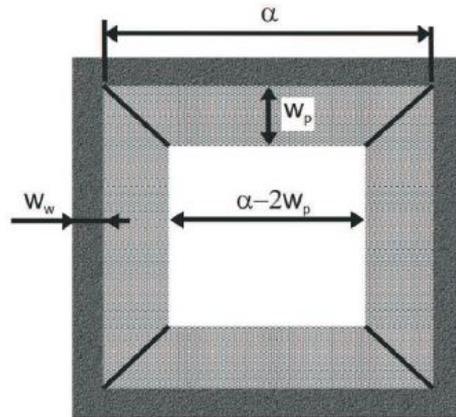


Figura 3.2: Sección transversal del canal de entrada.

3.1.4 Pérdida de presión debida al paso del flujo a través de la capa de partículas

Como ya se ha comentado, una vez saturados los orificios del filtro, se comienza a generar una capa de partículas que además de reducir la sección transversal de los canales de entrada, actúa como un agente filtrante. El filtrado que lleva a cabo la capa de partículas, que no está presente en filtros limpios o con poca carga, se puede modelar de acuerdo a la ley de Darcy, pues el flujo atraviesa un medio poroso.

$$\Delta p_{PL} = \frac{\mu Q}{2V_{DPF}} (\alpha + w_w)^2 \left[\frac{1}{2k_p} \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 2w_p} \right) \right] \quad (3.15)$$

La Ecuación 3.15 introduce esta nueva contribución a la pérdida de presión, siendo k_p la permeabilidad de la capa de partículas y w_p el espesor de la misma.

3.1.5 Pérdida de presión inercial

Esta es la contribución debida a los fenómenos de contracción y expansión del fluido. La contracción del fluido se produce a la entrada del monolito, y viene originada por el estrechamiento del flujo al penetrar en el canal de entrada. Por otro lado, la expansión se produce en la salida del monolito donde incluso se llegan a generar vórtices. Esta pérdida de presión, se ve afectada por la contribución del efecto *Forchheimer*, de acuerdo a la Ecuación 3.16, mediante el coeficiente que lleva el mismo nombre β_F .

$$\Delta p_{In} = \frac{\rho Q^2}{V_{DPF}^2 \alpha^2} (\alpha + w_w)^4 \left[\frac{\beta_F w_w}{4} + 2\xi_t \left(\frac{L}{\alpha} \right)^2 \right] \quad (3.16)$$

El término de *Forchheimer* introduce la resistencia adicional de la pared porosa cuando la velocidad de filtrado es muy elevada. Atendiendo a estudios anteriormente realizados (referencia Piqueras), la influencia de este término es despreciable sobre la capa de partículas (a excepción de elevados números de Reynolds). De esta manera, la expresión anterior se reduce a la expuesta en la Ecuación 3.17.

$$\Delta p_{In} = \frac{\rho Q^2}{V_{DPF}^2 \alpha^2} (\alpha + w_w)^4 2\xi_t \left(\frac{L}{\alpha} \right)^2 \quad (3.17)$$

En esta ecuación, el término ξ_t es la denominada constante inercial.

3.2 Submodelo de transmisión de calor

El submodelo de transmisión de calor está basado en la discretización nodal del filtro de partículas. Concretamente, en la discretización radial sin tener en cuenta la axial debido a que se trata de un modelo de valor medio.

El modelo queda representado según el esquema mostrado en la Figura 3.3, en el cual se considera la existencia de diferentes mecanismos de transferencia de calor:

- Transferencia de calor entre el gas y la pared del monolito a través de la resistencia $R_{gas,wall}$.
- Transferencia de calor por convección y radiación desde el monolito hacia el exterior mediante la resistencia R_{ext} .
- Transferencia de calor por conducción axial desde el conducto de entrada hasta el monolito y desde éste hacia el conducto de salida a través de $R_{ax,pre}$ y $R_{ax,post}$.
- Transferencia de calor por conducción radial entre diferentes haces, en caso de considerar la existencia de más de uno, mediante la resistencia $R_{rad,c}$.

El modelo mostrado, también tiene en cuenta la posibilidad de que exista inercia térmica en los diferentes elementos que conforman el modelo.

Las variables de interés del modelo son la temperatura de la pared del monolito, así como la de superficie del mismo. De acuerdo al esquema, las variables mencionadas son $T_w^{H,p+1}$, $T_{sup,int}^{p+1}$ y $T_{sup,ext}^{p+1}$. En ellas, el subíndice p hace referencia al instante de tiempo, mientras que el H hace referencia al haz que se esté calculando ya que se admite la discretización radial a través de varios haces.

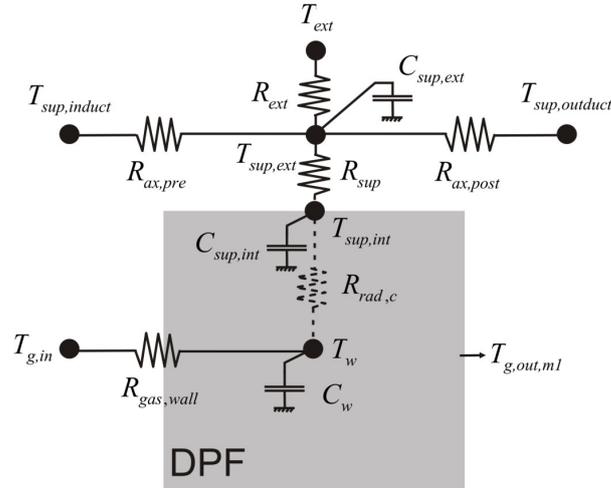


Figura 3.3: Esquema de la discretización nodal del DPF.

Debido a que el monolito del filtro de partículas se encuentra rodeado de un material aislante, una pequeña cámara de aire y un recubrimiento metálico, la transferencia de calor desde la superficie de éste hasta el exterior se modela de forma más completa y precisa siguiendo el esquema mostrado en la Figura 3.4.

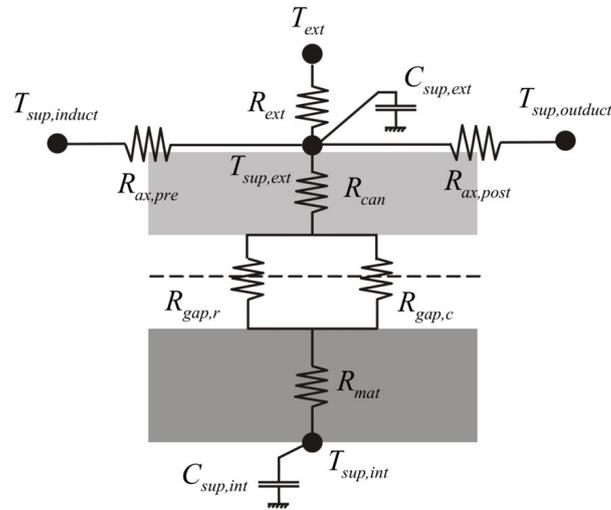


Figura 3.4: Esquema de la discretización nodal del DPF.

En esta nueva discretización se considera la existencia de tres medios entre la superficie del monolito y el exterior:

- El subíndice *mat* hace referencia a la capa de material aislante.
- El subíndice *gap* hace referencia a la cámara de aire.
- El subíndice *can* hace referencia al recubrimiento metálico del filtro.

De acuerdo al esquema inicial de la Figura 3.3, el cálculo de la temperatura de la pared del monolito se calcula a través de la expresión 3.18.

$$T_w^{H,p+1} = \frac{\Delta t}{C_w^{H,p}} \left[\frac{1}{R_{gas,wall}} (T_{g,in}^p - T_w^{H,p}) + \sum_{h=-1}^1 \frac{1}{R_{rad,c}^{H,H+h,p}} (T_w^{H+h,p} - T_w^{H,p}) + \dot{q}_{reg}^p \right] + T_w^{H,p} \quad (3.18)$$

Para el cálculo de las temperaturas de superficie (interna y externa), hacemos uso del esquema de la Figura 3.4.

$$T_{sup,int}^{p+1} = \frac{\Delta t}{C_{sup,int}^p} \left[\frac{T_w^{H,p} - T_{sup,int}^p}{R_{rad}^{H,p}} + \frac{T_{sup,ext}^p - T_{sup,int}^p}{R_{sup}^p} \right] + T_{sup,int}^p \quad (3.19)$$

$$T_{sup,ext}^{p+1} = \frac{\Delta t}{C_{sup,ext}^p} \left[\frac{T_{ext} - T_{sup,ext}^p}{R_{ext}^p} + \frac{T_{sup,ext}^p - T_{sup,int}^p}{R_{sup}^p} \right] + T_{sup,ext}^p \quad (3.20)$$

En ambas ecuaciones se hace uso de la resistencia denominada R_{sup}^p , cuya expresión es la mostrada en la Ecuación 3.21. Además, el término \dot{q}_{reg}^p presente en la Ecuación 3.18 hace referencia al calor generado en el proceso de regeneración.

$$R_{sup}^p = R_{mat}^p + \frac{R_{gap,c}^p R_{gap,r}^p}{R_{gap,c}^p + R_{gap,r}^p} + R_{can}^p \quad (3.21)$$

A la hora de estudiar casos estacionarios, el hecho de que el modelo considere la existencia de inercia térmica en los elementos, retrasa mucho la convergencia y por tanto necesita más tiempo y más gasto computacional. Para agilizar los cálculos, existe la posibilidad de que el modelo no considere las diferentes inercias térmicas, es lo que se denomina el método de *convergencia rápida*. Este método, asume desde el primer momento que existe un equilibrio térmico en el filtro entre la energía que aporta el fluido y la que se cede al exterior. Asumiendo este método de cálculo, las expresiones de las variables de interés se simplifican de acuerdo a las Ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.24.

$$\bar{T}_w^H = \frac{\sum_{p=1}^n \frac{T_{g,in}^p}{R_{gas,wall}} \Delta t^p + \sum_{h=-1}^{n+1} \frac{T_w^{H+h} t_c}{R_{rad,c}^{H,H+h,p} + \sum_{p=1}^n \dot{q}_{reg}^p \Delta t^p}}{\sum_{p=1}^n \frac{1}{R_{gas,wall}} \Delta t^p + \sum_{h=-1}^{n+1} \frac{t_c}{R_{rad}^{H,H+h,p}}} \quad (3.22)$$

$$\bar{T}_{sup,int} = \frac{\frac{\bar{T}_w^H}{R_{rad,c}^H} + \frac{\bar{T}_{sup,ext}}{R_{sup}}}{\frac{1}{H} R_{rad,c}} + \frac{1}{R_{sup}} \quad (3.23)$$

$$\bar{T}_{sup,ext} = \frac{\frac{T_{ext}}{R_{ext}} + \frac{\bar{T}_{sup,int}}{R_{sup}}}{\frac{1}{R_{ext}} + \frac{1}{R_{sup}}} \quad (3.24)$$

3.3 Submodelo de filtrado

El uso de los filtros de partículas diésel tiene como principal finalidad la retención de las partículas emitidas por el motor en su interior. Esto se lleva a cabo mediante la deposición de las partículas sobre una superficie colectora cuando el flujo que las contiene atraviesa el filtro.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el filtrado de un DPF tiene dos regímenes bien diferenciados y que dependen del nivel de carga que éste tenga.

En primer lugar, cuando el filtro se encuentra limpio el régimen de filtrado que tiene lugar es el de lecho profundo, en el cual las partículas se depositan sobre los orificios porosos. En este régimen de filtrado, existen tres tipos de mecanismos de deposición. De forma esquemática se pueden apreciar las diferencias entre ellos en la Figura 3.5.

- **Deposición por difusión Browniana.** Este mecanismo afecta principalmente a las partículas de menor tamaño, siendo predominante en aquellas cuyo diámetro es inferior a los $0,3 \mu m$. Esto se debe a que este tipo de partículas no siguen de forma uniforme la trayectoria marcada por las líneas de corriente, sino que siguen un movimiento oscilatorio alrededor de ellas. Esto origina que las partículas terminen difundiéndose en la superficie del medio colector.
- **Deposición por intercepción.** Dicho mecanismo adquiere importancia en partículas de mayor tamaño, cuyo diámetro ronda $1 \mu m$. Estas partículas son capaces de seguir la trayectoria de las líneas de corriente. De esta forma, cuando la trayectoria pasa próxima al elemento colector, las partículas quedan retenidas.
- **Deposición inercial o por impacto.** Este mecanismo se da en partículas de diámetro superior a $1 \mu m$, las cuales no son capaces de seguir la trayectoria de la línea de corriente y terminan impactando sobre la superficie colector. Debido a que el tamaño de las partículas que generalmente emiten los motores diésel no es tan elevado, este mecanismo no adquiere mucha importancia en los DPF.

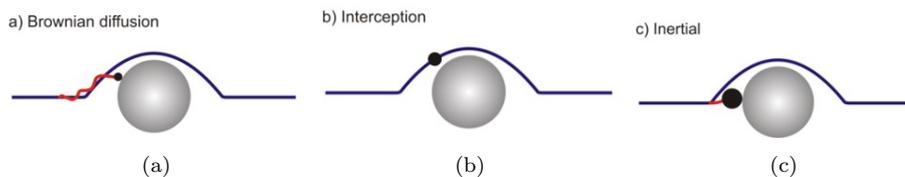


Figura 3.5: Mecanismos de deposición de las partículas.

Una vez los poros se han obstruido, las partículas comienzan a acumularse en torno a los orificios formando pequeños cúmulos. Conforme las partículas continúan atravesando el filtro, se va generando una capa de partículas sobre toda la superficie del canal de entrada. De esta manera, el filtrado de lecho profundo pierde relevancia frente al superficial, que comienza a ser predominante. Con la capa de partículas formada, el principal agente filtrante es dicha capa. Debido a que el diámetro de los poros de la capa es menor que el de las propias partículas, el mecanismo de filtrado es similar al del tamizado. La evolución desde el régimen de filtrado superficial hasta la saturación del filtro, se puede apreciar en la Figura 3.6.

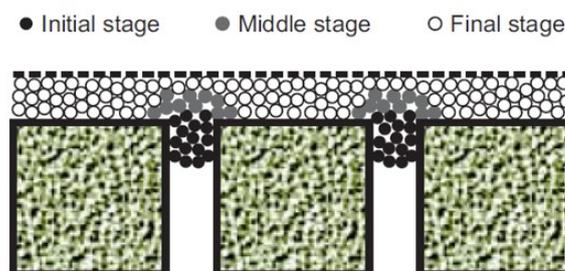


Figura 3.6: Evolución de la deposición de hollín durante el filtrado.

El cálculo de la masa de hollín depositada en el filtro está relacionado con el cálculo de la eficiencia de filtrado. Para ello es necesario calcular la eficiencia de filtrado de una unidad colectora en los diferentes mecanismos de filtrado, las cuales se explican a continuación.

3.3.1 Difusión Browniana

La eficiencia de este mecanismo de filtrado toma la expresión de la Ecuación 3.25.

$$\eta_{DBi} = 3,5 \frac{\epsilon_w}{K_{KW}} Pe_{wi}^{-2/3} \quad (3.25)$$

En la Ecuación 3.25, el término ϵ_w hace referencia a la porosidad de la pared porosa, mientras que K_{KW} es el factor de Kuwabara dado por la Ecuación 3.8. Por otro lado, el número de Peclet Pe_{wi} relaciona el transporte de partículas difusivo con el convectivo a partir de la Ecuación 3.26.

$$Pe_{wi} = \frac{u_{wi} d_{ci}}{D_{pi}} \quad (3.26)$$

El coeficiente de difusión D_{pi} es dependiente de la temperatura, viscosidad del gas, diámetro de la partícula y el efecto de deslizamiento (introducido mediante el factor corrector *Stokes-Cunningham*).

3.3.2 Deposición por intercepción

La eficiencia de este mecanismo viene dada por la Ecuación 3.27.

$$\eta_{fRi} = 1,5 \frac{N_{Ri}^2}{1 + N_{Ri}^{\frac{3-2\epsilon_w}{3\epsilon_w}}} \frac{\epsilon_w}{K_{KW}} \quad (3.27)$$

La eficiencia de filtrado por intercepción está dominada por el parámetro de intercepción, definido según la Ecuación 3.28.

$$N_{Ri} = \frac{d_{part,i}}{d_{c,w}} \quad (3.28)$$

Este parámetro relaciona el diámetro de la partícula ($d_{part,i}$) con el diámetro medio de la unidad colectora ($d_{c,w}$)

3.3.3 Deposición inercial

Tal y como se ha comentado anteriormente, este mecanismo de filtrado no es muy común en los filtros de partículas diésel. Sin embargo, el cálculo de su eficiencia viene dominado por el número de Stokes de acuerdo a las Ecuaciones 3.29 y 3.30.

$$\eta_{fIi} = \frac{St_i^2}{(St_i \pm 0,25)^2} \quad (3.29)$$

$$St_i = \frac{SCF_w \rho_{s,w} u_{i,w} d_{part,i}^2}{9 \mu d_{c,w}} \quad (3.30)$$

El número de Stokes, es un número adimensional a través del cual se caracteriza el comportamiento de una partícula en suspensión en un fluido. Este número, incluye una corrección por deslizamiento introducido por el factor SCF .

3.3.4 Eficiencia global

Una vez estudiados los diferentes mecanismos de filtrado así como las eficiencias que los caracterizan, la eficiencia del proceso global se puede obtener aplicando la regla de la independencia. La expresión de la eficiencia global viene dada por la Ecuación 3.31.

$$\eta_{DRI} = \eta_{fDi} + \eta_{fRi} + \eta_{fIi} - (\eta_{fDi}\eta_{fRi} + \eta_{fRi}\eta_{fIi} + \eta_{fDi}\eta_{fIi}) + \eta_{fDi}\eta_{fRi}\eta_{fIi} \quad (3.31)$$

A partir de la Ecuación 3.31 se obtiene la eficiencia global de una esfera aislada. A partir de ésta se puede obtener la eficiencia de filtrado del lecho de partículas esféricas mediante la Ecuación 3.32.

$$E_{f,wi} = 1 - e^{-\frac{3\eta_{DRI}(1-\epsilon_w)w_w f_{w,set} S_c}{2\epsilon_w d_{c,w}}} \quad (3.32)$$

3.4 Submodelo de regeneración

El uso de forma continuada de los filtros de partículas diésel manteniendo las prestaciones solamente es posible si se encuentra una estrategia que permita descargar los filtros de hollín. Como se ha comentado anteriormente, este tipo de estrategias son conocidas como regeneraciones y existen multitud de formas de aplicarse.

El submodelo de regeneración empleado en VEMOD está basado en la conservación de las especies químicas en los nodos de discretización. De acuerdo a un modelo cero-dimensional, la discretización de los canales se reduce a un único nodo. La discretización axial, sí tiene en cuenta la existencia de diferentes regiones en dicha dirección, las cuales se muestran en la Figura 3.7.

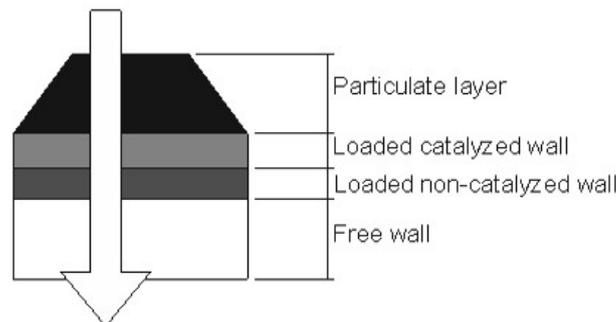
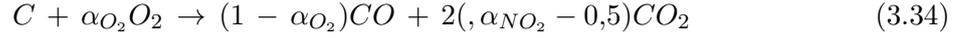


Figura 3.7: Regiones de acumulación de hollín.

En este submodelo se consideran dos especies oxidantes diferentes, el NO_2 y el O_2 . El primero de los oxidantes es predominante cuando las temperaturas son bajas, mientras que el segundo predomina cuando las temperaturas son altas o cuando el filtro está catalizado. Las ecuaciones químicas que expresan la reactividad del NO_2 y O_2 son respectivamente las Ecuaciones 3.33 y 3.34.





De acuerdo a la Figura 3.7, las regiones de acumulación de hollín en un filtro son las siguientes:

- **Capa de partículas.** Es la región que se forma con la acumulación de hollín y por tanto, su espesor es variable. Su existencia no se da siempre, pues solamente existe cuando el filtro está saturado.
- **Pared porosa catalizada.** En determinados filtros de partículas diésel, se impregna la pared porosa con un agente catalizador. Este agente provoca una reducción en la energía de activación de las reacciones de combustión del hollín, y por tanto un aumento en la reactividad química.
- **Pared porosa sin catalizar.** La reactividad de esta región es mucho menor que la de la capa catalizada. Además la concentración de NO_2 y O_2 en el gas que presenta, es mucho menor.

3.4.1 Ecuación de conservación de las especies

En la ecuación de conservación de las especies empleada, la reactividad de las partículas de hollín sobre las concentraciones de las diferentes especies presentes en el gas se define por medio de la ecuación de transporte de especies químicas unidimensional, expresada en la Ecuación 3.35.

$$\dot{\omega}_n = \frac{\partial(\rho Y_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_n)}{\partial z} \quad (3.35)$$

En el submodelo, se asume que las reacciones son procesos instantáneos, y por tanto el flujo tiene un comportamiento cuasi-estacionario en el interior del medio poroso. Esta hipótesis hace desaparecer la dependencia temporal en la Ecuación 3.35. Además, asumiendo una cinética química de orden 1 respecto al reactivo, el término fuente $\dot{\omega}_n$ se expresa según la Ecuación 3.36.

$$\dot{\omega}_n(Y_n) = -S_p k_n \alpha_n Y_n \rho \quad (3.36)$$

En la Ecuación 3.36, el término S_p es la superficie específica del hollín y k_n es la constante cinética calculada a partir de una ecuación de *Arrhenius*.

$$k_n = A_n e^{\frac{E_{a_n}}{RT}} \quad (3.37)$$

Mediante la relación entre la fracción másica Y_n y la molar X_n dada por la Ecuación 3.38, es posible expresar la Ecuación 3.35 en términos de la variación de fracción molar. Esta relación depende del peso molecular promedio del gas \overline{PM} y del peso molecular del reactivo en cuestión PM_n .

$$X_n = \frac{\overline{PM}}{PM_n} Y_n \quad (3.38)$$

Eliminando la derivada temporal de acuerdo a la hipótesis de flujo cuasi-estacionario, la ecuación de conservación de las especies queda planteada según la variación de la fracción molar en dirección axial.

$$\dot{\omega}_n(X_n) = \frac{\partial(u X_n)}{\partial z} \quad (3.39)$$

A continuación, se explican las diferentes etapas de las reacciones.

3.4.2 Etapas de las reacciones

Debido a que la reacción química de oxidación se da entre una especie en fase gas y otra en fase sólida, éstas tienen lugar en la interfase sólido-gas de la partícula porosa. En este tipo de reacciones es necesario tener en cuenta en el submodelo las siguientes etapas en el correspondiente orden.

Etapa de difusión interna

Las especies reactivas difunden internamente desde la superficie externa de la partícula hasta la superficie interior de los microporos. Debido a que esta difusión se da en un medio poroso, los mecanismos de difusión predominantes que tienen lugar son la difusión molecular y la de Knudsen. De esta manera, la difusión efectiva es dependiente de las difusiones correspondientes a dichos mecanismos, de acuerdo a la Ecuación 3.40.

$$D_{ef_n} = \left(\frac{1}{D_{m_n}^*} + \frac{1}{D_{k_n}} \right)^{-1} \quad (3.40)$$

Una vez obtenida la difusión efectiva, se puede calcular el módulo de *Thiele*. Este número adimensional muestra la relación entre la cinética química por difusión sin limitaciones y la velocidad de difusión. Su expresión viene dada por la Ecuación 3.41.

$$\phi_n = \frac{L_{hollin}}{3} \sqrt{\frac{k_n}{D_{ef_n}}} \quad (3.41)$$

A partir de este módulo, se define el rendimiento de la difusión de una partícula de hollín.

$$\eta_n = f_c \frac{1}{\phi_n} \left[\frac{1}{\tanh(3\phi_n)} - \frac{1}{3\phi_n} \right] \quad (3.42)$$

Para la Ecuación 3.42 del rendimiento de la difusión, se considera que la partícula de hollín posee un comportamiento químico homogéneo.

Etapa de adsorción

Puesto que las reacciones químicas se dan en la superficie de las partículas, es preciso relacionar la concentración de las especies en el gas con la concentración superficial. Esta relación se lleva a cabo mediante el uso de isothermas de adsorción, asumiendo el equilibrio entre las concentraciones en la superficie y en la fase gas. Por tanto, la velocidad de adsorción es despreciable frente a la de reacción química.

Para la adsorción del NO_2 y del O_2 en el hollín, se ha considerado que la partícula es homogénea (al igual que en la etapa de difusión interna) y por ello, se ha elegido la isoterma de *Langmuir* para modelar la adsorción. La expresión de esta isoterma viene dada por la Ecuación 3.43.

$$\theta_n = \frac{K_{s,n} X_n}{1 + K_{s,n} X_n} \quad (3.43)$$

En esta expresión, el subíndice s hace referencia a la especie considerada, θ_n es la fracción de cobertura de la superficie, $K_{s,n}$ es la constante de equilibrio de adsorción/desorción en la superficie, y X_n es la fracción molar.

$$\frac{\partial X_s}{\partial z} = - \frac{K_{s,n} X_n}{1 + K_{s,n} X_n} \frac{S_p k_n \alpha_n \eta}{u_w} \quad (3.44)$$

Considerando todas las etapas descritas, la expresión del término fuente que las tiene en cuenta es la Ecuación 3.44.

3.4.3 Masa consumida de hollín

Aplicando estequiometría, el modelo calcula la cantidad de hollín consumida por unidad de tiempo en cada una de las diferentes regiones.

Conocida la variación de fracción molar en valor absoluto de cada especie reactiva en el medio poroso (ΔX_{NO_2} , ΔX_{O_2}), se obtiene la variación molar de los productos de la reacción según la Ecuación 3.45, la cual es dependiente de los parámetros a_{n,NO_2} y a_{n,O_2} . Estos parámetros representan el cociente entre el coeficiente estequiométrico de la especie n y del coeficiente estequiométrico de la especie oxidante en cada caso.

$$\Delta X_n = a_{n,NO_2} \Delta X_{NO_2} + a_{n,O_2} \Delta X_{O_2} \quad (3.45)$$

Según las Ecuaciones 3.46 y 3.47, se pueden obtener los caudales molares consumidos, que son función de la velocidad de filtrado, del área de filtrado, de la concentración molar del gas y de la variación de fracción molar entre entrada y salida.

$$\frac{\partial n_{NO_2}}{\partial t} = \Delta X_{NO_2} u_w A_f C_{Gas} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial n_{O_2}}{\partial t} = \Delta X_{O_2} u_w A_f C_{Gas} \quad (3.47)$$

La masa de hollín consumida se conoce a partir de la Ecuación 3.48, que es dependiente del paso temporal y de la estequiometría de cada reacción.

$$m_{c,Reg} = PM_c \Delta t \left(\frac{1}{a_{NO_2}} \frac{\partial n_{NO_2}}{\partial t} + \frac{1}{a_{O_2}} \frac{\partial n_{O_2}}{\partial t} \right) \quad (3.48)$$

Herramientas experimentales

La correcta validación del modelo de filtros de partículas diésel desarrollado hace necesaria la comparativa con datos experimentales. Estos datos han sido obtenidos en ensayos realizados en estudios anteriores al aquí expuesto.

En los estudios previos se ha hecho uso de las instalaciones pertenecientes al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, bajo la supervisión de técnicos cualificados y autorizados para su uso. Para el desarrollo de este trabajo, únicamente se ha hecho uso de los datos experimentales, sin ser parte del trabajo su obtención. No obstante, parece interesante comentar y explicar las instalaciones empleadas.

4.1 Banco de flujo frío

Uno de los objetivos del trabajo es ajustar el submodelo de pérdida de presión a unos datos experimentales. El banco de flujo, permite caracterizar dicha pérdida de presión en función del gasto másico que atraviesa el filtro. En la Figura 4.1 se puede apreciar la instalación de la que se hizo uso.



Figura 4.1: Montaje de la instalación del banco de flujo.

Los ensayos que se llevaron a cabo fueron realizados con flujo en impulsión, y por tanto, inyectando el flujo de aire en el sentido directo del filtro de partículas. El filtro se encuentra limpio y por tanto, descargado. El elemento que permite controlar el caudal másico es un

compresor situado aguas arriba de un depósito de remanso, el cual está conectado directamente con el conducto de entrada del filtro. La presencia del depósito se debe a que homogeneiza el flujo y así se evitan posibles fluctuaciones que puedan alterar las medidas.

La temperatura de ensayo fue similar a la temperatura ambiente de la sala. Por otro lado, el flujo de aire máximo que es capaz de aportar el compresor alcanza los $800 - 850 \text{ kg/h}$, dependiendo de la pérdida de presión que se genere. Se realizaron ensayos fijando el gasto másico en un rango comprendido entre $40 - 800 \text{ kg/h}$.

La pérdida de presión medida corresponde al sistema completo incluyendo los tubos de entrada y salida, y corresponde a la diferencia de presiones entre el depósito de remanso y la presión ambiental. La presencia de los tubos de entrada y salida, enmascara la pérdida de presión del filtro pues ambos introducen pérdidas que se deben tener en cuenta. Sin embargo, su presencia es necesaria para caracterizar de forma precisa el comportamiento del sistema.

4.1.1 Pérdida de presión del sistema de post-tratamiento

Para obtener la pérdida de presión real que se produce en el filtro, es necesario caracterizar las pérdidas que se producen en los canales de entrada y salida. En el ensayo del sistema completo se tienen las siguientes contribuciones:

1. Pérdida por descarga del depósito al conducto de entrada, y la debida a la fricción.
2. Pérdida en el DPF debida a las tres contribuciones ya comentadas.
3. Pérdida por descarga del conducto de entrada a la atmósfera, y la debida a la fricción.

Posteriormente, se realiza un ensayo sobre el conducto de entrada solamente, teniendo las siguientes pérdidas de presión:

1. Pérdida por descarga del depósito al conducto.
2. Pérdida por fricción en el conducto.
3. Pérdida por descarga a la atmósfera.

El cálculo completo de la pérdida de presión se hace de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 4.2.

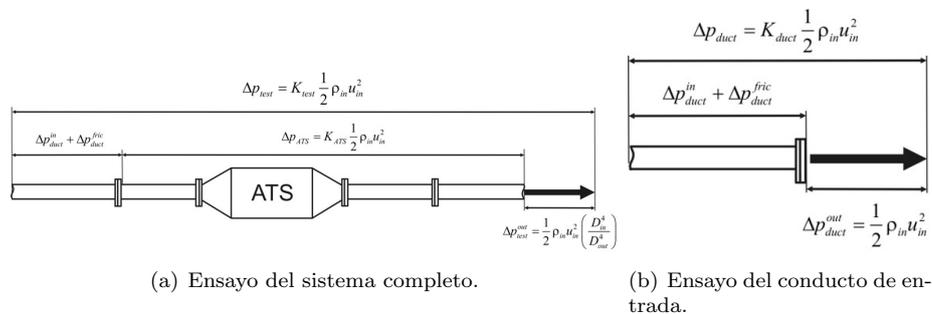


Figura 4.2: Esquema ensayo ATS.

La pérdida de presión debida a la descarga del flujo a la atmósfera en el primer ensayo, coincide con la pérdida de energía cinética, debido a que el flujo está totalmente desarrollado. A la

pérdida de presión global del primer ensayo Δp_{Test} , se resta la pérdida global del segundo Δp_{Duct} y la de descarga a la atmósfera ya mencionada Δp_{Test}^{Out} . Sin embargo, al restar la pérdida del ensayo sobre el conducto de entrada, se está restando una pérdida de presión debida a la descarga de ese ensayo, Δp_{Duct}^{Out} , con lo que posteriormente hay que añadirla. La Ecuación 4.1 recoge el proceso explicado.

$$\begin{aligned} \Delta p_{ATS} &= (\Delta p_{Test} - \Delta p_{Out}) - (\Delta p_{Test}^{Out} - \Delta p_{Duct}^{Out}) \\ \Delta p_{Test}^{Out} &= \frac{1}{2} \rho_{in} u_{in}^2 \left(\frac{D_{in}^4}{D_{out}^4} \right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

La pérdida de presión obtenida como Δp_{ATS} , es de la que se hace uso a la hora de validar el submodelo desarrollado.

4.2 Banco de flujo caliente y pulsante

Para una caracterización de la pérdida de presión en condiciones más realistas, se hace uso del banco de turbos, que usualmente se emplea para caracterización acústica. Esta instalación genera un flujo de aire pulsante, semejante al generado por un motor en funcionamiento, a diferentes temperaturas.

El esquema de la instalación se expone en la Figura 4.3. Dicha instalación se compone de un compresor que proporciona el caudal másico requerido, calentado posteriormente por calentadores hasta la temperatura establecida. El carácter pulsante del flujo es introducido mediante una electro-válvula rotativa, que permite controlar la frecuencia de los pulsos actuando sobre su velocidad de rotación. Otro elemento necesario en la instalación es la válvula *by-pass*, la cual permite derivar parte del flujo para que no atraviese la válvula rotativa. De esta manera, se puede controlar la amplitud de los pulsos.

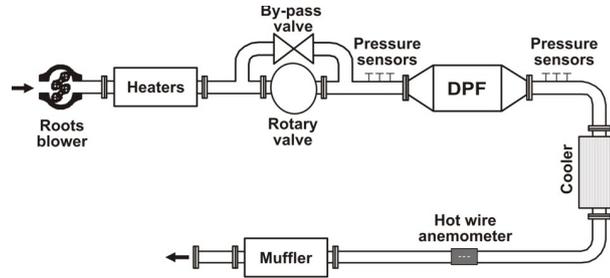


Figura 4.3: Esquema del banco de flujo caliente.

A la salida de la válvula *by-pass* se sitúa un sensor de presión convencional, el cual se empleó para medir el valor estacionario del flujo pulsante. Por otro lado, los tres sensores situados a la entrada y a la salida del filtro, conectados a un osciloscopio son capaces de medir la presión instantánea.

El carácter pulsante del flujo de aire, produce una reflexión del flujo en el sistema de post-tratamiento. Se genera por tanto un frente de ondas constituido por las siguientes ondas:

1. Onda incidente sobre el filtro.
2. Onda reflejada en el filtro.
3. Onda transmitida por el filtro.

4. Onda reflejada por la salida de la instalación.

Esto queda representado en el esquema de la Figura 4.4.

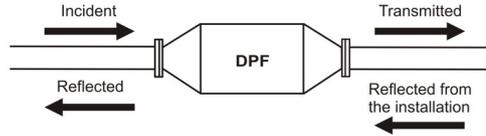


Figura 4.4: Esquema del frente de ondas producido.

Los casos que fueron ensayados se indican en la Tabla 4.1. Se encuentran agrupados de acuerdo a la frecuencia de ensayo y posteriormente según la amplitud del mismo. Gran parte de los ensayos fueron realizados tanto para 33 Hz como para 100 Hz.

Tabla 4.1: Casos estudiados en el banco de flujo caliente.

Frecuencia [Hz]	Amplitud [mbar]	Gasto másico [kg/h]
33 y 100	100	150
		300
		460
		500
	180	300
		460
		500
	250	460
500		
100	400	300
		460
		500

4.3 Banco motor

Hasta ahora, las instalaciones empleadas nos han permitido caracterizar la pérdida de presión del filtro en diferentes condiciones. Para poder caracterizar los procesos de filtrado y regeneración, se necesita obtener datos experimentales de procesos de carga del filtro. Para ello se hace uso de un banco motor.

Un ensayo de este tipo, consiste en poner en funcionamiento un motor real, en unas determinadas condiciones de funcionamiento. El motor diésel empleado para el ensayo está alimentado con un turbocompresor y es de tipo *High-Speed Direct Injection* o HSDI. Las principales características del motor se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros principales del motor.

Vol. desplazado	1997 cm^3
Nº cilindros	4
Nº válvulas	4 por cilindro
Potencia máxima	100 kW
Par máximo	320 , Nm

Modelado y resultados

En este capítulo se va a desarrollar y detallar el proceso que se ha seguido para conseguir el ajuste de los diferentes submodelos que conforman el modelo del filtro de partículas en VEMOD. La validación se ha hecho frente a resultados experimentales obtenidos en trabajos anteriores, los cuales han sido proporcionados.

La validación de los submodelos se ha realizado frente a los resultados experimentales obtenidos en el ensayo de dos equipos diferentes. La Tabla 5.1, recoge los datos y características de los filtros de partículas de ambos equipos.

El modelo de DPF empleado en los cálculos está implementado en el software VEMOD, sin embargo, en el desarrollo del proyecto se ha hecho uso del modelo de forma aislada. A la hora de lanzar un cálculo, bien sea estacionario o transitorio, se hace uso de las condiciones de contorno a las cuales está expuesto el filtro DPF, siendo en este caso la presión de entrada y salida del filtro, la temperatura de entrada del filtro, y las concentraciones molares de una serie de componentes químicos, también a la entrada del filtro. En el caso de que estuviese integrado en el software VEMOD, dichas condiciones de contorno serían las calculadas en los dispositivos situados antes del DPF, pero en este caso, se hace uso de las medidas experimentales. De esta manera, ante unas condiciones de contorno experimentales, se busca que el modelo sea capaz de reproducir de forma eficaz los procesos y fenómenos que se dan en la realidad, contrastando los resultados con las mediciones experimentales.

Tabla 5.1: Datos de los equipos ensayados.

		Equipo 1	Equipo 2
Longitud	m	0.1047	0.2
Diámetro	m	0.1728	0.132
Volumen	l	2.44	2.74
Densidad de celdas	$cpsi$	200	200
Número de canales	—	14870	4246
Espesor de pared w_w	mm	0.404	0.31
Lado del canal α	mm	0.850	1.486

5.1 Validación submodelo de pérdida de presión

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, la pérdida de presión que se da en un filtro de partículas, se debe a tres contribuciones diferentes: inercial, de fricción y de Darcy, por atravesar un medio poroso. El ajuste de la pérdida de presión se hace para conseguir modelar el flujo másico que trasiega el DPF, ya que la presión en entrada y salida de éste, son las variables de entrada del modelo.

En primer lugar, se ajustarán las tres contribuciones por separado, ajustando para cada caso, las constantes o factores necesarios. Posteriormente, se comprobará que el flujo másico obtenido con el modelo se ajusta a los valores experimentales.

Se van a hacer dos ajustes independientes, uno para cada equipo ensayado, para la posterior validación.

5.1.1 Pérdida de presión por fricción

El modelado de esta contribución al proceso de pérdida de presión se realiza a través de la constante de fricción. Debido a que el modelo de pérdida de presión empleado en VEMOD, deriva de uno anterior empleado en OpenWAM, este parámetro se ajustó de acuerdo a la literatura existente. La Tabla 5.2, recoge el valor de este parámetro. Este valor es el mismo para los dos ajustes realizados.

Tabla 5.2: Resultados del ajuste de la constante de fricción.

Parámetro	Valor
k_{fr}	1/3

5.1.2 Pérdida de presión debida a la contribución de Darcy

El ajuste de la pérdida de presión debida a esta contribución, pasa por el cálculo de la constante de permeabilidad k_w . Se sabe que la pérdida de presión total es una suma de tres contribuciones diferentes, dos de ellas dependen de forma lineal con caudal másico, mientras que la tercera depende de forma cuadrática. Las que dependen de forma lineal son la contribución de la fricción, la cual ya es conocida puesto que la constante de fricción ha sido ajustada, y la contribución de Darcy.

El procedimiento que se ha seguido para el ajuste ha sido el mismo para los dos ajustes, de forma esquemática es el siguiente:

1. Considerar la pérdida de presión descontando la parte debida a la contribución de fricción.
2. Dividir esta pérdida de presión entre el caudal, quedando por tanto la ecuación de una recta, tal y como indica la Ecuación 5.1.

$$\frac{\Delta P^*}{Q} = bQ + a \quad (5.1)$$

3. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, el término independiente de la ecuación de la recta depende de la contribución de Darcy, y por lo tanto de la permeabilidad. La Ecuación 5.2 nos da la expresión de la permeabilidad en función de los parámetros del DPF y del término a del ajuste lineal.

$$k_w = \frac{w_w}{\alpha} \frac{1}{\frac{a}{\frac{\mu(\alpha+w_w)^2}{2V_{DPF}}} - \frac{8F_{FF}L^2}{3\alpha^4}} \quad (5.2)$$

La permeabilidad no es un parámetro de entrada del modelo y por lo tanto, es necesario encontrar una manera indirecta de ajustarlo. Para ello se emplea la correlación de *Kuwabara*, dada por la Ecuación 3.8, para ajustar la porosidad ϵ y el diámetro medio del poro d_c . Ajustando estos parámetros, se busca conseguir que la permeabilidad experimental y la predicha por la correlación sean iguales.

En la Figura 5.1 se muestra la representación gráfica de la evolución de $\Delta p/Q$ con respecto al caudal, siendo la pérdida de presión empleada la debida a las contribuciones de Darcy e inercial. En esta gráfica se ve claramente que la tendencia es lineal en ambos ensayos.

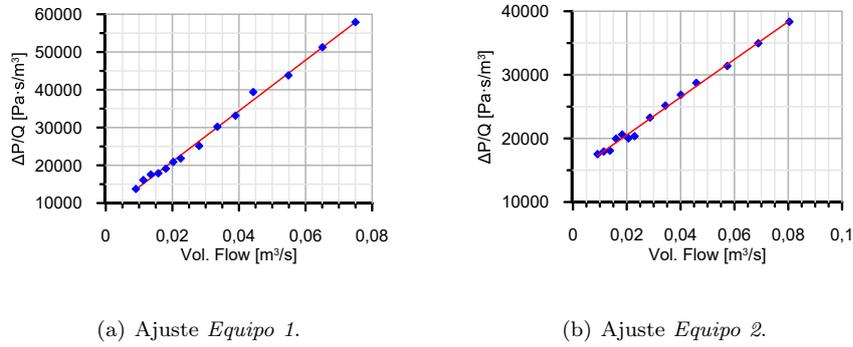


Figura 5.1: Ajuste $\Delta P/Q$ para ambos equipos.

La ecuación de esta recta, de la cual se hace uso del término independiente, es la indicada por las Ecuaciones 5.3 y 5.4 para el ajuste del *Equipo 1* y del *Equipo 2*, respectivamente.

$$\frac{\Delta P^*}{Q} = 671128,75 Q + 7556,84 \quad (5.3)$$

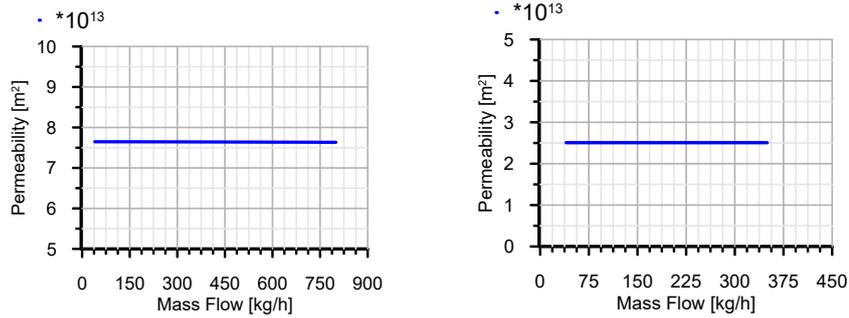
$$\frac{\Delta P^*}{Q} = 297306,56 Q + 14585,09 \quad (5.4)$$

Aplicando la Ecuación 3.8, se obtiene la permeabilidad de la pared. A partir de este valor, y haciendo uso de la correlación de *Kuwabara*, se ajustan los valores de porosidad y diámetro del poro. Todos estos valores, se recogen en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Resultados del ajuste de la permeabilidad.

Parámetro	Valor (<i>Equipo 1</i>)	Valor (<i>Equipo 2</i>)
k_w	$7,641 \cdot 10^{-13}$	$2,461 \cdot 10^{-13}$
ϵ	0,4	0,42
d_c	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
k_w (correlación)	$7,644 \cdot 10^{-13}$	$2,468 \cdot 10^{-13}$

A continuación, en la Figura 5.2, se demuestra gráficamente que la permeabilidad es constante para todo el rango de caudal ensayado. De esta manera se justifica que el ajuste de la permeabilidad, se haga a través de la porosidad y del diámetro medio del poro.



(a) Ajuste *Equipo 1*.

(b) Ajuste *Equipo 2*.

Figura 5.2: Valores de permeabilidad para ambos equipos.

5.1.3 Pérdida de presión inercial

Una vez ajustada la pérdida de presión debida a Darcy y a la fricción, solamente queda caracterizar la debida a los fenómenos inerciales que se dan en la entrada y salida de los canales del DPF. Para el ajuste de esta contribución, se varía la constante inercial ξ_t con el objetivo de reproducir fielmente el gasto másico experimental que trasiega el DPF. La forma de proceder con la constante inercial es la siguiente, idéntica para ambos ajustes:

1. Se ajusta cada caso de estudio de forma independiente, de forma que se consigue una constante inercial variable con el gasto másico.
2. Se hace un ajuste promedio, obteniéndose una misma constante inercial para todos los casos.

El resultado de los ajustes, se recoge en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Resultados del ajuste de la constante inercial.

Parámetro	<i>Equipo 1</i>	<i>Equipo 2</i>
ξ_t	55,5	10,02

Cabe destacar que la constante inercial, tiene una gran dependencia con respecto a la geometría del equipo de ensayo. Debido a que la instalación de ensayo no fue la misma para ambos equipos, los valores de la constante empleados son tan diferentes entre sí.

5.1.4 Validación del ajuste

Una vez ajustadas las tres contribuciones, se hace uso del modelo VEMOD. Para verificar que el ajuste es correcto, en el modelo VEMOD se imponen las presiones de entrada y salida experimentales, y se compara el gasto másico que el modelo proporciona con el experimental. La Figura 5.3 muestra que el ajuste realizado, modela de forma correcta el gasto másico en el rango de gasto másico de ambos ensayos.

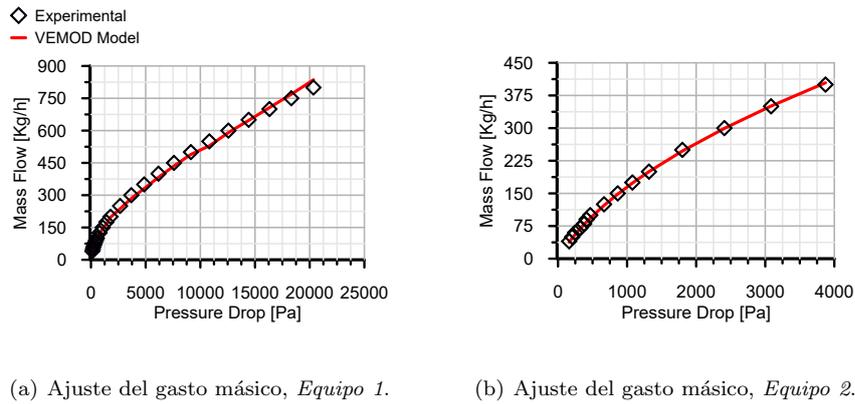


Figura 5.3: Ajustes del gasto másico en ambos equipos.

Es también interesante comprobar cómo afecta cada una de las diferentes contribuciones de pérdida de presión, sobre la pérdida total. La Figura 5.4 muestra estas contribuciones de forma gráfica.

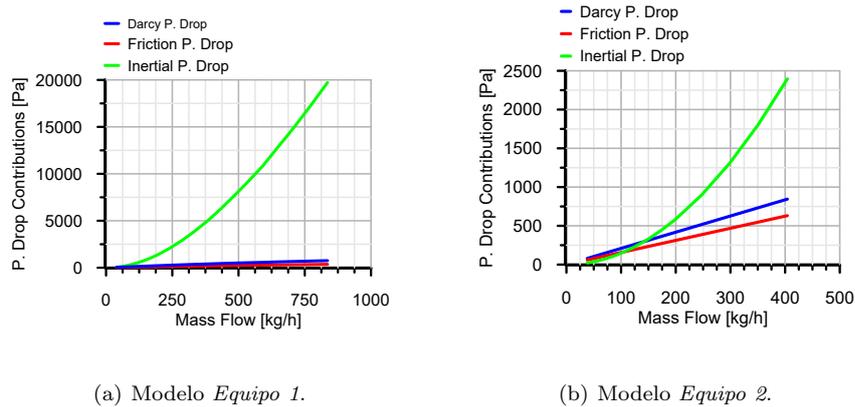


Figura 5.4: Contribuciones a la pérdida de presión total en ambos equipos.

En ambas gráficas, se observa que el peso de la contribución inercial se vuelve muy importante para elevados gastos másicos, siendo las otras dos prácticamente despreciables. Esto tiene cierta lógica, pues la contribución inercial depende del caudal de forma cuadrática.

5.2 Validación submodelo de transmisión de calor

Una vez ajustado el submodelo de pérdida de presión para los dos equipos ensayados, se procede a ajustar el submodelo de transmisión de calor. El submodelo se ajusta a través de un parámetro denominado *factor de corrección radial* (k_{rad}). Este factor modifica el valor de la resistencia $R_{rad}^{H,p}$, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 3.3. La Ecuación 5.5, muestra la dependencia de esta resistencia con respecto al parámetro k_{rad} , objetivo del ajuste.

$$R_{rad} = \ln \left(\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right) \frac{1}{2\pi k_{rad}} \quad (5.5)$$

La validación se ha hecho frente a los datos experimentales del ensayo correspondiente solamente del *Equipo 2*, y por lo tanto se ha ajustado únicamente el modelo correspondiente a éste. Se han realizado diferentes ensayos para llevar a cabo la validación:

1. Ensayos en banco de flujo frío, con gasto másico continuo.
2. Ensayos en banco de flujo caliente con transitorios térmicos: tres procesos de calentamiento y tres casos de enfriamiento.
3. Ensayos en banco de flujo caliente pulsante, considerando el valor medio del flujo pulsante, con el filtro en frío y en caliente.
4. Ensayos en banco de flujo caliente pulsante, considerando el flujo pulsante explícitamente, con el filtro en caliente.

El modelo se ajusta para reproducir la transmisión de calor considerando solamente un haz de canales entrada-salida, y posteriormente aumentando la discretización radial a 10 haces.

5.2.1 Casos estacionarios, 1 haz

Puesto que el ajuste corresponde con el *Equipo 2*, la constante inercial a usar es la obtenida en la sección anterior. Sin embargo, debido a que el trasiego de flujo másico en el interior del filtro afecta a la transferencia de calor, se ha optado por probar con una nueva constante inercial, lo cual permitirá comprobar la sensibilidad del submodelo con respecto a este parámetro. Ambas constantes, junto al *factor de corrección radial*, se recogen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Parámetros del ajuste.

Parámetro	Valor
$\xi_{t,1} (K_1)$	9,5
$\xi_{t,2} (K_2)$	10,02
k_{rad}	1,3

La validación del ajuste se realiza comparando las siguientes variables (representadas todas ellas frente a la pérdida de presión):

1. La temperatura de salida del DPF obtenida en los ensayos y la proporcionada por el modelo.
2. La temperatura de superficie del DPF obtenida en los ensayos y la proporcionada por el modelo.
3. El gasto másico que atraviesa el DPF, tanto experimental como calculada mediante el modelo.

La Figura 5.5 muestra las dos primeras validaciones, cada una de ellas realizada con las dos constantes inerciales.

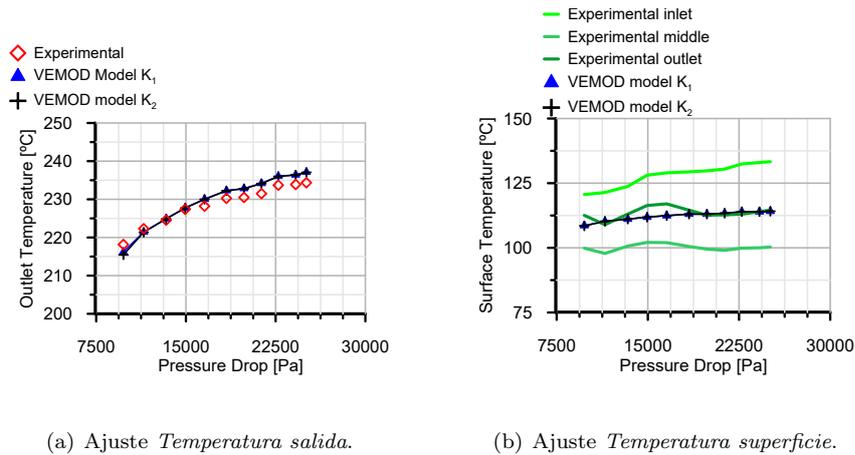


Figura 5.5: Ajuste de temperaturas.

En la Figura 5.5 a) se aprecia que la variación en la constante inercial comentada, apenas afecta en la evolución de la temperatura de salida. Un punto a destacar es que las máximas diferencias entre las medidas experimentales y los resultados del modelo, se dan en los extremos del rango de ensayo; por ello, el modelo es mucho más preciso en la región intermedia de ensayos, pese a que en los extremos, el error no supera el 2% en ninguno de los casos.

Por otro lado, la Figura 5.5 b), muestra que la variación de temperatura en la superficie es mínima respecto a la variación de la constante inercial. Además, en esta última figura se aprecia que la temperatura de superficie obtenida a través del modelo VEMOD, está en torno al valor de la temperatura experimental de la superficie de la salida. Experimentalmente, se midió la temperatura de la superficie del DPF a lo largo del filtro, midiendo por tanto, la variación axial de esta temperatura. Puesto que el modelo VEMOD no tiene en cuenta la discretización axial del filtro, la temperatura de superficie calculada, debe estar en torno a la media de las superficiales experimentales.

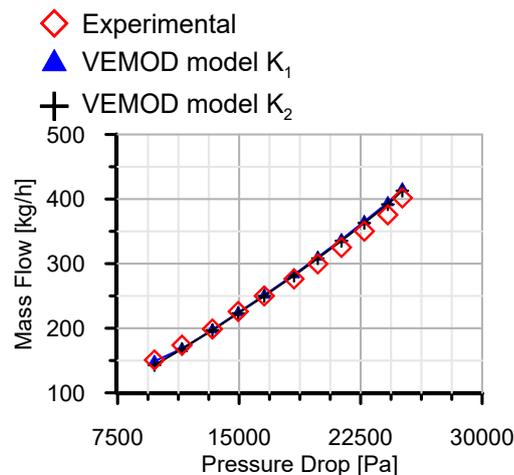


Figura 5.6: Ajuste gasto másico.

La Figura 5.6, muestra la evolución del gasto másico en función de la pérdida de presión impuesta. Vemos como la precisión del ajuste se mantiene con respecto al realizado en la sección anterior, además de que la variación en la constante inercial, apenas tiene un efecto significativo. Por ello, a partir de este ensayo se mantiene la constante inercial ajustada en la sección anterior, $\xi_t = 10,02$.

5.2.2 Casos estacionarios, 10 haces

Una vez fijada la constante inercial, en este caso, es necesario modificar el *factor de corrección radial* para ajustar la transmisión radial que se produce en los 10 haces considerados. De forma experimental, se fue modificando este factor, hasta conseguir un ajuste preciso del modelo. Los parámetros correspondientes a este ajuste se recogen en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Parámetros del ajuste.

Parámetro	Valor
ξ_t	10,02
k_{rad}	500

El proceso de validación seguido en este ajuste, es el mismo que en el ajuste de un solo haz.

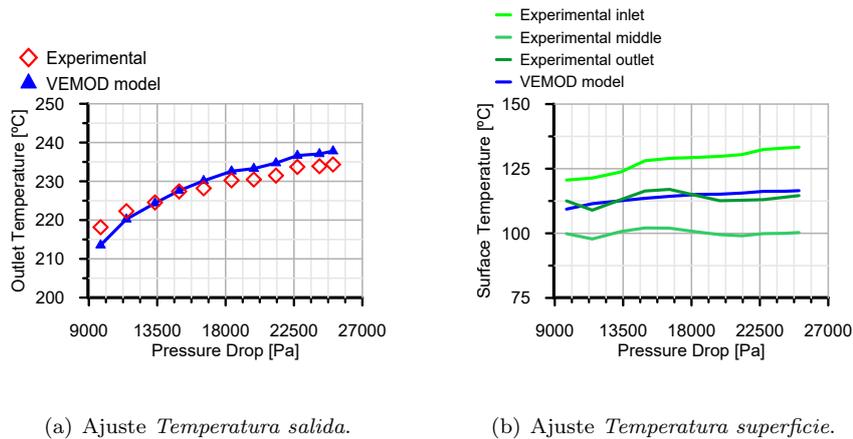


Figura 5.7: Ajuste de temperaturas.

En la Figura 5.7 a), se aprecia la misma tendencia que en el caso de 1 haz; las máximas diferencias se aprecian en los extremos del rango de ensayos, no superando el 2% de error. En cuanto a la Figura 5.7 b), muestra que la temperatura de la superficie obtenida en el modelo de VEMOD, se mantiene en torno a la temperatura superficial medida en la salida del filtro; lo cual es debido al fenómeno explicado anteriormente.

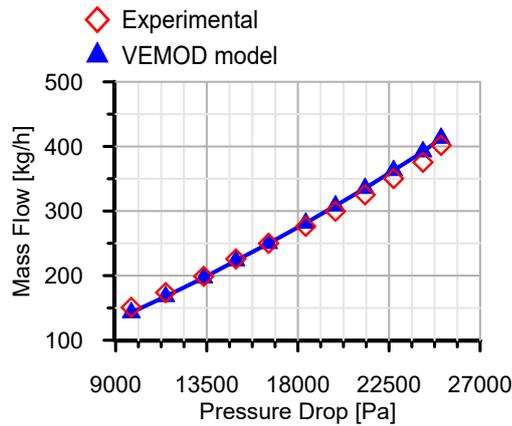


Figura 5.8: Ajuste gasto másico.

La Figura 5.8, muestra que en el caso de considerar 10 haces, el ajuste en gasto másico apenas se ve afectado. Esto se debe a que la discretización radial, solamente afecta al submodelo de transmisión de calor, y no al de pérdida de presión.

5.2.3 Ensayos con flujo másico pulsante, valor medio

Los ensayos han sido realizados en el banco de flujo caliente, sometiendo el filtro a un trasiego de flujo másico pulsante. Tal y como se explicó en la sección *Herramientas experimentales*, en el banco de flujo caliente se podía modificar la frecuencia y amplitud de las pulsaciones. El *Equipo 1* se ensayó a 33 Hz y 100 Hz , para diferentes amplitudes y diferentes gastos másicos. Además, se realizaron ensayos con el filtro en frío, y posteriormente en caliente. La tabla 4.1 recoge todos los casos ensayados.

Pese a que el flujo másico era pulsante, en primera instancia, se ha validado el modelo imponiendo en la entrada la diferencia de presiones media de cada ensayo. Además, la validación del modelo se ha realizado considerando un único haz en el filtro DPF.

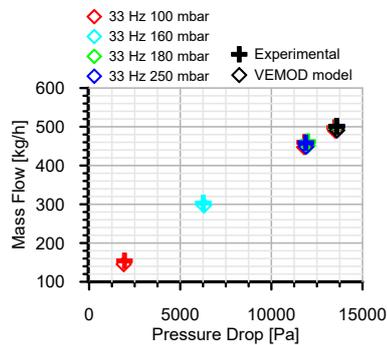
Tabla 5.7: Parámetros del ajuste.

Parámetro	Valor
k_{in}	62
k_{rad}	1,3

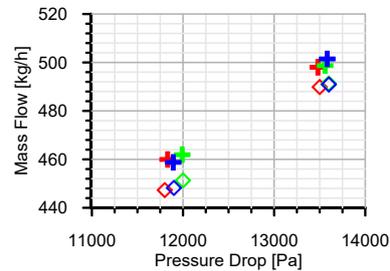
Los parámetros del ajuste, se recogen en la Tabla 5.7; éstos corresponden con los parámetros ajustados hasta ahora para el *Equipo 1*. Sin embargo, la constante inercial se ha aumentado ligeramente con respecto a la obtenida en el ajuste de la pérdida de presión; esto se debe a que en el ensayo en el banco de flujo caliente, la instalación del filtro DPF, incluía unos “codos de tubería” a la entrada y salida del filtro, que no tenía en los realizados en el banco de flujo frío. Para tener en cuenta la pérdida de presión debida a los fenómenos inerciales que se dan en estos codos, la constante ha sido aumentada ligeramente.

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a los ensayos en frío y en caliente, organizados de acuerdo a la frecuencia de ensayo.

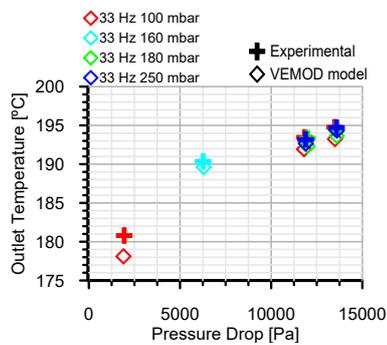
Ensayos en frío



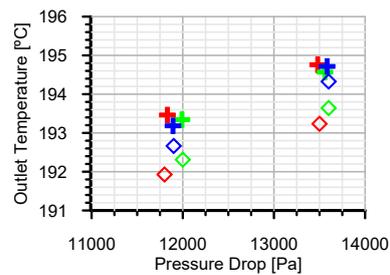
(a) Gasto másico.



(b) Gasto másico (ampliación).



(c) Temperatura de salida.

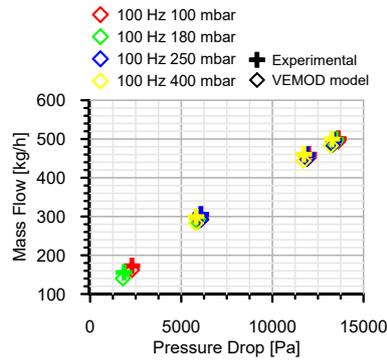


(d) Temperatura de salida (ampliación).

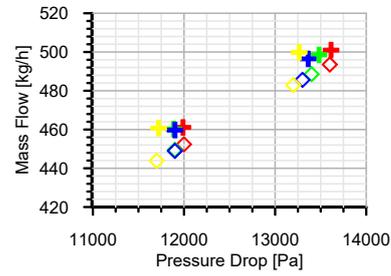
Figura 5.9: Ensayos a 33 Hz.

Las Figuras 5.9 a) y c) recogen el ajuste del gasto másico y de la temperatura de salida, frente a la pérdida de presión impuesta al modelo, que coincide con la experimental. Pese a que estas dos gráficas recogen todo el rango ensayado, se hace necesario realizar una ampliación sobre estas gráficas. Esta ampliación permite ver correctamente el cúmulo de casos que hay hacia la parte final del rango ensayado.

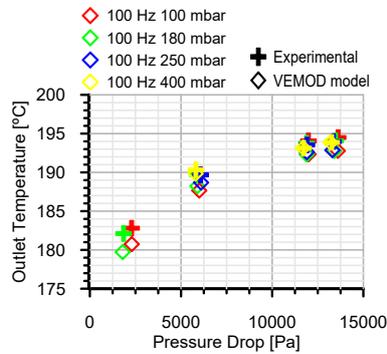
Las ampliaciones, que se recogen en las Figuras 5.9 b) y d), muestran la misma tendencia que las gráficas normales. El posible error cometido, que en ningún caso supera el 5%, no depende en ningún caso de la amplitud del flujo.



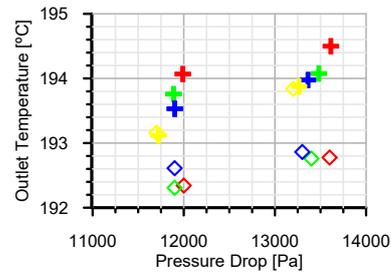
(a) Gasto másico.



(b) Gasto másico (ampliación).



(c) Temperatura de salida.



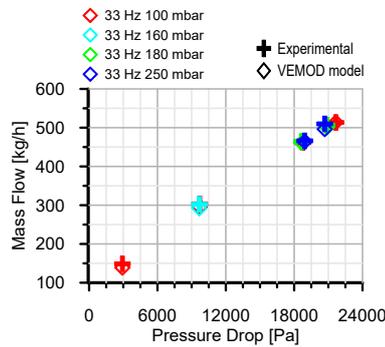
(d) Temperatura de salida (ampliación).

Figura 5.10: Ensayos a 100 Hz.

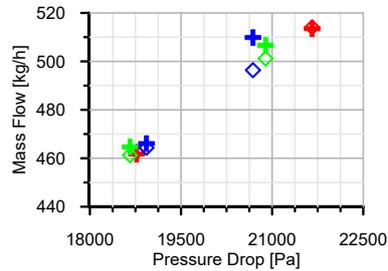
De igual manera a como ocurría con los ensayos a 33 Hz, se hace necesario ampliar las gráficas en la parte final del rango de Δp , para apreciar con más detalle el ajuste. El error, al igual que ocurría con los ensayos a 33 Hz, no depende de la amplitud del flujo y en ningún caso supera el 5%.

Algo común tanto en los ensayos realizados a 33 Hz, como en los realizados a 100 Hz, es la temperatura de salida medida. En ninguno de los casos supera los 200 °C por tratarse de ensayos en frío.

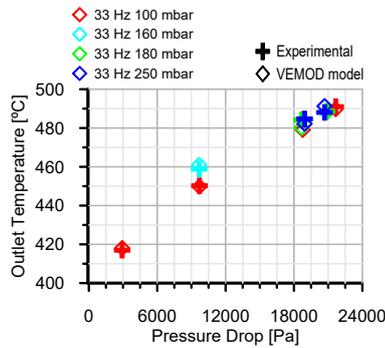
Ensayos en caliente



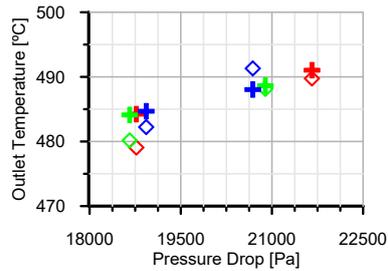
(a) *Gasto másico.*



(b) *Gasto másico (ampliación).*



(c) *Temperatura de salida.*

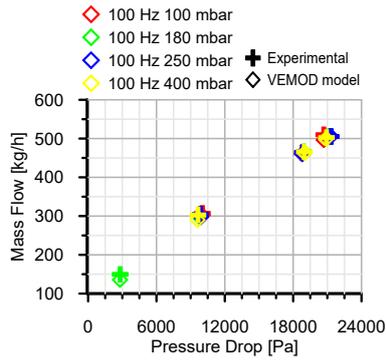


(d) *Temperatura de salida (ampliación).*

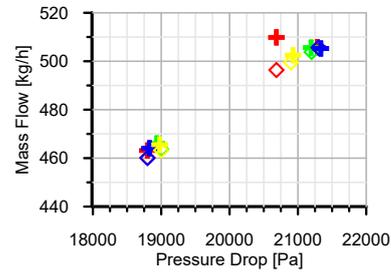
Figura 5.11: Ensayos a 33 Hz.

La manera de proceder con los ensayos en caliente, es la misma que la llevada a cabo con los casos en frío. Se ha hecho necesario ampliar las gráficas de gasto másico y de temperatura de salida, tal y como se muestra en las Figuras 5.11 b) y d).

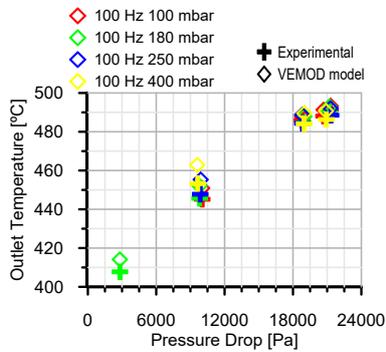
En los ensayos realizados a 33 Hz en caliente, se sigue demostrando que el error que comete el modelo VEMOD no depende de la amplitud del flujo.



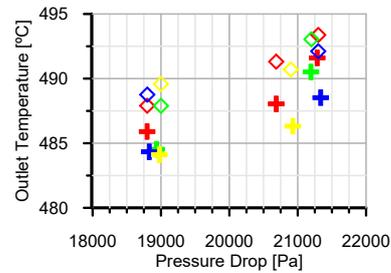
(a) Gasto másico.



(b) Gasto másico (ampliación).



(c) Temperatura de salida.



(d) Temperatura de salida (ampliación).

Figura 5.12: Ensayos a 100 Hz.

Para los ensayos hechos en caliente a 100 Hz, se observan las mismas conclusiones que las extraídas para 33 Hz. Tanto en las gráficas normales, como en las ampliadas, el error que se comete es mínimo y además, éste no depende de la amplitud del flujo.

Cabe destacar que estos dos últimos ensayos, tanto los de 33 Hz y los de 100 Hz, se han realizado en caliente, alcanzado el filtro temperaturas de hasta 500 °C. En estas condiciones, la transferencia de calor es mucho más crítica y determinante que en los ensayos en frío; no obstante, el modelo es capaz de ajustarse igualmente bien, sin producir errores mayores. Por tanto, se verifica el ajuste realizado.

5.2.4 Ensayos con flujo másico pulsante, flujo pulsante

Una vez validados los resultados ante un caso estacionario de flujo pulsante, se ha procedido a evaluar si el modelo se comportaría de forma precisa ante condiciones de entrada pulsantes transitorias. Para ello, se imponen como variables de entrada las presiones de entrada y salida experimentales.

La naturaleza del flujo pulsante, genera un tren de ondas, tal y como se muestra en la Figura 4.4. Este tren de ondas, desvirtúa la medida real de las presiones a la entrada y a la salida del filtro, produciendo un desfase entre ellas; por ello, se ha hecho necesario poner en fase las presiones a la entrada y a la salida del DPF.

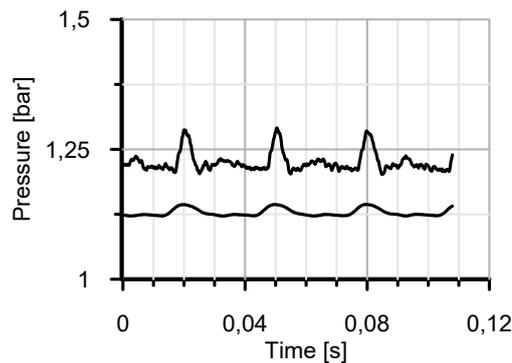


Figura 5.13: Ejemplo de presiones en fase.

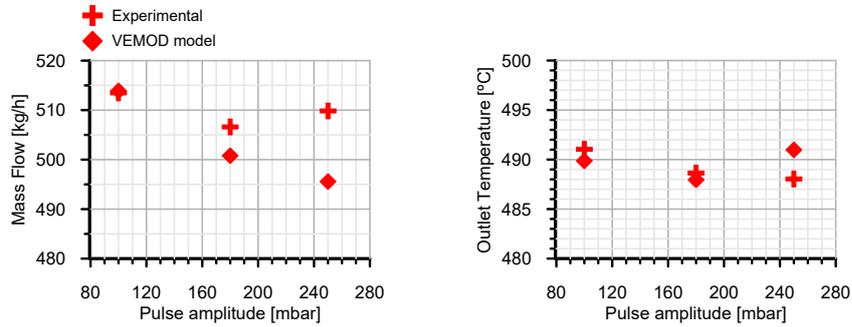
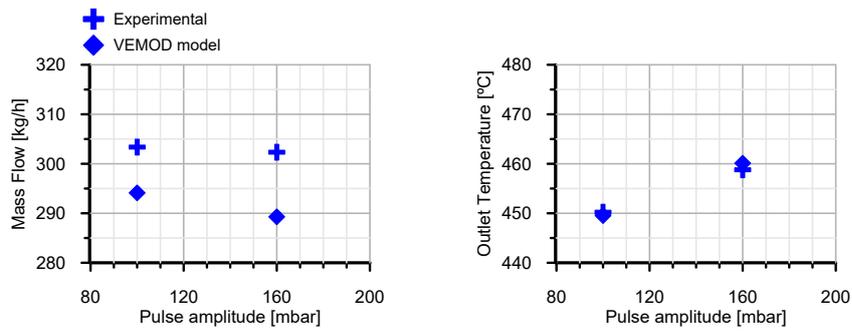
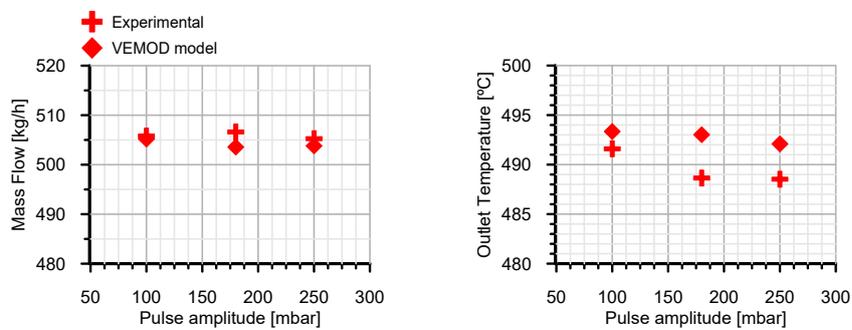
La Figura 5.13 muestra un ejemplo de cómo quedarían las presiones de entrada y salida tras el proceso de puesta en fase.

Se validarán los resultados frente al gasto másico experimental, y frente a la temperatura de salida. Puesto que no hay datos experimentales instantáneos de estas dos variables, se comparará el valor promedio. En el caso de la temperatura de salida, ésta se promediará con el gasto másico, a través de la Ecuación 5.6.

$$\overline{T_{out}} = \frac{\sum_{i=0}^N T_{out}^i \dot{m}^i \Delta t}{\sum_{i=0}^N \dot{m}^i \Delta t} \quad (5.6)$$

Debido a la elevada complejidad del procesado previo a la ejecución de los diferentes casos, únicamente se ha validado el modelo con respecto a los ensayos en caliente. La transmisión de calor en este tipo de ensayos es más crítica e importante, de forma que si el modelo es capaz de predecir correctamente los resultados de estos ensayos, se asume que el modelo queda validado.

A continuación se muestran las diferentes gráficas, las cuales están diferenciadas según el gasto másico correspondiente al caso. Además, la representación de las variables a validar se hace respecto a la amplitud del flujo, con el fin de demostrar que el ajuste es válido para todo el rango de amplitudes ensayadas.

Ensayos a 33 Hz(a) *Gasto másico.*(b) *Temperatura de salida.***Figura 5.14:** Gasto másico de ensayo, 500 kg/h.(a) *Gasto másico.*(b) *Temperatura de salida.***Figura 5.15:** Gasto másico de ensayo, 300 kg/h.*Ensayos a 100 Hz*(a) *Gasto másico.*(b) *Temperatura de salida.***Figura 5.16:** Gasto másico de ensayo, 500 kg/h.

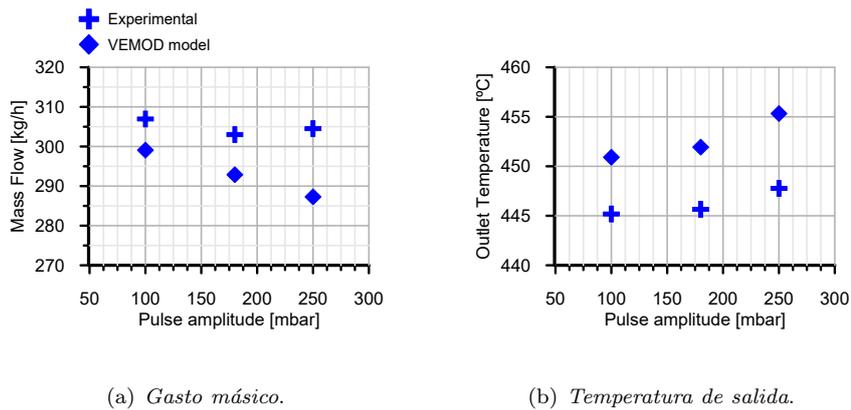


Figura 5.17: Gasto másico de ensayo, 300 kg/h.

Comentarios

Al igual que se apreciaba en los ensayos estacionarios en el bando de flujo caliente, el modelo es capaz de predecir correctamente el gasto másico promedio. Además, pese a tratarse de ensayos en caliente en los que la transmisión de calor, juega un papel muy importante, las temperaturas de salida predichas por el modelo coinciden con las experimentales, produciéndose un error menor al 5%.

Como ya se ha comentado al comienzo, durante el ensayo no se disponía de un sensor capaz de medir de forma instantánea el gasto másico; por ello, la validación se ha realizado frente al valor experimental promedio. No obstante, el modelo sí que ofrece una evolución temporal e instantánea de todas las variables.

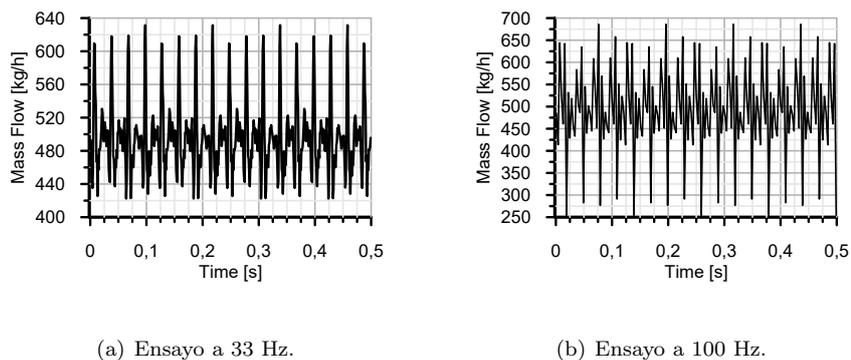


Figura 5.18: Gasto másico instantáneo.

En las Figuras 5.18 a) y b), se recoge una muestra de la evolución temporal del gasto másico para dos casos diferentes: uno a 33 Hz y el otro a 100 Hz. En ambos casos, se aprecia que el gasto predicho por el modelo es altamente pulsante, con una amplitud cercana a los 150 kg/h.

5.2.5 Caso transitorio, 1 haz

Hasta ahora, se había procedido a validar los diferentes ajustes del modelo VEMOD en situaciones estacionarias, a excepción del flujo másico pulsante. Este tipo de situaciones corresponden con regímenes de funcionamiento poco usuales en los motores de vehículos; por esta razón, es necesario validar los resultados frente a ensayos transitorios, mucho más realistas y representativos.

Los ensayos se clasifican en dos procesos diferentes:

1. Tres casos de calentamiento del filtro DPF, con un gasto másico continuo, hasta alcanzar diferentes temperaturas. El primero de estos procesos de calentamiento, se ensayó con el filtro cargado de partículas.
2. Tres casos de enfriamiento del filtro DPF, con un gasto másico continuo, partiendo de diferentes temperaturas. El primero de estos procesos de enfriamiento, se ensayó con el filtro cargado de partículas.

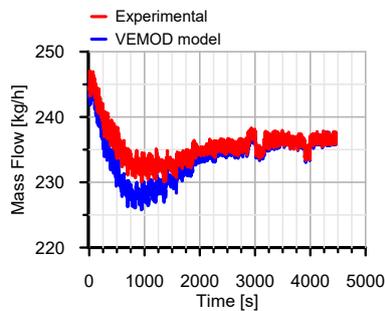
Tabla 5.8: Casos transitorios modelados.

	Gasto másico [kg/h]	Temperatura [° C]
Calentamiento 1	300	300
Calentamiento 2	300	320
Calentamiento 3	300	400
Enfriamiento 1	300	300
Enfriamiento 2	300	320
Enfriamiento 3	300	400

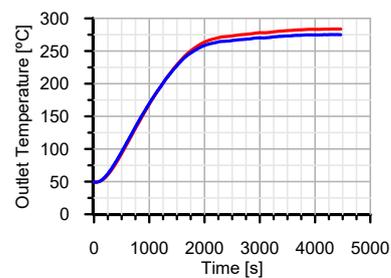
En la Tabla 5.8, se muestran los diferentes casos modelados. Los procesos de enfriamiento se realizaron a continuación de los de calentamiento, partiendo desde la temperatura alcanzada. En todos ellos, se hará uso del ajuste realizado para el caso estacionario, con la finalidad de verificar que el ajuste es correcto. A continuación se expondrán las gráficas correspondientes a los diferentes casos modelados.

Proceso calentamiento 1

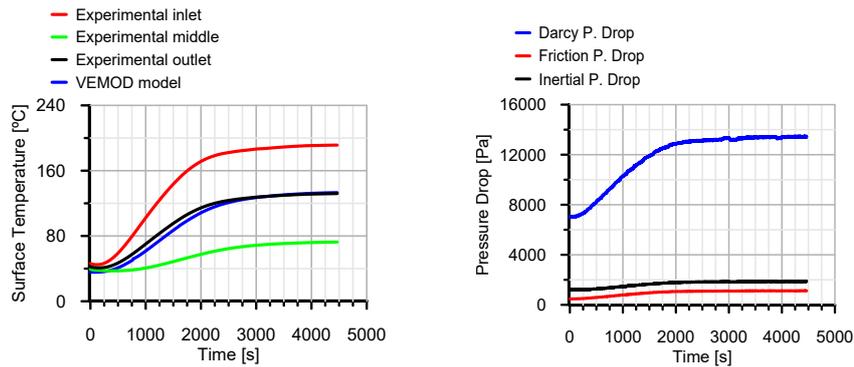
Este ensayo se realizó con el filtro cargado con 60 g de hollín.



(a) Gasto másico.



(b) Temperatura de salida.



(c) *Temperatura de superficie.*

(d) *Contribuciones Δp .*

Figura 5.19: Proceso calentamiento 1.

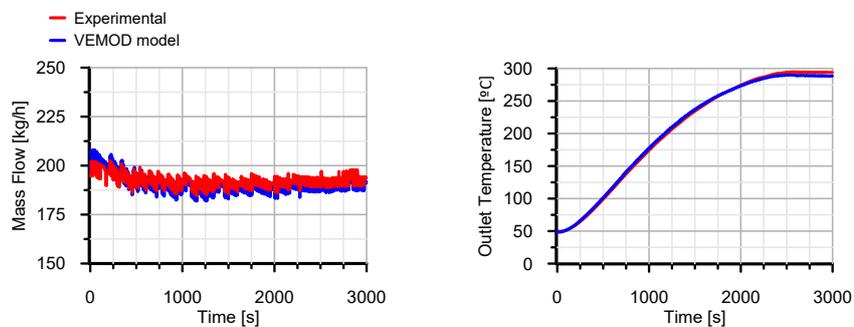
En la Figura 5.19 a), se aprecia que el modelo VEMOD predice con exactitud la evolución temporal del gasto experimental; es decir, no solo predice el valor estacionario de esta variable, sino que también predice su dinámica.

En la Figura 5.19 d), se puede ver cómo la contribución de Darcy a la pérdida de presión global es muy elevada. La pérdida de presión debida a Darcy, se debe a que el flujo atraviesa un medio poroso. El ensayo se realizó con el filtro cargado de 60 g de partículas de hollín; en estas condiciones, el filtro tiene el medio poroso del monolito cerámico saturado, además de haberse creado una capa de partículas que actúa como un nuevo medio poroso. La permeabilidad “global” del monolito cerámico se reduce notoriamente, produciendo que la pérdida de presión debida a Darcy, tenga un peso tan importante frente al resto de contribuciones.

En lo que respecta a la temperatura de salida del DPF y la de superficie, en las Figuras 5.19 b) y c), se muestra que el modelo es capaz de reproducirlas de forma precisa; de nuevo, no solo capta su valor estacionario, también su dinámica.

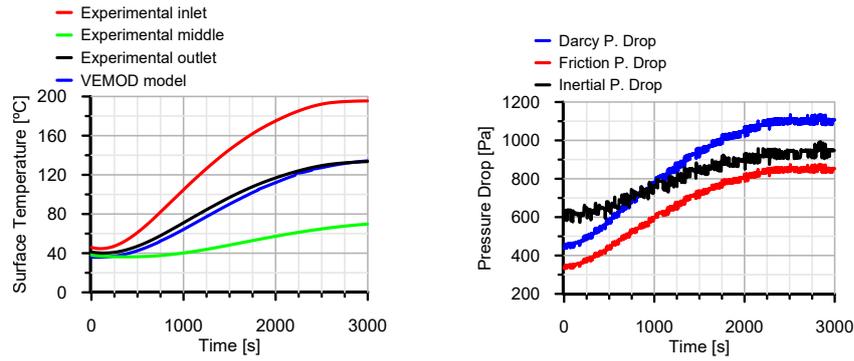
Proceso calentamiento 2

Este ensayo se realizó con el filtro en condiciones limpias.



(a) *Gasto másico.*

(b) *Temperatura de salida.*



(c) Temperatura de superficie.

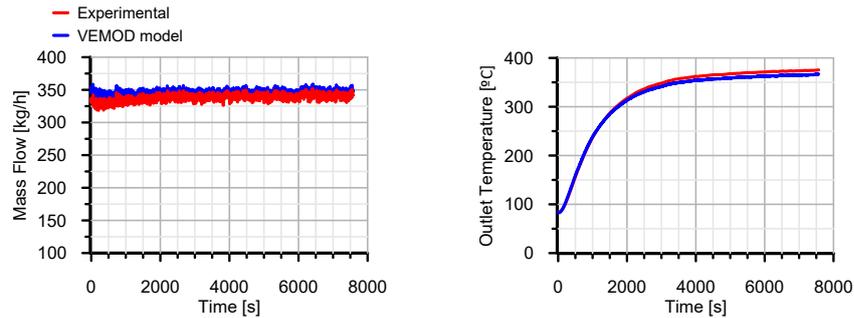
(d) Contribuciones Δp .**Figura 5.20:** Proceso calentamiento 2.

El modelo, tal y como muestra la Figura 5.20 a), el modelo predice la evolución temporal del gasto másico; siendo la precisión bastante elevada.

En la Figura 5.20 d), se puede apreciar que las diferentes contribuciones a la pérdida de presión global son muy diferentes al caso *Calentamiento 1*. En este caso, las tres contribuciones son del mismo orden, y concretamente la debida a Darcy, es mucho menor que en el caso anterior; esto se debe a que el flujo solamente atraviesa el medio poroso de las paredes del monolito, las cuales están limpias además de no haber capa de partículas.

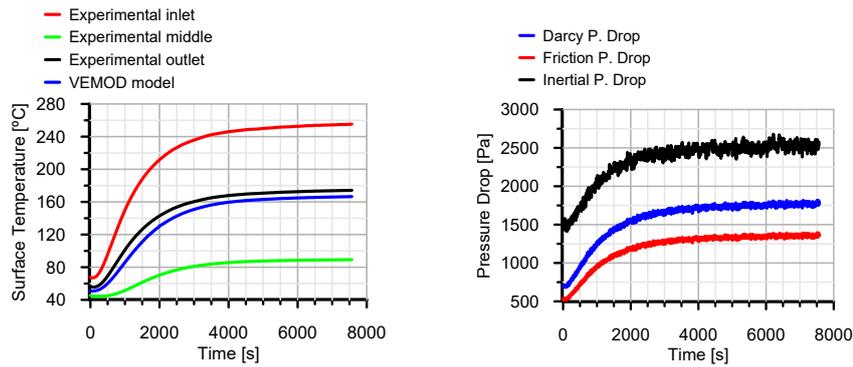
Proceso calentamiento 3

Este ensayo se realizó con el filtro en condiciones limpias.



(a) Gasto másico.

(b) Temperatura de salida.



(c) Temperatura de superficie.

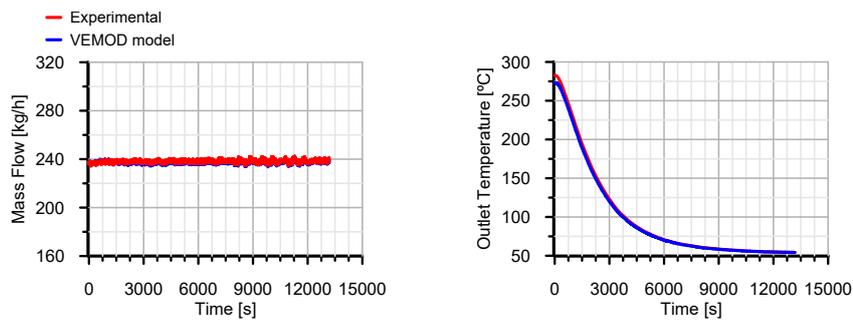
(d) Contribuciones Δp .

Figura 5.21: Proceso calentamiento 3.

En este ensayo, se puede apreciar que tanto el gasto másico como las diferentes temperaturas se ajustan a las medidas experimentalmente, tanto en valor estacionario como en dinámica. En cuanto a las contribuciones a la pérdida de presión global, las tres son del mismo orden. Sin embargo, en este caso, la contribución inercial tiene algo más de peso que en el proceso *Calentamiento 2*, debido a que el gasto másico que trasiega el filtro DPF es ligeramente mayor, tal y como muestra la Figura 5.21 a).

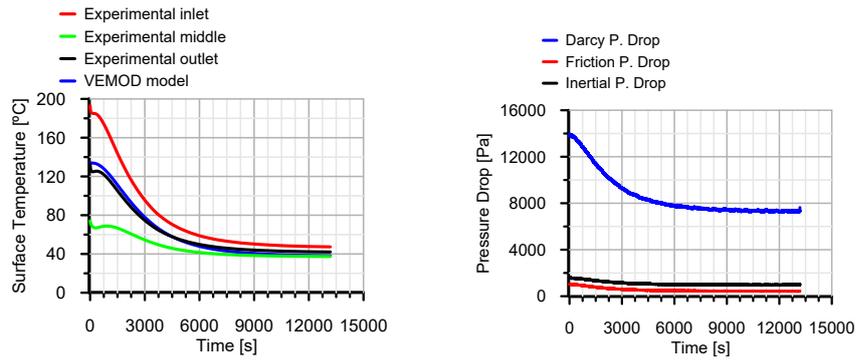
Proceso enfriamiento 1

Este ensayo se realizó con el filtro cargado de 60 g de hollín.



(a) Gasto másico.

(b) Temperatura de salida.



(c) Temperatura de superficie.

(d) Contribuciones Δp .**Figura 5.22:** Proceso enfriamiento 1.

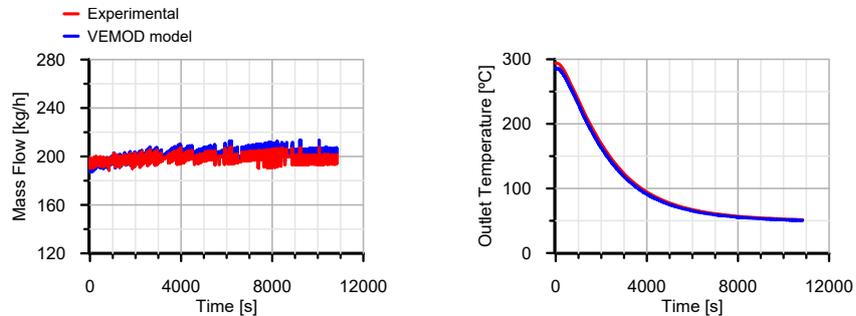
Al igual que los casos anteriores, el modelo capta con gran exactitud la evolución del gasto másico, tanto en su valor estacionario como en su evolución. Este ensayo se realizó a continuación del *Calentamiento 1*, por ello las variables evolucionan a partir de esas condiciones alcanzadas.

Por otro lado, el ensayo de este proceso también se realizó con el filtro cargado con 60 g de hollín. La Figura 5.22 d), muestra cómo la contribución de Darcy a la pérdida de presión global, es muy elevada. En el proceso *Calentamiento 1*, ya se ha explicado que se debe a que en esas condiciones de carga, el medio poroso se encuentra saturado y además se genera un nuevo medio poroso (la capa de partículas), con lo que la permeabilidad “global” disminuye notoriamente. Esta disminución hace que la contribución de Darcy, crezca en importancia.

En cuanto al resto de variables medidas, el ajuste es válido y por tanto el modelo es capaz de reproducirlas de forma precisa.

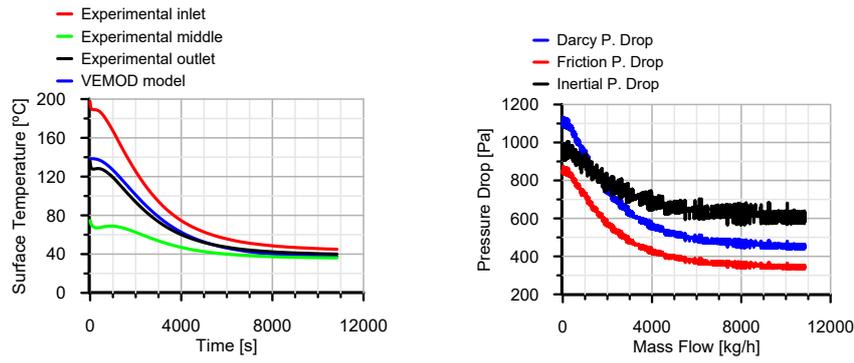
Proceso enfriamiento 2

En este ensayo, el filtro se encontraba en condiciones limpias.



(a) Gasto másico.

(b) Temperatura de salida.



(c) Temperatura de superficie.

(d) Contribuciones Δp .

Figura 5.23: Proceso enfriamiento 2.

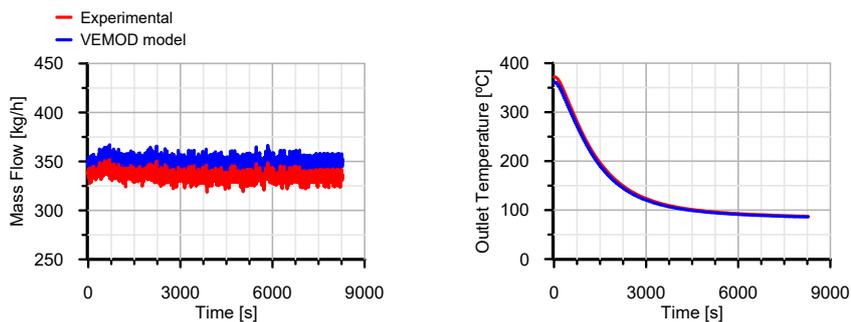
En este caso, el ensayo se realizó a continuación del *Calentamiento 2*; a la vista queda, que las variables evolucionan a partir de dichas condiciones. En lo referente al gasto másico, el modelo predice su evolución.

Además, puesto que el filtro se encontraba en condiciones limpias, la contribución de Darcy a la pérdida de presión es mucho menor que en el caso *Enfriamiento 1*.

En cuanto al resto de variables, el modelo reproduce su evolución de forma precisa; concretamente, la temperatura de superficie se encuentra en la media de las medidas, más próxima a la de la salida, tal y como cabría esperar en un modelo de valor medio.

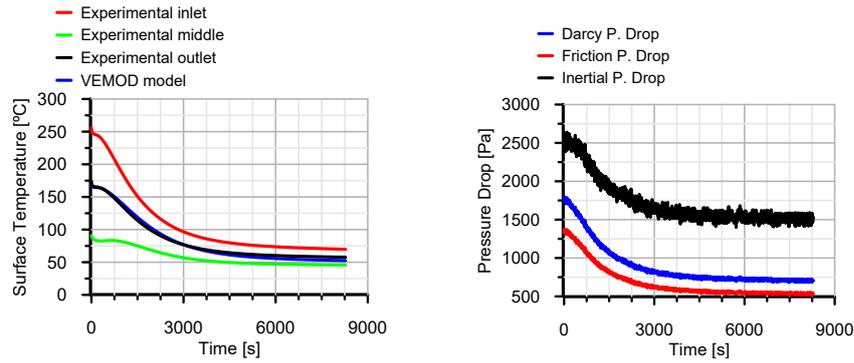
Proceso enfriamiento 3

En este ensayo, el filtro se encontraba totalmente limpio.



(a) Gasto másico.

(b) Temperatura de salida.

(c) *Temperatura de superficie.*(d) *Contribuciones Δp .***Figura 5.24:** Proceso enfriamiento 3.

Al igual que ocurría con el proceso *Calentamiento 3*, el gasto másico que trasiega el filtro es mayor que en el resto de casos; por ello, la contribución inercial a la pérdida de presión global es superior a las otras dos. Esto se puede apreciar en la Figura 5.24 d).

En cuanto al resto de variables, se obtiene el mismo resultado que hasta ahora, el modelo reproduce correctamente su evolución temporal.

5.2.6 Caso transitorio, 10 haces

En el caso de un solo haz, se ha verificado el ajuste con diferentes ensayos transitorios. De igual manera, y partiendo de los mismos ensayos, se realiza la misma verificación para el caso de 10 haces de canales.

Los casos ensayados son los mismos que se muestran en la Tabla 5.8, fijando el *factor de corrección radial* de acuerdo al ajuste estacionario, recogido en la Tabla 5.6. Puesto que los casos ensayados, y sus resultados gráficos, son muy similares a los mostrados para el ajuste con un solo haz, a continuación se muestra un caso de calentamiento y otro de enfriamiento característicos. El resto de casos, con sus correspondientes gráficas, se adjuntan en el Anexo A.

Proceso calentamiento 2

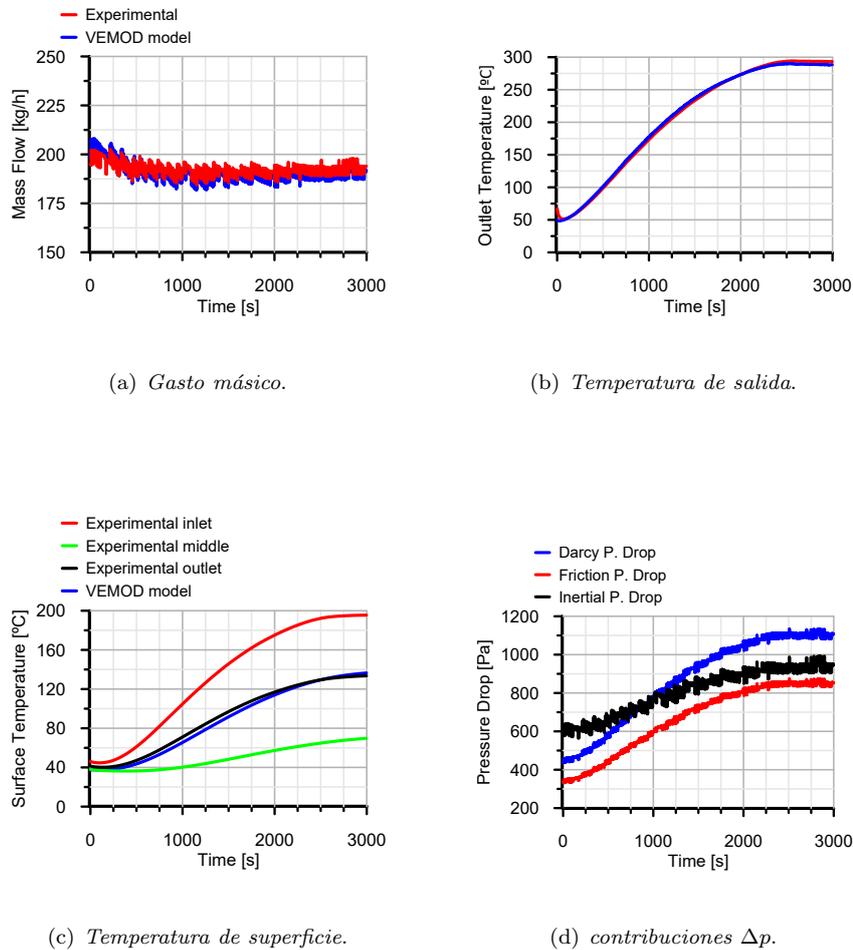
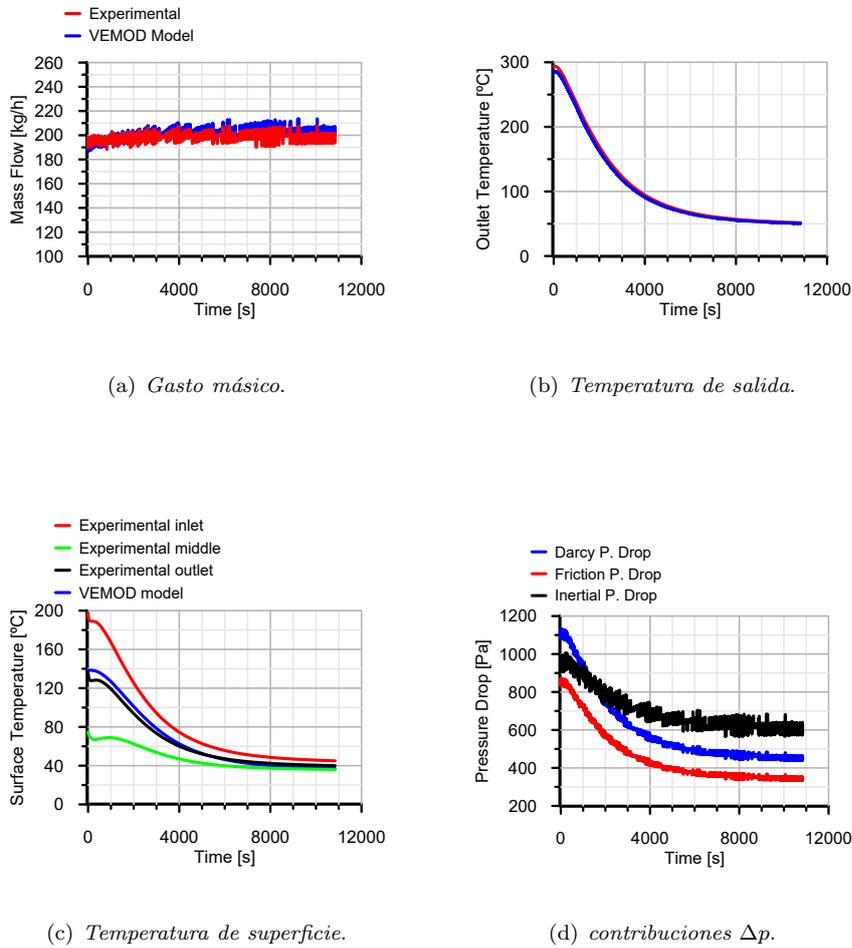


Figura 5.25: Proceso calentamiento 2.

El ensayo experimental correspondiente a este caso, corresponde con el mismo que en *Calentamiento 2* de un solo haz. En la Figura 5.25 a), se puede apreciar que el modelo reproduce correctamente el gasto másico experimental, captando también su evolución dinámica.

En cuanto a la temperatura de salida, tal y como se aprecia en la Figura 5.25 b), se ajusta correctamente. De nuevo, esto se debe a que el modelo de transmisión de calor está correctamente ajustado. En lo referente a la temperatura de superficie, el modelo predice su evolución temporal, situándose en la media de las experimentales.

El ensayo se realizó con el filtro limpio, sin masa de hollín en su interior, por ello la contribución de Darcy a la pérdida de presión global es menor. De hecho, las tres contribuciones son del mismo orden de magnitud.

Proceso enfriamiento 2**Figura 5.26:** Proceso enfriamiento 2.

El ensayo correspondiente a este caso, se realizó a continuación del ensayo de *Calentamiento 2*. Esto conlleva que la tendencia de todas las variables, sea muy similar a lo expuesto anteriormente.

En el caso del gasto másico, el modelo reproduce fielmente los datos experimentales; esto se puede apreciar en la Figura 5.26. Tanto la temperatura de salida como la de superficie, es predicha de forma precisa por el modelo, tal y como se observa en las gráficas.

La tendencia de las tres contribuciones a la pérdida de presión global, es la misma que la expuesta en el caso anterior; debido a que el ensayo se realizó con el filtro limpio, la contribución de Darcy es mucho menor que en los casos de filtro cargado.

5.3 Validación submodelo de filtrado

El ajuste del submodelo de filtrado en el filtro DPF, es imprescindible para poder modelar los procesos de regeneración pasiva, dada la alta dependencia que tienen entre sí. Pese a que en el desarrollo de este trabajo, no se ha participado directamente en el ajuste de este submodelo, sí se ha hecho uso de él. Además, debido a la importancia de éste en el ajuste del proceso de regeneración pasiva, se procede a explicar cómo se ha realizado.

El proceso de filtrado que tiene lugar en un filtro DPF, puede darse mediante dos mecanismos bien diferenciados, dependiendo de si el filtro se encuentra limpio o saturado de partículas de hollín.

1. Filtrado en lecho profundo. Tiene lugar desde que el filtro está limpio, hasta que se satura el medio poroso. El agente filtrante es el medio poroso de las paredes del monolito cerámico.
2. Filtrado superficial. Tiene lugar desde que se comienza a generar la capa de partículas sobre las paredes del monolito, cuando el medio poroso ya se ha saturado. El agente filtrante es la capa de partículas que se genera sobre las paredes del monolito.

El ajuste en el régimen de filtrado en lecho profundo, se realiza modificando el *factor de forma* (χ), y el *sticking coefficient* (S_c). El primero de estos parámetros, que toma valores entre 0 y 1, marca cómo de regular es la deposición de las partículas en la unidad colectora. El segundo de los parámetros, representa el ratio entre las partículas que golpean sobre la unidad colectora, y las partículas que quedan adheridas a ella; es un parámetro que se emplea para corregir la eficiencia global del lecho colector, tal y como muestra la Ecuación 5.7. Otro parámetro de ajuste importante en este régimen, es la penetración de la masa de hollín en el lecho de partículas; sin embargo, se ha ajustado de acuerdo a la literatura existente.

$$E_{f,wi} = 1 - e^{-\frac{3\eta_{DRFI}(1-\epsilon_w)w_w f_{w,set} S_c}{2\epsilon_w d_{c,w}}} \quad (5.7)$$

En el régimen de filtrado superficial, el ajuste se realiza modificando la porosidad de la capa de partículas ϵ_{pl} , el cual adquiere un valor constante.

El ajuste del submodelo se ha llevado a cabo en tres etapas diferentes:

1. Ajuste del régimen de filtrado en lecho profundo de forma discreta.
2. Ajuste del régimen de filtrado superficial de forma discreta.
2. Validación del ajuste de forma continua.

5.3.1 Ajuste discreto del régimen de filtrado en lecho profundo

Como ya se ha comentado antes, el ajuste de este régimen de filtrado, se realiza a través del *factor de forma* y del *sticking coefficient*. El ajuste del *factor de forma*, se realiza a través de una correlación que lo relaciona con el denominado *factor de densidad de hollín* (Φ_{ρ_s}). Este parámetro se define a través de la Ecuación 5.8.

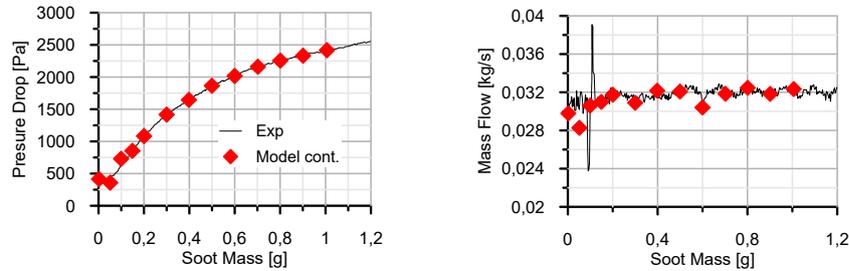
$$\Phi_{\rho_s} = \frac{\rho_{s,w}}{m_{sp}/V_{sp}} \quad (5.8)$$

El ratio m_{sp}/V_{sp} representa la densidad del hollín dentro de la pared porosa, en el caso de que el hollín se distribuyese uniformemente en el volumen vacío; por otro lado, el parámetro $\rho_{s,w}$

representa la densidad de los agregados de hollín en la pared porosa. El *factor de densidad de hollín*, es un parámetro medible en los ensayos experimentales.

$$\chi = a(\Phi_{\rho_s})^b + c \quad (5.9)$$

La correlación es del tipo mostrado en la Ecuación 5.9, y es función de las constantes a, b y c.



(a) Ajuste de la pérdida de presión.

(b) Ajuste del gasto másico.

Figura 5.27: Ajuste discreto.

A partir de una serie de puntos discretos como los mostrados en la Figura 5.27, se ajusta el *factor de forma* para lograr ajustar la pérdida de presión y el gasto másico experimentales, con respecto a la masa de hollín acumulada. De esta manera, se tiene un valor del *factor de forma* que varía con respecto a la masa de hollín acumulada, y con respecto al *factor de densidad de hollín*. Posteriormente, se ajusta la correlación entre el *factor de forma* establecido para cada punto discreto, y el *factor de densidad de hollín* correspondiente.

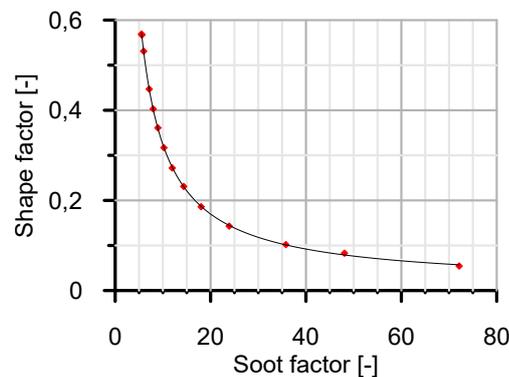


Figura 5.28: Ajuste de la correlación.

La correlación se muestra gráficamente en la Figura 5.28, siendo las constantes las mostradas en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Constantes de la correlación.

Constantes	Valor
a	3,011
b	-0,986
c	0,013

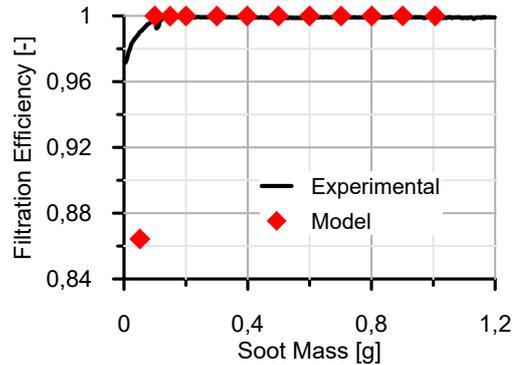


Figura 5.29: Ajuste de la correlación.

Una vez ajustado el *factor de forma*, se procede a ajustar el *sticking coefficient*. El procedimiento es el mismo que el seguido anteriormente. A partir de una serie de datos discretos, se fija un valor de este parámetro (constante para todo el rango), que permita ajustar la eficiencia de filtrado respecto de la masa de hollín acumulada. La Figura 5.29 muestra la metodología seguida en el ajuste discreto. La Tabla 5.10 recoge el valor correspondiente al ajuste.

Tabla 5.10: Ajuste del *sticking coefficient*.

Parámetro	Valor
S_c	130

5.3.2 Ajuste discreto del régimen de filtrado superficial

El ajuste de este régimen de filtrado, se realiza modificando la porosidad de la capa de partículas (ϵ_{pl}), que posee un valor constante. De nuevo, a partir de unos puntos discretos del ensayo experimental, se ajusta este parámetro para reproducir de forma precisa el gasto másico frente a la masa de hollín acumulada.

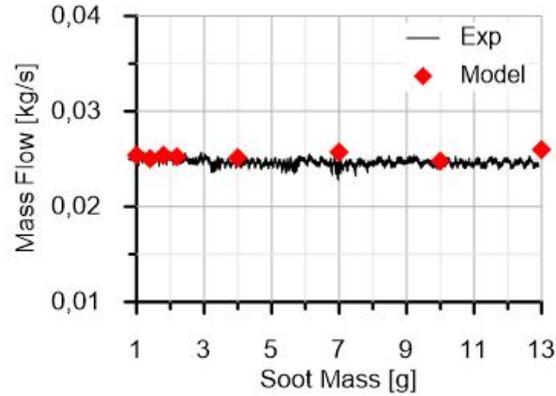


Figura 5.30: Ajuste del gasto másico.

En la Figura 5.30, se muestra el ajuste realizado de forma gráfica, mientras que en la Tabla 5.11 se recoge el valor de dicho ajuste.

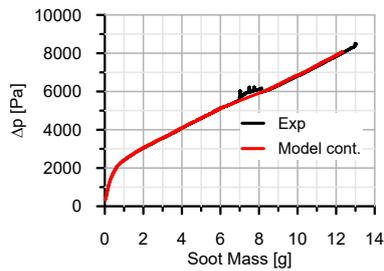
Tabla 5.11: Ajuste de la porosidad de la capa de partículas.

Parámetro	Valor
ϵ_{pl}	0,6

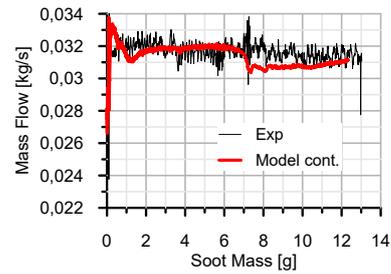
5.3.3 Validación del ajuste de forma continua

Una vez ajustados ambos regímenes de filtrado a partir de puntos discretos del ensayo, se valida dicho ajuste comprobando que el modelo VEMOD sea capaz de reproducir los ensayos de forma continua.

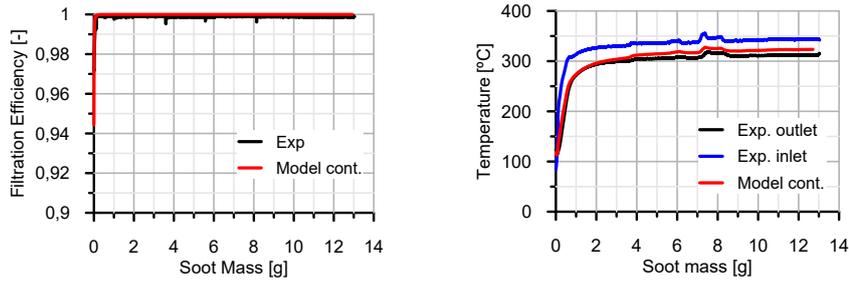
Puesto que el ajuste de ambos mecanismos de filtrado se ha realizado frente a la masa de hollín acumulada, en primer lugar se muestra la evolución de las variables de interés frente a ésta.



(a) Pérdida de presión.



(b) Gasto másico.



(c) Eficiencia de filtrado.

(d) Temperatura.

Figura 5.31: Ajuste continuo frente a masa de hollín acumulada.

En la Figura 5.31, se puede apreciar como todas las variables consideradas se ajustan a los datos experimentales de forma bastante precisa. Este ajuste se da en todo el rango de *soot mass*; por ello, el ajuste queda validado tanto para el régimen de filtrado en lecho profundo, como para el de filtrado superficial. En lo referente a la evolución de la eficiencia de filtrado, se hace necesaria una gráfica que muestre su evolución cuando la acumulación de *soot mass* es pequeña. Esta evolución se muestra en la Figura 5.32; en ella se muestra que la eficiencia de filtrado posee una dinámica muy rápida, pues ante una cantidad de masa acumulada pequeña, alcanza valores de entorno al 100 %.

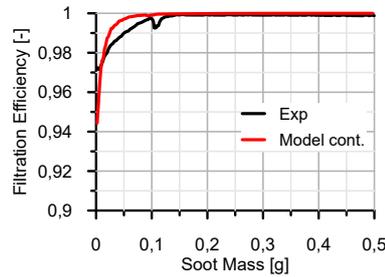
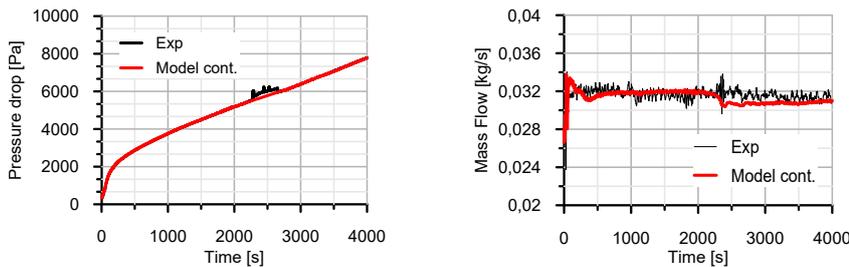


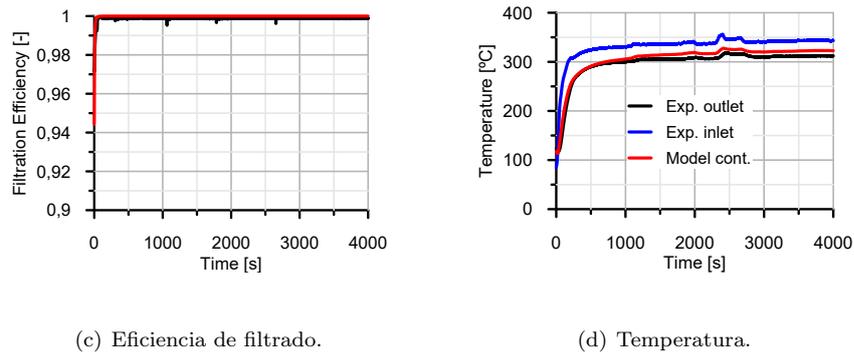
Figura 5.32: Ampliación de la evolución de la eficiencia de filtrado.

Puesto que se está tratando un ensayo estacionario, a continuación se muestra la evolución de las mismas variables frente al tiempo.



(a) Pérdida de presión.

(b) Gasto másico.



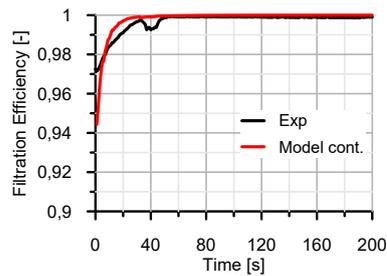
(c) Eficiencia de filtrado.

(d) Temperatura.

Figura 5.33: Ajuste continuo frente al tiempo.

De igual manera que se observaba anteriormente, en la Figura 5.33 se puede apreciar como el modelo es capaz de reproducir con precisión la evolución temporal de las diferentes variables.

Igualmente se muestra la ampliación de la evolución temporal de la eficiencia de filtrado en los primeros instantes del proceso.

**Figura 5.34:** Ampliación de la evolución de la eficiencia de filtrado.

De nuevo, se aprecia que la eficiencia de filtrado posee una dinámica muy rápida, alcanzando pronto valores cercanos al 100 %.

A la vista de la precisión del modelo, puede darse como validado el submodelo de filtrado, imprescindible para el ajuste del submodelo de regeneración pasiva.

5.4 Validación submodelo de regeneración pasiva

Tal y como se ha indicado en la *Introducción* del proyecto, los procesos de regeneración del filtro de partículas son necesarios e imprescindibles para su funcionamiento, ya que permiten eliminar el hollín acumulado. El proceso de regeneración implica la combustión del hollín por parte de las especies oxidantes presentes en el gas de escape, y puede clasificarse como activa o pasiva según si requieren o no, un aporte externo de energía.

Las regeneraciones pasivas, que no requieren un aporte externo de energía, se producen normalmente a las temperaturas de escape habituales en el uso normal del motor. Esto permite

reducir la frecuencia a la que se realizan los eventos de regeneración activa, que por el contrario sí necesitan un aporte extra de energía.

Existen diferentes formas de promover la regeneración pasiva, entre otras haciendo uso de recubrimientos de carácter catalítico en el filtro o el empleo de aditivos que favorezcan la oxidación del hollín. Una de las reacciones más habituales que permiten la regeneración pasiva, es la oxidación del carbono (componente principal del hollín) con NO_2 , presente en el gas de escape. Esta reacción tiene una energía de activación menor que la oxidación con oxígeno, y puede favorecerse mediante la instalación de un *catalizador de oxidación diésel* (DOC) aguas arriba del filtro, de tal manera que aumente la cantidad de NO_2 que llegue al mismo.

El modelo desarrollado permite tener en cuenta el efecto de estas reacciones sobre la acumulación de hollín durante el funcionamiento del equipo. Para ello, se lleva a cabo la validación de esta función del modelo empleando un proceso de carga estacionario. Como variable de ajuste del modelo, se varía el factor preexponencial de la reacción de NO_2 con el hollín en la capa de partículas. Este factor varía la constante de velocidad de la reacción química, de acuerdo a la ecuación de Arrhenius.

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (5.10)$$

En la Ecuación 5.10, el parámetro A es el denominado factor preexponencial, y marca la frecuencia de las colisiones entre partículas. De esta manera, un valor elevado de este factor hace aumentar la velocidad de la reacción y por tanto que se queme más hollín en la capa de partículas. Esta expresión de la constante de velocidad también depende de la temperatura (T), de la constante universal de los gases ideales (R) y de la energía e activación (E_a).

En el ajuste se ha empleado el valor del factor preexponencial mostrado en la Tabla 5.12. Los resultados obtenidos en el ajuste, se validan posteriormente con los resultados medidos experimentalmente.

Tabla 5.12: Valor factor preexponencial.

Parámetro	Valor [m/s]
A	160

A continuación, se muestran los resultados del modelo en comparativa con los del ensayo.

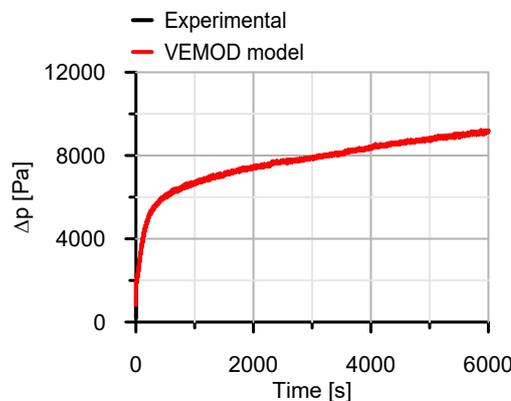


Figura 5.35: Pérdida de presión impuesta.

Como condiciones de contorno se imponen las presiones de entrada y salida del equipo, además de la temperatura de entrada. La pérdida de presión impuesta en el modelo es la obtenida de forma experimental; esto se puede observar en la Figura 5.35.

A continuación, se muestra la evolución temporal de las variables de interés.

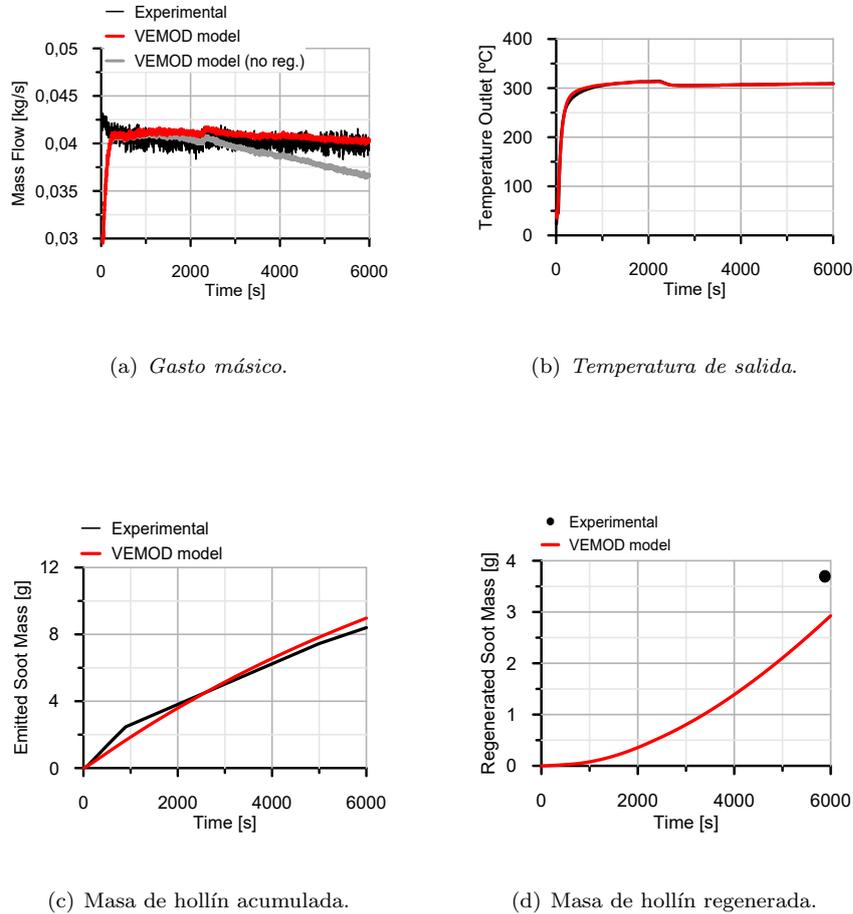


Figura 5.36: Evolución temporal de las variables.

Tal y como se ha comentado anteriormente, un mayor valor del factor preexponencial conlleva una mayor oxidación de hollín en la capa de partículas.

La Figura 5.36 a), muestra que el modelo es capaz de predecir el gasto másico experimental de forma precisa. Este proceso, tiene la peculiaridad de que la regeneración pasiva se da simultáneamente con el proceso de carga del filtro; es decir que conforme el filtro se carga, parte de la masa de hollín acumulada se está oxidando.

En la Figura 5.36 a), además se ha añadido la evolución temporal del modelo si éste no llevara a cabo ninguna regeneración (gráfica en color gris), para apreciar la diferencia en la predicción del gasto másico. La discrepancia con el modelo que sí regenera, es bastante notoria desde los primeros instantes. El hecho de que este modelo no regenere, hace que el filtro se vaya saturando y restrinja cada vez más el paso del flujo, y por tanto, cada vez trasiega menos gasto.

Por otro lado, en la Figura 5.36 b) se puede apreciar que el submodelo de transmisión de calor ha quedado perfectamente validado, pues es capaz de reproducir la dinámica de la temperatura de salida del filtro.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 5.36 c), la masa de hollín emitida obtenida con el modelo es muy similar a la experimental. Esta masa emitida es muy semejante a la masa de hollín filtrada, debido a que la eficiencia de filtrado alcanza muy rápidamente un valor de cercano al 100 %; esto ha quedado demostrado en la validación del submodelo de filtrado.

Por último, la Figura 5.36 d) muestra explícitamente lo comentado hasta ahora, el modelo regenera una cantidad de hollín muy similar a la obtenida experimentalmente. Esta masa de hollín regenerada durante el ensayo, se calculó mediante la diferencia en el peso del filtro antes y después del ensayo.

A continuación, se muestra la evolución de las diferentes variables con respecto a la masa de hollín en el filtro DPF.

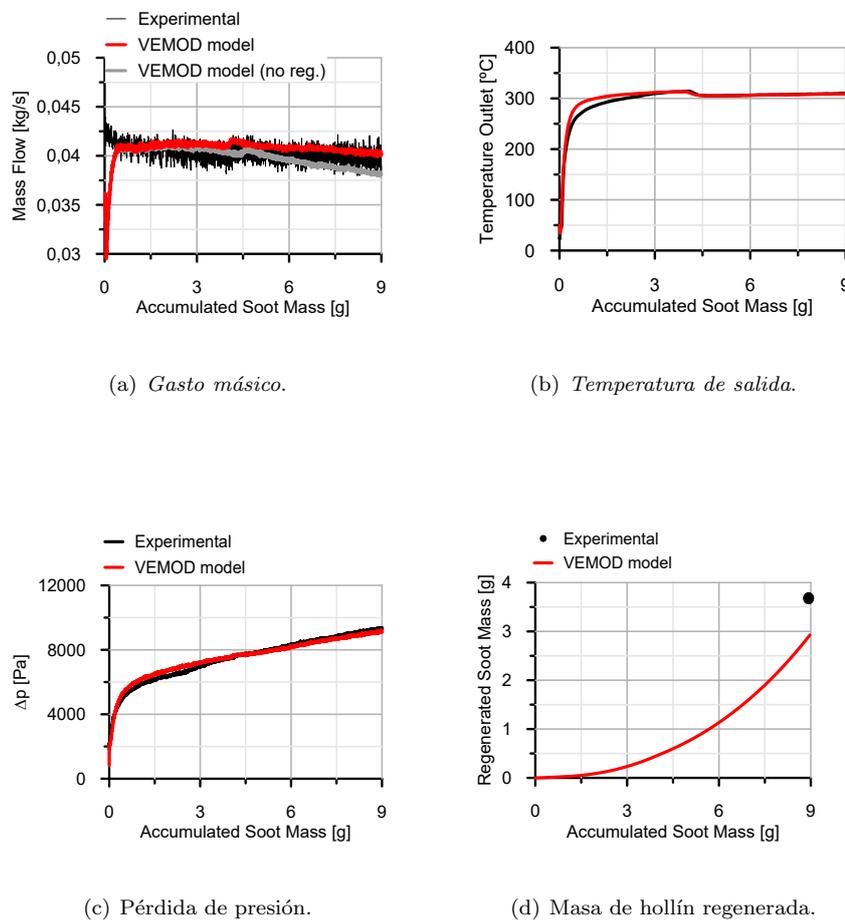


Figura 5.37: Evolución de las variables respecto a la masa de hollín.

En la Figura 5.37 a), se vuelve a observar que el modelo predice de forma precisa la dinámica de la evolución del gasto másico en el filtro. Además, tal y como se ha realizado anteriormente, se ha añadido el gasto másico modelado por un caso sin regeneración, con una finalidad comparativa.

De igual manera a cómo se ha visto anteriormente, el modelo reproduce la evolución de la dinámica de la temperatura de salida; esto se puede verificar en la Figura 5.37 b). Con esto se vuelve a validar el ajuste del submodelo de transmisión de calor.

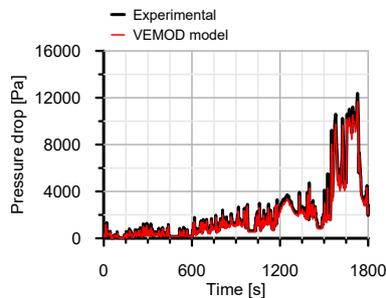
En la última de las gráficas, la Figura 5.37 d), se verifica que frente a la masa de hollín acumulada, el modelo regenera una cantidad de hollín muy similar a la calculada de forma experimental.

Finalmente, a la vista de los gráficos expuestos, el ajuste llevado a cabo sobre el submodelo de regeneración queda validado.

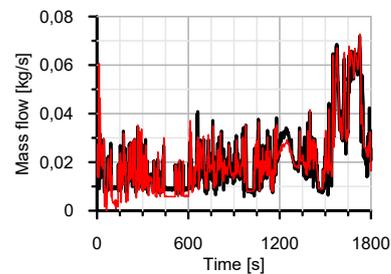
5.5 Validación ciclo WLTC

Una vez ajustados todos los submodelos de forma independiente, que conforman el modelo del filtro DPF en VEMOD, se busca validar dichos ajustes frente a condiciones reales de funcionamiento. Para ello, se hace uso de un ensayo en el que se simula un ciclo de conducción, denominado *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycles*, o *WLTC* por sus siglas en inglés.

En dicho ensayo, que tiene una duración de 1800 segundos, se tomaron medidas experimentales de todas las variables de interés empleadas hasta ahora. De la misma manera que se ha operado hasta ahora, la pérdida de presión medida experimentalmente, es la impuesta como condición de contorno en el modelo VEMOD. Sin embargo, en este caso durante los primeros instantes del ciclo se impuso como condición de contorno el ratio NO_2/NO_x . A continuación, se muestran las gráficas que recogen los resultados obtenidos.



(a) Pérdida de presión.



(b) Gasto másico.

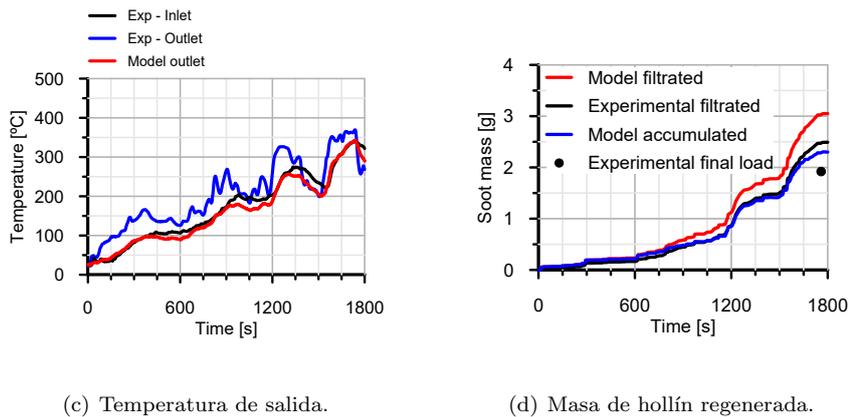


Figura 5.38: Ensayo *WLTC*.

Tal y como se puede observar en las diferentes gráficas, el ensayo corresponde con unas condiciones del flujo altamente fluctuantes.

La Figura 5.38 a) muestra que el modelo se ajusta de forma exacta a la pérdida de presión experimental, esto es lógico puesto que esta pérdida de presión es la que se impone al modelo como condición de contorno.

En la Figura 5.38 b), se puede apreciar que el modelo es capaz de reproducir de forma precisa el gasto másico experimental. Pese a que en determinados instantes, el modelo no es capaz de captar el flujo experimental, sí es capaz de predecir la dinámica.

Por otro lado, la Figura 5.38 c) muestra la evolución temporal de la temperatura de salida del filtro. El modelo es capaz de predecir dicha evolución.

En cuanto a la Figura 5.38 d), se aprecia que existe una pequeña discrepancia entre la masa de hollín acumulada en el filtro experimentalmente y la acumulada por el modelo. La masa acumulada experimentalmente se calculó mediante la diferencia en el peso del filtro antes y después del correspondiente ensayo; esto unido a que el error de la balanza es $\pm 0,5 g$, hace que realmente la discrepancia producida sea en realidad, menor al que se aprecia en la gráfica.

En esta sección, se ha verificado que el modelo se comporta correctamente en condiciones reales de funcionamiento. Con esto quedan validados los diferentes ajustes llevados a cabo, sobre cada uno de los submodelos. De esta manera, queda demostrado que la metodología empleada a lo largo del proyecto es adecuada a la hora de ajustar un modelo de DPF, cumpliéndose uno de los principales objetivos.

Conclusiones

A la vista de lo expuesto a lo largo del trabajo, se hace evidente que en el interior de un filtro de partículas diésel tienen una gran multitud de fenómenos diferentes. Además, también se ve la gran necesidad de contar con herramientas computacionales eficaces y fiables, que permitan conocer y estudiar cómo afectan estos fenómenos sobre el funcionamiento del propio filtro, y del motor en general.

El software empleado a lo largo de este proyecto, denominado VEMOD, lleva implementado un modelo computacional de filtro de partículas diésel. Este modelo, a su vez compuesto de diversos submodelos, es capaz de reproducir los fenómenos que tienen lugar en el interior del DPF. Dichos submodelos han sido el objeto de ajuste y validación llevado a cabo en el trabajo, dándose de forma satisfactoria.

De todo el trabajo realizado se han extraído una serie de conclusiones fruto del entendimiento del modelo y de los fenómenos físicos considerados por el mismo.

En primer lugar, ha quedado demostrado que el rango de validez del modelo es bastante amplio, abarcando todas las posibles condiciones de funcionamiento en las que podría operar un filtro DPF. Esto permite dar por válidas tanto las ecuaciones que los diferentes submodelos llevan implementadas, así como las hipótesis asumidas en determinados casos.

Además, el modelo admite sin problemas el aumento de la discretización radial, con el fin de predecir de forma más precisa la transmisión de calor radial. No obstante, el aumento de esta discretización conlleva un reajuste del submodelo, necesario debido a la definición de las propias ecuaciones.

El modelo, también ha demostrado ser válido en situaciones altamente transitorias como las ensayadas en el banco de flujo caliente. Este tipo de ensayos, son necesarios para validar el modelo frente a condiciones similares a las reales de operación. Puesto que el modelo se ajusta igual de bien en situaciones altamente transitorias, que en situaciones estacionarias, el ajuste del modelo de filtro DPF es válido independientemente de la dinámica del flujo, y de la dinámica térmica.

En referencia al ajuste del proceso de filtrado, éste posee una dinámica altamente homogénea; esto es, el proceso tiende a estabilizarse por sí solo. Es por ello, que un modelo de valor medio como el empleado se ajusta de forma sencilla.

En cuanto al proceso de regeneración pasiva durante un proceso de carga, se trata de un mecanismo de oxidación lento y continuo. Debido a que la cantidad de partículas filtradas, es mayor que la de partículas oxidadas, el medio poroso se termina colmatando. Una vez colmatado, se genera la capa de partículas sobre las paredes del monolito. Pese a la formación de esta capa de partículas, las retenidas en el medio poroso no dejan de oxidarse; esto se debe a que no se interrumpe el flujo de especies oxidantes a través de éste, mientras que al existir capa, ya no entran partículas en la pared, pues quedan retenidas sobre dicha capa. Por lo tanto, en el filtro termina quedando una capa de partículas, mientras que el medio poroso queda limpio de hollín.

A la vista de lo expuesto en referencia al proceso de regeneración, es más complejo de modelar y ajustar. Además, el ajuste de este submodelo requiere de un previo ajuste del correspondiente submodelo de filtrado, puesto que ambos están altamente relacionados; una vez ajustados ambos submodelos, el modelo de DPF es capaz de reproducir de forma adecuada los resultados experimentales.

Finalmente, se pueden dar por cumplidos los objetivos planteados al comienzo del presente proyecto, al haber logrado la correcta validación de los diferentes submodelos frente a condiciones de funcionamiento reales. De forma más genérica, se ha conseguido demostrar que la metodología empleada y desarrollada a lo largo del presente proyecto es la adecuada para el ajuste de un modelo de DPF, compuesta por una serie de ajustes y validaciones independientes, terminando en un proceso global. La eficacia de esta metodología, le permite ser empleada en futuros proyectos.

6.1 Trabajos futuros

Pese a haber logrado con éxito un ajuste y posterior validación del modelo de DPF, se puede seguir profundizando en el tema. De hecho, tal y como se ha expuesto en el desarrollo del trabajo, el modelo DPF viene implementado en el software VEMOD, desarrollado por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Este software es capaz de reproducir el comportamiento de un motor al completo, considerando todas sus partes. No obstante, el modelo de DPF se ha tratado de forma independiente, es decir, sin atender a la influencia o interacción con otros elementos del motor. Simplemente, se ha hecho uso del modelo introduciendo las condiciones de contorno a las que éste está sometido.

Un posible proyecto a desarrollar en futuras ocasiones, sería la integración del modelo de DPF empleado en el software VEMOD. Esta integración podría conllevar un reajuste de determinados submodelos, en el caso que estos se vieran influenciados por otros elementos del motor. De esta manera, se haría uso del modelo DPF de forma integrada en el software.

Otra posibilidad de proyecto a llevar a cabo, sería el desarrollo e implementación de un submodelo de regeneración activa, dada la importancia de este proceso en el funcionamiento real del filtro. Posteriormente, se haría necesario el ajuste de dicho submodelo, de forma similar al trabajo llevado a cabo.

Bibliografía

- [1] PIQUERAS CABRERA, P. (2010) “*Contribución al modelado termo-fluidodinámico de filtros de partículas Diesel de flujo de pared.*” Tesis Doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] SANCHIS PACHECO, E.J. (2016) *Contribución al modelado del proceso de regeneración de filtros de partículas diésel.* Trabajo Fin de Máster. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [3] GARCÍA-AFONSO, O. (2013) *Análisis teórico-experimental de la arquitectura pre-turbo de sistemas de post-tratamiento en MCI.* Tesis Doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] SERRANO, J.R., CLIMENT, H., PIQUERAS, P. y ANGIOLINI, E. (2016) “*Filtration modelling in wall-flow particulate filter of low soot penetration thickness*” en *Energy*, 112(2016)883-898.
- [5] PAYRI, F., BROATCH, A., SERRANO, J.R. y PIQUERAS, P. (2011) “*Experimental-theoretical methodology for determination of inertial pressure drop distribution and pore structure properties in wall-flow diesel particulate filters (DPFs)*” en *Energy*, 36(2011)6731-6744.
- [6] TORREGROSA, A.J., SERRANO, J.R., PIQUERAS, P. y GARCÍA-AFONSO, O. (2017) “*Experimental and computational approach to the transient behaviour of wall-flow diesel particulate filters*” en *Energy*, 119(2017)887-900.
- [7] BERMÚDEZ, V., SERRANO, J.R., PIQUERAS, P. y GARCÍA-AFONSO, O. (2014) “*Pre-DPF water injection technique for pressure drop control in loaded wall-flow diesel particulate filters*” en *Applied Energy*, 140(2015)234-245.
- [8] TORREGROSA, A.J., SERRANO, J.R., ARNAU, F.J. y PIQUERAS, P. (2010) “*A fluid dynamic model for unsteady compressible flow in wall-flow diesel particulate filters*” en *Energy*, 36(2011)671-684.
- [9] SERRANO, J.R., ARNAU, F.J., PIQUERAS, P. y GARCÍA-AFONSO, O. (2013) “*Packed bed of spherical particles approach for pressure drop prediction in wall-flow DPFs (diesel particulate filters) under soot loading conditions*” en *Energy*, 58(2013)644-654.
- [10] SEVERIN C. *Exhaust Aftertreatment of Internal Combustion Engines.*
- [11] PAYRI F. y DESANTES J.M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos.* Valencia: Editorial Reverté-Editorial UPV.

Parte II

Pliego de Condiciones

Condiciones de higiene y salud en el trabajo

Artículo 1. **Ámbito de aplicación.**

Se ajustarán a las disposiciones de esta Ordenanza todas aquellas personas comprendidas en el ámbito del Sistema de Seguridad Social con el fin de garantizar su propia seguridad, prevenir accidentes y enfermedades de carácter laboral. De esta manera, se podrán garantizar las mejores condiciones de higiene y bienestar en los puestos y centros de trabajo.

Artículo 11. **Obligaciones y derechos de los trabajadores.**

Los trabajadores están obligados a la cooperación en materia de prevención de riesgos profesionales en la empresa así como en el mantenimiento de la máxima higiene, para lo cual deberán cumplir los preceptos de esta Ordenanza y sus instrucciones, así como las órdenes e instrucciones dadas por sus superiores.

Los trabajadores están obligados a cumplir una serie de premisas.

- Recibir las correspondientes enseñanzas sobre Seguridad, Higiene, Salvamento y Socorrismo en los centros de trabajo facilitados por su empresa.
- Usar de forma adecuada los medios de protección personal, así como cuidar de su estado y conservación.
- Informar a sus superiores de las averías y deficiencias susceptibles de ocasionar cualquier tipo de peligro en los centros y puestos de trabajo.
- Cuidar y mantener su higiene personal don el fin de evitar las enfermedades contagiosas o molestias a los compañeros de trabajo.
- Someterse a los reconocimientos médicos preceptivos así como a las vacunaciones o inmunizaciones ordenadas por las Autoridades Sanitarias competentes.

- No introducir bebidas u otras sustancias no permitidas en los centros de trabajo, así como no presentarse ni permanecer en estado de embriaguez en los mismos.
- Colaborar en la extinción de siniestros y en el salvamento de víctimas de accidentes laborales en las condiciones que fueran racionalmente exigibles.

Artículo 13. Seguridad estructural.

Las edificaciones han de cumplir una serie de requisitos.

- Todos los edificios, tanto permanentes como provisionales, serán construidos de forma que sean seguros a fin de evitar desplomes o derribos derivados de agentes atmosféricos.
- Tanto los cimientos como los pisos y demás elementos, ofrecerán resistencia suficiente para suspender y sostener con seguridad las cargas para los que han sido calculados.
- Se indicará por medio de rótulos visibles las cargas que los locales pueden soportar o suspender, quedando prohibido cualquier tipo de sobrecarga.

Artículo 14. Superficie y cubicación.

Los locales de trabajo han de reunir las siguientes condiciones mínimas.

- Tres metros de altura desde el piso al techo.
- Dos metros cuadrados de superficie para cada trabajador.
- Diez metros cúbicos de espacio por cada trabajador.

En edificios destinados a oficinas la altura puede ser reducida hasta los dos metros y medio, siempre que se respete la cubicación anteriormente señalada.

Por otro lado, en el cálculo de superficies y espacios no se considerarán las máquinas, aparatos, instalaciones ni materiales.

Artículo 15. Suelos, techos y paredes.

Se asegurará que el pavimento constituye un conjunto homogéneo y llano. Ha de ser construido de material consistente no resbaladizo o susceptible de serlo con el uso prolongado, y de fácil limpieza. Además, las diferencias entre niveles deben ser evitadas, y en caso de que sean inevitables serán salvadas con rampas de pendiente inferior al 10%.

Por otro lado, las paredes serán lisas y pintadas de colores claros, susceptibles de ser lavadas o blanqueadas. A su vez, los techos deberán reunir las condiciones suficientes para proteger a los trabajadores de las inclemencias del tiempo.

Artículo 16. Pasillos.

Los corredores, galerías y pasillos deberán ser lo suficientemente anchos como para que transiten adecuadamente el número de personas previstas y para que cumplan las necesidades del trabajo. En cualquier caso, las dimensiones mínimas serán:

- 1,20 metros de anchura en pasillos principales.
- 1 metro de anchura en los secundarios.

Por otro lado, la separación entre máquinas u otros aparatos será la adecuada para que los trabajadores puedan operarlas y realizar su trabajo de forma segura. Esta separación nunca será menor de 0,80 metros.

Artículo 25. Iluminación-Disposiciones generales.

Todos los lugares y puestos de trabajo, así como lugares de tránsito, contarán con la iluminación adecuada, bien sea natural, artificial o mixta. En cualquier caso, se le dará prioridad a la luz natural siempre que sea posible. La iluminación de máquinas peligrosas se intensificará, así como los lugares de tránsito con riesgo de caída, escaleras y salidas de urgencia. La iluminación deberá graduarse en los lugares de acceso a zonas de distinta intensidad luminosa.

Artículo 29. Iluminación de emergencia.

En todos los centros de trabajo se dispondrá de los medios adecuados para la iluminación de emergencia de acuerdo a las dimensiones de éstos y al número de trabajadores operativos simultáneamente. Esta iluminación será capaz de mantener una intensidad de cinco lux durante al menos una hora, siendo su fuente de energía independiente del sistema normal de iluminación.

Artículo 30. Ventilación, temperatura y humedad.

Se asegurarán, bien por medios naturales o artificiales, las condiciones atmosféricas adecuadas evitando el exceso de calor o frío, humedad o sequedad.

Se tendrá especial cuidado en que el anhídrido carbónico o ambiental no supere la proporción de 50/10000, y el monóxido de carbono, la de 1/10000.

Se deberá asegurar que el suministro de aire fresco y limpio por hora y trabajador sea de al menos $30 m^3$, salvo que se efectúe una renovación total de aire varias veces por hora, siendo como mínimo seis veces para trabajos sedentarios y diez veces en el caso de trabajos que requieran esfuerzos físicos.

Se asegurará que la circulación del aire en locales cerrados se acondicione de forma que los trabajadores no estén expuestos a corrientes de aire molestas, que no excedan los $15 \text{ metros}/\text{min}$ en caso de temperaturas normales ni los $45 \text{ metros}/\text{min}$ en caso de temperaturas muy cálidas.

En los centros de trabajo expuestos a cambios bruscos de temperatura, se evitarán estos cambios de la forma más eficaz posible. En caso de que sea necesario, se habilitarán locales de paso para que los operarios y trabajadores se adapten gradualmente a dichos cambios.

Se establecen los siguientes límites normales de temperatura:

- Trabajos sedentarios: de 17 a 22 grados centígrados.
- Trabajos ordinarios: de 15 a 18 grados centígrados.
- Trabajos con acusado esfuerzo: de 12 a 15 grados centígrados.

Se establecen los siguientes límites normales de humedad relativa:

- Entre el 40 % y el 60 %, en instalaciones ordinarias.
- Superior al 50 % en instalaciones con peligro de generarse electricidad estática.

Artículo 31. Ruidos, vibraciones y trepidaciones.

Se evitarán o reducirán en lo posible los ruidos y las vibraciones en los locales de trabajo. Para ello, el anclaje de máquinas y aparatos susceptibles de originar estos ruidos o vibraciones, será realizado de forma óptima. En caso de que se empleen bancadas, el peso ha de ser de 1.5 a 2.5 veces superior al peso de la propia máquina.

En el caso de que haya máquinas que produzcan ruidos o vibraciones molestas, se prohíbe instalarlas a menos de 0.70 metros de paredes o columnas. Éstas se aislarán adecuadamente y sólo trabajarán en el recinto el personal necesario.

No solo se aislarán los focos de ruidos agresivos en los centros de trabajo, sino que se adoptarán las prevenciones técnicas necesarias para evitar que se produzcan los fenómenos de reflexión y resonancia.

A partir de los 80 decibelios de nivel sonoro, y siempre que no se consiga reducir aislándolo, se adoptarán medidas de protección personal como tapones o cascos.

Artículo 51. Protección contra contactos en las instalaciones y equipos eléctricos.

Para la protección de las personas contra los contactos con partes habitualmente en tensión en los equipos e instalaciones eléctricas, se adoptarán una serie de medidas:

- Se situarán las partes activas de la instalación a suficiente distancia del lugar por donde circulan o se encuentran habitualmente las personas.
- Se recubrirán las partes activas con el aislamiento apropiado, de tal manera que la corriente de contacto se reduzca a un valor inocuo.
- Se dispondrán de obstáculos de protección para evitar el contacto accidental con las partes activas de la instalación. Estos obstáculos deben resistir de forma segura, los esfuerzos mecánicos usuales.

Para proteger contra el contacto las masas de las instalaciones que puedan quedar accidentalmente con tensión, se hará uso de los siguientes dispositivos y medidas de seguridad:

-
- Las masas deberán estar unidas eléctricamente a una toma de tierra. Además las instalaciones, deben estar controladas de forma permanente mediante un dispositivo que indique la existencia de cualquier defecto en el aislamiento.
 - Dispositivos de corte automático sensibles a la corriente de defecto.
 - Se separarán los circuitos de utilización de las fuentes de energía por medio de transformadores o grupos convertidores.

Por último, en el caso de las instalaciones de corriente continua, se adoptarán las mismas medidas que para las de alterna.

Artículo 57. Electricidad estática.

Para evitar que se produzcan chispas en ambientes inflamables o cualquier otro peligro por electricidad estática, la humedad relativa se mantendrá por encima del 50%. A su vez, las cargas de electricidad estática que puedan acumularse en cuerpos metálicos se neutralizarán mediante tomas de tierra.

Artículo 82. Medios de prevención y extinción de incendios

Además de la protección general más próxima que puedan prestar los servicios públicos contra incendios, en los centros de trabajo susceptibles de sufrir incendios con o sin explosión, se adoptarán las siguientes medidas:

- Donde existan conducciones de agua a presión, se instalarán suficientes bocas de agua, lo suficientemente cercanas a los puestos de trabajo. Éstas contarán con la sección y la resistencia adecuadas. En caso de no contar con agua a presión, se instalarán depósitos con agua suficiente para combatir los posibles incendios.
- Se evitará el uso de agua como medio extintor en aquellos incendios originados por productos que al contacto con el agua originen algún tipo de explosión o gases nocivos.
- Se dispondrán cerca de los puestos de trabajo con mayor riesgo de sufrir incendios, extintores portátiles de forma que sean visibles y fácilmente accesibles. Estos extintores serán revisados periódicamente y cargados, de acuerdo a la normativa vigente.
- En los lugares de trabajo de gran peligrosidad de sufrir un incendio, se podrá imponer la obligatoriedad de la instalación de detectores automáticos.
- En los centros de trabajo con grave riesgo de incendio se instruirá y entrenará especialmente al personal en el uso de equipos contra incendios. A su vez, y con carácter preventivo, se realizarán periódicamente alarmas y simulacros de incendios.

Parte III

Presupuesto

Capítulo 1

Introducción

En este documento se muestra y detalla el presupuesto correspondiente al proyecto *Validación experimental de un modelo fluidodinámico de valor medio para filtros de partículas diésel (DPF)*.

El desembolso económico ha sido llevado a cabo por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, que ha sido el encargado de proporcionar el material informático y la mano de obra necesaria. La parte de ensayos experimentales no forma parte de este proyecto, por lo que los gastos correspondientes no se incluyen como parte del presupuesto. No obstante, puesto que el proyecto se ha servido de estos ensayos, cabe mencionar que los gastos derivados de las instalaciones experimentales, han sido cubiertos por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.

El presupuesto se define en base a la duración del proyecto, las etapas que conforman su desarrollo y la mano de obra que se ha visto involucrada. La duración del proyecto ha sido de 9 meses desde que se establecieron los objetivos iniciales hasta que se ha concluido.

Las etapas del proyecto comprenden desde las reuniones iniciales en las que se establecieron los objetivos iniciales, hasta el desarrollo del mismo junto a las reuniones que se llevaron a cabo durante el mismo.

Durante el desarrollo del proyecto, han intervenido en él un profesor doctor encargado de la dirección del mismo, un doctorando encargado de la dirección experimental y el autor del proyecto, un ingeniero aeroespacial de grado junior.

A continuación se desglosa el presupuesto del proyecto atendiendo a las diferentes etapas, así como el material tanto informático como fungible que se ha empleado en cada una de ellas.

Desglose presupuestario

En este capítulo se desglosa el presupuesto del proyecto. Este desglose se hace de acuerdo a las etapas del proyecto, en primer lugar las reuniones iniciales llevadas a cabo, y posteriormente, el estudio en sí mismo.

2.1 Reuniones

Las reuniones llevadas a cabo inicialmente, sirvieron para establecer los objetivos de estudio que el proyecto debería abarcar. En primera instancia participaron en ella el director del proyecto junto al doctorando, posteriormente el ingeniero autor del proyecto fue también partícipe de ellas. Posteriormente, se realizaron reuniones durante el desarrollo del proyecto con la finalidad de evaluar la evolución del proyecto.

En las reuniones, participaron las tres personas involucradas en el proyecto, pero no de forma simultánea en todas ellas. Las tasas horarias que corresponden a cada una de estas personas son las siguientes:

- Profesor doctor: 50 €/h.
- Doctorando: 25 €/h.
- Ingeniero junior: 15 €/h.

En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se diferencian las reuniones iniciales según los integrantes que participaron en ellas.

Tabla 2.1: Reuniones iniciales mantenidas entre doctor y doctorando.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Doctor	5 horas	50 €/h	250
Doctorando	5 horas	25 €/h	125
Subtotal			375

Tabla 2.2: Reuniones iniciales mantenidas entre doctor e ingeniero junior.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Doctor	2 horas	50 €/h	100
Ing. junior	2 horas	15 €/h	30
Subtotal			130

Tabla 2.3: Reuniones iniciales mantenidas entre doctorando e ingeniero junior.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Doctorando	5 horas	25 €/h	125
Ing. junior	5 horas	15 €/h	75
Subtotal			200

A continuación, en las Tablas se recogen las reuniones que tuvieron lugar durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 2.4: Reuniones mantenidas entre doctor, doctorando e ingeniero junior.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Doctor	10 horas	50 €/h	500
Doctorando	10 horas	25 €/h	250
Ing. junior	10 horas	15 €/h	150
Subtotal			900

Tabla 2.5: Reuniones mantenidas entre doctorando e ingeniero junior.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Doctorando	50 horas	25 €/h	1250
Ing. junior	50 horas	15 €/h	750
Subtotal			2000

Si agrupamos todo el presupuesto debido al desarrollo de las reuniones, quedaría tal y como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Presupuesto en relación a las reuniones mantenidas.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Doctor	15 horas	50 €/h	750
Doctorando	72 horas	25 €/h	1800
Ing. junior	67 horas	15 €/h	1005
Subtotal			3555

La celebración de reuniones, además de la mano de obra implicada, lleva asociada un coste económico debido a la adquisición de equipos informáticos y su amortización, además de las licencias del software empleado. La Tabla 2.7 recoge los costes de adquisición de equipos y licencias de software empleados en las reuniones, mientras que la Tabla 2.8 recoge los costes de amortización de estos equipos.

Tabla 2.7: Coste de equipos empleados en las reuniones.

Concepto	Importe €
Ordenador	650
Licencia Microsoft Office	250
Subtotal	900

Tabla 2.8: Costes de amortización de equipos.

Coste equipos	900 €
Período amortización	4 años
Coste mensual amortización	18.75 €/mes
Período amortizado	9 meses
Subtotal	168.75 €

En cuanto al material fungible empleado en las diferentes reuniones, la Tabla 2.9 recoge los costes asociados.

Tabla 2.9: Costes de material fungible empleado en las reuniones.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Papel	100	0.01 €/ud.	1
Bolígrafo	2	0.5 €/ud.	1
Subtotal			2

2.2 Desarrollo del proyecto

La fase dedicada al desarrollo del proyecto comprende toda la etapa de estudio y procesado de información, con la correspondiente mano de obra, equipos, herramientas computacionales y material fungible. La mano de obra corresponde de forma íntegra al ingeniero de grado junior. La mano de obra debida al doctor y doctorando, se corresponde con las reuniones mantenidas, con lo cual han sido incluidas en la sección anterior.

De los 9 meses de duración del proyecto, el autor ha empleado en torno a 700 horas desde el comienzo hasta su finalización, lo cual se recoge en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10: Costes de mano de obra.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Ing. Junior	700	15 €/h	10500
Subtotal			10500

En cuanto al coste económico de adquisición de equipos y licencias de software, así como su amortización se recoge en las Tablas 2.11 y 2.12 .

Tabla 2.11: Coste de equipos.

Concepto	Importe €
Ordenador	650
Licencia MATLAB	500
Licencia Grapher 10	490
Licencia Microsoft Office	250
Subtotal	1890

Tabla 2.12: Costes de amortización de equipos.

Coste equipos	1890 €
Período amortización	4 años
Coste mensual amortización	39.38 €/mes
Período amortizado	9 meses
Subtotal	354.38 €

En cuanto al material fungible empleado durante el desarrollo del proyecto, la Tabla 2.13 recoge el presupuesto correspondiente.

Tabla 2.13: Costes de material fungible empleado en las reuniones.

Concepto	Unidades	Coste	Importe €
Papel	200	0.01 €/ud.	2
Bolígrafo	4	0.5 €/ud.	2
Tóner impresora	1	70 €/ud.	70
Subtotal			74

Capítulo 3

Presupuesto total

De acuerdo al desglose presupuestario realizado en el capítulo anterior, en este capítulo se muestra el presupuesto global del proyecto. Las tarifas de mano de obra empleadas, no incluyen el 21 % de IVA, mientras que los costes de equipo y material fungible sí. En cuanto al coste de adquisición y amortización de equipos, puesto que no fueron adquiridos para el uso exclusivo durante el proyecto, sólo se incluirá en el presupuesto global, el coste de amortización.

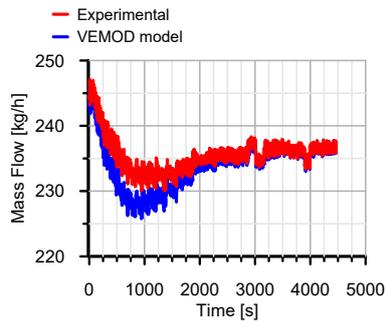
Tabla 3.1: Presupuesto total del proyecto.

Concepto	Coste €	Coste con IVA €
Mano de obra	14055	17006.55
Amortización equipos	523.13	-
Material fungible	76	-
Coste total		17605.68 €

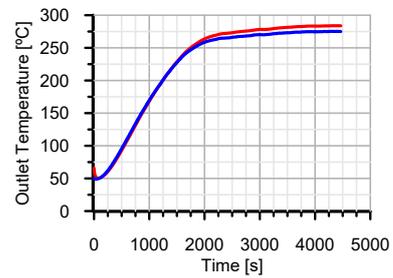
Anexos

Casos transitorios, 10 haces

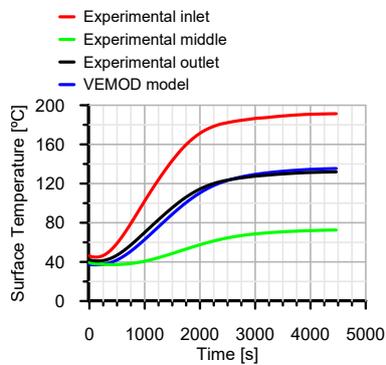
Proceso calentamiento 1



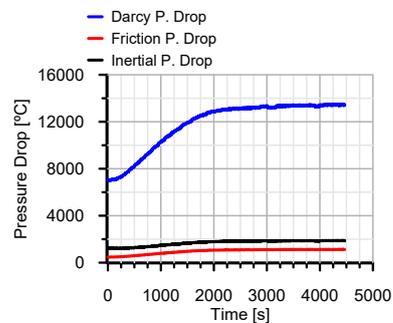
(a) *Gasto másico.*



(b) *Temperatura de salida.*



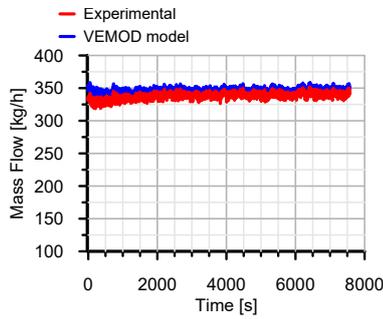
(c) *Temperatura de superficie.*



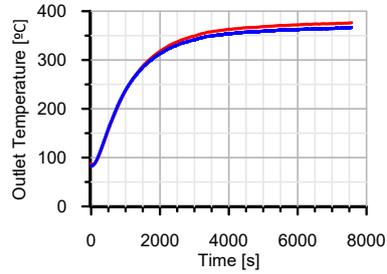
(d) Δp .

Figura A.1: Proceso calentamiento 1.

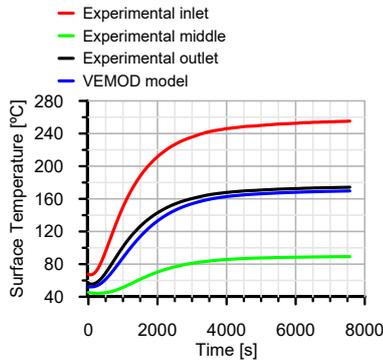
Proceso calentamiento 3



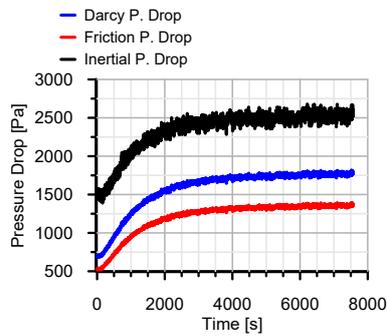
(a) Gasto másico.



(b) Temperatura de salida.



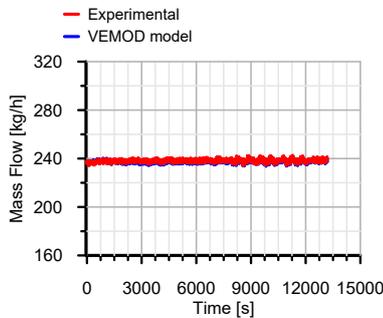
(c) Temperatura de superficie.



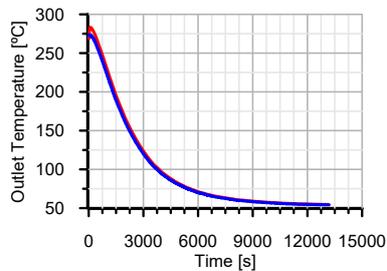
(d) contribuciones Δp .

Figura A.2: Proceso calentamiento 3.

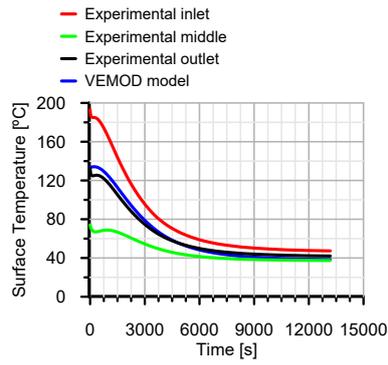
Proceso enfriamiento 1



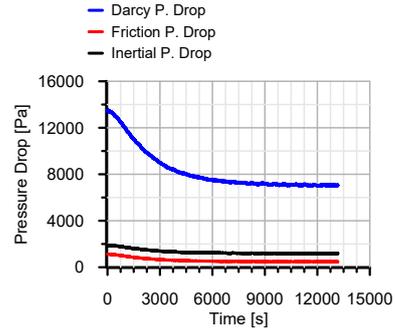
(a) Gasto másico.



(b) Temperatura de salida.



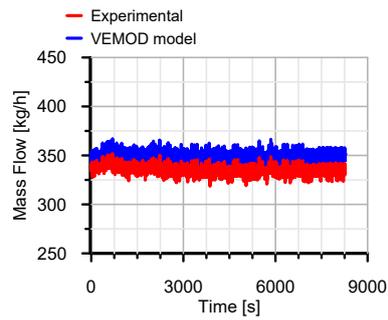
(c) *Temperatura de superficie.*



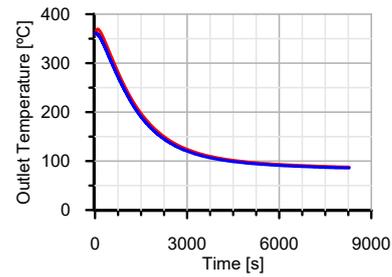
(d) *contribuciones Δp .*

Figura A.3: Proceso enfriamiento 1.

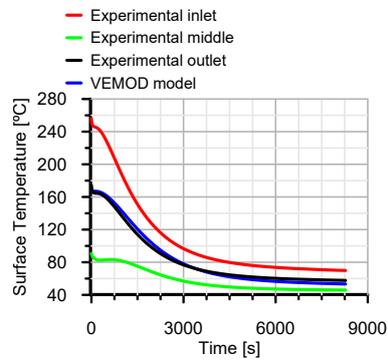
Proceso enfriamiento 3



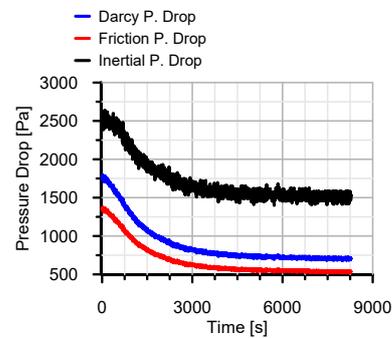
(a) *Gasto másico.*



(b) *Temperatura de salida.*



(c) *Temperatura de superficie.*



(d) *contribuciones Δp .*

Figura A.4: Proceso enfriamiento 3.

Comentarios

Al igual que ocurría con los casos mostrados en la validación del modelo con un solo haz de canales, en los procesos *Calentamiento 1* y *Enfriamiento 1*, el filtro se encontraba cargado con 60 g de hollín; esto se debe a que los ensayos experimentales son los mismos. Esta condición hace que la contribución de Darcy a la pérdida de presión global sea mucho mayor que el resto de contribuciones en estos dos casos. Por contra, en el resto de casos, las tres contribuciones son del mismo orden, pues el filtro está limpio.

Como se puede ver en las gráficas de cada uno de los casos, el gasto másico obtenido a través del modelo se ajusta correctamente al gasto experimental. Este ajuste se da independientemente de cual sea el proceso modelado, pues tanto en los procesos de calentamiento como en los de enfriamiento, el error cometido es mínimo.

Por último, en cuanto a las temperaturas calculadas a través del modelo VEMOD, se tiene que su evolución temporal es predicha correctamente. En el caso de la temperatura de superficie, la obtenida por el modelo se encuentra en la media de las medidas experimentalmente. El ajuste del *factor de corrección radial* se encuentra correctamente ajustado, y por tanto, la transmisión de calor queda ajustada y validada.