



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO  
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

---

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PECLET  
SOBRE LA EFICIENCIA DE FILTRADO Y LA PÉRDIDA DE  
PRESIÓN DE FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL

---

TRABAJO FIN DE GRADO  
INGENIERÍA AEROESPACIAL



AUTOR: SALVADOR BELENGUER ALMÉCIJA  
TUTOR: DR. D. PEDRO PIQUERAS CABRERA  
DIRECTOR EXPERIMENTAL: EMANUELE ANGIOLINI

VALENCIA, JULIO 2016



# Resumen

En la actualidad, el campo de investigación de los motores de combustión interna alternativos está focalizado en la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones contaminantes, debido a la cada vez más estricta normativa. En el contexto del cumplimiento de la normativa en emisiones contaminantes, el filtro de partículas Diésel o DPF es el sistema enfocado a la reducción de las emisiones de partículas.

A pesar de conseguir su objetivo, la instalación de este dispositivo introduce una pérdida de presión en la línea de escape creciente con la acumulación de partículas que desemboca en incrementos en el consumo. Por otro lado, a este dispositivo se le requiere elevada eficiencia de filtrado, también creciente con la acumulación de hollín. Este requerimiento se contrapone al de baja pérdida de presión, haciendo necesarias soluciones de compromiso. Es este el contexto en el que surge el proyecto, continuación de una serie de trabajos enfocados a la comprensión de los fenómenos detrás de estos sistemas.

El funcionamiento del filtro en términos de filtrado y de caída de presión viene fuertemente influenciado por el número de Peclet. También la medida en que las partículas penetran en el substrato poroso que compone el DPF es dependiente del número de Peclet. Por ello, este número adquiere especial importancia a la hora de comprender cómo se comportan estos dispositivos. En particular, el Peclet característico de estos sistemas viene determinado por la microestructura de los mismos y por las condiciones termofluidodinámicas a las que se enfrentan.

Con el fin de analizar el comportamiento del filtro frente a cambios en el número de Peclet, se ha realizado un estudio computacional que engloba la variación de este parámetro tanto por medio de la microestructura como por medio de las condiciones termofluidodinámicas. Para ello, se ha seguido una metodología de cálculo basada en el empleo de un modelo de acción de ondas 1D, apoyado en un modelo 0D para el cálculo de la penetración de las partículas en el substrato.

Con lo realizado, se consigue abordar el impacto sobre el filtrado, la pérdida de presión y el consumo que supone la variación del número de Peclet desde los dos grados de libertad existentes, obteniendo una evaluación rigurosa de la manera en que este parámetro define el comportamiento del filtro y aportando posibles criterios a la hora de diseñar estos sistemas.



# Agradecimientos

En estas líneas me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todo el personal del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. En especial, quiero agradecer al tutor del proyecto Dr. D. Pedro Piqueras Cabrera por haber confiado en mí para colaborar en el Departamento y por su dedicación e inestimables consejos que han dado pie al presente proyecto. Ha sido un honor poder colaborar con él y haberlo tenido como profesor.

También quiero agradecer a los compañeros del Departamento, tanto a proyectandos como a doctorandos, por el ambiente de trabajo creado. Pero de manera especial debo agradecer a Emanuele, por su apreciada ayuda y sin el cual no podría haber realizado este proyecto, gracias.

Tampoco voy a olvidar mencionar a mis padres, gracias a los cuales he llegado donde estoy ahora, gracias por vuestro apoyo y ánimo incondicional, en los buenos y malos momentos. Porque se que me apoyarán en lo que sea, a ellos se lo debo todo.

Por último, no voy a olvidar agradecer a mis amigos de la universidad, en especial a Alex, Miguel Ángel, Raúl, Fabián, Nicolás, Sandra y Rubén. Siento no haberos podido dedicar todo el tiempo que os merecéis y muchas gracias por los momentos vividos en esta etapa a la que al fin parece que damos cierre para abrir nuevos caminos. Aunque puede que para algunos los caminos pronto se separen, nuestra amistad perdurará.



# Índice general

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
1.1.	Motivación . . . . .	3
1.2.	Antecedentes . . . . .	4
1.3.	Objetivos . . . . .	5
1.4.	Metodología . . . . .	6
1.5.	Estructura del proyecto . . . . .	6
<b>2.</b>	<b>Sistemas de post-tratamiento</b>	<b>9</b>
2.1.	Normativa en la emisión de contaminantes . . . . .	9
2.2.	Control de emisiones en la línea de escape . . . . .	12
2.2.1.	Catalizador de oxidación Diésel . . . . .	12
2.2.2.	Sistema de reducción catalítica selectiva . . . . .	13
2.2.3.	Trampa de $NO_x$ . . . . .	13
2.2.4.	Filtro de partículas Diésel . . . . .	14
2.3.	Filtro de partículas Diésel de flujo de pared . . . . .	17
2.3.1.	Parámetros estructurales . . . . .	18
2.3.2.	Parámetros térmicos y mecánicos . . . . .	23
2.3.3.	Mecanismos de filtrado . . . . .	24
2.3.4.	Contribuciones a la pérdida de presión . . . . .	26
2.3.5.	Proceso de regeneración . . . . .	29
2.3.6.	Emplazamiento pre-turbo del DPF . . . . .	31
<b>3.</b>	<b>Modelo de cálculo</b>	<b>35</b>
3.1.	Modelo 1D del DPF . . . . .	36
3.1.1.	Geometría del lecho colector . . . . .	40
3.1.2.	Crecimiento de la capa de partículas . . . . .	44
3.1.3.	Submodelo de caída de presión . . . . .	46
3.1.4.	Submodelo de filtrado . . . . .	48
3.2.	Modelo 0D de cálculo de la penetración . . . . .	53
<b>4.</b>	<b>Estudio computacional sobre la influencia del número de Peclet</b>	<b>55</b>
4.1.	Motor modelado . . . . .	55
4.2.	Metodología del estudio computacional . . . . .	57

4.3.	Consideraciones e hipótesis del estudio . . . . .	61
4.4.	Filtro en condiciones limpias de hollín . . . . .	62
4.4.1.	Análisis de la caída de presión y el consumo . . . . .	62
4.4.2.	Análisis de la eficiencia de filtrado . . . . .	73
4.4.3.	Compromiso entre el consumo y la eficiencia de filtrado . . . . .	83
4.5.	Filtro en condiciones cargadas de hollín . . . . .	85
4.5.1.	Análisis de la caída de presión y el consumo . . . . .	85
4.5.2.	Análisis de la eficiencia de filtrado . . . . .	108
4.5.3.	Compromiso entre el consumo y la eficiencia de filtrado . . . . .	119
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>123</b>
5.1.	Aportaciones y conclusiones . . . . .	123
5.2.	Desarrollos futuros . . . . .	126
	<b>Bibliografía</b>	<b>129</b>
<b>II</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>133</b>
<b>1.</b>	<b>Ordenanzas de seguridad e higiene en el trabajo</b>	<b>135</b>
1.1.	Obligaciones y derechos de los trabajadores . . . . .	135
1.2.	Seguridad estructural . . . . .	136
1.3.	Superficies y cubicación . . . . .	136
1.4.	Suelos, techos y paredes . . . . .	137
1.5.	Disposiciones generales . . . . .	137
1.6.	Iluminación de emergencia . . . . .	137
1.7.	Ventilación, temperatura y humedad . . . . .	137
1.8.	Ruidos, vibraciones y trepidaciones . . . . .	138
1.9.	Protección contra contactos en equipos eléctricos . . . . .	139
1.10.	Electricidad estática . . . . .	139
1.11.	Recomendaciones sobre materias inflamables . . . . .	140
1.12.	Prevención y extinción de incendios . . . . .	140
<b>III</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>143</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>145</b>
<b>2.</b>	<b>Balance de presupuesto</b>	<b>147</b>
2.1.	Partida de reuniones . . . . .	147
2.1.1.	Costes de mano de obra . . . . .	147
2.1.2.	Costes de amortización de equipos . . . . .	149
2.1.3.	Costes de material fungible . . . . .	150
2.2.	Partida de estudio computacional . . . . .	150
2.2.1.	Costes de mano de obra . . . . .	150
2.2.2.	Costes de amortización de equipos . . . . .	151
2.2.3.	Costes de material fungible . . . . .	151



**3. Presupuesto global**



# Índice de figuras

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>3</b>
2.1.	Normativa europea en emisiones de partículas y $NO_x$ para vehículos ligeros con motor Diésel. . . . .	11
2.2.	Catalizador de oxidación Diésel (DOC) de monolito cerámico. . . . .	12
2.3.	Filtro de partículas Diésel de flujo de pared completo y cortado diametralmente. . . . .	16
2.4.	Substrato de una espuma cerámica. . . . .	17
2.5.	Filtro metálico con corte de una proporción de los canales. . . . .	18
2.6.	Geometría de un par de canales de entrada y salida de un DPF. . . . .	19
2.7.	Mecanismos de deposición de una partícula en un elemento colector. . . . .	25
2.8.	Proceso de carga característico de un DPF. . . . .	26
2.9.	Contribuciones a la caída de presión en DPFs. . . . .	27
2.10.	Sección transversal de un canal del monolito sobre el que se ha formado una capa de partículas. . . . .	28
2.11.	Esquema de las configuraciones pre- y post-turbo de los sistemas de post-tratamiento en la línea de escape. . . . .	31
3.1.	Discretización radial del monolito en haces de canales. . . . .	37
3.2.	Representación esquemática en OpenWAM del DPF como combinación de elementos 0D, 1D y condiciones de contorno. . . . .	37
3.3.	Métodos numéricos aplicados para la resolución de las ecuaciones de conservación en un par de canales de entrada y salida del DPF. . . . .	39
3.4.	Crecimiento de una unidad colectora con la acumulación de hollín en una unidad celular. . . . .	40
3.5.	Esquema de la subdivisión de la pared porosa en dos regiones diferenciadas por la penetración parcial del hollín. . . . .	42
3.6.	Esquema de la deposición del hollín alrededor de poros superficiales durante la fase de transición. . . . .	45
3.7.	Esquema de las velocidades de filtrado a través de la capa de partículas y de la pared porosa. . . . .	46
3.8.	Comparación de la presión de entrada al DPF, de la velocidad de filtrado y de la eficiencia de filtrado de la pared porosa instantáneos entre configuración post-turbo y pre-turbo. . . . .	52

4.1. Esquema del motor en la interfaz de OpenWAM: a) arquitectura post-turbo, b) arquitectura pre-turbo. . . . .	57
4.2. Discretización de la porosidad ( $\varepsilon_{w_0}$ ) y del diámetro medio de poro ( $d_{p,w_0}$ ) en el estudio paramétrico. . . . .	58
4.3. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $d_{c,w_0}$ [ $\mu m$ ]. . . . .	63
4.4. Efecto de la variación de $\varepsilon$ en las funciones: a) $K$ b) $f_K(\varepsilon)$ . . . . .	63
4.5. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_{w_0}$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ . . . . .	64
4.6. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_{w_0}$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ con longitud reducida. . . . .	65
4.7. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ en la distribución axial de $u_w$ en el canal de entrada en condiciones limpias con $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	66
4.8. Efecto de la variación de $d_{p,w_0}$ en la distribución axial de $u_w$ en el canal de entrada en condiciones limpias con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ . . . . .	66
4.9. Efecto de la reducción de la longitud en la distribución axial de $u_w$ en el canal de entrada en condiciones limpias con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ y $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	67
4.10. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones limpias. . . . .	68
4.11. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones limpias con longitud reducida. . . . .	69
4.12. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la posición de la VGT [%] en condiciones limpias. . . . .	70
4.13. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la posición de la VGT [%] en condiciones limpias con longitud reducida. . . . .	71
4.14. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre el $bsfc$ [g/kWh] en condiciones limpias. . . . .	72
4.15. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre el $bsfc$ [g/kWh] en condiciones limpias con longitud reducida. . . . .	72
4.16. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ en $D_{part}$ en condiciones limpias con $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	74
4.17. Efecto de la variación de $d_{p,w_0}$ en $D_{part}$ en condiciones limpias con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ . . . . .	74
4.18. Efecto de la reducción de la longitud en $D_{part}$ en condiciones limpias con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ y $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	75
4.19. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $Pe_{w_0}$ [-]. . . . .	75
4.20. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $Pe_{w_0}$ [-] con longitud reducida. . . . .	76
4.21. Efecto de la variación de $\varepsilon$ en la función $\varepsilon/K$ . . . . .	77
4.22. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_D$ [-] en condiciones limpias. . . . .	78
4.23. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_D$ [-] en condiciones limpias con longitud reducida. . . . .	78
4.24. Efecto de la variación de $\varepsilon$ en la función $(3 - 2\varepsilon)/3\varepsilon$ . . . . .	79
4.25. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_R$ [-] en condiciones limpias. . . . .	80
4.26. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_I$ [-] en condiciones limpias. . . . .	81
4.27. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_I$ [-] en condiciones limpias con longitud reducida. . . . .	81
4.28. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_{f,w_0}$ [-]. . . . .	82
4.29. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_{f,w_0}$ [-] con longitud reducida. . . . .	83
4.30. Solución de compromiso al reducir la longitud en condiciones limpias. . . . .	84

4.31. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $f_w$ [%]. . . . .	86
4.32. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $f_w$ [%] con longitud reducida. . . . .	86
4.33. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la microestructura de la pared porosa en condiciones de saturación. . . . .	88
4.34. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_w$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ (5 g de hollín). . . . .	89
4.35. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_w$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	90
4.36. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_{w,e}$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ (5 g de hollín). . . . .	91
4.37. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_{w,e}$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	91
4.38. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $m_{s,sat_{cell}}$ [g]. . . . .	92
4.39. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $n_{cell}$ [#]. . . . .	93
4.40. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $n_{cell}$ [#] con longitud reducida. . . . .	93
4.41. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $m_{sp,sat}$ [g] (5 g de hollín). . . . .	94
4.42. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $m_{sp,sat}$ [g] con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	95
4.43. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $m_{pl}$ [g] (5 g de hollín). . . . .	96
4.44. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $m_{pl}$ [g] con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	96
4.45. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $w_{pl}$ [ $\mu m$ ] (5 g de hollín). . . . .	97
4.46. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $w_{pl}$ [ $\mu m$ ] con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	98
4.47. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_{pl}$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ (5 g de hollín). . . . .	99
4.48. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $k_{pl}$ [ $m^2$ ] en $L_e/2$ con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	99
4.49. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ en la distribución axial de $u_w$ en el canal de entrada en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	100
4.50. Efecto de la variación de $d_{p,w_0}$ en la distribución axial de $u_w$ en el canal de entrada en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ . . . . .	101
4.51. Efecto de la reducción de la longitud en la distribución axial de $u_w$ en el canal de entrada en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ y $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	101
4.52. Efecto de la variación de $\Upsilon$ en las funciones: a) $\ln(1/\Upsilon)$ b) $(1 + 1/\Upsilon^4)$ . . . . .	102
4.53. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	103
4.54. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida. . . . .	104
4.55. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la posición de la VGT [%] en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	105
4.56. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre la posición de la VGT [%] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida. . . . .	106
4.57. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre el $bsfc$ [g/kWh] en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	107
4.58. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre el $bsfc$ [g/kWh] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida. . . . .	107

4.59. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ en $D_{part}$ en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	109
4.60. Efecto de la variación de $d_{p,w_0}$ en $D_{part}$ en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ . . . . .	109
4.61. Efecto de la reducción de la longitud en $D_{part}$ en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ y $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ . . . . .	110
4.62. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $Pe_w$ [-] (5 g de hollín). . . . .	111
4.63. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $Pe_w$ [-] con longitud reducida (5 g de hollín). . . . .	111
4.64. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_D$ [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	112
4.65. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_D$ [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida. . . . .	113
4.66. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_R$ [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	114
4.67. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_I$ [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	115
4.68. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_I$ [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida. . . . .	116
4.69. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_{f,w}$ [-] (5 g de hollín). . . . .	117
4.70. Efecto de la variación de $\varepsilon_{w_0}$ y $d_{p,w_0}$ sobre $E_{f,w}$ [-] (5 g de hollín) con longitud reducida. . . . .	118
4.71. Solución de compromiso al reducir la longitud en condiciones de acumulación de hollín (5 g). . . . .	120

# Índice de tablas

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>3</b>
4.1.	Características principales del motor DW10BTED4. . . . .	56
4.2.	Características principales del DPF de referencia. . . . .	56
<b>III</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>145</b>
2.1.	Coste de mano de obra asociado a las reuniones correspondientes a la planificación del proyecto. . . . .	148
2.2.	Coste de mano de obra asociado a las reuniones entre profesor contratado doctor y becario. . . . .	148
2.3.	Coste de mano de obra asociado a las reuniones entre profesor contratado doctor, doctorando y becario. . . . .	148
2.4.	Coste de mano de obra asociado a las reuniones entre doctorando y becario. . . . .	149
2.5.	Coste de mano de obra asociado a la partida de reuniones. . . . .	149
2.6.	Coste de los equipos asociados a la partida de reuniones. . . . .	149
2.7.	Equipos y coste de amortización de los equipos en la partida de reuniones. . . . .	150
2.8.	Coste del material fungible asociado a la partida reuniones. . . . .	150
2.9.	Coste de mano de obra asociado a la realización del estudio computacional. . . . .	151
2.10.	Equipos en la partida de realización del estudio computacional. . . . .	151
2.11.	Amortización de los equipos en la partida de estudio computacional. . . . .	151
2.12.	Coste del material fungible asociado a la partida de estudio computacional. . . . .	152
3.1.	Coste total del proyecto aplicado el IVA asociado a la mano de obra. . . . .	153





# Tabla de símbolos

## Latinos

$a, b$ y $c$	–	constantes ajustables en la correlación del factor de forma
$A_f$	–	área de filtrado monolito
$A_{fr}$	–	área total de la sección transversal del monolito
$A_{open}$	–	área abierta de la sección transversal del monolito
$d_c$	–	diámetro de la unidad colectora
$d_{cell}$	–	diámetro de la unidad celular
$d_p$	–	diámetro medio de poro
$d_{part}$	–	diámetro de las partículas
$D$	–	diámetro del monolito
$D_{part}$	–	coeficiente de difusión de las partículas
$e_0$	–	energía interna específica de parada
$E_D$	–	eficiencia de filtrado de la pared porosa debida al mecanismo de difusión Browniana
$E_{f,gl}$	–	eficiencia de filtrado global del conjunto pared porosa y capa de partículas
$E_{f,pl}$	–	eficiencia de filtrado de la capa de partículas
$E_{f,w}$	–	eficiencia de filtrado de la pared porosa
$E_I$	–	eficiencia de filtrado de la pared porosa debida al mecanismo inercial
$E_R$	–	eficiencia de filtrado de la pared porosa debida al mecanismo de intercepción
$f_K(\varepsilon)$	–	función de la porosidad basada en el factor hidrodinámico de Kuwabara
$f_w$	–	fracción de la pared porosa penetrada por el hollín
$F$	–	área de la sección transversal de un canal en el sistema de ecuaciones de conservación
$F_w$	–	coeficiente de transferencia de cantidad de movimiento debido al efecto de inyección o succión a través del medio poroso
$h_0$	–	entalpía específica de parada
$k$	–	permeabilidad
$k_B$	–	constante de Boltzmann
$K$	–	factor hidrodinámico de Kuwabara
$Kn$	–	número de Knudsen
$L$	–	longitud del monolito
$L_e$	–	longitud de los canales del monolito o longitud efectiva

$L_{plug}$	–	longitud del tapón o sellado
$m_{pl}$	–	masa de hollín acumulada en la capa de partículas
$m_s$	–	masa de hollín acumulada
$m_{sp}$	–	masa de hollín acumulada en el interior de la pared porosa
$\dot{m}$	–	gasto másico
$n$	–	número de nodos
$n_{cell}$	–	número de unidades celulares en el interior del volumen de penetración de un canal
$N_c$	–	número de canales del monolito
$N_{ic}$	–	número de canales de entrada del monolito
$N_R$	–	parámetro de intercepción
$p$	–	presión del gas
$Pe$	–	número de Peclet característico
$q$	–	calor por unidad de tiempo y de masa
$Q$	–	caudal volumétrico
$R$	–	constante del gas
$S_c$	–	coeficiente de ajuste de la eficiencia de filtrado ( <i>sticking coefficient</i> )
$S_l$	–	coeficiente de saturación límite
$St$	–	número de Stokes
$t$	–	coordenada temporal en las ecuaciones de conservación de los canales
$t_c$	–	duración de un ciclo de motor
$T$	–	temperatura del gas
$u$	–	velocidad del flujo en la dirección axial
$u_w$	–	velocidad de filtrado o velocidad a través del medio poroso
$V$	–	volumen del filtro de partículas Diésel definido con la longitud total del monolito
$V_{cell}$	–	volumen de la unidad celular
$V_e$	–	volumen del filtro de partículas Diésel definido con la longitud de los canales del monolito
$V_{sp}$	–	volumen definido por la penetración del hollín en la pared porosa
$w_{pl}$	–	espesor de la capa de partículas
$w_{sp}$	–	espesor de penetración de las partículas en la pared porosa
$w_w$	–	espesor de la pared porosa
$x$	–	coordenada espacial en la dirección axial en las ecuaciones de conservación de los canales
$Y_s$	–	fracción másica de la especie $s$
$z$	–	coordenada espacial en la dirección transversal a la pared porosa en la ecuación de Darcy

### Griegos

$\alpha$	–	lado del canal
$\Delta p$	–	pérdida de presión o de carga
$\Delta t$	–	paso temporal en la discretización de las ecuaciones de conservación

$\Delta x$	–	paso espacial en la discretización de los canales del monolito
$\varepsilon$	–	porosidad
$\eta_D$	–	eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida al mecanismo de difusión Browniana
$\eta_{DRI}$	–	eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida a los tres mecanismos de deposición
$\eta_I$	–	eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida al mecanismo inercial
$\eta_R$	–	eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida al mecanismo de intercepción
$\lambda$	–	camino libre medio de las moléculas del gas
$\mu$	–	viscosidad dinámica del fluido
$\xi$	–	factor corrector de superficie
$\pi_t$	–	relación de expansión de la turbina
$\rho$	–	densidad del fluido
$\rho_C$	–	densidad del carbón
$\rho_{s,w}$	–	densidad de empaquetamiento del hollín en la pared porosa
$\rho_{pl}$	–	densidad de la capa de partículas
$\sigma$	–	densidad de celdas del monolito
$\varsigma$	–	coeficiente de pérdida de presión
$\Upsilon$	–	ancho de canal no ocupado por el hollín normalizado con el ancho de canal
$\phi$	–	coeficiente de saturación
$\Phi_{\rho_s}$	–	factor de densidad de hollín
$\chi$	–	factor de forma
$\psi$	–	factor de percolación

### Subíndices

$a$	–	acompañando a la eficiencia de filtrado, hace referencia a cualquier otra eficiencia
$atm$	–	referente a condiciones atmosféricas
$cell$	–	referente a una unidad celular
$CV$	–	referente a la región de control definida por el mallado
$Darcy$	–	referente a la ley de Darcy
$DOC$	–	referente al DOC
$DPF$	–	referente al DPF
$DPF_0$	–	referente al DPF en condiciones limpias
$fric$	–	referente a la fricción
$e$	–	referente a condiciones efectivas
$i$	–	referente al instante de tiempo $i$
$in$	–	referente a las condiciones de entrada al DPF
$ie$	–	referente a la expansión en el cono de entrada al DPF
$j$	–	referente al tipo de canal (1 si es de entrada y 0 si es de salida)
$lim$	–	referente a una condición límite

<i>mon</i>	–	referente al monolito
<i>oc</i>	–	referente a la contracción del flujo en el cono de salida del DPF
<i>pl</i>	–	referente a la capa de partículas
<i>s</i>	–	referente al hollín
<i>sat</i>	–	referente a condiciones de saturación de la pared porosa
<i>sat<sub>cell</sub></i>	–	referente a condiciones de saturación de una unidad celular
<i>sp</i>	–	referente a la penetración del hollín
<i>w</i>	–	referente a la pared porosa
<i>w<sub>0</sub></i>	–	referente a la pared porosa en condiciones limpias

### Siglas

0D	–	cero-dimensional
1D	–	unidimensional
<i>bsfc</i>	–	<i>brake specific fuel consumption</i>
<i>CRT</i>	–	<i>Continuously Regenerating Trap</i>
<i>DOC</i>	–	catalizador de oxidación Diésel ( <i>Diesel Oxidation Catalyst</i> )
<i>DPF</i>	–	filtro de partículas Diésel de flujo de pared ( <i>Diesel Particulate Filter</i> )
<i>EGR</i>	–	recirculación de gases de escape ( <i>Exhaust Gas Recirculation</i> )
<i>FCT</i>	–	<i>Flux-Corrected transport Technique</i>
<i>LNT</i>	–	Lean NOx Trap (trampa de NOx)
<i>LOF</i>	–	<i>Light-off Factor</i>
<i>MCIA</i>	–	Motor de Combustión Interna Alternativo
<i>MEC</i>	–	Motor de Encendido por Compresión
<i>MEP</i>	–	Motor de Encendido Provocado
<i>MIF</i>	–	factor de integridad mecánica ( <i>Mechanical Integrity Factor</i> )
<i>MoC</i>	–	método de las características ( <i>Method of Characteristics</i> )
<i>NEDC</i>	–	ciclo europeo de homologación de vehículos ( <i>New European Driving Cycle</i> )
<i>NO<sub>x</sub></i>	–	óxidos de nitrógeno
<i>OFA</i>	–	fracción abierta del área frontal del monolito ( <i>Open Frontal Area</i> )
<i>PM</i>	–	materia particulada ( <i>Particulate Matter</i> )
<i>SCF</i>	–	factor corrector de Stokes-Cunningham ( <i>Stokes-Cunningham Factor</i> )
<i>SCR</i>	–	sistema de reducción catalítica selectiva ( <i>Selective Catalytic Reduction</i> )
<i>SFA</i>	–	superficie específica de filtrado ( <i>Specific Filtration Area</i> )
<i>SOF</i>	–	fracción orgánica soluble ( <i>Soluble Organic Fraction</i> )
<i>TIF</i>	–	factor de integridad térmica ( <i>Thermal Integrity Factor</i> )
<i>VGT</i>	–	turbina de geometría variable ( <i>Variable Geometry Turbine</i> )
<i>WAM</i>	–	modelo de acción de ondas ( <i>Wave Action Model</i> )

Parte I

Memoria



# 1

## Introducción

---

En este capítulo se pretende introducir los motivos que han desembocado en la realización del presente proyecto, así como los principales antecedentes al mismo. También se proporcionarán los objetivos del mismo y la metodología a seguir para conseguirlos. En último lugar, se describirá cómo está estructurado el proyecto.

### 1.1. Motivación

El desarrollo que ha experimentado el motor Diésel hasta su estado del arte actual constituye una de las mejoras más significativas logradas en el campo de los motores de combustión interna alternativos (MCI). Con el paso de los años, los motores Diésel han ido ganando aceptación en numerosas aplicaciones y, en particular, se han convertido en el sistema propulsivo más eficiente del sector automovilístico [1], equiparándose a los de encendido provocado en términos de prestaciones.

El atractivo de estos motores radica en sus mayores eficiencias que implican consumos más bajos y menores emisiones de  $CO_2$ , aunque la principal dificultad de estos motores radica en el control de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y de materia particulada (PM).

Para lograr esta aceptación, tanto fabricantes como investigadores han tenido que lidiar con las crecientes exigencias de las normativas anticontaminantes. Esto ha desembocado en el desarrollo de soluciones tecnológicas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Entre las mejoras logradas, cabe mencionar los progresos en los sistemas de inyección, en la combustión y en las estrategias de control. Tampoco hay que olvidar mencionar la inclusión de sistemas de recirculación de gases de escape (EGR) para la reducción de emisiones de  $NO_x$ . Todas estas soluciones tienen en común que afectan al diseño del motor y a sus estrategias de control, estando incluidas dentro de lo que se conoce como soluciones activas.

Sin embargo, las continuas reducciones en los límites impuestos por la normativa han hecho insuficiente el uso de técnicas activas, forzando a la búsqueda de nuevas soluciones para su uso combinado con las anteriores que contribuyan al desarrollo de motores más limpios. En este contexto, surgen los sistemas pasivos o de post-tratamiento, que buscan

la reducción de las emisiones en la línea de escape. Entre estos se encuentran los catalizadores de oxidación Diésel (DOC), los sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR), las trampas de  $NO_x$  (LNT) y el filtro de partículas Diésel (DPF), objeto de este trabajo. No obstante, el uso de estos sistemas introduce una pérdida de carga en el conducto de escape del motor que se ve reflejada en penalizaciones en el consumo. En particular, el filtro de partículas Diésel de flujo de pared, es el sistema de post-tratamiento por excelencia en lo que a emisión de partículas se refiere. Este sistema consiste en una serie de canales alternativamente sellados, de modo que el flujo portador de partículas es obligado a pasar a través de una pared porosa, atrapando físicamente las partículas y acumulándolas en su interior.

Tanto la pérdida de presión que el DPF introduce como la eficiencia en el filtrado de la materia particulada son crecientes con el grado de acumulación de partículas en su interior. El filtrado en estos dispositivos se realiza en base a dos regímenes distinguidos, el filtrado en lecho profundo y el superficial. En el primero de los regímenes, la acumulación de partículas se realiza en el interior del sustrato poroso que conforma el DPF hasta que satura, tras lo cual se inicia una transición al segundo régimen y se comienza a formar una capa de partículas. En la comprensión del régimen de filtrado profundo es donde la penetración de las partículas en el medio poroso adquiere especial importancia. Cuando se alcanzan ciertas condiciones de pérdida de presión, se hace necesaria la aplicación de estrategias de regeneración con el fin de oxidar el hollín acumulado, recuperar la capacidad acumuladora del filtro y volviendo a niveles de caída de presión aceptables.

En este contexto, especial importancia cobra comprender la naturaleza que hay detrás de la deposición de partículas. Estos fenómenos dependen de la macro y microgeometría del filtro y de las condiciones fluidodinámicas a las que se ve sometido, y van a condicionar las prestaciones del mismo en términos de eficiencia de filtrado y de caída de presión. Desde este punto de vista, el parámetro que adquiere un carácter relevante es el número de Peclet, que relaciona el transporte convectivo de masa con el difusivo. Con este motivo surge el presente proyecto, dónde se pretende estudiar hasta qué punto las prestaciones del DPF vienen influenciadas por este número adimensional.

## 1.2. Antecedentes

El proyecto se sitúa dentro de una serie de trabajos, entre los que se incluyen los de Piqueras, García-Alfonso y Angiolini [2, 3, 4, 5, 6], encaminados a la comprensión de los fenómenos que afectan a la operación del DPF. Estos estudios han nacido resultado del empleo del software OpenWAM desarrollado en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia y del uso de sus instalaciones experimentales.

Por su importancia en el presente proyecto, especial énfasis hay que dedicar al modelo unidimensional de filtros de partículas de flujo de pared integrado en OpenWAM [2, 7]. El modelo trata flujo compresible, no-estacionario y no-homentrópico y se ha ido completando con diferentes submodelos. Entre estas ampliaciones se incluyen un submodelo de



transmisión de calor, un submodelo de pérdida de presión ante acumulación de hollín [3] y un submodelo de filtrado [6].

Los estudios de carácter paramétrico resumidos en [4, 5] contemplaban variaciones de la macro y mesogeometría del filtro bajo distintas hipótesis, haciendo especial hincapié en comparar las ventajas que ofrece ubicar el DPF aguas arriba de la turbina (configuración pre-turbo) con respecto a ubicarlo aguas abajo (configuración post-turbo). Con esto se extrapolaron claras conclusiones acerca del dimensionado de los DPFs y de las ventajas que ofrecían ciertas maneras de reducir el volumen de los filtros en la configuración pre-turbo. Aunque estos trabajos se centraban en analizar la penalización en el consumo producida por el hecho de incluir el DPF en la línea de escape.

Por otro lado, los avances en las técnicas de modelado han permitido determinar que la relación entre la eficiencia de filtrado y la caída de presión que impone el DPF viene fuertemente influenciada por el grado en que las partículas penetran en la pared del filtro de partículas [6], penetración que ha resultado correlarse linealmente con el número de Peclet en condiciones limpias.

Lo anterior ha dado lugar a la posibilidad de acoplar el submodelo de filtrado, descrito en [6], al de pérdida de presión en condiciones de acumulación de hollín, dando lugar a una herramienta que puede abrir muchas puertas en el campo de investigación marco de este trabajo.

### 1.3. Objetivos

El proyecto constituye una continuación de los estudios llevados a cabo en [4, 5], pero abordados desde un punto de vista distinto. Este punto de vista es la influencia del número de Peclet sobre la eficiencia de filtrado y sobre la caída de presión del DPF, además de sobre el consumo del motor.

El número de Peclet particularizado a los DPFs depende de la microestructura de estos dispositivos y de las condiciones fluidodinámicas a las que hace frente. De este modo, existen dos grados de libertad a la hora de variarlo. Atendiendo a a esto, los objetivos del proyecto se resumen en los siguientes:

- En primer lugar, se pretende realizar un análisis exhaustivo sobre la influencia del número de Peclet en las prestaciones del DPF desde el punto de vista de la variación de la microestructura.
- En segundo lugar, se pretende continuar el análisis exhaustivo sobre la influencia del número de Peclet a través de la variación del campo termo-fluidodinámico al que se enfrenta el dispositivo.

## 1.4. Metodología

Tras plantear los objetivos del trabajo, establecer una metodología a seguir resulta fundamental para la consecución de los mismos.

La metodología a seguir se acoge a un análisis computacional haciendo uso del modelo 1D de filtros de partículas introducido en OpenWAM, junto con sus diferentes submodelos. El análisis irá enfocado al estudio de los efectos del número de Peclet sobre la caída de presión, el consumo y la eficiencia de filtrado. Para ello, el estudio cubrirá varias posibilidades en cuanto a variación del número de Peclet respecta:

- El estudio computacional contemplará la modificación de la microestructura propia del lecho colector de partículas que constituye la pared porosa del filtro de partículas. Desde este punto de vista, el estudio adquiere un carácter propiamente paramétrico.
- La acumulación de partículas en el interior del medio poroso que compone el sustrato del filtro modifica la microestructura del mismo. Dado que estos dispositivos acostumbran a operar en condiciones cargadas, se hace necesario que el análisis contemple también esta posibilidad.
- Las ventajas que ofrece la configuración pre-turbo frente a la tradicional post-turbo convierten a la primera en una opción susceptible de rigurosos estudios. Situar el sistema de post-tratamiento aguas arriba de la turbina implica cambiar el campo termo-fluidodinámico al que se enfrenta y, por consiguiente, el número de Peclet. Por ello, el estudio computacional también abarcará esta posibilidad.
- Modificar la superficie de filtrado también implica variaciones en el campo termo-fluidodinámico. Por ello, a partir de los mapas paramétricos que se analizaron en [4], se han escogido tres puntos estratégicos con el fin de analizar la variación del número de Peclet por esta vía.

Posteriormente a realizar cada una de las modificaciones anteriores, se tratará de aportar posibles criterios de utilidad a la hora de diseñar estos sistemas de filtrado.

## 1.5. Estructura del proyecto

La totalidad del proyecto presenta tres documentos que, por orden, se resumen en la *Memoria*, el *Pliego de condiciones* y el *Presupuesto*. Al no tratarse de un proyecto de diseño, sino más bien de un proyecto de investigación, y debido a la carencia de planos no se ha incluido el documento correspondiente a los mismos.

En primer lugar se expone el documento correspondiente al desarrollo del propio proyecto, la *Memoria*, que consta de una serie de capítulos cuyo enfoque se describe a continuación:

- El capítulo 1, correspondiente al presente capítulo, existe con el fin de introducir el tema base del proyecto y el enfoque del mismo.

- En el capítulo 2 se recoge una descripción más detallada del contexto en el cual nacen los sistemas de post-tratamiento y del estado del arte de los filtros de partículas Diésel.
- En el capítulo 3 se introducen las bases del modelo de cálculo 1D empleado para el desarrollo de la parte computacional y del modelo 0D empleado para el cálculo de las penetraciones.
- En el capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados referentes al estudio computacional llevado a cabo, junto con consideraciones e hipótesis a las que queda sujeto.
- Por último, en el capítulo 5 se resumirán las principales conclusiones y aportaciones extraídas a lo largo del proyecto.

En el documento *Pliego de Condiciones* se exponen las condiciones que han de cumplirse en el lugar de trabajo para dar lugar a un entorno adecuado que asegure la consecución de los objetivos propuestos en el proyecto.

Para finalizar, el *Presupuesto* incluye un balance de los costes asociados a la realización del proyecto, exponiendo al final del documento el presupuesto global del mismo.



# 2

## Sistemas de post-tratamiento

---

Los requisitos cada vez más estrictos de la normativa en emisiones contaminantes han hecho necesaria la implantación de sistemas de post-tratamiento de gases de escape. Estos dispositivos son sistemas pasivos que se instalan en la línea de escape y buscan la reducción de las emisiones contaminantes una vez han sido formadas.

A cada uno de ellos se le exige una serie de requisitos que pueden ser diferentes o no. Pero, por lo general, estos afectan en algún sentido al diseño y ajuste del motor, ya que introducen una pérdida de carga en la línea de escape que no resulta beneficiosa desde el punto de vista del consumo.

En este capítulo se definirá qué se considera emisión contaminante por la normativa y se proporcionará un breve resumen de esta normativa, en particular, para motores Diésel. Se comentarán los principales sistemas de post-tratamiento que existen y con qué fin, para después centrarse en el filtro de partículas Diésel. En concreto, el capítulo se centrará en los del tipo flujo de pared, por ser los más extendidos y los usados en el desarrollo del proyecto. También se dedicará un subapartado al mecanismo de regeneración y a la ubicación pre-turbo del filtro.

### 2.1. Normativa en la emisión de contaminantes

En primer lugar, cabe mencionar que el simple hecho de realizar un proceso de combustión empleando hidrocarburos libera dióxido de carbono ( $CO_2$ ), uno de los principales causantes del calentamiento global. La razón radica en la estequiometría de la reacción de combustión. A pesar de esto, como el simple hecho de quemar hidrocarburos emite  $CO_2$ , este no es reconocido como un contaminante por la normativa.

Teniendo en cuenta lo anterior, las emisiones de  $CO_2$  están íntimamente relacionadas con la cantidad de combustible que se quema y, por tanto, con el consumo. En ello se justifica el creciente interés por los motores de encendido por compresión (MEC) o Diésel respecto a los de encendido provocado (MEP). En el estado de arte actual, los primeros son más eficientes [1] y, por consiguiente, consumen menos que los segundos a la vez que proporcionan prestaciones equiparables.

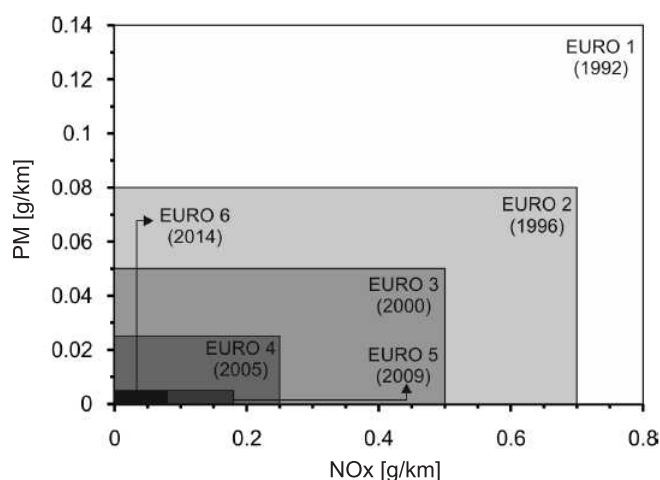
Además de lo anterior, la combustión en MCIA no se realiza de manera ideal, produciendo otra serie de compuestos que, a vista de la normativa, si que están considerados como contaminantes y tienen una serie de efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente:

- Los **óxidos de nitrógeno** ( $NO_x$ ) tienen su origen en la disociación del nitrógeno ( $N_2$ ) a elevadas temperaturas de combustión y alto contenido en oxígeno ( $O_2$ ). El más común en MCIA es el óxido nítrico ( $NO$ ), aunque también puede darse la conversión de  $NO$  a dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) en condiciones de temperatura más bajas y elevado contenido en  $O_2$ .
- El **monóxido de carbono** ( $CO$ ) es, generalmente, el resultado de una combustión en condiciones de mezcla rica y, por ello, su emisión está íntimamente relacionada con el dosado de operación del motor.
- Los **hidrocarburos sin quemar** ( $HC$ ) son el resultado de una combustión incompleta y normalmente tienen una composición muy variada.
- La **materia particulada** ( $PM$ ) se compone principalmente de dos fracciones fácilmente separables:
  - La primera constituye lo que se llama fracción inorgánica soluble, en la que prevalece principalmente la materia carbonosa (hollín), acompañada por otros compuestos como sulfatos, sales, agua, etc. Cabe decir que el hollín es el que típicamente toma mayor proporción en la composición de las partículas y de ahí que, a menudo, simplemente se hace mención a las partículas como hollín. No obstante, se ha de tener en cuenta que la composición de las mismas no se limita al carbón.
  - La segunda constituye la fracción orgánica soluble (SOF), compuesta por hidrocarburos sin quemar procedentes del combustible o del aceite lubricante. Estos se adhieren al hollín mediante procesos de condensación y adsorción.

También se ha de distinguir entre las partículas primarias, formadas directamente producto del proceso de combustión, y las partículas secundarias o agregados, que han sufrido una serie de transformaciones físicas y químicas a lo largo de la línea de escape y finalmente han sido diluidas en la atmósfera. La razón de hacer esta distinción radica en que las partículas que realmente son controladas por la normativa son las secundarias.

Aunque la principal ventaja de los motores Diésel sobre los MEP es su mayor eficiencia, el principal inconveniente tiene su origen en las mayores emisiones de  $NO_x$  y de partículas. Esto es en parte debido a la constitución propia de este tipo de motores. En motores MEC, la mezcla se logra a través de la inyección del combustible en el cilindro y el encendido se consigue cuando la mezcla alcanza ciertas condiciones de presión y temperatura, la mezcla no se suele conseguir de manera totalmente homogénea antes de su encendido. Por ello, estos motores acostumbran a operar en exceso de aire, o lo que es lo mismo, con mezcla pobre.

Dada la peligrosidad de las sustancias anteriormente listadas, se han ido aplicando una serie de restricciones a su emisión en todo el mundo. En el caso de Europa, las normativas son conocidas como las Euro standards y fueron introducidas en 1992, reduciendo los límites de forma severa desde la Euro 1 a la Euro 6 en 2014. Esta evolución en los límites de dichas normativas para vehículos ligeros con motor Diésel se muestra en la Figura 2.1. En concreto, se muestran los límites en emisiones de  $NO_x$  y de partículas.



**Figura 2.1:** Normativa europea en emisiones de partículas y  $NO_x$  para vehículos ligeros con motor Diésel.

Las restricciones se han ido fortaleciendo con el paso de los años, no sólo en los límites de emisiones, sino también en otros aspectos. A partir de la Euro 3 se introdujo un control de la durabilidad de los sistemas anticontaminantes, aumentando todavía más las exigencias. En lo que respecta a las emisiones de partículas, la Euro 6 contempla un procedimiento del conteo del número de partículas emitidas, además de la medida de las emisiones en masa habituales. Algunos detalles adicionales sobre la normativa pueden ser consultados en [8].

Con esto queda justificado que la alta presión de la normativa ha obligado a la introducción de sistemas de post-tratamiento con el fin de cumplir los límites estipulados en emisiones, las cuales son medidas en ciclos de homologación, como el NEDC en el caso de vehículos ligeros.

En la actualidad los sistemas de post-tratamiento más implantados son el DOC y el DPF, cuyas funciones se describirán brevemente en el siguiente apartado junto con otros de los sistemas de post-tratamiento más conocidos.

## 2.2. Control de emisiones en la línea de escape

Una vez introducidas las emisiones características y la normativa a la que han de atenerse los motores actuales, se pretende resumir qué sistemas de post-tratamiento se emplean para la reducción de cada una de estas emisiones. Concretamente, se mencionarán algunos de los sistemas empleados en motores MEC, focalizando la atención en los filtros de partículas.

### 2.2.1. Catalizador de oxidación Diésel

El catalizador de oxidación Diésel (DOC) se incluye dentro de la categoría de reactores catalíticos. Estos tienen como objetivo acelerar las reacciones de oxidación o reducción que no han alcanzado el equilibrio químico tras salir los gases quemados del cilindro.

La función principal de este dispositivo es oxidar el  $CO$ , los  $HC$  y la fracción orgánica soluble (SOF). En este sistema, también se oxida el  $NO$  a  $NO_2$ . Aunque lo anterior no es interesante desde el punto de vista de las emisiones, su formación es deseada. La presencia de  $NO_2$  en el escape incrementa la eficiencia de los sistemas de post-tratamiento de  $NO_x$  [9]. Además, el  $NO_2$  es un potente oxidante del hollín acumulado en el DPF a bajas temperaturas [10].

Estos sistemas suelen ser monolitos con estructura en panel de abeja fabricados con cerámicas, como el mostrado en la Figura 2.2, o con metales. Sobre la superficie de los canales internos al monolito se añade un recubrimiento o *washcoat*, típicamente de alúmina ( $Al_2O_3$ ). La función de este recubrimiento es incrementar la superficie de contacto entre el gas y el elemento catalítico disperso por toda su superficie. En lo que respecta al elemento catalítico, se suelen emplear metales nobles como el platino ( $Pt$ ) y el paladio ( $Pd$ ).



**Figura 2.2:** Catalizador de oxidación Diésel (DOC) de monolito cerámico.

El verdadero inconveniente que sufre este dispositivo radica en la oxidación del dióxido de azufre ( $SO_2$ ) a trióxido de azufre ( $SO_3$ ). La razón yace en que este último compuesto contribuye a desactivar el agente catalizador [9]. Es este uno de los principales motivos por



el cual se busca la reducción del contenido en azufre de los combustibles de automoción actuales.

### 2.2.2. Sistema de reducción catalítica selectiva

Los sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) son empleados para la reducción de las emisiones de  $NO_x$  cuando el empleo del EGR no es suficiente y cuando los sistemas de reducción catalítica tradicionales no son viables por elevados niveles de  $O_2$  en la línea de escape, hecho que sucede en condiciones de operación habituales en motores MEC.

El catalizador SCR como tal contiene una mezcla de óxidos de vanadio y de titanio en un sustrato cerámico y para asegurar la reducción del  $NO_x$  es necesaria la presencia de amoníaco ( $NH_3$ ). Dada la toxicidad del mismo, se inyecta una solución acuosa de urea antes del SCR. De este modo, el amoníaco necesario se obtiene a partir de un proceso de hidrólisis de la urea. A pesar de ello, la inyección de urea hace necesario el empleo de depósitos auxiliares que suponen una desventaja, junto con el hecho de que estos catalizadores son más voluminosos que los convencionales.

El SCR no se suele instalar de manera individual, sino que aguas arriba del mismo es usual instalar un catalizador de oxidación para reducir la concentración de  $CO$  y de  $HC$ , oxidando también el  $NO$  a  $NO_2$ . Además, con el fin de evitar la emisión de amoníaco por el escape, también se suele instalar otro catalizador de oxidación de menor tamaño aguas abajo.

### 2.2.3. Trampa de $NO_x$

Dentro de los sistemas de post-tratamiento, el empleo de la trampa de  $NO_x$  (LNT) es la solución alternativa al uso del SCR en lo que a reducción de  $NO_x$  respecta. Este sistema es bastante similar constructivamente a los catalizadores tradicionales.

El dispositivo en cuestión funciona como un catalizador de oxidación en condiciones de mezcla pobre (condiciones habituales en MEC), al mismo tiempo que almacena los  $NO_x$  en forma de nitratos. Posteriormente, son liberados y regenerados haciendo uso de una atmósfera reductora en condiciones de mezcla rica. Estas condiciones se pueden lograr de manera puntual inyectando hidrocarburos en el escape o mediante una inyección adicional en el cilindro durante la etapa final de la expansión.

Una de las principales desventajas de estos dispositivos radica en que la ventana de temperaturas en las que el sistema funciona con buenos rendimientos de conversión es muy estrecha, haciendo estos sistemas poco aptos para motores con grados de carga muy variables. Aun así, son menos voluminosos que los SCR y, desde este punto de vista, resultan más atractivos.

#### 2.2.4. Filtro de partículas Diésel

Los filtros o trampas de partículas son sistemas empleados en MCIA para capturar de forma física las partículas presentes en el flujo de gases de escape, tanto primarias como secundarias. Estas son retenidas hasta que puedan ser eliminadas por medio de un proceso de regeneración, continuo o periódico.

Estos filtros cobran especial interés en motores Diésel al presentarse como una herramienta capaz de solventar el problema de las emisiones de partículas. Cuando estos se aplican a este tipo de motores, son denominados como filtros de partículas Diésel o DPFs.

#### Requerimientos

Las prestaciones y la durabilidad de estos filtros vienen influenciadas por su material de fabricación, además de por la estructura geométrica. De este modo, para alcanzar los objetivos para los cuales están diseñados de manera eficiente, la estructura y los materiales utilizados en los filtros de partículas han de cumplir, entre otros, los siguientes requerimientos:

- Elevada eficiencia de filtrado no solo en términos de masa, sino también en términos de número de partículas.
- Reducida pérdida de presión, tanto en condiciones limpias como en condiciones de acumulación de partículas.
- Elevada temperatura máxima de operación y alta resistencia al choque térmico, aunque también resulta interesante una baja inercia térmica para mejorar la respuesta ante transitorios.
- Integridad mecánica, asegurando también la no pérdida del material que compone el filtro.
- Elevada capacidad de acumulación de partículas.
- Resistencia química a los gases de escape y compatibilidad con los sistemas de regeneración.
- Larga vida útil y ausencia de efectos adversos sobre el manejo del vehículo.
- Bajos costes de fabricación y de mantenimiento, dentro de lo posible.

Dada la cantidad de requerimientos que se exigen a estos sistemas, la consecución de varios de ellos entra a menudo en conflicto, dificultando el diseño del dispositivo y haciendo necesaria la búsqueda de soluciones de compromiso. Este es, por ejemplo, el caso del requerimiento de elevada eficiencia de filtrado y el de baja pérdida de presión.

Con lo expuesto quedan claras las elevadas exigencias que se imponen a estos sistemas y el interés en estudiar maneras de optimizarlos, al mismo tiempo que se intenta reducir los costes de los mismos.

### Tipos de filtros

La tipología de filtro más extendida es el monolito cerámico de flujo de pared. No obstante, conviene conocer las características más relevantes de las principales tipologías, ya que esto permitiría encontrar los motivos que han dado lugar a una mayor implantación del monolito de flujo de pared en el mercado y a numerosos esfuerzos en su estudio. De este modo, se resumen las principales tipologías de filtros de partículas:

- El **monolito cerámico de flujo de pared** es el filtro que más ha acaparado el mercado por su buen compromiso en términos de prestaciones.

Se trata de una estructura cerámica extruida, generalmente cilíndrica, como la que se observa en la Figura 2.3. Esta estructura cuenta con una gran cantidad de canales paralelos que atraviesan el monolito de forma axial. Los canales son de reducida sección transversal, normalmente cuadrada, y están sellados alternativamente en sus extremos. De este modo, el flujo es obligado a atravesar la pared cerámica, filtrando gran parte de las partículas presentes en el mismo. De ahí que se incluya en la categoría *wall-flow*.

Esta tipología de filtros alcanza eficiencias de filtrado de hasta el 99 % en condiciones de acumulación de partículas [11]. La razón viene parcialmente dada por el hecho de tener una gran superficie de filtrado por unidad de volumen en contacto con el flujo másico de gases de escape.

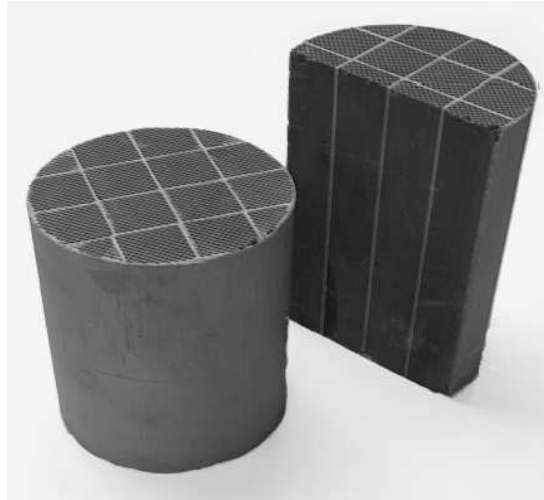
Pese a que la caída de presión que producen es reducida en los instantes iniciales, esta crece con la acumulación de partículas. Como situación extrema, los canales se pueden obstruir completamente y para evitarlo es necesario prever estrategias de regeneración controladas. Especial interés cobra evitar picos de temperatura durante los procesos de regeneración con el fin de mantener la durabilidad del filtro.

Aunque el DPF es extremadamente efectivo para el filtrado de partículas, también lo es en la captura de material inorgánico (cenizas), con principal origen en los aditivos de los lubricantes [12]. El problema radica en que, por ser material inorgánico, las cenizas no pueden ser eliminadas aplicando estrategias de regeneración, limitando el volumen efectivo de acumulación de partículas.

Respecto al material de fabricación de las trampas, inicialmente se introdujo la cordierita ( $2MgO - 2Al_2O_3 - 5SiO_2$ ). Más tarde se introdujo el carburo de silicio (*SiC*), que aportaba una menor pérdida de presión y presentaba una mayor conductividad térmica, dando lugar a menor inercia térmica. Por otro lado, su mayor coeficiente de expansión térmico obligaba a segmentar el monolito en bloques de canales para incrementar su integridad térmica, aumentando los costes de fabricación. En los últimos años se ha introducido en el mercado el titanato de aluminio ( $Al_2TiO_5$ ), que proporciona también bajas inercias térmicas y buena resistencia al ataque químico, con una pérdida de presión similar al *SiC*. A pesar de la aparición de este último material, el *SiC* sigue siendo ampliamente utilizado.

- Las **fibras cerámicas** constituyen otra de las tipologías cuyo uso también es extendido, aunque en mucha menor medida que la tipología anterior.

Las disposiciones de las fibras más empleadas son las de empaquetado continuo y las fibras en forma de láminas:



**Figura 2.3:** Filtro de partículas Diésel de flujo de pared completo y cortado diametralmente.

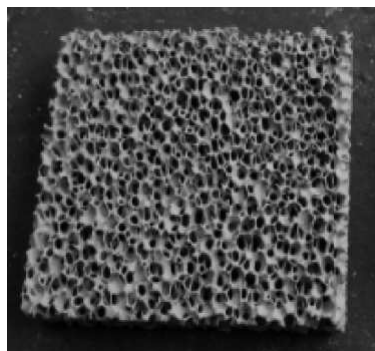
- La primera tipología de diseño la conforman cartuchos de fibras cerámicas fabricados con fibras de hilo de empaquetado continuo alrededor de un conducto de acero perforado. En esta configuración, el flujo de gases de escape entra en una vasija sellada para, posteriormente, pasar al interior del conducto perforado atravesando la capa de fibra porosa.
- Las láminas de fibras cerámicas se fabrican mediante procesos de laminado y posterior exposición a elevadas temperaturas, obteniendo una especie de tela de fibras cerámicas. De este modo, en vez de disponer de cartuchos de fibras, se hace uso de láminas que pueden estar plegadas o no, formando un medio continuo poroso.

Estas configuraciones tienen claras desventajas frente a los monolitos de flujo de pared. Esto se debe a que la eliminación de las cenizas acumuladas entre las fibras se hace dificultosa cuando se hace uso de cartuchos de fibras y a que las temperaturas máximas de operación son menores. Otra desventaja de estos sistemas tiene su origen en que resulta imposible impregnar directamente las fibras cerámicas con catalizadores. Esta incompatibilidad con dicho sistema de regeneración hace de esta tipología una opción menos atractiva que los monolitos de flujo de pared.

- Las **espumas cerámicas** son filtros del tipo *wall-through* que fueron ampliamente estudiados en el pasado para su uso en aplicaciones de automoción. Estas espumas son estructuras rígidas con poros esféricos grandes y abiertos, tal y como se observa en la Figura 2.4. La estructura se obtiene impregnando una matriz de espuma de poliuretano con una pasta cerámica y, posteriormente, calcinando el poliuretano.

Al igual que los monolitos cerámicos de flujo de pared, las espumas cerámicas se pueden fabricar tanto de cordierita como de carburo de silicio y poseen la capacidad de ser catalizadas.

No obstante, estas presentan menores eficiencias de filtrado y baja capacidad para mantener las partículas acumuladas. Además, sus características resistentes son débiles, haciendo poco atractivo su uso en automoción.



**Figura 2.4:** Substrato de una espuma cerámica.

- Los **filtros metálicos** también pertenecen a la categoría de filtros *wall-through*. Estos suelen consistir en una serie de canales metálicos que contienen pliegues o rampas con el fin de generar un paso tortuoso al gas, tal y como muestra la Figura 2.5. Estas rampas fuerzan a que parte del flujo atraviese las hojas metálicas porosas, atrapando una proporción de las partículas contenidas en el mismo.

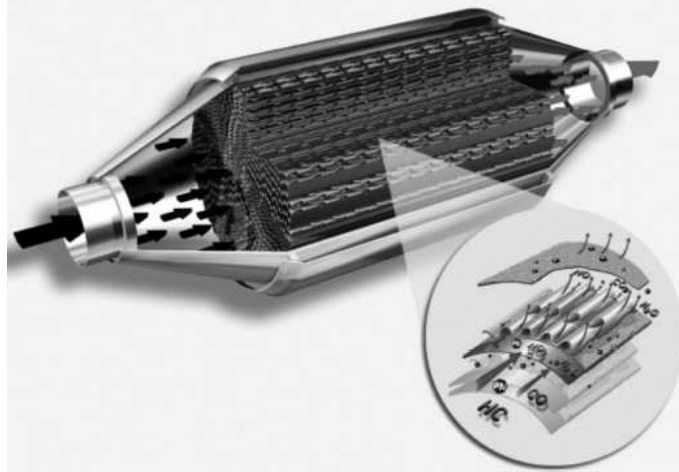
Por el material de fabricación, estas trampas son más resistentes mecánicamente y tienen conductividades térmicas superiores a las cerámicas, reduciendo así el peligro por aparición de puntos calientes en la estructura filtrante. A su vez, esto da lugar a una distribución de temperaturas más uniforme en el filtro (menor inercia térmica), facilitando así la activación de reacciones de oxidación que se puedan dar si el filtro se encuentra catalizado o la propia reacción de oxidación del hollín.

A pesar de lo anterior y aunque presentan menores pérdidas de carga, los filtros de partículas metálicos manifiestan menores eficiencias de filtrado que los cerámicos de flujo de pared debido a su reducida superficie de filtrado y a la elevada porosidad del medio. Probablemente por esto, los filtros metálicos están menos extendidos que los monolitos cerámicos de flujo de pared.

- Los **filtros de papel** constituyen otra opción que se probó en el pasado. Estos consistían en cartuchos de papel plegados y presentaban una eficiencia de filtrado cercana al 100%. A pesar de este ventajoso hecho, por su estructura y material, se hace necesario que el gas de escape se encuentre a una temperatura baja, haciendo poco viable el uso de esta tipología en motores de automoción.

### 2.3. Filtro de partículas Diésel de flujo de pared

Tras lo anterior queda justificado el por qué los filtros de partículas cerámicos de flujo de pared o DPFs son los más extendidos y los estudiados en el presente proyecto. Sin hacer



**Figura 2.5:** Filtro metálico con corte de una proporción de los canales.

más énfasis en esto, el resto del trabajo tratará solamente esta tipología.

Para comenzar, conviene definir una serie de parámetros cuyo conocimiento resulta necesario para la comprensión de los análisis llevados a cabo en el resto del trabajo. Estos se pueden subdividir en los relacionados con la estructura monolítica y los relacionados con las características térmicas y resistentes del monolito.

Posteriormente, se explicarán las principales contribuciones asociadas a los fenómenos de pérdida de presión y los principales mecanismos de filtrado que tienen lugar en la totalidad del DPF. Esto se realizará sin entrar en su descripción matemática, pues eso corresponde a un capítulo posterior.

Finalmente y dado que hasta ahora no se ha centrado atención en ello, se introducirán los principales procesos de regeneración en DPFs y se explicarán las ventajas de la configuración pre-turbo respecto a la post-turbo, remarcando también sus desventajas.

### 2.3.1. Parámetros estructurales

Los canales que componen el monolito cerámico suelen ser de sección cuadrada simétrica y, además, esta sección suele ser idéntica en los canales de entrada y de salida. También es cierto que existen tipologías de sección distinta (triangulares, octogonales, etc.) o incluso de canales asimétricos [13], en un intento de incrementar la superficie de filtrado en los canales de entrada. A pesar de que esta última tipología está adquiriendo interés en los últimos años, la geometría cuadrada simétrica sigue siendo la más común. Por ello, los parámetros referentes a la estructura y a las capacidades resistivas del monolito se definirán en base a esta geometría, siendo la empleada para el resto del desarrollo del proyecto.

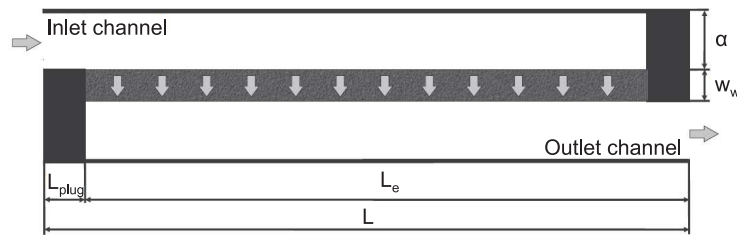
Antes de comenzar a definir parámetros relativos a la estructura, cabe hacer una distin-

ción entre ellos. Esta distinción hace referencia al tamaño que describe dicho parámetro. Atendiendo a esto, se pueden definir parámetros relativos a la macroestructura, a la estructura de tamaño intermedio o mesoestructura y a la microestructura.

### Parámetros macroestructurales

Entre los parámetros de la macroestructura propia del filtro se encuentran la longitud ( $L$ ), el diámetro ( $D$ ) y el volumen del monolito ( $V$ ).

Dado que el sellado en los extremos de los canales no contribuye al filtrado, conviene definir la longitud de sellado ( $L_{plug}$ ), tal y como se observa en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Geometría de un par de canales de entrada y salida de un DPF.

De este modo, queda distinguida la longitud de los canales ( $L_e$ ), que viene dada por la ecuación 2.1, de la longitud del monolito.

$$L_e = L - L_{plug} \quad (2.1)$$

Teniendo en cuenta esto, el volumen del filtro se puede definir en base a las dos longitudes características, anteriormente definidas. El volumen que se tiene en cuenta a efectos de espacio ocupado es el definido a partir de la longitud total del monolito ( $V$ ). Por otro lado, el volumen que computa a efectos de filtrado es el que se define a partir de la longitud de los canales ( $V_e$ ). Estos volúmenes se muestran en las ecuaciones 2.2 y 2.3.

$$V = A_{fr} L = \pi \frac{D^2}{4} L \quad (2.2)$$

$$V_e = A_{fr} L_e = \pi \frac{D^2}{4} L_e \quad (2.3)$$

Respecto al volumen, cabe decir que interesan filtros compactos, pero siguiendo un compromiso entre el mismo y la pérdida de presión que generan. Algunos estudios apuntaban a que este volumen solía ser del orden del volumen desplazado por el motor en el que

va instalado [14]. Pero, actualmente, este volumen suele moverse entre 1.5 y 2.5 veces el desplazamiento del motor [15].

Por otro lado, el diámetro del monolito establece el área total de la sección transversal del monolito ( $A_{fr}$ ), calculable a través de la ecuación 2.4.

$$A_{fr} = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.4)$$

### Parámetros mesoestructurales

La mesoestructura está más íntimamente relacionada con la geometría de los canales, la cual se esquematiza en la Figura 2.6. De este modo, se puede distinguir una serie de parámetros relacionados con el dimensionado de las celdas que conforman los canales, entre los que se incluye el lado del canal ( $\alpha$ ) y el espesor de la pared porosa ( $w_w$ ).

A partir de ellos, se puede definir la densidad de celda ( $\sigma$ ) como el número de canales por unidad de área de sección transversal. Esta se puede calcular para canales cuadrados aplicando la ecuación 2.5 y se suele expresar en celdas por pulgada cuadrada (*psi*) en la industria, aunque no es la unidad del Sistema Internacional.

$$\sigma = \frac{1}{(\alpha + w_w)^2} \quad (2.5)$$

### Parámetros relacionados con la macro y mesoestructura

También existen otra serie de parámetros que relacionan las estructuras anteriores, no quedando clara la categoría a la que pertenecen. De aquí que se separen del resto en la clasificación pertinente.

El número de canales de entrada del monolito ( $N_{ic}$ ) se asume la mitad del número de canales total ( $N_c$ ) y queda definido a partir de  $\sigma$  y  $A_{fr}$ , tal y como establece la ecuación 2.6.

$$N_{ic} = \frac{N_c}{2} = \frac{A_{fr}\sigma}{2} \quad (2.6)$$

A partir de  $N_{ic}$  y  $A_{fr}$ , es sencillo obtener la fracción abierta del área frontal del monolito (*OFA*). Esta se puede calcular en base a la ecuación 2.7.

$$OFA = \frac{A_{open}}{A_{fr}} = \frac{\alpha^2 N_{ic}}{A_{fr}} = \frac{\alpha^2 \sigma}{2} = \frac{\alpha^2}{2(\alpha + w_w)^2} \quad (2.7)$$



Un parámetro clave a la hora de analizar las prestaciones de los DPF es la superficie específica de filtrado ( $SFA$ ). Esta superficie específica se define como el área por unidad de volumen del monolito a través de la cual el flujo se mueve de los canales de entrada a los de salida y se puede calcular a partir de la ecuación 2.8.

$$SFA = 2\alpha\sigma = \frac{2\alpha}{(\alpha + w_w)^2} \quad (2.8)$$

Otro parámetro que adquiere especial interés es el área de filtrado ( $A_f$ ). Esta superficie se calcula teniendo en cuenta las paredes de los canales de entrada a excepción de la correspondiente al sellado. Esta se puede definir en base a  $SFA$ , tal y como establece la ecuación 2.9.

$$A_f = SFA \frac{\pi D^2}{4} L_e = 2\alpha\sigma A_{fr} L_e = 4\alpha L_e N_{ic} \quad (2.9)$$

### Parámetros microestructurales

Hasta ahora se han definido parámetros correspondientes a la macro y mesoestructura del monolito, pero no hay que olvidar definir los parámetros correspondientes a la microestructura del mismo, aunque se pueden considerar parámetros macroscópicos en el sentido de que caracterizan la microestructura a través de un valor medio. Este es el caso de la porosidad ( $\varepsilon$ ), el diámetro medio de poro ( $d_p$ ) y la permeabilidad ( $k$ ). Estos parámetros se definirán de manera genérica para un medio poroso por el momento.

La porosidad ( $\varepsilon$ ) es la fracción del volumen aparente del substrato que está ocupado por poros o espacios vacíos. Dicho de otro modo, es el cociente entre el volumen vacío total y el volumen total ocupado por la matriz sólida y los espacios vacíos.

A efectos de filtrado, los poros interconectados con otros poros a través de orificios son los que contabilizan. De este modo, la fracción de volumen de estos poros se conoce como porosidad efectiva. También existen poros finales conectados a otros poros únicamente por un orificio que contribuyen de manera ínfima al filtrado. Por último, los poros que no contribuyen al transporte de materia a través del medio poroso constituyen los llamados poros aislados.

Normalmente, la presencia de poros aislados o ciegos es muy reducida en los monolitos. Por ello, hablar simplemente de porosidad es equivalente a hablar de porosidad efectiva.

Estos poros se suelen idealizar con forma esférica, representados por un diámetro medio de poro ( $d_p$ ) para todo el medio, aunque su forma no sea totalmente regular. Del mismo modo, los granos del medio poroso se idealizan como un lecho de unidades colectoras

esféricas caracterizadas a través de un diámetro ( $d_c$ ). Concretamente, este diámetro se obtiene como establece la ecuación 2.10 para lechos de partículas esféricas.

$$d_c = \frac{3}{2} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} d_p \quad (2.10)$$

Estos parámetros van a influir en la capacidad de filtrado del DPF y, junto con la macro y mesoestructura, van a determinar la caída de presión que su instalación impone. Por un lado, elevadas eficiencias de filtrado requieren de baja porosidad y reducido diámetro de poro y, por otro lado, reducidas pérdidas de presión requieren de alta porosidad y elevado diámetro de poro.

En lo que al DPF respecta, la microestructura de la pared porosa se ve modificada al acumular hollín en su interior, reduciéndose tanto la porosidad como el diámetro medio de poro. De este modo, aunque en este apartado se han definido de manera genérica estos parámetros, hay que diferenciar entre la microestructura en condiciones limpias y condiciones cargadas de hollín.

Respecto a los valores en porosidad y diámetro medio de poro que suelen presentar estos dispositivos en condiciones limpias de hollín, y que será necesario definir para justificar los rangos escogidos en posteriores estudios, estos dependen de si el filtro está catalizado o no. En filtros no catalizados la porosidad toma valores entre 40 y 45 % con poros de entre 10 y 15  $\mu m$  [16]. Si el filtro se encuentra catalizado para regeneración, se requieren porosidades mayores por el simple hecho de tener que albergar el catalizador, tomando valores de porosidad de entre 50 y 55 % y poros del orden de 20  $\mu m$  [17]. Por último, si el DPF está preparado para la adsorción de  $NO_x$  se requieren cargas de recubrimiento muy elevadas y, por tanto, son necesarias porosidades mayores al 60 % y tamaños de poro de 20 a 25  $\mu m$  [18].

Por otro lado, el concepto de permeabilidad ( $k$ ) es el término que surge para definir la conductividad de un medio poroso. Su valor queda determinado por las características de la estructura porosa y del campo fluidodinámico. Este parámetro adquiere importancia al definir la pérdida de presión que establece el medio poroso a través de la ley de Darcy, tal y como se describe en la ecuación 2.11.

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu}{k} u_w \quad (2.11)$$

En la ley de Darcy,  $p$  representa la presión,  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido,  $z$  es la coordenada transversal al medio poroso,  $u_w$  es la velocidad de filtrado o de pared y  $k$  la permeabilidad del medio.

Existe una gran variedad de correlaciones para su cálculo y todas ellas siguen la forma universal del cálculo de la permeabilidad en lechos de partículas esféricas [19]. A pesar de

la variedad de correlaciones, el uso de estas es indistinto por dar resultados similares [20]. De este modo,  $k$  se puede determinar a partir de ecuaciones del tipo 2.12.

$$k = f_K(\varepsilon)d_c^2 SCF \quad (2.12)$$

Siguiendo la correlación correspondiente a Kuwabara,  $f_K(\varepsilon)$  representa una función de la porosidad dependiente del factor hidrodinámico de Kuwabara ( $K$ ). Esta función queda definida como establece la ecuación 2.13.

$$f_K(\varepsilon) = 0.02 \frac{K}{1 - \varepsilon} \quad (2.13)$$

$$K = 2 - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} - \varepsilon - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon)^2 \quad (2.14)$$

Por otro lado,  $SCF$  representa el factor corrector de Stokes-Cunningham. La necesidad de tener en cuenta esta corrección en el cálculo de la porosidad tiene su origen en que la velocidad del flujo en las paredes de un medio poroso no es nula, surgiendo un efecto de deslizamiento (en inglés *slip-flow effect*). Este factor corrector es función del número de Knudsen del gas referido al diámetro medio de poro ( $Kn$ ) por medio de la ecuación 2.15.

$$SCF = 1 + Kn(1.257 + 0.4e^{-\frac{1}{Kn}}) \quad (2.15)$$

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (2.16)$$

En la ecuación 2.16,  $\lambda$  es el camino libre medio de las moléculas del gas. Este parámetro queda definido a partir de la viscosidad dinámica ( $\mu$ ), la densidad ( $\rho$ ), la temperatura ( $T$ ) y la constante del gas ( $R$ ), tal y como se muestra en la ecuación 2.17.

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi}{2RT}} \quad (2.17)$$

### 2.3.2. Parámetros térmicos y mecánicos

Además de los parámetros relacionados con la estructura del DPF, también adquieren un carácter relevante los parámetros relacionados con las características térmicas y mecánicas del mismo. Sin embargo, solo se mencionarán los implicados en el estudio realizado en el presente proyecto.

Respecto a los parámetros térmicos, adquiere interés el parámetro abreviado como  $LOF$ . Este representa la capacidad de transmisión de calor del monolito durante el transitorio y

se define como establece la ecuación 2.18. A medida que este parámetro es mayor, menos inercia térmica tendrá el monolito y menos tiempo se necesitará para alcanzar la temperatura de activación de ciertas reacciones presentes durante el proceso de regeneración.

$$LOF = \frac{1}{4} \left( \frac{SFA}{OFA} - 2SFA \right) \quad (2.18)$$

Respecto a los parámetros resistentes mecánicos, adquieren importancia el factor de integridad térmica (*TIF*) y el factor de integridad mecánica (*MIF*).

El primero de ellos (*TIF*) es proporcional al gradiente máximo de temperatura que puede soportar el monolito cuando este es sujeto a ciclos térmicos. De este modo, valores elevados de este parámetro implican elevadas resistencias al choque térmico. Este parámetro se define de acuerdo a la ecuación 2.19.

$$TIF = \frac{\alpha + w_w}{w_w} \quad (2.19)$$

El segundo de ellos (*MIF*) hace referencia al límite de carga máxima que la estructura celular puede soportar y viene dado por la ecuación 2.20. Valores altos de este parámetro indican una elevada capacidad de carga soportable por el monolito.

$$MIF = \frac{w_w^2}{(\alpha + w_w)\alpha} = \frac{w_w}{\alpha TIF} \quad (2.20)$$

Para conocer más detalles sobre otros parámetros no definidos en este apartado se pueden consultar los documentos [4, 21].

### 2.3.3. Mecanismos de filtrado

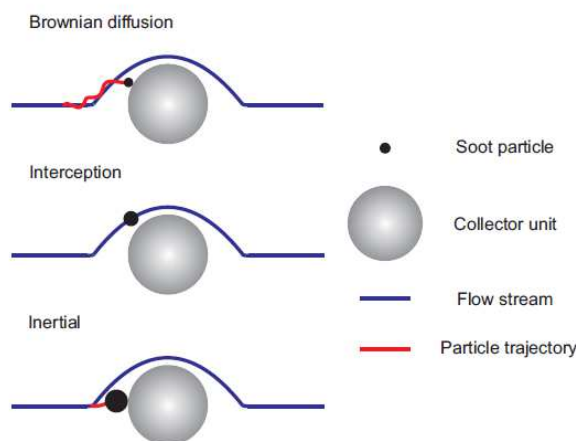
El filtrado se define como el proceso de retención de las partículas contenidas en el flujo de escape a su paso por el sistema de filtrado, en este caso el DPF.

En el caso del DPF existen dos regímenes de filtrado, el régimen de filtrado en lecho profundo (*deep bed filtration regime* en inglés) y el de filtrado superficial (*cake filtration regime* en inglés).

En las primeras fases del filtrado, desde condiciones limpias, predomina el régimen de filtrado en lecho profundo, en el cual las partículas quedan depositadas en el interior del medio poroso que constituye el sustrato tras penetrar en él. Desde este punto de vista, la penetración del hollín constituye una característica fundamental para la comprensión de este régimen de filtrado.

Durante esta fase tienen lugar una serie de mecanismos de filtrado, los principales de los cuales quedan esquematizados en la Figura 2.7 y se resumen en los siguientes:

- La **deposición por difusión Browniana** afecta a las partículas de menor tamaño, adquiriendo importancia para partículas de diámetros menores a  $0.3 \mu m$ . Las partículas afectadas por este mecanismo de deposición siguen un movimiento Browniano, de modo que no se mueven uniformemente a lo largo de las líneas de corriente. Este movimiento aleatorio provoca que las partículas afectadas se difundan desde el flujo hasta la superficie de la unidad colectora quedando depositadas en ella. Este régimen de deposición viene fuertemente influenciado por el número de Peclet.
- La **deposición por intercepción** adquiere importancia a medida que el tamaño de las partículas se aproxima al del elemento colector o a medida que el tamaño del elemento colector es mayor. En este caso, las partículas tienden a seguir las líneas de corriente del gas, pudiendo depositarse en el elemento colector si estas pasan cerca del mismo.
- La **deposición por impacto o inercial** adquiere importancia en el caso de partículas de bastante mayor tamaño (por encima de  $1 \mu m$ ) y cuando estas alcanzan velocidades elevadas. La partícula afectada por este régimen no es capaz de seguir la línea de corriente del gas. De este modo, esta sale de la línea de corriente e impacta contra la unidad colectora, quedando depositada sobre ella.



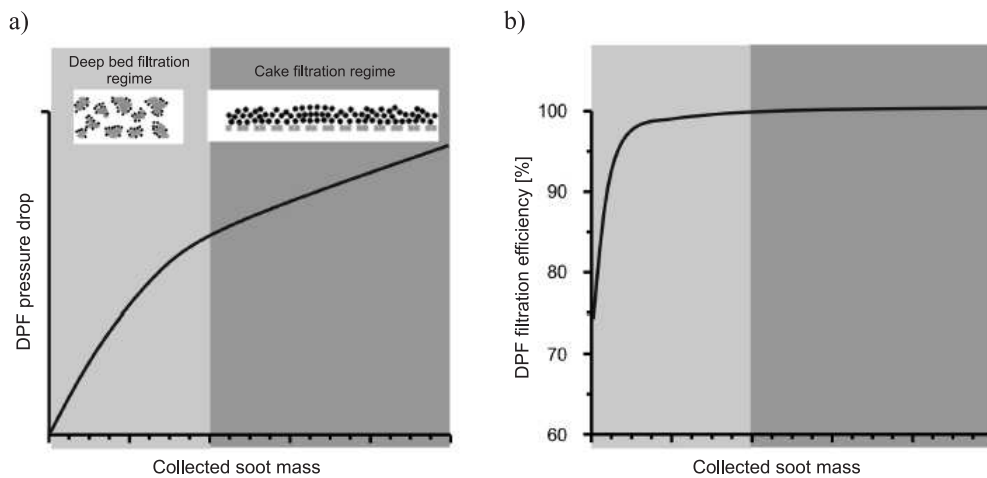
**Figura 2.7:** Mecanismos de deposición de una partícula en un elemento colector.

El hecho de que suceda uno de los mecanismos de deposición no quita que aparezca otro, pues los tres suelen darse. A pesar de esto, el mecanismo de difusión Browniana es el que suele adquirir mayor relevancia dados los tamaños típicos de los agregados en motores Diésel [22]. El mecanismo de intercepción adquiere mayor relevancia a medida que las unidades colectoras del lecho poroso crecen en tamaño, hecho que sucede a medida que el filtro acumula partículas en la fase de filtrado en lecho profundo. Por contra, el mecanismo

inercial suele ser el menos frecuente.

Una vez los poros comienzan a obstruirse, el régimen de filtrado superficial empieza a adquirir mayor importancia sobre el filtrado en lecho profundo y comienza a formarse una capa de partículas sobre la superficie de los canales que también contribuirá al filtrado. En última instancia, cuando los poros del sustrato queden completamente obstruidos, el filtrado superficial prevalecerá sobre el filtrado en lecho profundo y se dirá que el filtro ha saturado.

El proceso de carga o acumulación de partículas típico de un DPF queda esquematizado en la Figura 2.8 en términos de pérdida de presión y de eficiencia de filtrado, desde el régimen de filtrado en lecho profundo hasta el superficial. El filtrado en lecho profundo queda caracterizado por un crecimiento abrupto de la eficiencia de filtrado desde valores de entre el 50 y el 70 % en limpio hasta valores cercanos al 100 %. A medida que crece la eficiencia de filtrado con la masa de hollín acumulada, también lo hace la pérdida de presión de manera no lineal y pronunciada. Por otro lado, bajo condiciones de filtrado superficial, la pérdida de presión suele crecer linealmente con la masa de hollín acumulada, mientras que la eficiencia de filtrado se mantiene a un nivel constante.

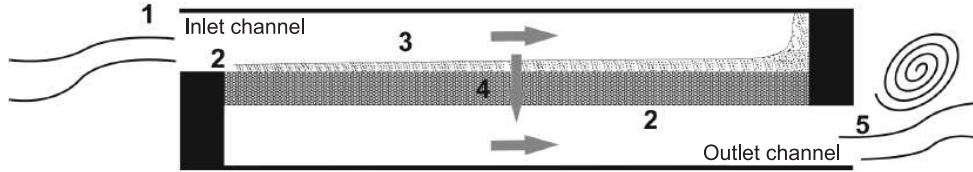


**Figura 2.8:** Proceso de carga característico de un DPF.

### 2.3.4. Contribuciones a la pérdida de presión

Desde un punto de vista termofluidodinámico, el DPF (y cualquier sistema de post-tratamiento) se comporta como un elemento que restringe el paso del fluido. Como resultado, se genera una pérdida de presión en el mismo que incrementa la contrapresión a la salida de los cilindros del motor en el que se instala el sistema. Esto se ve reflejado en un incremento del trabajo de bombeo que aumenta el consumo específico del motor. Un aumento en el consumo específico implica que para obtener la misma potencia por parte del motor se ha de inyectar más combustible, resultando en mayores emisiones de  $CO_2$ .

Este incremento de presión es el resultado de una serie de contribuciones que se dan a lo largo de todo el sistema [2], las cuales quedan esquematizadas en la Figura 2.9.



**Figura 2.9:** Contribuciones a la caída de presión en DPFs.

Las contribuciones a la caída de presión, numeradas de acuerdo a la Figura 2.9, se pueden resumir como sigue:

1. Contribución debida a la contracción local que sufre el flujo al adaptarse a los canales de entrada del monolito.
2. Contribución debida a la fricción entre el fluido y las paredes de los canales de entrada y salida.
3. Contribución debida al paso del fluido a través de la capa de partículas en caso de que exista.
4. Contribución debida al paso del fluido a través de la pared porosa, contabilizando la posible acumulación de partículas que haya tenido lugar en el interior de dicha pared.
5. Contribución debida a la expansión local que sufre el flujo en los canales de salida del monolito.

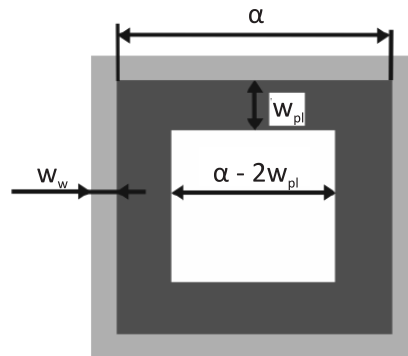
Estas contribuciones son propias del monolito en sí. Sin embargo, la instalación de los mismos en la línea de escape puede que requiera del uso de conos que adapten la envoltura del monolito a la de los conductos de escape. Para contabilizar la pérdida de presión que supone la instalación de estos sistemas, habría que incluir las contribuciones debidas a la expansión del gas de escape a su paso por el cono de entrada del DPF y al proceso de contracción en el cono de salida del mismo, en caso de que sean necesarios.

La expresión de la caída de presión que supondría la instalación del DPF ( $\Delta p_{DPF}$ ) queda definida por la ecuación 2.21 bajo condiciones de flujo incompresible e hipótesis 0D [2].

$$\Delta p_{DPF} = \frac{\mu Q}{2V_e} (\alpha + w_w)^2 \left[ \frac{w_w}{\alpha k_{w,e}} + \frac{1}{2k_{pl}} \ln \left( \frac{\alpha}{\alpha - 2w_{pl}} \right) + \frac{4F_w L_e^2}{3} \left( \frac{1}{(\alpha - 2w_{pl})^4} + \frac{1}{\alpha^4} \right) \right] + \frac{2\rho Q^2}{V_e^2 \alpha^2} (\alpha + w_w)^4 (\zeta_{mon} + \zeta_{ie} + \zeta_{oc}) \left( \frac{L_e}{\alpha} \right)^2 \quad (2.21)$$

Por un lado, los mecanismos no inerciales que contribuyen a la caída de presión del DPF quedan mostrados en el primer grupo de términos de la ecuación 2.21. Estos dependen linealmente del caudal volumétrico ( $Q$ ) y se corresponden con las contribuciones de la ley de Darcy y de la fricción en los canales:

- La contribución de Darcy tiene en cuenta que la pared porosa del DPF puede haber acumulado partículas en su interior a través de una permeabilidad efectiva ( $k_{w,e}$ ), que es fuertemente dependiente de la penetración de estas partículas en el medio poroso. Esta contribución también tiene en cuenta la existencia de una capa de partículas a través de su permeabilidad ( $k_{pl}$ ). Esta capa de partículas, de espesor  $w_{pl}$ , queda esquematizada en la Figura 2.10.
- La contribución de la fricción se cuantifica a través del coeficiente  $F_w$ , el cual representa la transferencia de cantidad de movimiento debida a la inyección (canales de entrada) o succión (canales de salida) del flujo a través del medio poroso y adquiere el valor 28.454 para canales cuadrados simétricos [23]. Esta contribución también contempla el cambio de geometría que la sección transversal de los canales sufre al formarse una capa de partículas (Figura 2.10).



**Figura 2.10:** Sección transversal de un canal del monolito sobre el que se ha formado una capa de partículas.

Por otro lado, los principales mecanismos inerciales quedan mostrados en el segundo grupo de términos de la ecuación 2.21. Estos dependen cuadráticamente de  $Q$  y se corresponden, principalmente, a los procesos de contracción y expansión que tienen lugar en el sistema:

- Las contribuciones debidas a la contracción del flujo en los canales de entrada y a la expansión del mismo en los canales de salida se recogen en un mismo coeficiente de pérdida de presión ( $\zeta_{mon}$ ).



- Las contribuciones debidas a la expansión del flujo a su paso por el cono de entrada al filtro y la contracción al paso por el cono de salida quedan recogidas a través de sus respectivos coeficientes de pérdida de presión por separado ( $\zeta_{ie}$  y  $\zeta_{oc}$ , respectivamente).

Nótese que en condiciones limpias la ecuación 2.21 se simplificaría a 2.22. Por un lado, la capa de partículas no existiría y su espesor ( $w_{pl}$ ) sería nulo, mientras que la permeabilidad efectiva ( $k_{w,e}$ ) contabilizaría como la permeabilidad propia del sustrato en condiciones limpias ( $k_{w,0}$ ).

$$\Delta p_{DPF_0} = \frac{\mu Q}{2V_e} (\alpha + w_w)^2 \left[ \frac{w_w}{\alpha k_{w,0}} + \frac{8F_w L_e^2}{3\alpha^4} \right] + \frac{2\rho Q^2}{V_e^2 \alpha^2} (\alpha + w_w)^4 \quad (2.22)$$

$$(\zeta_{mon} + \zeta_{ie} + \zeta_{oc}) \left( \frac{L_e}{\alpha} \right)^2$$

### 2.3.5. Proceso de regeneración

Se llama regeneración al proceso de oxidación del hollín acumulado durante el filtrado. Este proceso, periódico o continuo, se hace necesario para evitar la obstrucción completa de los canales del DPF y restaurar los niveles de operación del mismo en cuanto a caída de presión se refiere.

La tasa de reacción de este proceso está principalmente controlada por la temperatura de pared del monolito, dándose de manera espontánea entre los 500 y los 600 °C. Sin embargo, las temperaturas habituales de los gases de escape en motores Diésel no alcanzan estos niveles. Además, las pérdidas por transmisión de calor en los conductos de escape y la presencia de la turbina u otros sistemas de post-tratamiento aguas arriba del DPF propicia que estos niveles de temperatura sean todavía menores. Esto hace necesario recurrir a técnicas que permitan salvar este problema e iniciar el proceso de regeneración, técnicas que se pueden clasificar en pasivas o activas.

#### Regeneración pasiva

Son las técnicas encaminadas a que se alcancen las condiciones adecuadas para la regeneración sin el uso de sistemas auxiliares. Para ello, buscan reducir la temperatura de activación de la reacción de oxidación del hollín.

Una manera de conseguir lo anterior consiste en impregnar las paredes del monolito con catalizadores. Estos catalizadores son, principalmente, metales nobles como los usados en los DOCs. Además de que estos catalizadores pueden desactivarse al contacto con  $SO_3$ , estos solo consiguen oxidar las partículas en contacto con el mismo, suponiendo una clara desventaja.

Otra técnica la constituye el uso de aditivos en el combustible que reducen la temperatura de oxidación del hollín. A pesar de conseguirlo, la reducción de temperatura no resulta

suficiente para conseguir la regeneración, haciendo uso de esta técnica en combinación con otras. Además, estos aditivos aumentan la acumulación de cenizas en el sustrato poroso.

La presencia de  $NO_2$  en los gases de escape facilita la oxidación del hollín a bajas temperaturas, razón por la cual han nacido conceptos relacionados con el uso combinado del reactores de oxidación (como el DOC) y DPF. Este es el caso del conocido CRT [24], que hace uso de un reactor catalítico de oxidación situado aguas arriba del DPF de manera compacta. Este reactor está impregnado con platino, facilitando la oxidación de  $NO$  a  $NO_2$ .

### Regeneración activa

Los sistemas de regeneración activa son los aplicados con el fin de alcanzar la temperatura de oxidación natural del hollín de manera puntual haciendo uso de técnicas auxiliares y tienen carácter periódico. Estas estrategias se aplican cuando se alcanzan ciertas condiciones de acumulación de hollín que imponen caídas de presión considerables.

Una manera de conseguir lo anterior implica actuar sobre el dosado de operación del motor, incrementándolo. Para ello, se puede estrangular el aire de admisión (*throttling*). Sin embargo, el uno de los métodos mas extendidos es el empleo de una post-inyección retrasada lo suficiente de la principal, de modo que parte del combustible se queme en el escape, antes del DPF.

Otro conjunto de soluciones pasa directamente por situar elementos aguas arriba del DPF que introduzcan incrementos de temperatura a la entrada del dispositivo lo suficientemente altos como para iniciar la regeneración. Se puede hacer uso de un quemador en la línea de escape junto con una cámara de mezcla de reducido tamaño, con el consecuente incremento en el coste del sistema. Otra opción incluye la posibilidad de instalar un calentador eléctrico alimentado con la energía generada para aplicaciones abordo, aunque esta resulta ser la menos eficiente de las soluciones. Sin embargo, la más extendida de estas soluciones pasa por situar un inyector aguas arriba del DPF o del DOC (el llamado quinto inyector) que asegure la regeneración mediante una inyección de combustible directamente en la línea de escape.

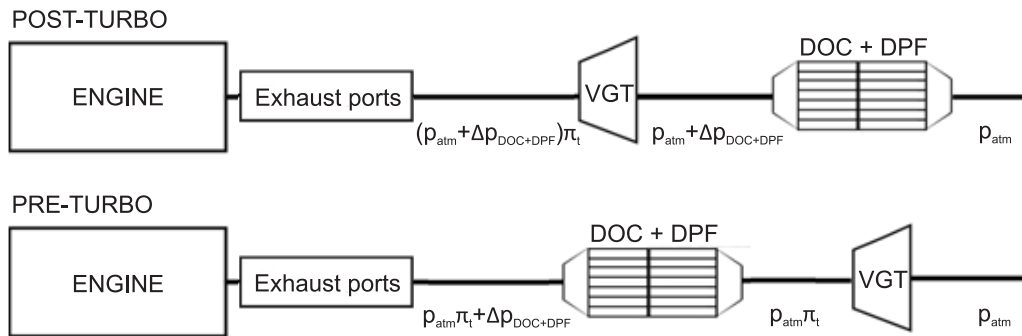
### Regeneración activo-pasiva

Claramente, los sistemas pasivos presentan especial atractivo, puesto que permiten la regeneración de manera continua, pero su uso no asegura la completa regeneración a baja carga del motor (conducción urbana). Por otro lado, el uso único de estrategias activas periódicas aumentaría el consumo del motor y el estrés térmico en el monolito cuando estas tuviesen lugar. Esto ha dado lugar a que en la industria se utilicen estrategias de regeneración combinadas, las llamadas estrategias activo-pasivas. Un ejemplo de este tipo de combinaciones se fundamenta en el uso del sistema CRT apoyado en las post-inyecciones cuando el motor opera a baja carga.

### 2.3.6. Emplazamiento pre-turbo del DPF

La idea de disponer el DPF aguas arriba de la turbina (configuración pre-turbo) ha estado presente durante décadas, pues sus ventajas hacen de ella una propuesta interesante frente a la ubicación tradicional aguas abajo (configuración post-turbo). Sin embargo, la primera prueba que se realizó con esta configuración al instalarlo en un motor real resultó en tragedia [3]. El filtro quebró a causa de los picos de temperatura durante las regeneraciones activas, liberando fragmentos cerámicos que colisionaron y destruyeron los álabes de la turbina. Esto hizo que se abandonara la idea hasta el surgir de soluciones que solventaran este problema.

Cabe mencionar que el término pre-turbo se aplica a cualquier sistema de post-tratamiento y, dados los beneficios en términos de regeneración pasiva de disponer un DOC aguas arriba del DPF, es interesante no solo estudiar la ubicación pre-turbo del filtro, sino la ubicación pre-turbo del conjunto DOC - DPF [5]. La visualización de esta disposición queda facilitada por medio de la Figura 2.11. A pesar de lo comentado, estudiar la disposición pre-turbo del DOC queda fuera de los objetivos de este proyecto.



**Figura 2.11:** Esquema de las configuraciones pre- y post-turbo de los sistemas de post-tratamiento en la línea de escape.

Las ventajas de la ubicación pre-turbo frente a la post-turbo justifican el creciente interés en su estudio en los últimos años. Entre estas ventajas se encuentran las siguientes:

- La mayor densidad del gas a la entrada del DPF desemboca en una disminución de la velocidad de filtrado ( $u_w$ ) para el mismo gasto trasegado y la misma fracción abierta del área frontal del monolito ( $OFA$ ). Como ya se puede intuir a partir de la ecuación de Darcy 2.11, menores  $u_w$  resultan en menores caídas de presión, hecho que se ve reflejado en consumos específicos más bajos.
- La pérdida de presión del sistema de post-tratamiento en arquitectura pre-turbo no multiplica a la relación de expansión de la turbina, tal y como se observa en la Figura 2.11. Esto da lugar a una menor contrapresión a la salida de los cilindros y por consiguiente, a un menor consumo específico.
- Tal y como se concluyó en [4, 5], el consumo específico presenta menor sensibilidad

a la acumulación de hollín en ubicación pre-turbo, hecho que tiene su origen en los dos puntos anteriores.

- La reducción en la pérdida de presión y en el consumo específico que viene asociada a la configuración, hace interesante la posibilidad de reducir el volumen del DPF [4, 5] sin incrementar demasiado la penalización en el consumo, logrando sistemas más compactos y costes de fabricación más reducidos. En el caso del DOC sucede algo similar [5].
- Las mayores temperaturas aguas arriba de la turbina favorecen la activación de los procesos de regeneración pasiva, así como las reacciones de oxidación que puedan tener lugar en el DOC, si estuviese instalado.
- La configuración introduce la posibilidad de disponer de EGR de alta presión libre de partículas. La ausencia de partículas en la línea del EGR permite reducir el desgaste en la caída de presión por acumulación de hollín del intercambiador de calor (*intercooler*) presente en dicha línea.

A pesar de todas las ventajas anteriores, existen ciertas desventajas que frenan la implantación de este sistema en el mercado hasta lograr soluciones que salven estos inconvenientes:

- Como ya sucedió en un intento de aplicar la configuración a motores reales, los altos picos de temperatura durante las regeneraciones periódicas pueden producir el quiebre y desprendimiento del material cerámico que constituye el monolito, impactando y destruyendo los álabes de la turbina aguas abajo. Dado que no se puede prescindir completamente del uso de estrategias de regeneración activas, han surgido algunas soluciones destinadas a solventar este problema:
  - Sustituir el filtro cerámico por uno metálico, asumiendo la penalización en la eficiencia de filtrado que estos conllevan.
  - Instalar un DOC metálico de reducido tamaño aguas abajo del DPF que, en caso de que el DPF desprenda fragmentos cerámicos, impida que estos alcancen la turbina.
- La instalación del filtro y el catalizador, si lo hubiese, aguas arriba de la turbina da lugar a una menor energía disponible a la entrada misma. Además, los sistemas de post-tratamiento tienen una inercia térmica que, si es demasiado elevada, puede producir retrasos muy importantes a la hora de efectuar transitorios. Si son muy importantes, estos retrasos se pueden traducir en ausencia de respuesta por parte del turbo (*turbocharger lag*) cuando se parte de condiciones en frío (arranques), bajo las cuales la cerámica no ha alcanzado temperaturas lo suficientemente elevadas. Este retraso afecta de forma inadmisiblemente a las prestaciones del vehículo en regímenes de carga variables (conducción urbana) [5]. Por ello, también han surgido una serie de modificaciones encaminadas a solucionar este problema:
  - Sustituir el filtro cerámico por uno metálico con menor inercia térmica.

- Reducir el volumen del filtro, y con ello su inercia térmica, aprovechando el mayor margen de reducción que permite la configuración.
- El uso de un compresor mecánico o eléctrico, combinado con estrategias de control adecuadas, con el fin de asistir al turbocompresor cuando a este no le llegue energía suficiente de la turbina durante los transitorios [5, 25]. La ventaja radica en que los compresores mecánicos son capaces de proporcionar respuesta inmediata, aunque estos requieren del aporte de energía adicional que normalmente es extraída del eje.

A pesar de las soluciones existentes a las desventajas asociadas a esta configuración, se requieren rigurosos estudios sobre el impacto de las mismas. Estudios realizados con el fin de asegurar que la instalación de los sistemas de post-tratamiento en arquitectura pre-turbo no suponga ningún riesgo sobre el resto de los componentes de la línea de escape ni penalice en exceso las prestaciones del motor.



# 3

## Modelo de cálculo

---

Para los estudios computacionales realizados se ha empleado el software libre de modelado OpenWAM (siglas que vienen del inglés *Wave Action Model*) desarrollado por el Departamento de Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia [26].

OpenWAM es un software pensado para motores de combustión interna alternativos y para el cálculo de cualquier componente que involucre flujo compresible. Este es capaz de resolver diferentes elementos, tanto 0D como 1D, y se compone de una serie de modelos correspondiente a cada uno de estos componentes. Estos elementos quedan definidos por medio de su geometría y por una serie de coeficientes físicos, algunos de los cuales requieren de previa caracterización para la correcta representación de la respuesta termofluidodinámica que devuelve el sistema modelado ante una excitación.

El código del software cuenta con esquemas de resolución potentes que trabajan con órdenes de precisión cuadráticos y soluciones corregidas o suavizadas en puntos de discontinuidad. Así, OpenWAM se presenta como una herramienta de cálculo potente que permite obtener soluciones con precisión suficiente en tiempos relativamente cortos. De este modo, se puede afirmar que OpenWAM presenta un muy buen equilibrio entre la cantidad de simulaciones que se deben realizar para confeccionar estudios paramétricos y la precisión de los resultados, haciéndolo adecuado para su uso en el presente proyecto.

Por otro lado, el software también cuenta con una interfaz gráfica de usuario, denominada WAMer, con el fin de facilitar el uso del programa .

Especial interés adquiere el modelo 1D de cálculo del DPF [2, 7, 28] integrado en OpenWAM. Este debe ser contemplado junto con sus diferentes submodelos de transmisión de calor, de caída de presión [2, 3] y de filtrado [6]. Pero, en particular, se introducirán en este capítulo los submodelos de cálculo de caída de presión y de filtrado. La importancia de esto radica en que son los submodelos implicados en el análisis de los resultados posteriores.

Este modelo incluye la posibilidad de tener en cuenta la acumulación de hollín, la cual se produce en dos regímenes claramente diferenciados cuya relación viene determinada por la penetración del hollín en el interior de la pared porosa. Por ello, también conviene introducir el modelo 0D empleado para el cálculo de penetraciones. Este modelo ha sido pensado para predecir la evolución de la penetración en diferentes condiciones de operación

y está basado en la correlación con el número de Peclet en condiciones limpias obtenida en [6].

### 3.1. Modelo 1D del DPF

El modelo del DPF resuelve las ecuaciones que gobiernan el flujo en los canales, y lo hace bajo las hipótesis de flujo 1D, compresible, no estacionario y no homentrópico.

En configuración post-turbo, se pueden asumir modelos de flujo incompresible para estimar la caída de presión con suficiente precisión. En esta configuración, el flujo saliente de los cilindros ve suavizado su carácter altamente pulsante por la presencia intermedia de la turbina. Sin embargo, esto supondría errores considerables a la hora de modelar la configuración pre-turbo, donde el DPF recibe pulsos de mayor amplitud y la compresibilidad alcanza magnitudes considerables. De ahí la ventaja que supone usar modelos que tratan flujo compresible.

Por otro lado, el término “no homentrópico” hace referencia a que los niveles de entropía no se mantienen constantes por la existencia de irreversibilidades en el flujo, tal como la existencia de transferencia de calor o fricción.

El modelo permite la posibilidad de considerar distribuciones heterogéneas del flujo, variando en sentido radial el valor de los coeficientes de descarga correspondientes a las contracciones y expansiones del flujo en los canales de entrada y salida, respectivamente.

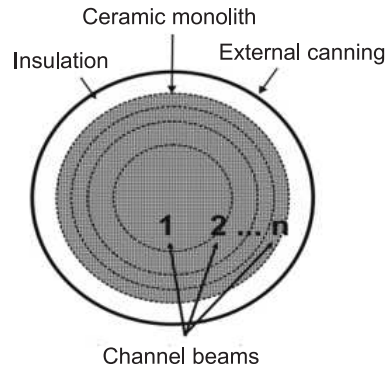
El modelo también permite la posibilidad de tratar fenómenos de transmisión de calor en la dirección radial por medio de balances de energía a través de la pared porosa. Estos procesos de transmisión de calor adquieren importancia durante la regeneración.

Considerar distribuciones radiales en las propiedades termo-fluidodinámicas del flujo añade certeza a la hora de modelar, puesto que el flujo no acostumbra a distribuirse de manera homogénea en la totalidad de la sección transversal de entrada al DPF, pero también añade coste computacional. Esto se consigue discretizando en varios haces de canales concéntricos la totalidad del radio del monolito, tal y como se observa en la Figura 3.1. En cada uno de estos haces concéntricos se resuelve un par de canales de entrada y salida.

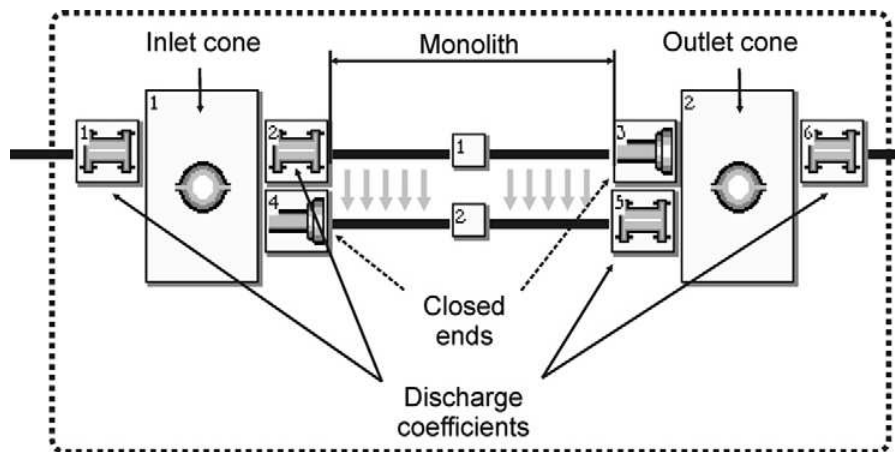
Para mayor simplicidad a la hora de explicar el comportamiento básico del modelo, se asumirá que el comportamiento del DPF queda representado por un par de canales. Esto supondría que el flujo tendría un comportamiento termo-fluidodinámico homogéneo a la entrada del monolito (pero dependiente del tiempo). Aunque más simple, esta representación queda ampliamente extendida en la literatura por mostrar también buena precisión en la resolución [23]. De este modo, se resuelve un esquema como el mostrado en la Figura 3.2.

Bajo estas hipótesis de homogeneidad termo-fluidodinámica a la entrada del DPF, el flujo que entraría en los canales resultaría de dividir el flujo descargado del cono de entrada entre el número de canales de entrada.





**Figura 3.1:** Discretización radial del monolito en haces de canales.



**Figura 3.2:** Representación esquemática en OpenWAM del DPF como combinación de elementos 0D, 1D y condiciones de contorno.

El modelo esquematizado considera los canales de entrada y salida del DPF como conductos 1D y los conos de entrada y salida del DPF como volúmenes 0D.

Por un lado, los elementos 0D se resuelven por medio de la aplicación de modelos de llenado y vaciado [27]. Estos se unen a los elementos 1D a través de cuatro condiciones de contorno que, de acuerdo a la Figura 3.2, se resumirían en las siguientes:

- La condición de contorno 1 representa la pérdida de presión debida a la expansión del gas en el cono de entrada.
- La condición de contorno 2 representa la pérdida de presión debida a la contracción del gas al introducirse en los canales de entrada del monolito.
- La condición de contorno 5 representa la pérdida de presión debida a la expansión

del gas al abandonar los canales de salida del monolito.

- La condición de contorno 6 representa la pérdida de presión debida a la contracción del gas en el cono de salida.

Para completar el esquema del DPF, se tienen en cuenta otra serie de condiciones de contorno que no unen elementos 0D con 1D, sino que más bien son representativas de los extremos sellados del DPF. Este sería el caso de las condiciones de contorno 3 (en el canal de entrada) y 4 (en el canal de salida).

Todas estas condiciones de contorno son resueltas por medio de la aplicación del método de las características (MoC) adaptado al medio poroso de los canales [28].

Cabe decir que la ampliación de la Figura 3.2 a varios haces de canales seguiría un esquema similar, pero teniendo en cuenta una única vez los volúmenes 0D de los conos y las condiciones de contorno asociadas a los mismos. Contabilizando varios haces, el flujo ya se podría asumir heterogéneo en la dirección radial y establecer diferencias entre las condiciones de contorno correspondientes a cada haz de canales.

Por otro lado, en los canales del monolito representados por los conductos 1 y 2 en la Figura 3.2, se resuelve el sistema de ecuaciones de conservación en la dirección axial. La existencia de un medio poroso entre canales de entrada y de salida se tiene en cuenta por medio de términos fuente en las ecuaciones de conservación. Este sistema se ha adaptado para distinguir los cambios de geometría que introduce la posible capa de partículas que pueda formarse en el interior de los canales de entrada. Para mayor simplicidad, esta capa de partículas se supone homogénea en la dirección axial y de espesor  $w_{pl}$ . De este modo, las ecuaciones de conservación adaptadas para la resolución del campo termo-fluidodinámico en los canales serían:

- Conservación de la masa:

$$\frac{\partial(\rho_j F_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_j u_j F_j)}{\partial x} = (-1)^j 4(\alpha - 2w_{pl}j)\rho_j u_{w_j} \quad (3.1)$$

- Conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial(\rho_j u_j F_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_j u_j^2 F_j + p_j F_j)}{\partial x} - p_j \frac{dF_j}{dx} = -F_w \mu_j u_j \quad (3.2)$$

- Conservación de la energía:

$$\frac{\partial(e_{0j}\rho_j F_j)}{\partial t} + \frac{\partial(h_{0j}\rho_j u_j F_j)}{\partial x} = q_j \rho_j F_j + (-1)^j 4(\alpha - 2w_{pl}j)h_{0w}\rho_j u_{w_j} \quad (3.3)$$

- Conservación de las especies:

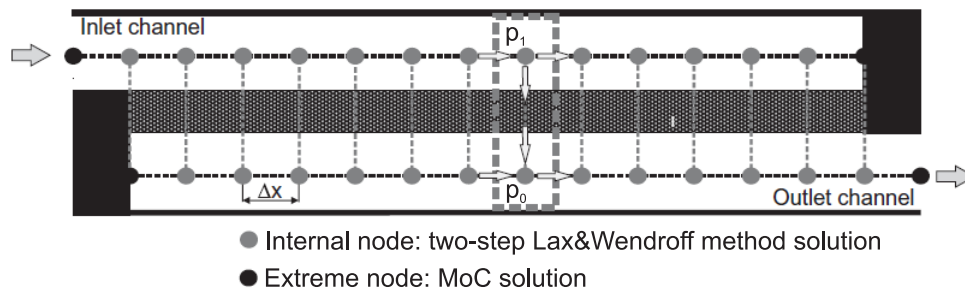
$$\frac{\partial(\rho_j Y_{s_j} F_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_j Y_{s_j} u_j F_j)}{\partial x} = (-1)^j 4(\alpha - 2w_{pl}j)\rho_j u_{w_j} Y_{s_j} \quad (3.4)$$

En las ecuaciones anteriores, el índice  $j$  hace referencia el tipo de canal que trata la ecuación. Este índice toma el valor 1 cuando se trata de los canales de entrada y 0 cuando se trata de los de salida. Por otro lado, el parámetro  $F$  representa el área de la sección transversal del canal,  $u$  es la velocidad axial del flujo en los canales,  $e_0$  representa la energía interna específica de parada,  $h_0$  es la entalpía específica de parada,  $h_{0w}$  es la entalpía específica de parada referente a la pared porosa,  $q$  hace referencia al calor por unidad de tiempo y de masa e  $Y_s$  es la fracción másica de la especie  $s$ .

Por otro lado, los cambios en la viscosidad dinámica con la temperatura son tenidos en cuenta por medio de la fórmula de Shuterland, aplicando las constantes características del gas de escape.

Desde un punto de vista numérico, la resolución de las ecuaciones de conservación se lleva a cabo mediante aplicación de métodos de diferencias finitas. Concretamente, se aplica un método adaptado de Lax-Wendroff acoplado con una técnica FCT para evitar falsas oscilaciones cerca de las discontinuidades [29]. De este modo, las ecuaciones que gobiernan el flujo quedarían discretizadas según un paso temporal ( $\Delta t$ ) y un paso espacial ( $\Delta x$ ), dividiendo la longitud del canal en una serie de nodos.

La aplicación de los métodos de resolución referentes a los canales queda expuesta con mayor claridad en la Figura 3.3.



**Figura 3.3:** Métodos numéricos aplicados para la resolución de las ecuaciones de conservación en un par de canales de entrada y salida del DPF.

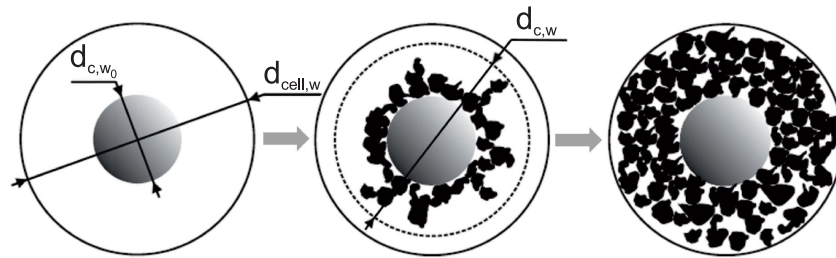
Aunque la Figura 3.3 se esquematice con un paso espacial constante para mayor simplicidad, el modelo modifica este paso en los extremos de los canales para adaptar el mallado a la longitud efectiva de los canales ( $L_e$ ) y a la existencia de los sellados en los extremos de los mismos ( $L_{plug}$ ).

Por último, el sistema de ecuaciones de conservación es cerrado con la ecuación de los gases ideales aplicada a los canales de entrada y salida en cada nodo de cálculo. Además,

estas ecuaciones se complementan con los submodelos de caída de presión a través del medio poroso y de filtrado. Sin embargo, para poder proceder a explicarlos correctamente, se hace necesario describir los cambios que sufre la microestructura del lecho de unidades colectoras que compone el medio poroso al acumular hollín en su interior, junto con la dinámica de crecimiento de la capa de partículas.

### 3.1.1. Geometría del lecho colector

En el modelo del DPF, el medio poroso queda representado por un lecho de unidades colectoras esféricas alrededor de las cuales quedan retenidas las partículas que atraviesan el medio poroso. Estas unidades colectoras, junto con los poros presentes en el medio, conformarían lo que sería la unidad celular, también esférica. De este modo, el medio poroso se puede entender también como un conjunto de unidades celulares esféricas que acumulan hollín hasta cierto límite. Esta descripción queda facilitada en la Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Crecimiento de una unidad colectoras con la acumulación de hollín en una unidad celular.

En lo referente a la microgeometría, el modelo arranca con un proceso de inicialización a partir de las variables en condiciones limpias (sin acumulación de hollín). Estas variables de inicialización son la porosidad ( $\varepsilon_{w_0}$ ) y el diámetro medio de poro ( $d_{p,w_0}$ ) en condiciones limpias.

Este proceso comenzaría calculando el diámetro medio de la unidad colectoras en condiciones limpias ( $d_{c,w_0}$ ), tal y como establece la ecuación 3.5.

$$d_{c,w_0} = \frac{3(1 - \varepsilon_{w_0})}{2\varepsilon_{w_0}} d_{p,w_0} \quad (3.5)$$

A partir de lo anterior, se obtendría el diámetro de la unidad celular ( $d_{cell,w}$ ) aplicando la ecuación 3.6.

$$d_{cell,w} = \frac{d_{c,w_0}}{(1 - \varepsilon_{w_0})^{\frac{1}{3}}} \quad (3.6)$$

La microestructura del lecho colector se iría modificando con la acumulación de hollín en el interior de la pared porosa, tal y como se observa en la Figura 3.4. De este modo, las unidades colectoras irían creciendo en diámetro, mientras que el tamaño de las unidades celulares se mantendría constante. Esta fase de cambios en la microestructura se correspondería con el régimen de filtrado en lecho profundo.

El diámetro de la unidad colectora en condiciones cargadas ( $d_{c,w}$ ) dependerá de la cantidad de hollín que esta acumule y de la manera en que lo haga, quedando definido por la ecuación 3.7.

$$d_{c,w} = 2 \left( \frac{d_{c,w_0}^3}{8} + \frac{3m_{s_{cell}}}{4\pi\chi\rho_{s,w}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.7)$$

En la ecuación 3.7, el parámetro  $m_{s_{cell}}$  representa la masa de hollín depositada alrededor de la unidad colectora y  $\rho_{s,w}$  representa la densidad de empacado de los agregados en el interior de la pared porosa que supondría un crecimiento perfectamente esférico de la unidad colectora. Para el valor de este último parámetro, se suele considerar como representativa la densidad de empacado de un agregado medio  $\rho_{s,w} = 345 \text{ kg/m}^3$  [22].

Por otro lado,  $\chi$  es un factor de forma que toma valores entre 0 y 1, caracterizando la deposición irregular de los agregados alrededor de la unidad colectora. Bajos valores de este parámetro suponen deposiciones de los agregados muy irregulares, mientras que el valor unidad se correspondería con un crecimiento perfectamente esférico. Su cálculo se explicará con detalle más adelante en este mismo apartado.

A medida que el tamaño de la unidad colectora va creciendo, la porosidad va disminuyendo. Dado que  $d_{cell,w}$  se mantiene constante con la acumulación de hollín, la porosidad en estas condiciones ( $\varepsilon_w$ ) se puede obtener a partir de la ecuación 3.8.

$$\varepsilon_w = 1 - \frac{d_{c,w}^3}{d_{cell,w}^3} \quad (3.8)$$

Por último, el diámetro medio de poro en condiciones de acumulación de hollín ( $d_{p,w}$ ) se calcula haciendo uso de la ecuación 3.9.

$$d_{p,w} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_w}{1 - \varepsilon_w} d_{c,w} \quad (3.9)$$

### Saturación del lecho colector

El límite en el crecimiento de la unidad colectora por acumulación de hollín viene impuesto por el diámetro máximo que estas pueden alcanzar que se corresponde con  $\psi d_{cell,w}$ .

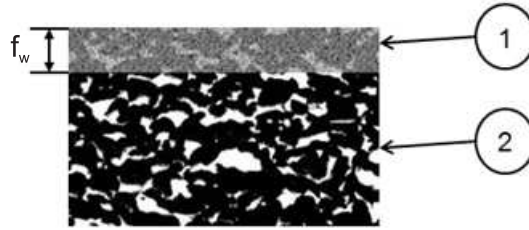
El parámetro  $\psi$  es el factor de percolación, el cual cuantifica la proporción de la unidad celular que se puede aprovechar para el almacenamiento de partículas y se suele estimar a partir de datos experimentales o técnicas de modelado. De acuerdo a la literatura, su valor está en torno a  $\psi = 0.92$  [30]. Una vez que el diámetro de la unidad colectora alcanza el valor  $\psi d_{cell,w}$ , se considera que la unidad celular ya no puede almacenar más partículas y el tamaño de la unidad colectora en su interior deja de crecer. Para cuantificar el momento en el que se cumple esta condición, se define el coeficiente de saturación ( $\phi$ ) en base a la ecuación 3.10. Cuando este coeficiente alcanza el valor de 1, la unidad colectora deja de crecer.

$$\phi = \frac{d_{c,w}^3 - d_{c,w_0}^3}{(\psi d_{cell,w})^3 - d_{c,w_0}^3} \quad (3.10)$$

A este límite de saturación le corresponde una cierta masa de saturación de las unidades celulares ( $m_{s,sat_{cell}}$ ), la cual se puede calcular por medio de la ecuación 3.11.

$$m_{s,sat_{cell}} = \frac{4}{3}\pi\rho_{s,w} \left( \left( \frac{\psi d_{cell,w}}{2} \right)^3 - \left( \frac{d_{c,w_0}}{2} \right)^3 \right) \quad (3.11)$$

Atendiendo a qué unidades colectoras acumulan hollín, la pared porosa queda dividida en dos zonas por la penetración parcial del hollín. Aunque puede estar distribuida de manera heterogénea en la pared porosa, esta se modela asumiendo homogeneidad en la fracción penetrada de la pared porosa ( $f_w$ ) y considerando despreciables los posibles depósitos de hollín que hayan podido acumularse en la fracción limpia de la pared. De este modo, quedaría una zona perfectamente definida en la que se acumulan partículas y otra zona en la que las unidades colectoras permanecen limpias, las cuales se corresponderían con las zonas 1 y 2 de la Figura 3.5, respectivamente.



**Figura 3.5:** Esquema de la subdivisión de la pared porosa en dos regiones diferenciadas por la penetración parcial del hollín.

La zona 1 de la Figura 3.5, correspondiente a la zona de penetración, contendría un número de unidades celulares definido en la totalidad de los canales de entrada ( $n_{cell}$ ).

Este parámetro se corresponde con el número de unidades celulares que están destinadas a saturar y se puede estimar teniendo en cuenta el volumen de cada unidad celular ( $V_{cell,w}$ ) y el volumen de penetración en la pared porosa ( $V_{sp}$ ). De este modo,  $n_{cell}$  se obtendría haciendo uso de la ecuación 3.12.

$$n_{cell} = \frac{V_{sp}}{V_{cell,w}} \quad (3.12)$$

Por otro lado, el volumen  $V_{cell,w}$  viene dado por  $d_{cell,w}$  a partir de la ecuación 3.13, mientras que el volumen  $V_{sp}$  se puede calcular por aplicación de la ecuación 3.14.

$$V_{cell,w} = \pi \frac{d_{cell,w}^3}{6} \quad (3.13)$$

$$V_{sp} = 4\alpha w_w L_e N_{ic} f_w \quad (3.14)$$

Dado que las condiciones termo-fluidodinámicas varían a lo largo de la longitud del canal, la deposición del hollín en la pared porosa no se reparte de manera homogénea entre las unidades celulares que la componen. Resultado de una mayor acumulación de flujo, al final del conducto de entrada se produce un incremento de la velocidad de filtrado [7]. Será en esta zona donde se produzca antes la saturación. A pesar de ello, este proceso se autorregula dado que la baja permeabilidad de los nodos saturados causa que el aire fluya a través de las zonas de mayor permeabilidad precedentes, desembocando en una saturación progresiva de la pared porosa [6]. En última instancia, el filtro saturaría completamente, finalizando el régimen de filtrado en lecho profundo y comenzando el régimen de filtrado superficial.

En lo que respecta a la saturación del filtro completo, este se considera saturado una vez la masa de hollín acumulada en el interior de la pared porosa ( $m_{sp}$ ) alcanza el valor de la masa de saturación del filtro completo ( $m_{sp,sat}$ ). Esta masa va a depender directamente de  $n_{cell}$ , tal y como establece la ecuación 3.15.

$$m_{sp,sat} = n_{cell} m_{s,sat_{cell}} \quad (3.15)$$

Con todo lo anterior, ya se puede intuir que la penetración resulta ser un parámetro de especial importancia a la hora de marcar la diferencia entre los dos regímenes de filtrado. Esta penetración va a establecer una clara diferencia entre la proporción de la pared porosa que va a acumular hollín y la que no, condicionando el final del régimen de filtrado en lecho profundo.

### Correlación para el cálculo del factor de forma

Para poder modelar la deposición irregular alrededor de las unidades colectoras, se hace necesario obtener este factor de forma ( $\chi$ ). De acuerdo a la literatura [22], este parámetro se puede calcular con correlaciones del tipo 3.16.

$$\chi = a(\Phi_{\rho_s})^b + c \quad (3.16)$$

Esta correlación es función de una serie de constantes ( $a$ ,  $b$  y  $c$ ), que se han de ajustar durante el set-up del modelo, y del factor de densidad de hollín ( $\Phi_{\rho_s}$ ), el cual se define como establece la ecuación 3.17.

$$\Phi_{\rho_s} = \frac{\rho_{s,w}}{m_{sp}/V_{sp}} \quad (3.17)$$

El ratio  $m_{sp}/V_{sp}$  representa la densidad que tendría el hollín dentro de la pared si la masa estuviera uniformemente distribuida en el volumen vacío existente en el interior del volumen de penetración del hollín ( $V_{sp}$ ).

De acuerdo a lo anterior, el valor que toma este factor de forma crece con la acumulación de hollín hasta que la pared porosa satura, tras lo cual se mantiene constante. Se puede decir que, de cierto modo, la unidad colectora tiende al crecimiento esférico con la deposición de agregados.

#### 3.1.2. Crecimiento de la capa de partículas

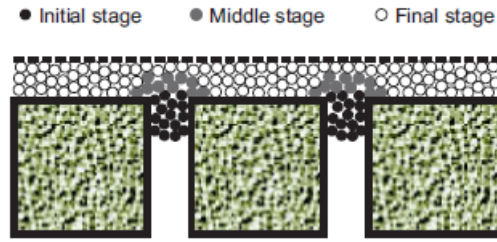
A la hora de modelar, se considera que la capa de partículas comienza a crecer alrededor de los poros superficiales, tras haber saturado la pared porosa en toda la longitud axial. Pues a través de estos poros es por donde pasa el flujo de gases de escape que contiene las partículas de hollín. De este modo, primero se formarían estructuras tipo colina que irían creciendo hasta cierto punto, a partir del cual ya se puede considerar que la capa crece de manera homogénea. Esta transición en el crecimiento de la capa de partículas se puede observar en la Figura 3.6.

Para tener en cuenta este fenómeno, el modelo tiene la posibilidad de considerar que la capa de partículas se forma inicialmente sobre un área efectiva de filtrado ( $A_{f,eCV}$ ) igual al área de filtrado geométrica en cada región de control ( $A_{fCV}$ ) multiplicada por un factor corrector de superficie ( $\xi$ ), como muestran las ecuaciones 3.18 y 3.19.

$$A_{f,eCV} = A_{fCV}\xi = 4\alpha\Delta x\xi \quad (3.18)$$

$$\xi = \varepsilon_w + (1 - \varepsilon_w) \left( \frac{w_{pl}}{w_{pl,lim}} \right) \quad (3.19)$$





**Figura 3.6:** Esquema de la deposición del hollín alrededor de poros superficiales durante la fase de transición.

En ausencia de espesor de capa, el valor de  $\xi$  sería igual a la porosidad de la pared saturada. A medida que el espesor de la capa de partículas ( $w_{pl}$ ) va creciendo, este factor corrector también lo hace. Tras alcanzarse cierto espesor de capa límite ( $w_{pl,lim}$ ), el factor corrector alcanzaría el valor unidad y la capa de partículas se desarrollaría en la totalidad de la región de control (ecuación 3.20).

$$A_{f_{CV}} = 4\alpha\Delta x \quad (3.20)$$

Bajo la hipótesis de distribución de masa de hollín uniforme en la superficie de los canales de entrada, la masa de hollín acumulada en la capa de partículas ( $m_{pl}$ ) se apilaría con una determinada densidad del hollín en la capa ( $\rho_{pl}$ ). En base a esto, el espesor de la capa de partículas sería constante en toda la longitud axial de los canales de entrada y se podría calcular a partir de la ecuación 3.21.

$$w_{pl} = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{m_{pl}}{N_{ic}L_e\rho_{pl}}}}{2} \quad (3.21)$$

A pesar de lo anterior, el modelo también incluye la posibilidad de considerar distribuciones axiales del espesor de la capa de partículas.

Al igual que la pared porosa, se asume que la capa de partículas sigue la aproximación de lecho colector, comportándose también como un medio filtrante. De este modo, a la capa le corresponde una microestructura que va a venir definida por un porosidad ( $\varepsilon_{pl}$ ), por un diámetro de la unidad colectora ( $d_{c,pl}$ ) y por un diámetro medio de poro ( $d_{p,pl}$ ).

Teniendo en cuenta lo anterior,  $\rho_{pl}$  vendrá dada por la densidad del carbón ( $\rho_C$ ) y por la porosidad de la capa de partículas ( $\varepsilon_{pl}$ ) por medio de la ecuación 3.22. Para la densidad del carbón se suele asumir el valor  $\rho_C = 2000 \text{ kg/m}^3$ .

$$\rho_{pl} = \rho_C(1 - \varepsilon_{pl}) \quad (3.22)$$

En lo que respecta a  $d_{c,pl}$ , se ha estudiado la posibilidad de tomar la moda de la distribución de partículas entrantes al DPF como tamaño representativo [22], resultando en una buena aproximación.

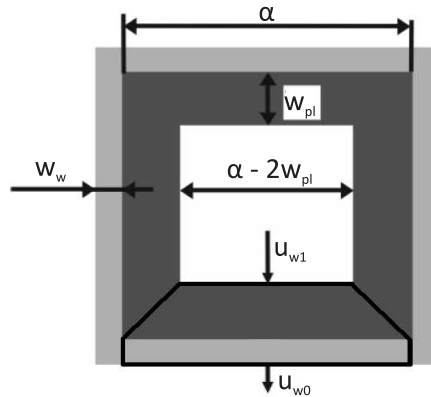
Por otro lado, al seguir la teoría de lechos de partículas, se puede definir la ecuación 3.23.

$$d_{p,pl} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_{pl}}{1 - \varepsilon_{pl}} d_{c,pl} \quad (3.23)$$

### 3.1.3. Submodelo de caída de presión

Para completar las ecuaciones de conservación, se hace necesario obtener las velocidades de filtrado en los canales de entrada y de salida en función de otros parámetros termodinámicos.

Para ello, se parte de la ecuación de continuidad y de la ley de Darcy, ambas aplicadas a través del medio poroso y de la capa de partículas bajo las hipótesis de flujo incompresible y quasi-estacionario. Estas ecuaciones se plantearían para el problema esquematizado en la Figura 3.7.



**Figura 3.7:** Esquema de las velocidades de filtrado a través de la capa de partículas y de la pared porosa.

Basándose en la nomenclatura introducida por el índice  $j$  (el cual adquiriría valor 1 para el canal de entrada y 0 para el de salida), se tendría el sistema que conforman las ecuaciones 3.24 y 3.25.

$$p_1 - p_0 = \frac{\mu_0 u_{w_0} w_w}{k_{w,e}} + \frac{\mu_1 u_{w_1} (\alpha - 2w_{pl})}{2k_{pl}} \ln \left( \frac{\alpha}{\alpha - 2w_{pl}} \right) \quad (3.24)$$

$$u_{w_1} \rho_1 (\alpha - 2w_{pl}) = u_{w_0} \rho_0 \alpha \quad (3.25)$$

Resolviendo el sistema anterior se obtienen las velocidades de filtrado buscadas. Estas velocidades quedan mostradas en las ecuaciones 3.26 y 3.27.

$$u_{w_1} = \frac{p_1 - p_0}{\frac{\mu_1 w_w \rho_1 (\alpha - 2w_{pl})}{k_{w,e} \rho_0} + \frac{\mu_1 (\alpha - 2w_{pl})}{2k_{pl}} \ln \left( \frac{\alpha}{\alpha - 2w_{pl}} \right)} \quad (3.26)$$

$$u_{w_0} = \frac{u_{w_1} \rho_1 (\alpha - 2w_{pl})}{\rho_0 \alpha} \quad (3.27)$$

La ecuación anterior implica que la diferencia entre  $u_{w_1}$  y  $u_{w_2}$  viene impuesta por el cambio geométrico en el área de filtrado que la aparición de una capa de partículas supone y por el cambio en la densidad del flujo entre los canales de entrada y salida.

Para el cálculo de la permeabilidad efectiva correspondiente al medio poroso ( $k_{w,e}$ ), se tiene en cuenta que la pared queda dividida en una zona limpia y otra con acumulación de hollín. De este modo,  $k_{w,e}$  se puede obtener a partir de la ecuación 3.28.

$$k_{w,e} = \frac{k_w k_{w_0}}{f_w k_{w_0} + (1 - f_w) k_w} \quad (3.28)$$

La ecuación anterior relaciona la permeabilidad del tramo limpio del medio poroso ( $k_{w_0}$ ) con la permeabilidad del tramo cargado de hollín ( $k_w$ ) por medio de la penetración del hollín en la pared porosa ( $f_w$ ).

Ambas permeabilidades siguen un esquema de cálculo idéntico, al igual que la permeabilidad de la capa de partículas ( $k_{pl}$ ). Este esquema está basado en la teoría de lechos de partículas, tal y como se introdujo en el capítulo 2 al tratar la microestructura del DPF.

De este modo, las tres permeabilidades implicadas en la caída de presión se pueden calcular empleando los parámetros microestructurales correspondientes a cada una de ellas, tal y como se muestra en las ecuaciones 3.29, 3.30 y 3.31.

$$k_{w_0} = f_K(\varepsilon_{w_0}) d_{c,w_0}^2 SCF_{w_0} \quad (3.29)$$

$$k_w = f_K(\varepsilon_w) d_{c,w}^2 SCF_w \quad (3.30)$$

$$k_{pl} = f_K(\varepsilon_{pl}) d_{pl}^2 SCF_{pl} \quad (3.31)$$

Este esquema seguiría desarrollándose de manera similar a lo introducido en el capítulo 2. Por un lado, los factores correctores de Stokes-Cunningham ( $SCF_{w_0}$ ,  $SCF_w$  y  $SCF_{pl}$ ) se calcularían con los números de Knudsen respectivos ( $Kn_{w_0}$ ,  $Kn_w$  y  $Kn_{pl}$ ), referidos a los diámetros medios de poro correspondientes ( $d_{p,w_0}$ ,  $d_{p,w}$  y  $d_{p,pl}$ ). En lo que se refiere al camino libre de las moléculas del gas ( $\lambda$ ), este se determinaría a partir de las condiciones termo-fluidodinámicas correspondientes al canal de entrada. Por otro lado, la función de la porosidad basada en el factor hidrodinámico de Kuwabara se evaluaría para cada porosidad ( $f_K(\varepsilon_{w_0})$ ,  $f_K(\varepsilon_w)$  y  $f_K(\varepsilon_{pl})$ ), obteniendo finalmente las permeabilidades que permiten caracterizar la pared porosa a través de la ley de Darcy.

Cabe decir que el valor de  $k_{w,e}$  se correspondería con  $k_{w_0}$  en limpio, ya que bajo estas condiciones no tiene sentido que exista penetración de las partículas.

Todo lo anterior se iría aplicando nodo a nodo, estableciendo diferentes propiedades en cada uno de ellos. La caída de presión debida al medio poroso resultante de todos los canales se sumaría a las otras contribuciones para establecer la caída de presión que impone la instalación del DPF.

#### 3.1.4. Submodelo de filtrado

Para tener en cuenta el efecto de la acumulación de hollín en el DPF sobre la caída de presión, se hace necesario contar con un submodelo de filtrado que tenga en cuenta cada uno de los fenómenos de deposición que tienen lugar en el DPF.

De acuerdo a este submodelo, la eficiencia de filtrado que impone la pared porosa depende de cada uno de los mecanismos de deposición sobre la superficie de las unidades colectoras, ya explicados en el capítulo 2. Estos se resumían fundamentalmente en la deposición por difusión Browniana, la deposición por intercepción y la deposición inercial. En lo que se refiere a la eficiencia de filtrado de la capa de partículas, esta se determina en base a la eficiencia de filtrado de la pared porosa.

La totalidad de este submodelo se aplica sobre los canales de entrada, teniendo en cuenta las condiciones termo-fluidodinámicas de los mismos.

Por otro lado, las eficiencias de filtrado que calcula el modelo están referidas a partículas de un determinado diámetro ( $d_{part}$ ). De este modo, la eficiencia puede variar atendiendo al tamaño de las partículas a las que esté referida [6].

Además, conviene mencionar que todas las eficiencias de filtrado que se calculan por medio de este submodelo vienen dadas en términos másicos.

### Eficiencia de filtrado por difusión Browniana

La eficiencia de filtrado de una única esfera debida al mecanismo Browniano depende del número de Peclet referido a la pared porosa ( $Pe_w$ ), el cual se define como establece la ecuación 3.32. En particular, el Peclet que aplica el modelo es función de las condiciones termo-fluidodinámicas en los canales de entrada a través de la velocidad de filtrado ( $u_w$ ) y del coeficiente de difusión de las partículas a las que esté referido ( $D_{part}$ ). Además, también es función de las características microestructurales del lecho colector ( $\varepsilon_w$  y  $d_{c,w}$ ).

$$Pe_w = \frac{u_w d_{c,w}}{\varepsilon_w D_{part}} \quad (3.32)$$

El coeficiente de difusión ( $D_{part}$ ) se establece a partir del diámetro de la partícula que se difunde ( $d_{part}$ ), tal y como se observa en la ecuación 3.33.

$$D_{part} = \frac{T k_B S C F_w}{3\pi\mu d_{part}} \quad (3.33)$$

En la ecuación anterior,  $k_B$  es la constante de Boltzmann cuyo valor es  $1.38054 \times 10^{-23} J/K$ .

Conocido el número de Peclet de una partícula acercándose a la unidad colectora y teniendo en cuenta el factor hidrodinámico de Kuwabara ( $K$ ) para el lecho colector de partículas (ya definido en el capítulo 2), la eficiencia de filtrado de una unidad colectora ( $\eta_D$ ) viene determinada por la ecuación 4.54.

$$\eta_D = 3.5 \left( \frac{\varepsilon_w}{K} \right)^{\frac{1}{3}} Pe_w^{-\frac{2}{3}} \quad (3.34)$$

En la ecuación 3.34, se observa la tendencia inversa con el número Peclet de la eficiencia debida a este mecanismo. Dado que este número adimensional se puede describir como el ratio entre el transporte convectivo de masa con el difusivo, menores números de Peclet desembocarán en una mayor importancia del transporte difusivo de masa y, por tanto, mayores eficiencias debidas a este mecanismo.

Por último, la eficiencia de filtrado de la totalidad de la pared porosa debida al mecanismo de difusión Browniana ( $E_D$ ) viene definida por la ecuación 3.35.

$$E_D = 1 - e^{-\frac{3\eta_D(1-\varepsilon_w)u_w f_w S_c}{2\varepsilon_w d_{c,w}}} = 1 - e^{-\frac{\eta_D u_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (3.35)$$

En la ecuación anterior,  $S_c$  es un coeficiente de ajuste (en ingles *sticking coefficient*) que se fija a partir de datos experimentales. Este coeficiente determina la eficiencia de filtrado en condiciones limpias sin afectar a la dinámica de evolución de esta eficiencia con

la acumulación de hollín.

### Eficiencia de filtrado por intercepción

La eficiencia de filtrado de una única esfera debida al mecanismo de intercepción depende del parámetro de intercepción ( $N_R$ ), definido como establece la ecuación 3.36.

$$N_R = \frac{d_{part}}{d_{c,w}} \quad (3.36)$$

El parámetro de intercepción es aplicado en la ecuación 3.37 para determinar la eficiencia de filtrado de una única esfera colectora debida al mecanismo referente.

$$\eta_R = 1.5 \frac{N_R^2}{1 + N_R} \frac{\varepsilon_w}{K} \quad (3.37)$$

Por último, la eficiencia de filtrado del conjunto debida al mecanismo de intercepción ( $E_R$ ) viene definida por la ecuación 3.38.

$$E_R = 1 - e^{-\frac{3\eta_R(1-\varepsilon_w)w_w f_w S_c}{2\varepsilon_w d_{c,w}}} = 1 - e^{-\frac{\eta_R w_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (3.38)$$

### Eficiencia de filtrado inercial

La eficiencia de filtrado de una única esfera debida al mecanismo inercial es función del número de Stokes ( $St$ ), el cual viene dado por la ecuación 3.39.

$$St = \frac{\rho S C F_w \rho_{s,w} u_w d_{part}^2}{9\mu\varepsilon_w d_{c,w}} \quad (3.39)$$

El número de Stokes se emplea en la ecuación 3.40 para determinar la eficiencia de filtrado de una única esfera colectora debida a este mecanismo.

$$\eta_I = \frac{St^2}{(St + 0.25)^2} \quad (3.40)$$

La eficiencia de filtrado del conjunto debida al mecanismo inercial ( $E_I$ ) viene establecida por la ecuación 3.41.

$$E_I = 1 - e^{-\frac{3\eta_I(1-\varepsilon_w)w_w f_w S_c}{2\varepsilon_w d_{c,w}}} = 1 - e^{-\frac{\eta_I w_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (3.41)$$

### Eficiencia de filtrado de la pared porosa

Conociendo la contribución de cada mecanismo de deposición de partículas, la eficiencia de filtrado combinada de una esfera colector (  $\eta_{DRI}$  ) es obtenida considerando que cada mecanismo de deposición actúa independientemente de los otros. Por consiguiente, esta se calcula a partir de la regla de independencia estadística, quedando la ecuación 3.42.

$$\eta_{DRI} = (\eta_D + \eta_R + \eta_I) - (\eta_D\eta_R + \eta_R\eta_I + \eta_D\eta_I) + \eta_D\eta_R\eta_I \quad (3.42)$$

Del mismo modo que en las eficiencias debidas a mecanismos individuales, en base a la eficiencia de una unidad colector se determina la eficiencia de filtrado de la pared porosa ( $E_{f,w}$ ) por medio de la ecuación 3.43.

$$E_{f,w} = 1 - e^{-\frac{3\eta_{DRI}(1-\varepsilon_w)w_w f_w S_c}{2\varepsilon_w d_{c,w}}} = 1 - e^{-\frac{\eta_{DRI}w_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (3.43)$$

### Eficiencia de filtrado de la capa de partículas

El modelo puede tener en cuenta que una pequeña fracción del hollín incidente a la pared porosa queda depositada sobre la misma aún incluso antes de alcanzar la saturación de la pared. Este proceso es controlado por el coeficiente de saturación límite ( $S_l$ ), el cual define el valor límite del coeficiente de saturación ( $\phi$ ) a partir del cual comienza este proceso de deposición superficial. De este modo, la eficiencia de filtrado de la capa de partículas ( $E_{f,pl}$ ) se calcula en base a la eficiencia de filtrado de la pared porosa y a estos coeficientes, tal y como muestra la ecuación 3.44.

$$E_{f,pl} = E_{f,w} \left( \frac{\phi - S_l}{1 - S_l} \right) \quad (3.44)$$

Este fenómeno, la saturación no homogénea de la pared porosa debida a la distribución axial de velocidades de filtrado y el crecimiento inicial de la capa de partículas alrededor de los poros superficiales comprenderían la fase de transición que tiene lugar entre los regímenes de filtrado en lecho profundo y superficial.

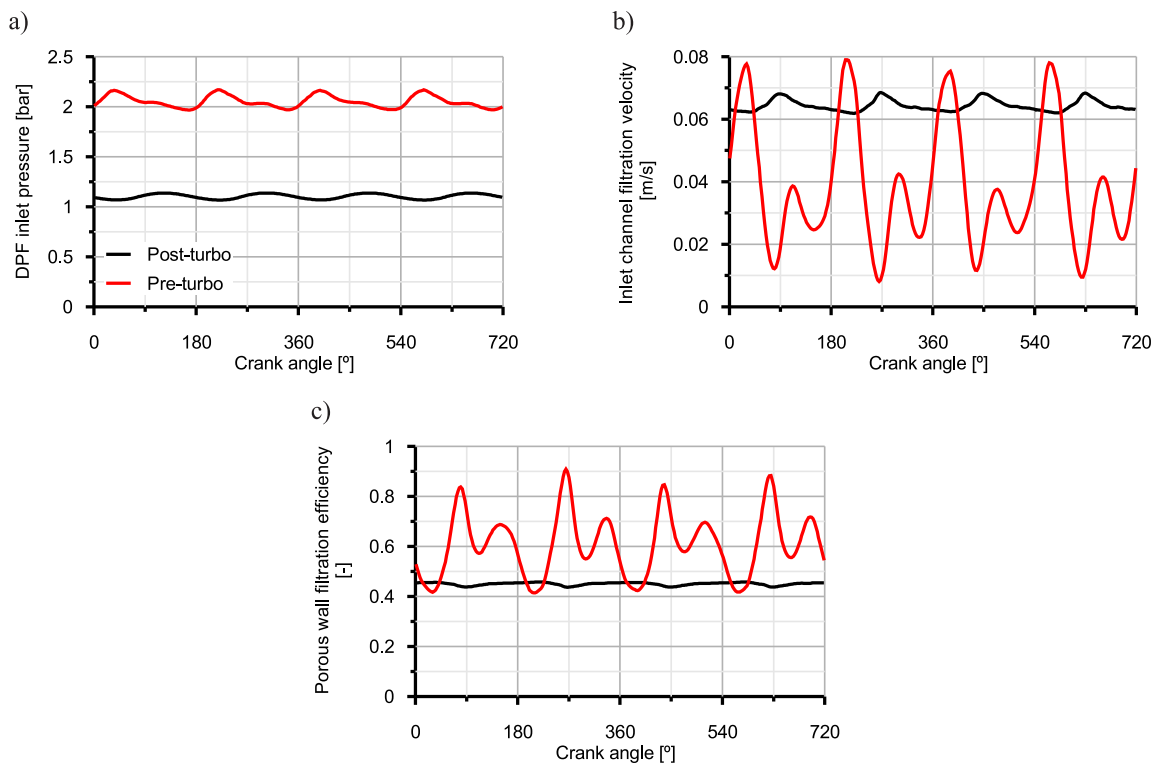
### Eficiencia de filtrado global

Aunque no es parte del modelo, para tener en cuenta una eficiencia global representativa del conjunto que conforman la pared porosa y la capa de partículas, se puede suponer que estas dos se comportan como dos elementos de filtrado dispuestos en paralelo. De este modo, se podría estimar una eficiencia global ( $E_{f,gl}$ ) a partir de la ecuación 3.45.

$$E_{f,gl} = 1 - (1 - E_{f,w})(1 - E_{f,pl}) \quad (3.45)$$

### Ponderado de las eficiencias

Los pulsos de presión presentes en el flujo de escape se traducen en picos en la velocidad de filtrado y, dado que la eficiencia de filtrado depende inversamente de la velocidad de filtrado, este carácter pulsante en velocidad se ve reflejado en la eficiencia de filtrado. De este modo, los picos de alta velocidad de filtrado se traducen en picos de baja eficiencia de filtrado y viceversa, tal y como se observa en la Figura 3.8. Teniendo en cuenta esto, obtener un valor medio de la eficiencia de filtrado a lo largo de todo el ciclo del motor proporcionaría errores que serían especialmente grandes en ubicación pre-turbo, donde el carácter pulsante del flujo es más remarcado por la ausencia de la turbina entre la salida de los cilindros del motor y el DPF (Figura 3.8).



**Figura 3.8:** Comparación de la presión de entrada al DPF, de la velocidad de filtrado y de la eficiencia de filtrado de la pared porosa instantáneos entre configuración post-turbo y pre-turbo.

Para tener en cuenta lo anterior, el modelo pondera cada una de las eficiencias instantáneas con el gasto másico instantáneo que fluye a través de la pared porosa a lo largo de la duración del ciclo del motor ( $t_c$ ). Para ello, se aplica la ecuación 3.46 en cada nodo de cálculo, donde el subíndice  $a$  hace referencia a que la ecuación es aplicable a cada una de las eficiencias.



$$E_{f,a_{CV}} = \frac{\sum_0^{t_c} E_{f,a_{CV_i}} \dot{m}_{CV_i} \Delta t}{\sum_0^{t_c} \dot{m}_{CV_i} \Delta t} \quad (3.46)$$

$$\dot{m}_{CV_i} = \rho_{CV_i} u_{w_{CV_i}} A_{f_{CV}} \quad (3.47)$$

### 3.2. Modelo 0D de cálculo de la penetración

La fracción de pared porosa penetrada ( $f_w$ ) ha mostrado ser un parámetro importante a la hora de determinar tanto la caída de presión como la eficiencia de filtrado, relacionándolas unívocamente. Además, es el parámetro que condiciona el final del régimen de filtrado en lecho profundo. No hay que olvidar que, junto con las características estructurales y algunos coeficientes de ajuste, es un parámetro de entrada al modelo. Por todo ello, conviene contar con alguna herramienta que sea capaz de predecir su magnitud. Es este el motivo por el que surge el presente modelo 0D, basándose en la correlación obtenida en [6].

Esta correlación establece una relación lineal entre el número de Peclet en condiciones limpias ( $Pe_{w_0}$ ) y el espesor de la pared porosa penetrada ( $w_{sp}$ ), tal y como se observa en la ecuación 3.48.

$$w_{sp} = 0.0019 Pe_{w_0} \quad (3.48)$$

Como cualquier correlación, esta debe aplicarse bajo las mismas condiciones en las que se extrajo. En este caso, la correlación hace uso del número de Peclet bajo la hipótesis 0D y el valor de  $w_{sp}$  que proporciona viene dado en  $\mu m$ , pudiendo calcular la fracción de pared porosa penetrada ( $f_w$ ) a partir de la ecuación 3.49.

$$f_w = \frac{w_{sp}}{w_w} \quad (3.49)$$

Por otro lado, el número de Peclet correspondiente viene dado por la microestructura de la pared porosa limpia, tal y como establece la ecuación 3.50.

$$Pe_{w_0} = \frac{u_w d_{c,w_0}}{\varepsilon_{w_0} D_{part}} \quad (3.50)$$

Atendiendo a la hipótesis de flujo 0D, la velocidad de filtrado ( $u_w$ ) en los canales de entrada se distribuye uniformemente a lo largo de los mismos. Por ello,  $u_w$  se puede

determinar a partir de la ecuación 3.51, en la cual el subíndice *in* hace referencia a las condiciones de entrada al filtro.

$$u_w = \frac{\dot{m}_{in}}{\rho_{in} A_f} = \frac{\dot{m}_{in}}{\rho_{in} N_{ic} 4\alpha L_e} \quad (3.51)$$

En lo que respecta al coeficiente de difusión, este se calcularía a partir de las condiciones fluidodinámicas a la entrada del filtro, empleando de la ecuación 3.52.

$$D_{part} = \frac{T_{in} k_B S C F_{w_0}}{3\pi \mu_{in} d_{part}} \quad (3.52)$$

Para determinar el factor de Stokes-Cunningham necesario en el modelo 0D, se aplicarían las ecuaciones 3.53, 3.54 y 3.55.

$$S C F_{w_0} = 1 + K n_{w_0} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1}{K n_{w_0}}}) \quad (3.53)$$

$$K n_{w_0} = \frac{2\lambda_{in}}{d_{p,w_0}} \quad (3.54)$$

$$\lambda_{in} = \frac{\mu_{in}}{\rho_{in}} \sqrt{\frac{\pi}{2RT_{in}}} \quad (3.55)$$

Conocido  $f_w$ , es sencillo determinar la masa de saturación del filtro a partir de las ecuaciones 3.11, 3.12 y 3.15.

En condiciones estacionarias, este modelo 0D se aplicaría directamente a condiciones limpias y la penetración calculada se emplearía en condiciones cargadas.

Sin embargo, las condiciones termo-fluidodinámicas cambian durante transitorios de carga y, por lo tanto, también cambia el Peclet en limpio y la penetración. Si este es el caso, el modelo 0D se tendría en cuenta hasta la saturación misma del filtro, a partir de la cual la penetración difícilmente puede cambiar por haberse cerrado los poros de la pared porosa del filtro. De este modo, para el cálculo de la penetración se puede considerar como representativa la media del número de Peclet limpio hasta la saturación del filtro.

# 4

## Estudio computacional sobre la influencia del número de Peclet

A lo largo de este capítulo se analizará por medio de técnicas de modelado basadas en el uso de OpenWAM la influencia del número de Peclet en la eficiencia de filtrado, en la caída de presión que la instalación del DPF impone y en el incremento en el consumo que esta caída de presión supone.

El estudio comprende una variación del número de Peclet por medio de la microestructura y otra variación por medio de las condiciones termo-fluidodinámicas, cada una de las cuales se han conseguido por diferentes vías.

Pero para poder analizar los resultados del estudio paramétrico realizado, antes se hace necesario exponer las características del motor modelado, junto con las del DPF que lleva instalado [4, 5].

Tampoco hay que olvidar mencionar las hipótesis a las que está sujeto el estudio, puesto que de ellas dependen los resultados del mismo.

### 4.1. Motor modelado

El motor modelado es un Diésel DW10BTED4 de 4 tiempos, cuyas características principales vienen resumidas en la Tabla 4.1.

Este motor se ha modelado tanto en configuración post-turbo como pre-turbo. La arquitectura post-turbo comprende un DOC inmediatamente aguas abajo de una turbina de geometría variable (VGT), seguido de un DOC principal y de un DPF. En contraposición, la arquitectura pre-turbo dispone tan solo de un DPF seguido de un DOC y la turbina (VGT). Estas arquitecturas quedan esquematizadas por medio de la interfaz gráfica de OpenWAM en la Figura 4.1.

La razón de disponer de un DOC intermedio entre el DPF y la turbina en configuración pre-turbo tiene relación con la protección de la turbina frente a posibles desprendimientos de material cerámico del DPF.

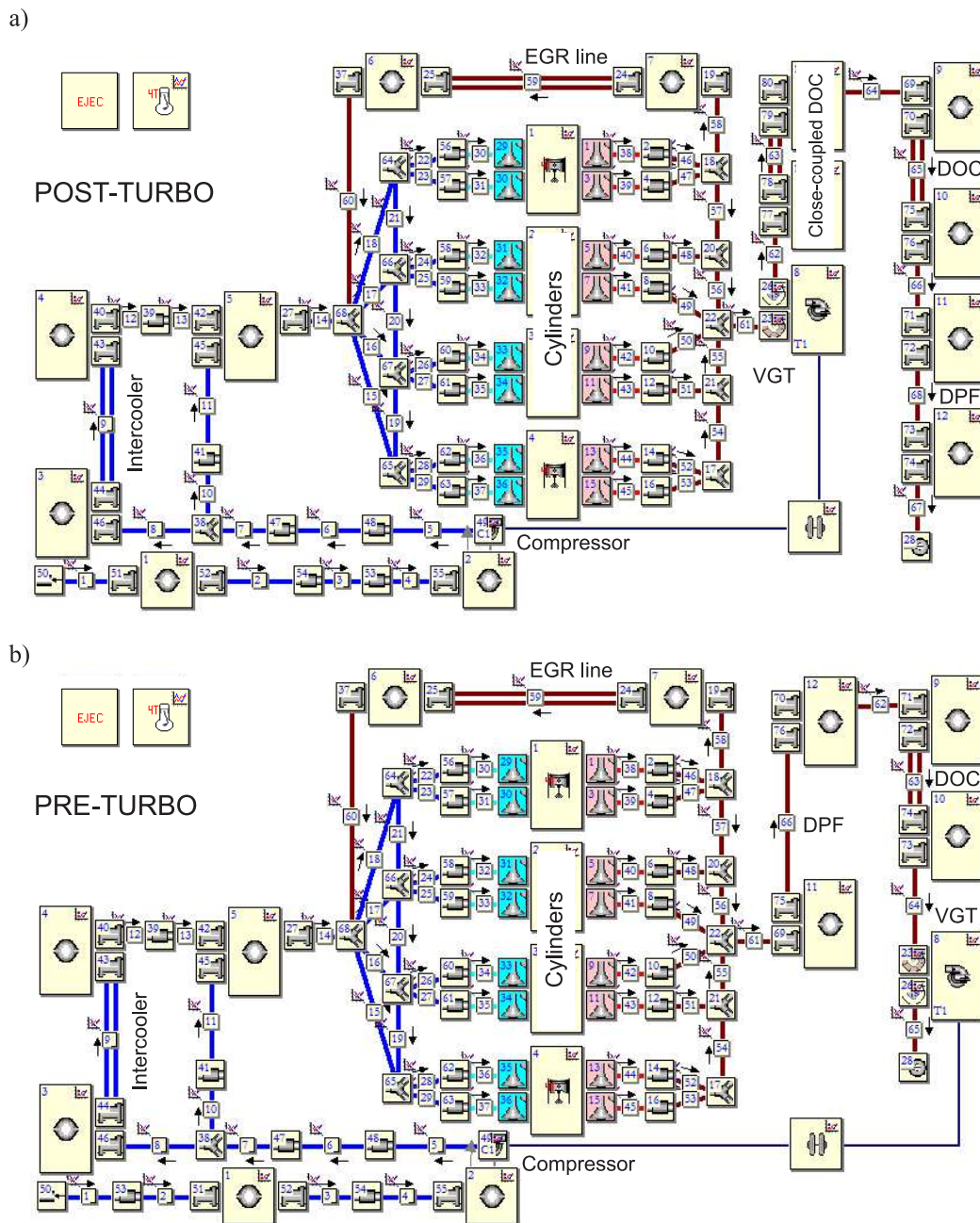
**Tabla 4.1:** Características principales del motor DW10BTED4.

<b>Tipo de motor</b>	motor Diésel HSDI E4
<b>Cilindrada</b>	1997 $cm^3$
<b>Diámetro</b>	85 $mm$
<b>Carrera</b>	88 $mm$
<b>Número de cilindros</b>	4 en línea
<b>Número de válvulas</b>	4 por cilindro
<b>Ratio de compresión</b>	18:1
<b>Sistema de inyección</b>	common-rail de inyección directa
<b>EGR</b>	alta presión refrigerado
<b>Turbocompresor</b>	VGT de una única etapa
<b>Potencia máxima</b>	100 $kW$ a 4000 $rpm$
<b>Par máximo</b>	320 $kW$ a 1750 $rpm$

Por otro lado, las características geométricas del DPF instalado en ambas arquitecturas se resumen en la Tabla 4.2. Este filtro es del tipo flujo de pared de canales cuadrados simétricos y sus características serán tomadas como referencia en el desarrollo del estudio.

**Tabla 4.2:** Características principales del DPF de referencia.

<b>Diámetro (<math>D</math>)</b>	$[mm]$	135
<b>Longitud (<math>L</math>)</b>	$[mm]$	170
<b>Longitud del sellado (<math>L_{plug}</math>)</b>	$[mm]$	5
<b>Volumen (<math>V</math>)</b>	$[l]$	2.43
<b>Porosidad (<math>\varepsilon_{w_0}</math>)</b>	$[-]$	0.46
<b>Diámetro de poro (<math>d_{p,w_0}</math>)</b>	$[\mu m]$	14.4
<b>Ancho de canal (<math>\alpha</math>)</b>	$[mm]$	1.47
<b>Espesor pared porosa (<math>w_w</math>)</b>	$[mm]$	0.32
<b>Densidad de celda (<math>\sigma</math>)</b>	$[cpsi]$	200
<b>Número de canales (<math>N_c</math>)</b>	$[\#]$	4470
<b>Área de filtrado (<math>A_f</math>)</b>	$[m^2]$	2.17
<b>SFA</b>	$[1/m]$	917.6
<b>OFA</b>	$[-]$	0.34
<b>TIF</b>	$[-]$	5.59
<b>MIF</b>	$[-]$	0.0389
<b>LOF</b>	$[-]$	215.9



**Figura 4.1:** Esquema del motor en la interfaz de OpenWAM: a) arquitectura post-turbo, b) arquitectura pre-turbo.

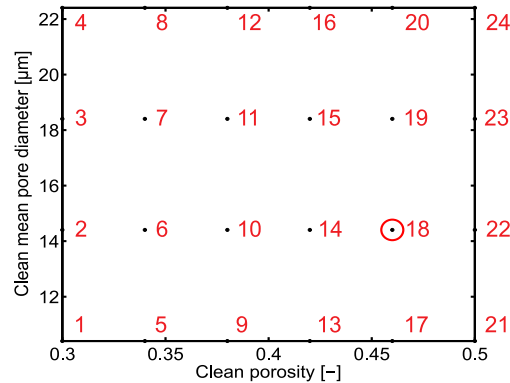
## 4.2. Metodología del estudio computacional

El análisis sobre el impacto que la variación del número de Peclet supone en la caída de presión, en el consumo y en la eficiencia de filtrado se aborda lanzando una serie de simulaciones con OpenWAM de diferentes características, atendiendo al grado de libertad

que se modifica, que o bien es la microestructura del filtro o bien las condiciones termo-fluidodinámicas a las que hace frente.

En lo que se refiere a la microestructura, esta se ve variada de dos maneras diferentes:

- En primer lugar, la microestructura propia del filtro en condiciones limpias se modifica intencionadamente a través de su porosidad ( $\varepsilon_{w_0}$ ) y del diámetro medio de poro característico del lecho colector ( $d_{p,w_0}$ ). Estos parámetros son barridos entre unos límites definidos con el fin de justificar que valores resultan en buenas prestaciones, englobando los valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  que suelen presentar los filtros no catalizados [16]. Para ello, se fijan como referencia los valores microestructurales del DPF instalado en el motor, y se establecen una serie de casos a simular. Estos casos quedan esquematizados mediante puntos negros numerados en la Figura 4.2, dónde el círculo rojo marca la microestructura de referencia.



**Figura 4.2:** Discretización de la porosidad ( $\varepsilon_{w_0}$ ) y del diámetro medio de poro ( $d_{p,w_0}$ ) en el estudio paramétrico.

- En segundo lugar, se ha tenido en cuenta la variación en la microestructura de la pared porosa que la acumulación de hollín produce. Por ello, la totalidad del análisis se ha llevado a cabo tanto en condiciones limpias como en condiciones de acumulación de hollín, correspondientes a un valor fijo de 5 g de hollín. Esta masa de hollín acumulada ha sido escogida de manera que se asegure la saturación del filtro en todos los casos simulados. Pero para ello, se hace necesario estimar la fracción de pared porosa penetrada a partir del modelo 0D expuesto en el capítulo 3, estableciendo una clara metodología de cálculo. Esta metodología consiste en simular primero los cálculos en condiciones limpias, para luego extraer las condiciones termo-fluidodinámicas a la entrada del filtro de sus resultados y poder determinar las penetraciones que serán necesarias en las condiciones cargadas.

En lo que a las condiciones termo-fluidodinámicas se refiere, la variación de estas se logra por medio de otras dos vías:

- En primer lugar, cambiar la ubicación del filtro relativa a la turbina produce una modificación en las condiciones termo-fluidodinámicas a la entrada del filtro. Por ello, se mostrarán a lo largo de todo el estudio los resultados de la arquitectura post-turbo y de la pre-turbo a modo comparativo.
- En segundo lugar, este cambio se logra a través de modificaciones intencionadas en el perfil de velocidades de filtrado que incide sobre la pared porosa. Para ello, se reduce el volumen del filtro de referencia de  $V = 2.43 l$  a  $V = 1.57 l$ , escogiendo tres puntos estratégicos de los mapas de colores mostrados en [4]. El primero de ellos se considera el volumen de referencia, el segundo comprende una variación del área de filtrado ( $A_f$ ) manteniendo la superficie específica de filtrado ( $SFA$ ) constante y el tercero una variación de  $SFA$  manteniendo constante  $A_f$ . Estas reducciones del volumen se logran atendiendo a ciertos criterios:
  - Dadas las ventajas sobre la caída de presión que presenta la reducción del volumen por medio de la longitud frente a la reducción por medio del diámetro del monolito [5], estas variaciones en las superficies se conseguirán a través de reducciones del volumen por el primero de los medios. De este modo, la longitud del monolito queda reducida de  $L = 0.17 m$  a  $L = 0.11 m$ .
  - La reducción de la longitud del monolito manteniendo  $SFA$  constante implica que  $A_f$  se reduzca, tal y como se deduce de la ecuación 4.1. Por otro lado, mantener  $A_f$  constante al reducir la longitud implica incrementar  $SFA$  y, por tanto, incrementar la densidad de celdas ( $\sigma$ ), y con ella el número de canales ( $N_c$ ), para una misma área frontal del monolito ( $A_{fr}$ ). De este modo,  $\sigma$  se modificará de 200 a 500 *psi* cuando se mantenga constante  $A_f$ , en base a la ecuación 4.2. Cabe mencionar que un incremento en  $\sigma$  se traduce en una reducción del ancho de los canales ( $\alpha$ ) o del espesor de las paredes ( $w_w$ ).

$$A_f = SFA \frac{\pi D^2}{4} L_e \quad (4.1)$$

$$\sigma = \frac{1}{(\alpha + w_w)^2} = \frac{SFA}{2\alpha} \quad (4.2)$$

- Para eliminar grados de libertad a la hora de cambiar  $\sigma$ , se mantendrá el factor de integridad térmica constante ( $TIF$ ), lo que implicaría que el ratio  $\alpha/w_w$  también debe hacerlo de acuerdo a la definición del  $TIF$  (ecuación 4.3). De este modo, serán ambos parámetros  $\alpha$  y  $w_w$  los que se reduzcan al aumentar  $\sigma$ . Para ser más concretos, el ancho de canal se reducirá de  $\alpha = 1.47 mm$  a  $\alpha = 0.93 mm$  y el espesor de pared de  $w_w = 0.32 mm$  a  $w_w = 0.20 mm$ .

$$TIF = \frac{\alpha + w_w}{w_w} \rightarrow \frac{\alpha}{w_w} = TIF - 1 \quad (4.3)$$

- En base a lo anterior, el factor de integridad mecánica ( $MIF$ ) también se mantendría constante, hecho que se puede deducir si se relaciona este parámetro con el  $TIF$ , tal y como se muestra en la ecuación 4.4.

$$MIF = \frac{w_w^2}{(\alpha + w_w)\alpha} = \frac{w_w}{\alpha TIF} = \frac{1}{(TIF - 1)TIF} \quad (4.4)$$

- La fracción abierta del área frontal del monolito ( $OFA$ ) también se mantendrá constante dado que se puede expresar en base al  $TIF$ , tal y como se muestra en la ecuación 4.5.

$$OFA = \frac{\alpha^2}{2(\alpha + w_w)^2} = \frac{\alpha^2}{2TIF^2 w_w^2} = \frac{(TIF - 1)^2}{2TIF^2} \quad (4.5)$$

- Teniendo en cuenta lo anterior, la respuesta térmica del monolito ( $LOF$ ) dependerá de si  $SFA$  se incrementa o no, tal y como se observa en la ecuación 4.6. Si esta se incrementa, el parámetro  $LOF$  también lo hará y más rápido se calentarán las paredes del monolito.

$$LOF = \frac{SFA}{4} \left( \frac{1}{OFA} - 2 \right) \quad (4.6)$$

Los resultados obtenidos en las simulaciones de los puntos discretos de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  son interpolados en el resto de valores intermedios haciendo uso de Matlab, obteniendo una serie de mapas de colores para las variables a estudiar.

En lo que respecta a las eficiencias de filtrado, los resultados proporcionados por OpenWAM, ya ponderados a lo largo de la duración de un ciclo de motor con el gasto instantáneo, son ponderados con el gasto másico a través de la pared porosa en cada nodo de calculo. Esto se realiza con el fin de tener en cuenta las distribuciones axiales de velocidades de filtrado en los canales de entrada, obteniendo un valor representativo de las eficiencias. Para ello, se implementa la ecuación 4.7 en Matlab.

$$E_{f,a} = \frac{\sum_1^n E_{f,a_{CV}} \dot{m}_{CV}}{\sum_1^n \dot{m}_{CV}} \quad (4.7)$$

$$\dot{m}_{CV} = \rho_{CV} u_{w_{CV}} A_{f_{CV}} \quad (4.8)$$

Sin embargo, el número de Peclet ya depende directamente de la velocidad de filtrado. Por tal motivo, el valor que proporciona OpenWAM de este número se pondera con la longitud de cada nodo o región de control ( $\Delta x$ ) implementando la ecuación 4.9 en Matlab. Cabe destacar que el valor proporcionado por OpenWAM del número de Peclet se establece en base a cada una de las variables de las que depende promediadas en la duración del ciclo de motor.

$$Pe_w = \frac{\sum_1^n Pe_{w_{CV}} \Delta x}{L_e} \quad (4.9)$$



### 4.3. Consideraciones e hipótesis del estudio

El estudio de modelado llevado a cabo en este trabajo se ha desarrollado en ciertas condiciones de operación del motor y atendiendo a una serie de consideraciones e hipótesis que es necesario tener en cuenta antes de proceder a analizar los resultados.

Las consideraciones a las que se atienen las simulaciones quedan resumidas en las siguientes:

- Todas las simulaciones necesarias para el análisis propuesto se han llevado a cabo en un punto de operación del motor en concreto. Este punto de operación se corresponde con un régimen de giro de 2500 rpm y el 80 % de carga del motor.
- Las simulaciones han sido ejecutadas bajo condiciones de gasto másico de combustible inyectado y de dosado constante. De este modo, la posición de la VGT se ve modificada atendiendo a la contrapresión de salida de los cilindros del motor (la cual es dependiente de la caída de presión del DPF) para mantener el gasto másico de aire constante y, por tanto, el dosado de operación. Así, el gasto másico es una variable a controlar cuyo valor objetivo se ha fijado en  $\dot{m} = 254.88 \text{ kg/h}$ .
- Las condiciones ambiente han sido fijadas en 1.025 bar y 26.9 °C para todas las simulaciones.

Por otro lado, las simulaciones están sujetas a una serie de hipótesis que se resumen a continuación:

- Se asume que el flujo queda distribuido uniformemente en la sección frontal del monolito y, por tanto, este queda representado por la resolución de un único haz de canales.
- Se desprecian las reacciones químicas que puedan tener lugar en el DPF, ya que no es objetivo del proyecto estudiar estos fenómenos.
- La densidad de empaquetado de los agregados en el interior de la pared porosa se ha fijado en  $\rho_{s,w} = 344.37 \text{ kg/m}^3$  [22].
- Dado que el estudio en condiciones cargadas se ha llevado a cabo asegurando la saturación de cada DPF simulado, el factor de forma se ha fijado en el valor  $\chi = 0.664$ .
- El factor de percolación tiene el valor  $\psi = 0.92$  [30].
- El diámetro de las partículas emitidas por el motor se considera igual a  $d_{part} = 75 \text{ nm}$ , dentro del rango típico del tamaño de partículas en motores Diésel. El diámetro de las unidades colectoras en la capa de partículas ( $d_{c,pl}$ ) se considera también igual a este valor.
- El producto del espesor de pared, la fracción de pared porosa penetrada y el *sticking coefficient* se ha fijado en  $w_w f_w S_c = 0.00032$ .

- La capa de partículas se considera de espesor constante a lo largo de la longitud de los canales.
- La porosidad de la capa de partículas se ha fijado en  $\varepsilon_{pl} = 0.6$ , que corresponde con una densidad de la capa de partículas de  $\rho_{pl} = 800 \text{ kg/m}^3$ .

Todos estos valores se fijan con el fin de desacoplar las tendencias provocadas por el número de Peclet de las tendencias que estos parámetros imponen, ya que esto estaría fuera de los objetivos del proyecto.

#### 4.4. Filtro en condiciones limpias de hollín

A lo largo de esta sección y con ayuda de mapas de color, se pretende visualizar el comportamiento de la caída de presión, del consumo y de la eficiencia de filtrado en condiciones limpias frente a los cambios en el número de Peclet descritos en la metodología. Estas tendencias se verán parcialmente justificadas en dependencias funcionales y en las ecuaciones internas al modelo 1D del DPF, descritas en el capítulo 3.

##### 4.4.1. Análisis de la caída de presión y el consumo

Para proceder con análisis exhaustivos en la caída de presión y en el consumo, antes se hace necesario estudiar cómo se comportan las variables implicadas. Es por ello que se pretende dar un esquema de dependencias para finalmente abordar las prestaciones de interés en el proyecto.

##### Microestructura de la pared porosa

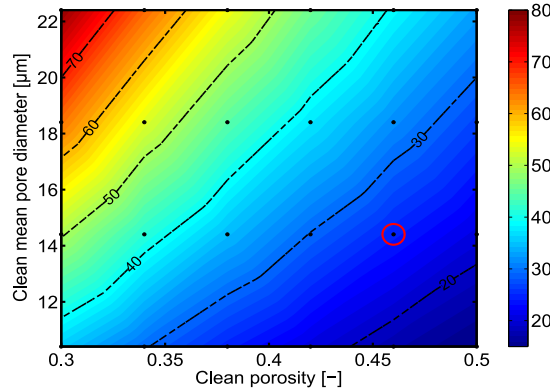
Modificar la porosidad ( $\varepsilon_{w_0}$ ) y el diámetro medio de poro ( $d_{p,w_0}$ ) implica que el tamaño de las unidades colectoras del lecho que conforma la pared porosa del filtro limpio ( $d_{c,w_0}$ ) se va a ver afectado, atendiendo a la definición del mismo (ecuación 4.10).

$$d_{c,w_0} = \frac{3(1 - \varepsilon_{w_0})}{2\varepsilon_{w_0}} d_{p,w_0} \quad (4.10)$$

De acuerdo a la ecuación 4.10, tanto reducir  $\varepsilon_{w_0}$  como aumentar  $d_{p,w_0}$  produce un incremento en  $d_{c,w_0}$ . Este hecho queda mostrado con el mapa representado en la Figura 4.3.

Por otro lado, la permeabilidad de la pared porosa limpia ( $k_{w_0}$ ) depende de la microestructura del lecho colector, a través de  $d_{c,w_0}$  y de  $\varepsilon_{w_0}$ , y de las condiciones fluidodinámicas a través del factor corrector de Stokes-Cunningham ( $SCF_{w_0}$ ), tal y como se observa en la ecuación que lo define 4.11.

$$k_{w_0} = f_K(\varepsilon_{w_0}) d_{c,w_0}^2 SCF_{w_0} \quad (4.11)$$

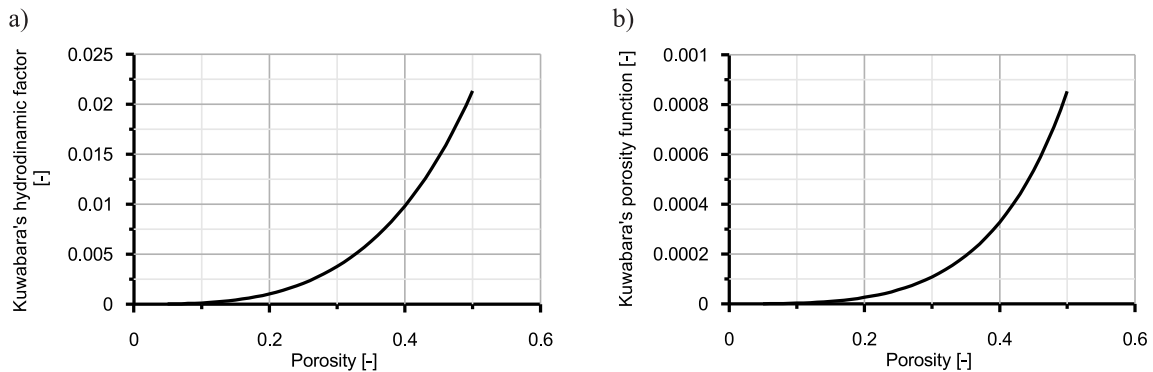


**Figura 4.3:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $d_{c,w_0}$  [ $\mu\text{m}$ ].

Para proseguir analizando  $k_{w_0}$ , se torna necesidad introducir el comportamiento de la función de la porosidad  $f_K(\varepsilon_{w_0})$ . Esta función es dependiente del factor hidrodinámico de Kuwabara ( $K$ ) a través de la ecuación 4.12. De acuerdo a la Figura 4.4, la función  $f_K(\varepsilon_{w_0})$  es, al igual que  $K$ , creciente con la porosidad.

$$f_K(\varepsilon_{w_0}) = 0.02 \frac{K}{1 - \varepsilon_{w_0}} \quad (4.12)$$

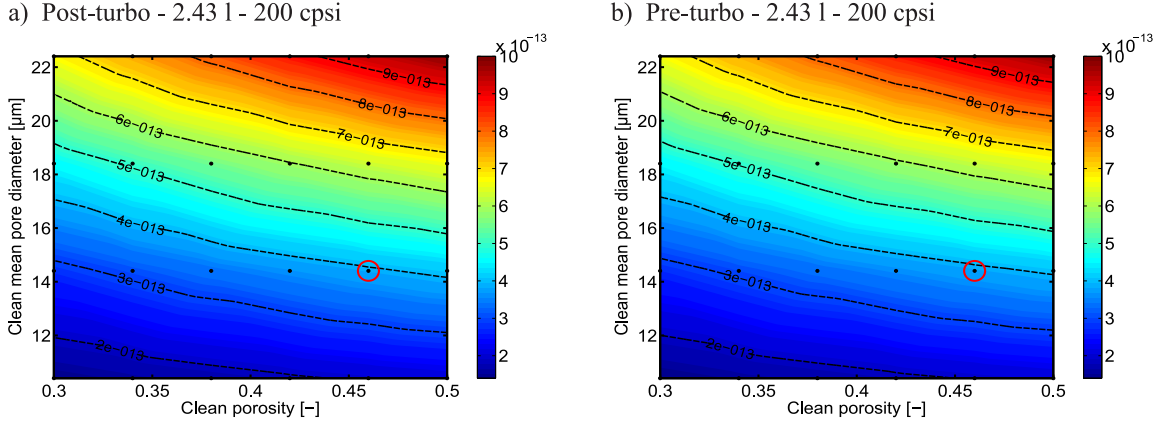
$$K = 2 - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon_{w_0})^{\frac{1}{3}} - \varepsilon_{w_0} - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon_{w_0})^2 \quad (4.13)$$



**Figura 4.4:** Efecto de la variación de  $\varepsilon$  en las funciones: a)  $K$  b)  $f_K(\varepsilon)$ .

La tendencia de la permeabilidad en limpio con  $d_{p,w_0}$  viene fundamentalmente controlada por  $d_{c,w_0}$ . Por otro lado, la tendencia de  $k_{w_0}$  con  $\varepsilon_{w_0}$  tiene una doble dependencia a través de  $f_K(\varepsilon_{w_0})$  y de  $d_{c,w_0}$ , la primera creciente con  $\varepsilon_{w_0}$  y la segunda decreciente. Sin embargo, esta tendencia va a venir dominada por la función  $f_K(\varepsilon_{w_0})$ , dado que sus valores son mayores que los que adquiere  $d_{c,w_0}$  que, además de ser del orden de micras, tiene dependencia cuadrática con  $k_{w_0}$ . A pesar de lo anterior, la tendencia decreciente de

$d_{c,w_0}$  con  $\varepsilon_{w_0}$  va a reducir la sensibilidad con la que  $k_{w_0}$  se ve afectada por  $\varepsilon_{w_0}$ . Con esto, ya se puede deducir que moverse a valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y de  $d_{p,w_0}$  mayores va a proporcionar permeabilidades mayores en limpio, tal y como se observa en la Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $k_{w_0}$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$ .

A pesar de que las temperaturas son mayores en pre-turbo, también lo es la presión a la entrada del filtro en mayor medida y, por ello, las densidades en esta zona son más elevadas. Esto se traduce en cambios en las condiciones termo-fluidodinámicas a las que se enfrenta el filtro, las cuales se cuantifican en la permeabilidad a través del factor corrector  $SCF_{w_0}$ . Aunque la viscosidad dinámica se incrementa con la temperatura, tanto la mayor temperatura como la mayor densidad a la entrada del DPF en arquitectura pre-turbo desembocan en un menor camino libre medio de las moléculas del gas ( $\lambda$ ). Esto hace que el número de Knudsen ( $Kn_{w_0}$ ) sea menor, dando lugar a valores de  $SCF_{w_0}$  menores, tal y como se deduce de las ecuaciones 4.14 y 4.15.

$$SCF_{w_0} = 1 + Kn_{w_0} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1}{Kn_{w_0}}}) \quad (4.14)$$

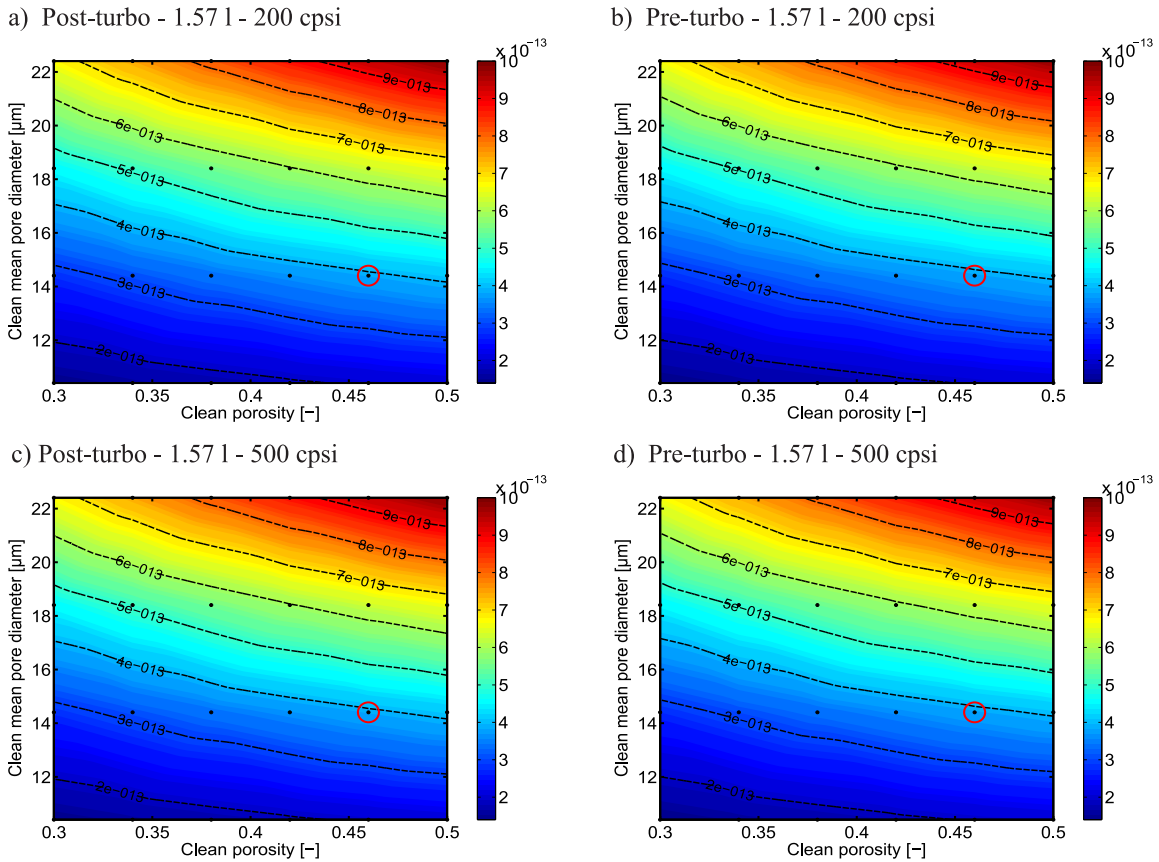
$$Kn_{w_0} = \frac{2\lambda}{d_{p,w_0}} \quad (4.15)$$

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi}{2RT}} \quad (4.16)$$

Lo anterior desembocaría en permeabilidades ligeramente menores. Sin embargo, la dependencia de  $k_{w_0}$  con las condiciones termo-fluidodinámicas es ínfima en comparación con su dependencia con la microestructura de la pared porosa. Este hecho se confirma si se compara la configuración post-turbo con la pre-turbo en la Figura 4.5.

Por otro lado, dependiendo de la manera en que se reduzca la longitud del monolito, la caída de presión puede verse incrementada o reducida, tal y como se verá más adelante.

Estos cambios en la caída de presión modifican la presión a la entrada del DPF y, con ella, la densidad del flujo, de manera que mayores presiones implican mayores densidades que desembocan en menores  $SCF_{w_0}$ . Lejos de afectar a la permeabilidad de manera significativa, sucede algo similar a cambiar la ubicación del DPF relativa a la VGT. Aunque este cambio en la permeabilidad es todavía de menor magnitud al solo verse afectada la densidad del flujo, tal y como se deduce de la comparación de las Figuras 4.5 y 4.6.



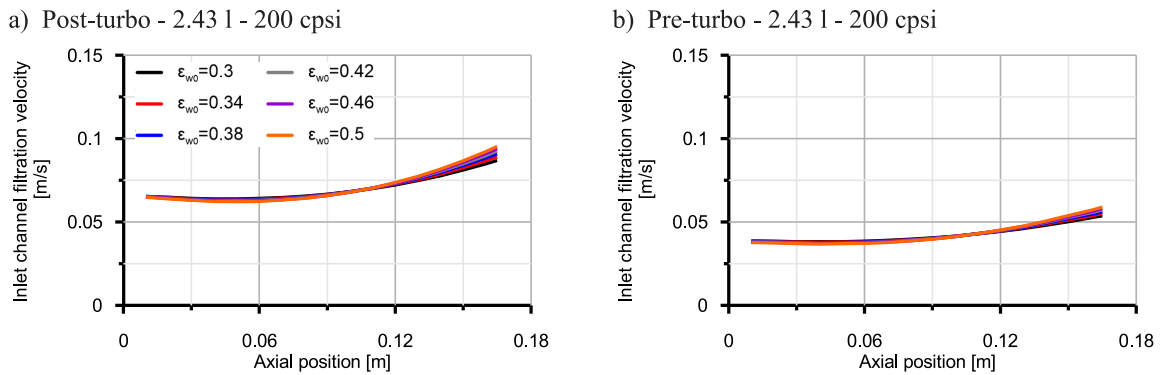
**Figura 4.6:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $k_{w_0}$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  con longitud reducida.

### Velocidad de filtrado

La distribución axial de la velocidad de filtrado en los canales ( $u_w$ ) depende de diversos factores, como lo son el área de filtrado del monolito ( $A_f$ ), el gasto másico trasegado, la densidad del flujo, la diferencia de presiones entre los canales de entrada y de salida o la permeabilidad de la pared porosa ( $k_{w_0}$ ). Dado que se aplica control sobre la VGT para mantener el gasto másico constante, esta dependencia sería eliminada.

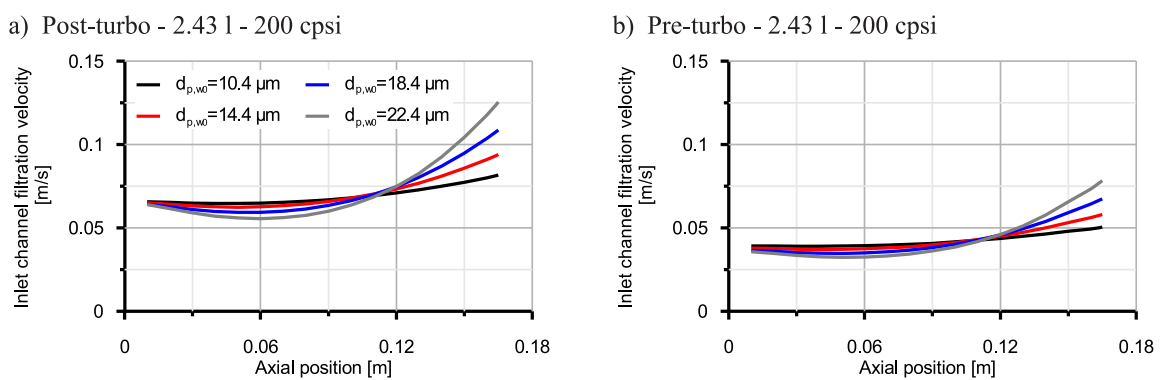
En primer lugar, la distribución de  $u_w$  se ve ínfimamente afectada por los cambios en  $\varepsilon_{w_0}$ , tal y como se observa en la Figura 4.7. Aunque sí que es cierto que incrementos en  $\varepsilon_{w_0}$

suponen una ligera reducción de  $u_w$  al principio del canal de entrada que se traducen en ligeros incrementos de la misma velocidad por acumulación del flujo al final. Este efecto está controlado por la diferencia de presiones entre canales y la permeabilidad de la pared porosa y, dado que estos parámetros están relacionados con  $u_w$  a través de la ley de Darcy, surge una especie de interdependencia entre ellos.



**Figura 4.7:** Efecto de la variación de  $\epsilon_{w0}$  en la distribución axial de  $u_w$  en el canal de entrada en condiciones limpias con  $d_{p,w0} = 14.4 \mu m$ .

Por otro lado, el efecto de  $d_{p,w0}$  sobre la distribución de  $u_w$  es más remarcado, tal y como se muestra en la Figura 4.8. Del mismo modo que pasa con  $\epsilon_{w0}$ , mayores  $d_{p,w0}$  desembocan en menores  $u_w$  al comienzo de los canales y mayores  $u_w$  al final del canal debido a la acumulación del flujo. A pesar de que este efecto es más remarcado que en el caso anterior, la velocidad de filtrado parece mantenerse a niveles similares si esta se promedia. De este modo, aunque ciertas zonas puedan contribuir más a la caída de presión, estas se ven compensadas con la menor contribución de otras zonas.



**Figura 4.8:** Efecto de la variación de  $d_{p,w0}$  en la distribución axial de  $u_w$  en el canal de entrada en condiciones limpias con  $\epsilon_{w0} = 0.46$ .

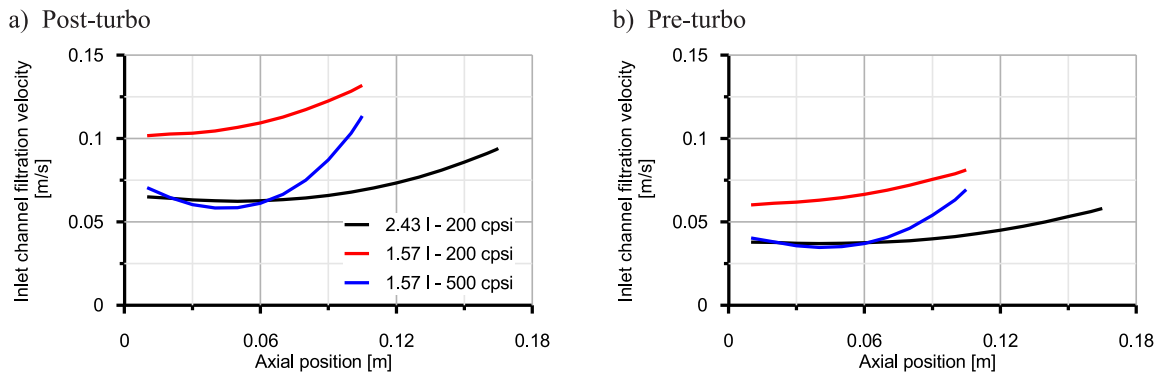
Si que hay que prestar atención al efecto que tiene cambiar la ubicación del DPF relativa a la VGT. Las mayores densidades aguas arriba del DPF en ubicación pre-turbo dan lugar

a menores velocidades de filtrado a igualdad de gasto másico y área de filtrado. Esto se puede observar tanto en la Figura 4.7 como en la 4.8.

En lo que respecta a la reducción de la longitud, el perfil de  $u_w$  se ve modificado de una manera u otra dependiendo de como se lleve a cabo la reducción de la longitud, tal y como se deduce de la Figura 4.9.

Si la reducción de la longitud se lleva a cabo manteniendo la superficie específica de filtrado ( $SFA$ ) y, por tanto, la densidad de celdas ( $\sigma$ ), el área de filtrado ( $A_f$ ) se reduce. Como consecuencia, la velocidad de filtrado se incrementa a lo largo de la longitud axial al redistribuirse el gasto másico incidente entre una menor área.

Si esta reducción se realiza de manera que  $A_f$  se mantenga constante (incrementando  $\sigma$ ), el gasto másico se redistribuye entre un área idéntica, resultando en menores  $u_w$  que en el caso anterior y similares la longitud de referencia. A pesar de ello y consecuencia de un menor recorrido del flujo al reducir la longitud, el incremento de  $u_w$  por la acumulación del flujo al final del canal de entrada es más acusado.



**Figura 4.9:** Efecto de la reducción de la longitud en la distribución axial de  $u_w$  en el canal de entrada en condiciones limpias con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$  y  $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ .

### Caída de presión

En lo que respecta al estudio de la caída de presión del DPF, conviene dividirla en las contribuciones que resultan afectadas, de modo que se pueda establecer un análisis preciso de lo que sucede con cada una de las modificaciones. Bajo las hipótesis de gasto másico constante ( $\dot{m} = \rho Q = \rho u_w A_f = cte$ ), de  $TIF$  constante ( $TIF = cte$  aplicando la ecuación 4.3) y de reducción del volumen por medio de la longitud ( $L_e/V_e \propto 1$ ), las dependencias de las contribuciones a la caída de presión en condiciones limpias quedan resumidas en las ecuaciones 4.18, 4.19 y 4.20, de acuerdo a los desarrollos establecidos en [4] a partir de modelos 0D de caída de presión y tras eliminar dependencias innecesarias para el análisis.

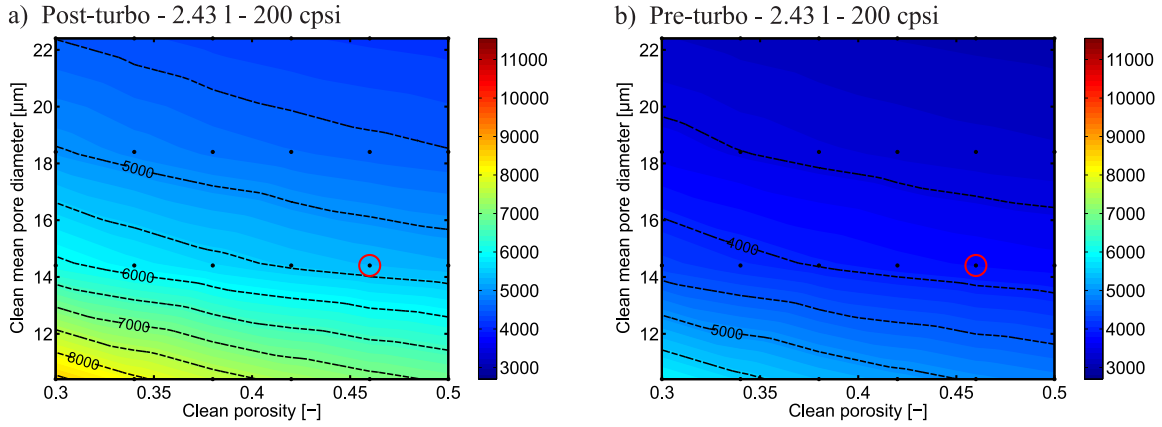
$$\frac{A_f}{V_e} = 2\alpha\sigma = \frac{2\alpha}{(\alpha + w_w)^2} = \frac{2(TIF - 1)^2}{\alpha TIF^2} \propto \frac{1}{\alpha} \quad (4.17)$$

$$\Delta p_{Darcy, w_0} \propto \frac{\mu Q}{V_e} \frac{TIF^2}{(TIF - 1)^3} \frac{\alpha^2}{k_{w_0}} \propto \mu u_w \frac{A_f}{V_e} \frac{\alpha^2}{k_{w_0}} \propto \frac{\mu u_w \alpha}{k_{w_0}} \quad (4.18)$$

$$\Delta p_{fric} \propto \frac{\mu Q}{V_e} \left( \frac{TIF}{TIF - 1} \right)^2 \left( \frac{L_e}{\alpha} \right)^2 \propto \mu u_w \frac{A_f}{V_e} \left( \frac{L_e}{\alpha} \right)^2 \propto \frac{\mu u_w L_e^2}{\alpha^3} \quad (4.19)$$

$$\Delta p_{mon/ie/oc} \propto \rho Q^2 \left( \frac{TIF}{TIF - 1} \right)^4 \frac{L_e^2}{V_e^2} \propto \dot{m} Q \propto Q \propto u_w A_f \quad (4.20)$$

La microestructura de la pared porosa condiciona la pérdida de presión a través de la permeabilidad, la cual afecta a la contribución de la ley de Darcy de manera inversamente proporcional (ecuación 4.18). De acuerdo a esta dependencia inversa, las zonas de los mapas de color con mayor permeabilidad (Figura 4.5) serán las que menor caída de presión impongan. De este modo, moverse a valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y de  $d_{p, w_0}$  mayores implica menores caídas de presión en condiciones limpias, tal y como se observa en la Figura 4.10.



**Figura 4.10:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p, w_0}$  sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones limpias.

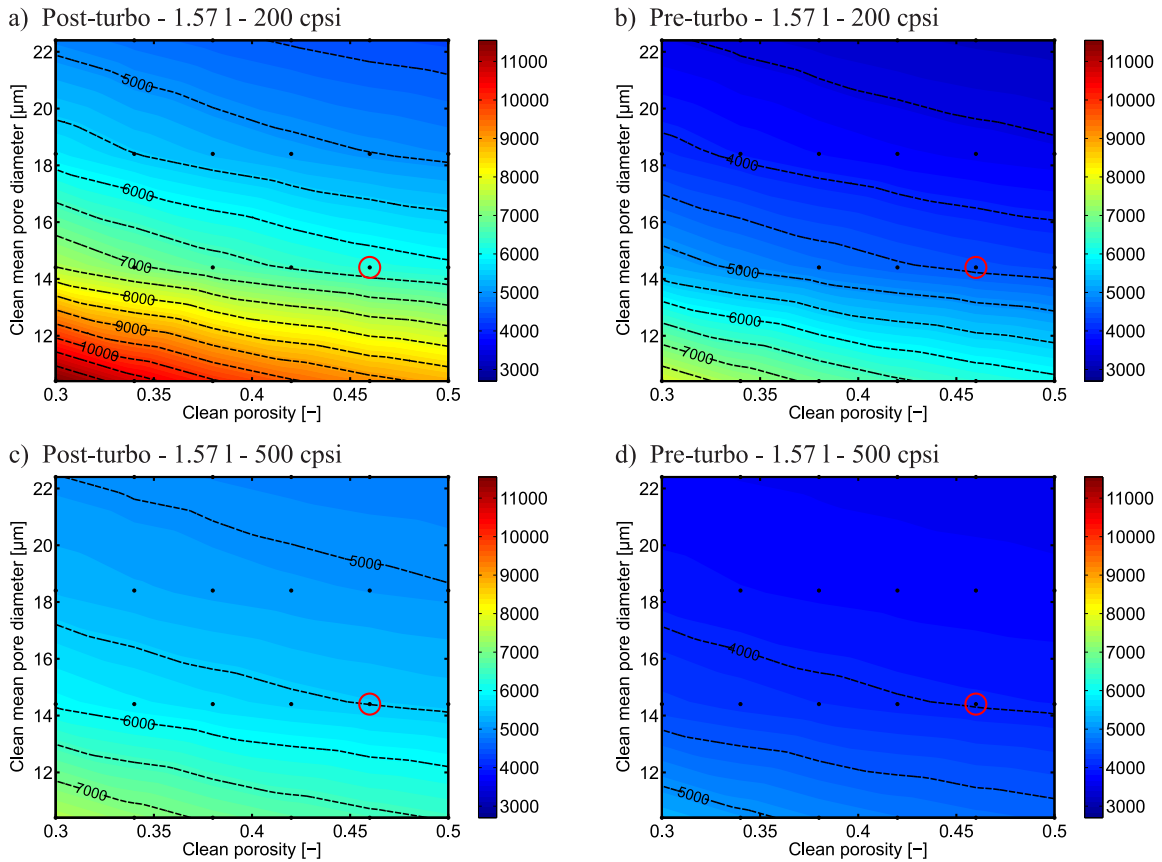
Por otro lado, cambiar la ubicación del filtro aguas arriba de la turbina supone menores pérdidas de presión, tal y como se muestra en la Figura 4.10. Aunque la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) es ligeramente mayor en pre-turbo por las mayores temperaturas, es el cambio en  $u_w$  el que controla la caída de presión. Así, son los menores valores de  $u_w$  los que dan lugar a una reducción de las contribuciones a la caída de presión en condiciones limpias (ecuaciones 4.18, 4.19 y 4.20), ya que estas dependen directamente de esta velocidad.

Atendiendo a la reducción de la longitud, cada una de las contribuciones a la caída de presión se verán afectadas de diferentes maneras, según cómo se realice la reducción en la



longitud.

Si la reducción de la longitud se lleva a cabo manteniendo  $SFA$  constante (y consecuentemente  $\sigma$ ,  $\alpha$  y  $w_w$ ) y reduciendo  $A_f$ ,  $u_w$  se incrementa tal y como se ha visto en la Figura 4.9. Teniendo en cuenta la ecuación 4.20, las contribuciones inerciales se van a ver ligeramente reducidas fruto de menores caudales volumétricos ( $Q$ ), debidos a los incrementos en la densidad del flujo que producen las mayores caídas de presión. Por otro lado, el incremento en  $u_w$  va a resultar en mayores pérdidas de presión debidas a la ley de Darcy (ecuación 4.18). En lo que respecta a la propia reducción de la longitud, esta disminuye la magnitud de la contribución de la fricción (ecuación 4.19) a costa del incremento en  $u_w$ . A pesar de todo lo anterior, el incremento en la contribución de Darcy adquiere mayor relevancia y, como resultado final, la caída de presión en limpio se ve incrementada al reducir la longitud por este medio (Figuras 4.10 y 4.11).



**Figura 4.11:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones limpias con longitud reducida.

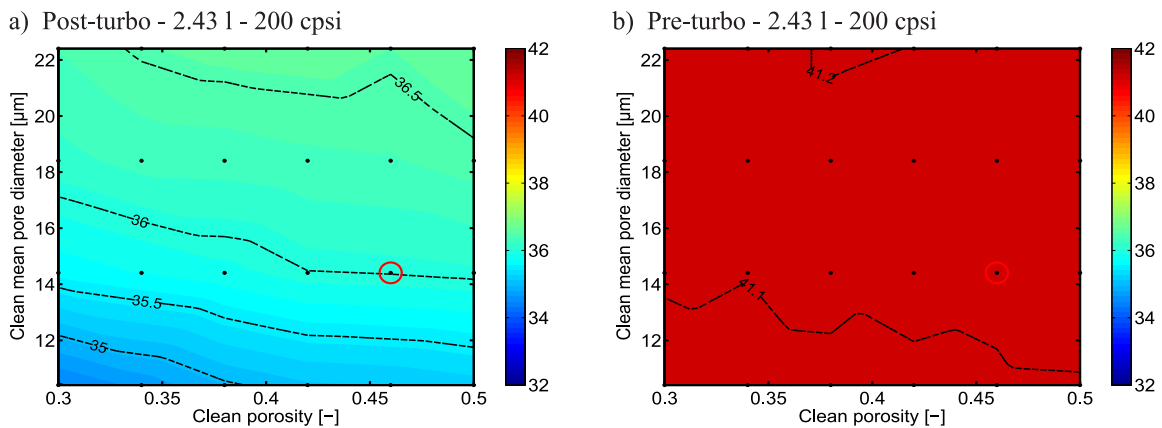
Si la reducción de la longitud se lleva a cabo manteniendo  $A_f$  constante e incrementando  $SFA$ ,  $u_w$  se mantendrá a niveles similares tal y como se ha explicado a partir de la Figura 4.9. Esta vez las contribuciones inerciales se ven ligeramente incrementadas debido a las

menores densidades del flujo, producto de las menores caídas de presión. Por otro lado, atendiendo a las hipótesis del estudio, aumentar  $SFA$  supone que  $\sigma$  se incremente a la vez que  $\alpha$  y  $w_w$  se ven reducidas. Que  $\sigma$  sea mayor es equivalente a decir que el número de canales de entrada se ha incrementado y, por tanto, también lo han hecho las pérdidas de presión debidas a la fricción, llegando incluso a eclipsar la disminución que la propia reducción de la longitud consigue en esta contribución. A pesar de lo anterior, las pérdidas de presión debidas a la ley de Darcy se ven reducidas al ser menor el espesor  $w_w$ , que en la ecuación 4.18 se ve reflejado en el parámetro  $\alpha$  tras las simplificaciones pertinentes. De nuevo, la contribución de la ley de Darcy adquiere mayor relevancia y, por ende, la caída de presión total disminuye al reducir la longitud por esta vía (Figuras 4.10 y 4.11).

### Posición de la VGT

En lo que a la posición de la VGT se refiere, se pueden establecer claras diferencias atendiendo a la ubicación del DPF relativa a la turbina.

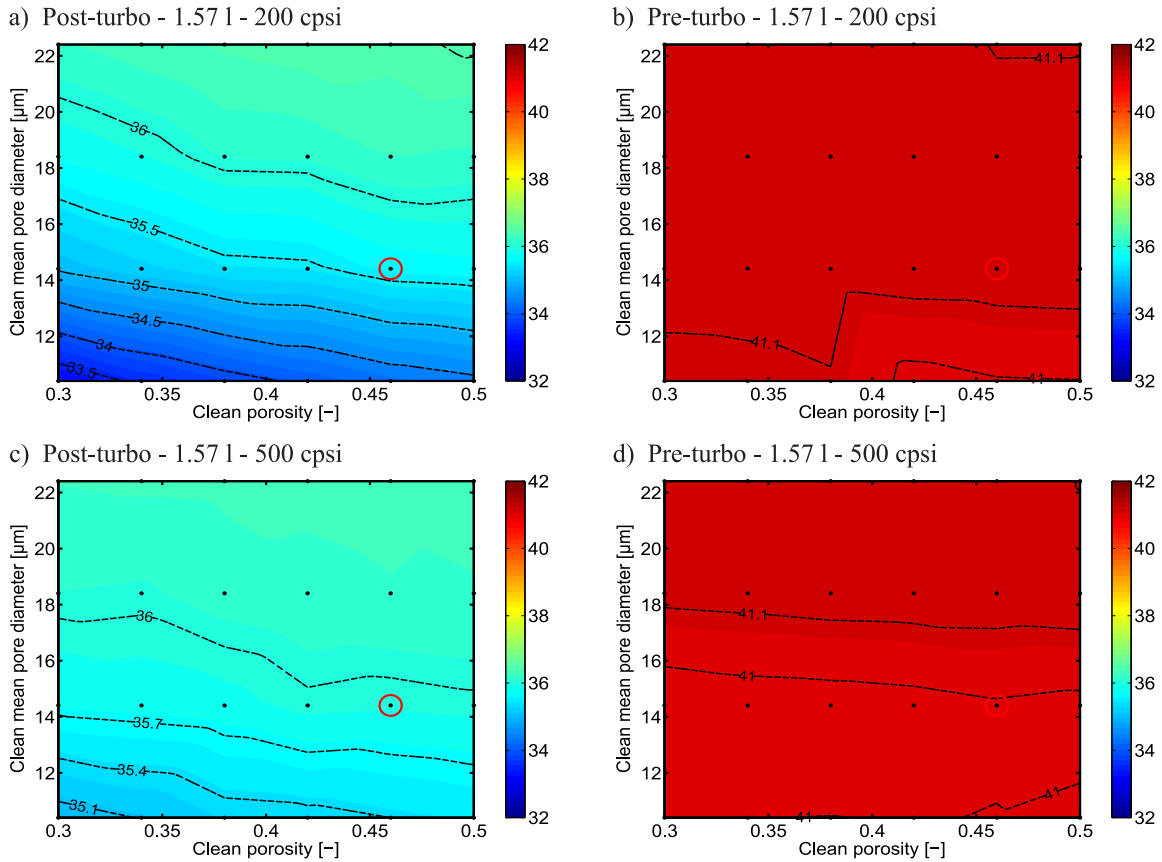
Si el DPF se sitúa en configuración post-turbo, las condiciones termo-fluidodinámicas a la salida de la turbina se ven marcadas por la presencia del DPF aguas abajo. Por ello, la posición de la VGT es muy sensible a la caída de presión del DPF en esta configuración, haciendo necesario cerrar la VGT a medida que la caída de presión aumenta, con el fin de alcanzar el ratio de expansión necesario que mantenga el gasto másico constante (Figura 4.12). Esto puede llegar a suponer una clara desventaja, puesto que sacar a la turbina de su punto de diseño no resulta atractivo desde el punto de vista de la eficiencia de la misma [4].



**Figura 4.12:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la posición de la VGT [%] en condiciones limpias.

Si el DPF se sitúa en configuración pre-turbo, la presión a la salida de la turbina es la ambiente. Por este motivo, la posición de la VGT es prácticamente independiente de la caída de presión del DPF en pre-turbo, manteniéndose esta posición a un nivel casi constante (Figura 4.12).

Del mismo modo que en los casos anteriores, los cambios en la caída de presión que producen las reducciones de la longitud dan lugar a variaciones en la posición de la VGT en configuración post-turbo, de tal modo que la turbina se cierra cuando la caída de presión es mayor. Por contra, la posición de la VGT no se ve prácticamente afectada por la presencia del DPF aguas arriba en la configuración pre-turbo (Figuras 4.12 y 4.13).

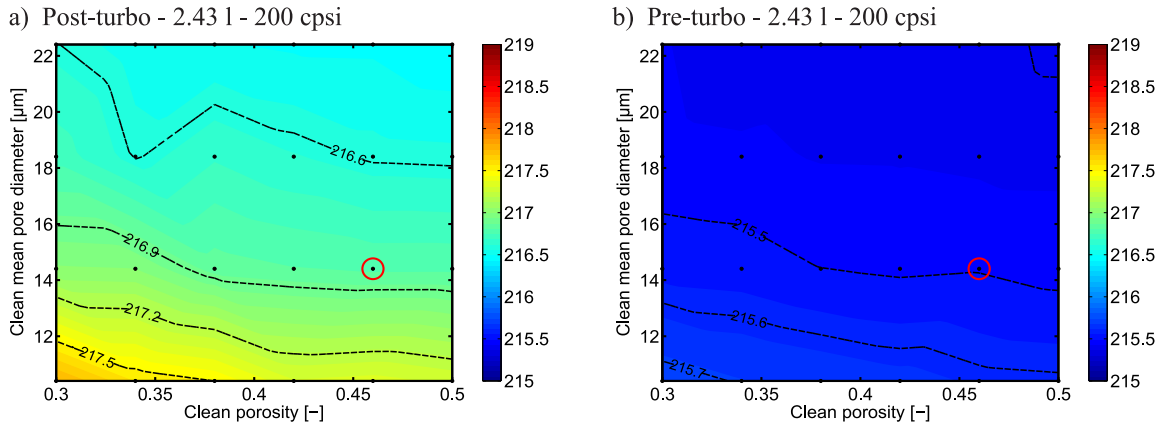


**Figura 4.13:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la posición de la VGT [%] en condiciones limpias con longitud reducida.

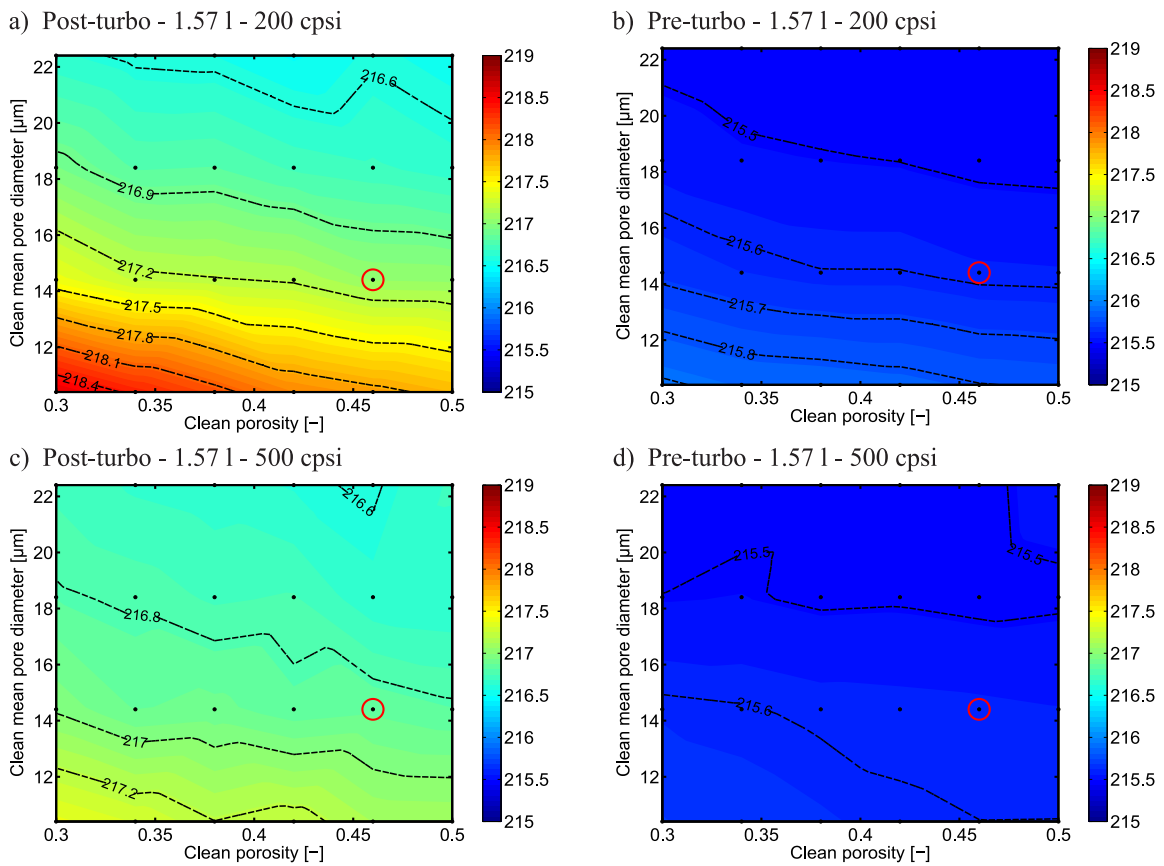
### Consumo específico

Finalmente, el análisis del consumo específico ( $bsfc$ ) se establece en base a la caída de presión y a la posición de la VGT, ya que depende de ambos. Tanto mayores caídas de presión del DPF como un cierre en la VGT suponen un incremento de la contrapresión de escape del motor. Si la contrapresión aumenta, el trabajo de bombeo será mayor y, por ende, el  $bsfc$  también lo será.

De acuerdo a lo anterior, moverse a valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y de  $d_{p,w_0}$  mayores da lugar a menores  $bsfc$ , tal y como se visualiza en las Figuras 4.14 y 4.15.



**Figura 4.14:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre el  $bsfc$  [g/kWh] en condiciones limpias.



**Figura 4.15:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre el  $bsfc$  [g/kWh] en condiciones limpias con longitud reducida.

Atendiendo a la ubicación relativa del DPF a la VGT, los consumos en post-turbo van

a ser mayores que en pre-turbo, tal y como se observa en las Figuras 4.14 y 4.15. En post-turbo, la relación de expansión de la turbina multiplica a la caída de presión del DPF, que ya de por sí es mayor que en pre-turbo, surgiendo así un doble efecto que conlleva mayores contrapresiones y mayores *bsfc*. Por contra, además de que las caídas de presión del DPF son menores en pre-turbo, la relación de expansión de la turbina no multiplica a esta caída de presión, dando lugar a menores contrapresiones y menores *bsfc*. Como resultado, el consumo presenta menor sensibilidad ante cambios en la caída de presión del DPF en configuración pre-turbo.

Por último, de acuerdo a lo explicado en la caída de presión del DPF, reducciones de la longitud manteniendo *SFA* constante dan lugar a incrementos en el *bsfc* para todo el rango microestructural establecido, mientras que reducciones de la longitud manteniendo *A<sub>f</sub>* constante conllevan ligeras reducciones en el *bsfc* respecto de la longitud de referencia (Figuras 4.14 y 4.15). Cabe resaltar que la menor sensibilidad del consumo ante cambios en la caída de presión del DPF, dota a esta arquitectura de especial interés para la reducción de la longitud.

#### 4.4.2. Análisis de la eficiencia de filtrado

Del mismo modo que con la caída de presión, para proceder con análisis exhaustivos en la eficiencia de filtrado, se hace necesario estudiar antes cómo se comportan los parámetros implicados ante las modificaciones propuestas en la metodología.

#### Número de Peclet

El número de Peclet es el objeto de variación del trabajo, siendo conveniente visualizar sus tendencias. Para proceder con el análisis del Peclet, antes conviene recordar su definición, aunque esta vez particularizada para condiciones limpias (ecuación 4.21).

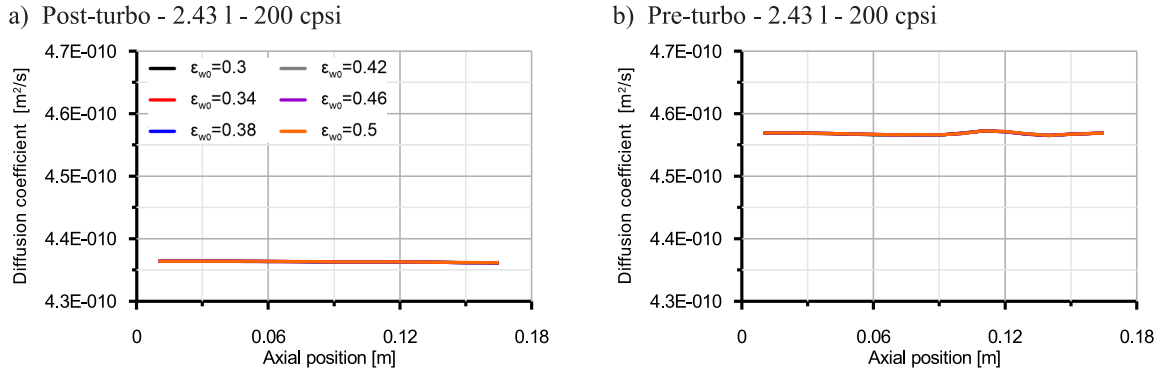
$$Pe_{w_0} = \frac{u_w d_{c,w_0}}{\varepsilon_{w_0} D_{part}} = \frac{3u_w(1 - \varepsilon_{w_0})d_{p,w_0}}{2\varepsilon_{w_0}^2 D_{part}} \quad (4.21)$$

Este depende de parámetros que simplemente son objeto de variación ( $\varepsilon_{w_0}$  y de  $d_{p,w_0}$ ) o cuyas tendencias ya han sido explicadas ( $u_w$ ), exceptuando el coeficiente de difusión de las partículas ( $D_{part}$ ). Por ello, es necesario un análisis precedente del coeficiente  $D_{part}$  (ecuación 4.22).

$$D_{part} = \frac{Tk_B S C F_{w_0}}{3\pi\mu d_{part}} \quad (4.22)$$

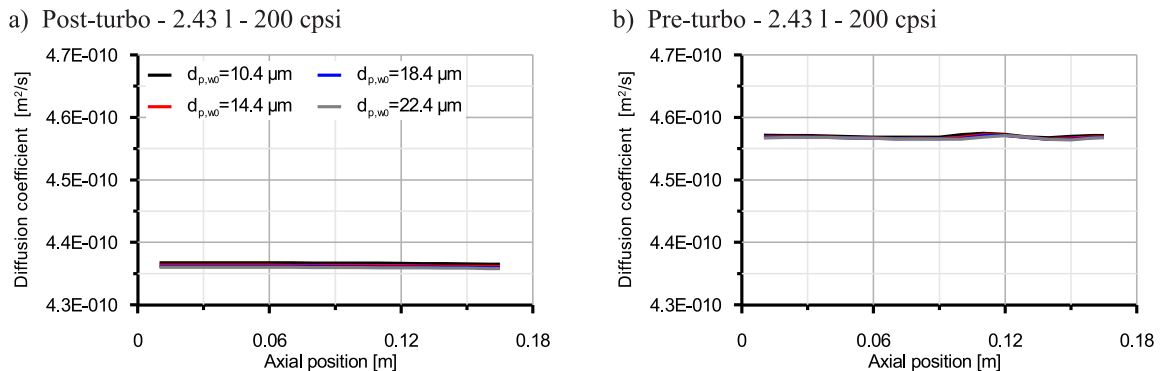
En primer lugar, menores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  conllevan mayores caídas de presión en limpio (Figura 4.10) que se traducen en mayores densidades del flujo y, por tanto, menores  $S C F_{w_0}$  y menores  $D_{part}$ . Sin embargo, los cambios producidos en la caída de presión por este motivo no llevan a diferencias apreciables en  $D_{part}$ , tal y como se observa en la Figura

4.16.



**Figura 4.16:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  en  $D_{part}$  en condiciones limpias con  $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ .

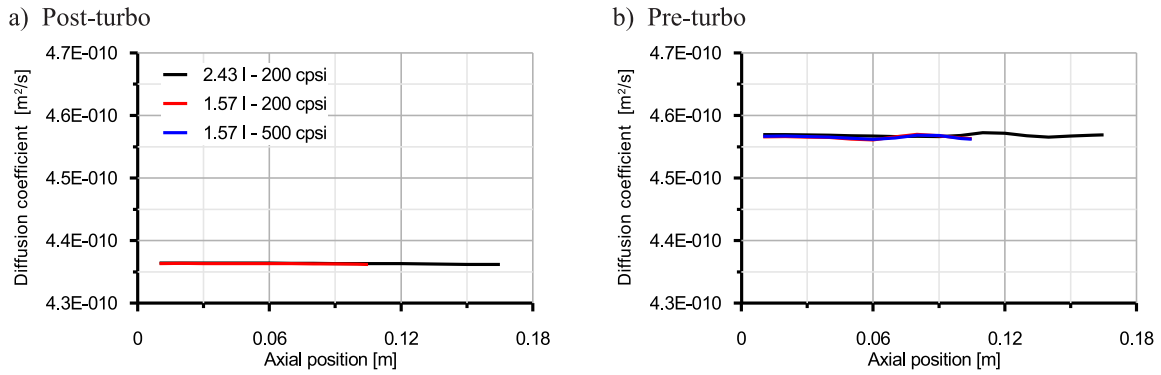
Por otro lado, menores valores de  $d_{p,w_0}$  imponen mayores caídas de presión en limpio, aunque sería el propio menor valor de  $d_{p,w_0}$  el que daría lugar a mayores  $Kn_{w_0}$  y mayores  $SCF_{w_0}$ . De este modo, menores valores de  $d_{p,w_0}$  desembocarían en coeficientes  $D_{part}$  ligeramente mayores, tal y como se aprecia en la Figura 4.17. A pesar de esto, el cambio producido sigue sin ser suficiente como para dar lugar a efectos remarcados.



**Figura 4.17:** Efecto de la variación de  $d_{p,w_0}$  en  $D_{part}$  en condiciones limpias con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ .

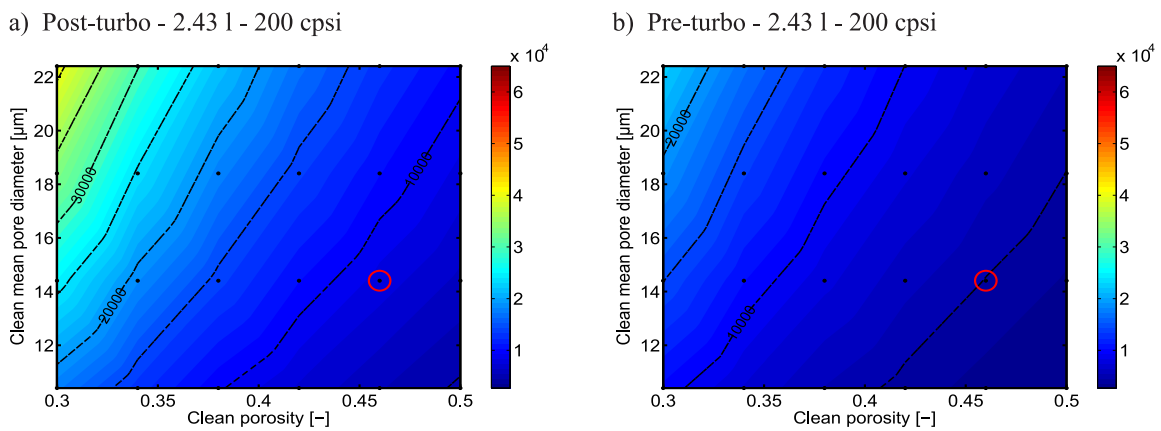
Al cambiar la ubicación del filtro de post-turbo a pre-turbo también se producen reducciones en  $SCF_{w_0}$ , producto de las mayores densidades y temperaturas del flujo, e incrementos en  $\mu$  producto de las mayores temperaturas. Sin embargo, la temperatura juega directamente el papel de factor controlante, de modo que las mayores temperaturas en pre-turbo dan lugar a  $D_{part}$  apreciablemente mayores (ecuación 4.22), tal y como se observa en las Figuras 4.16 y 4.17.

Al igual que en los casos anteriores y a pesar de los cambios producidos en la caída de presión, la reducción de la longitud tampoco parece tener efectos muy remarcados sobre  $D_{part}$  (Figura 4.18).



**Figura 4.18:** Efecto de la reducción de la longitud en  $D_{part}$  en condiciones limpias con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$  y  $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ .

En lo que respecta al número de Peclet, mayores valores de  $d_{p,w_0}$  suponen mayores  $d_{c,w_0}$  que desembocan en  $Pe_{w_0}$  más elevados (ecuación 4.21). Por contra, un incremento en  $\varepsilon_{w_0}$  produce una reducción en  $d_{c,w_0}$  y, por tanto, un decremento de  $Pe_{w_0}$  por dos vías, el cual resulta en una mayor sensibilidad por parte del Peclet ante cambios en  $\varepsilon_{w_0}$  que ante cambios en  $d_{p,w_0}$ . Para resumir, moverse a valores menores de  $\varepsilon_{w_0}$  y mayores de  $d_{p,w_0}$  va a desembocar en mayores  $Pe_{w_0}$ , tal y como queda patente en la Figura 4.19. Físicamente, mayores números de Peclet implicarían que el transporte convectivo de masa cobra mayor importancia que el difusivo.

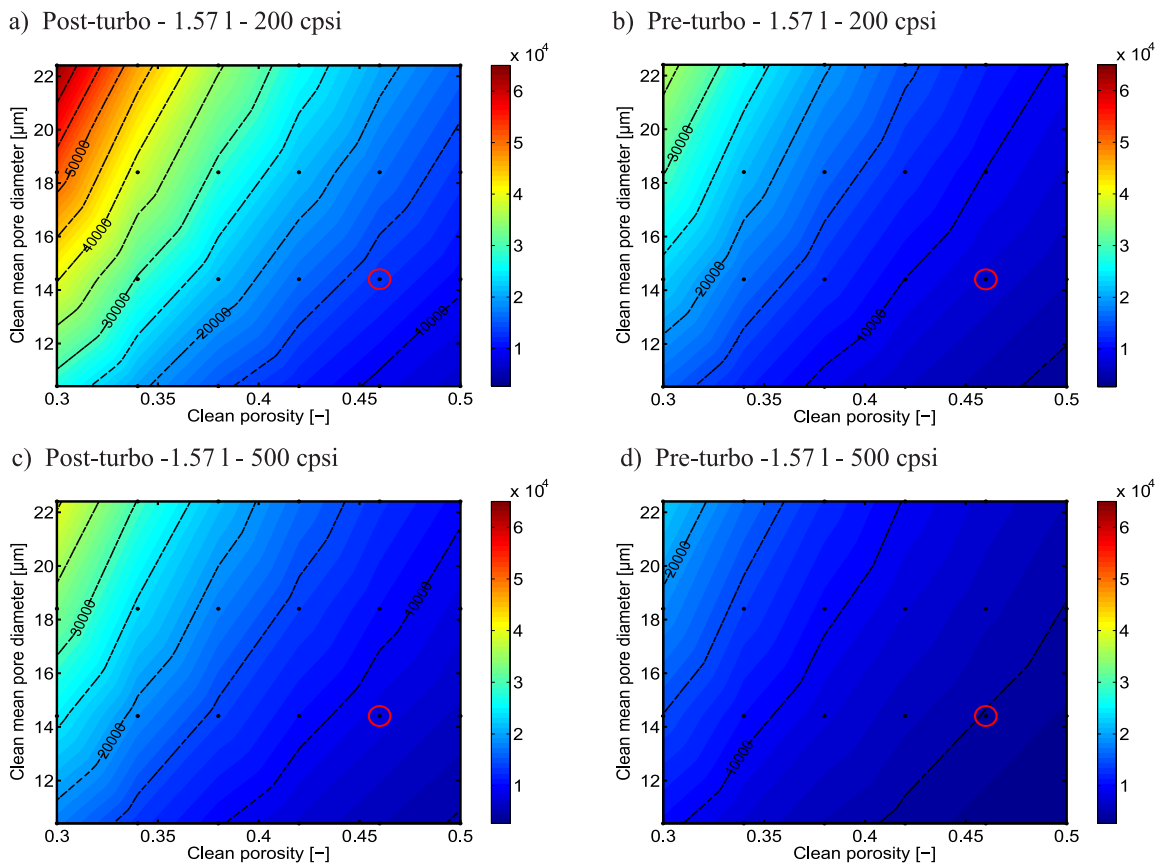


**Figura 4.19:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $Pe_{w_0}$  [-].

El cambio de ubicación del filtro también produce un doble efecto en el número de Peclet, de modo que la configuración pre-turbo tiene asociados menores  $Pe_{w_0}$  (Figura 4.19).

Los menores valores de  $u_w$  en pre-turbo desembocan en menores  $Pe_{w_0}$  y a este efecto se le suman los mayores valores de  $D_{part}$ , que también contribuyen a menores  $Pe_{w_0}$  (ecuación 4.21).

En lo que respecta a la reducción de la longitud, el cambio en  $Pe_{w_0}$  queda principalmente influenciado por  $u_w$ . De este modo, se tendrán mayores valores de  $Pe_{w_0}$  al reducir la longitud del DPF manteniendo  $SFA$  constante, fruto de mayores  $u_w$ . Por otro lado, no se producen cambios muy remarcados al reducir la longitud manteniendo  $A_f$  constante, dado que los valores de  $u_w$  permanecen a niveles similares. Tan solo se producen reducciones poco apreciables en  $Pe_{w_0}$ , producto de los mayores  $SCF_{w_0}$  que las menores caídas de presión producen (Figuras 4.19 y 4.20).



**Figura 4.20:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $Pe_{w_0}$  [-] con longitud reducida.

### Eficiencia de filtrado por difusión Browniana

La eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida al mecanismo de deposición por difusión Browniana ( $\eta_D$ ) está íntimamente ligada al número de Peclet por medio de la ecuación 4.23. Esta se extrapola al DPF entero ( $E_D$ ) haciendo uso de la ecuación 4.24. De acuerdo a las hipótesis del estudio, para esta extrapolación se ha de tener en cuenta que el

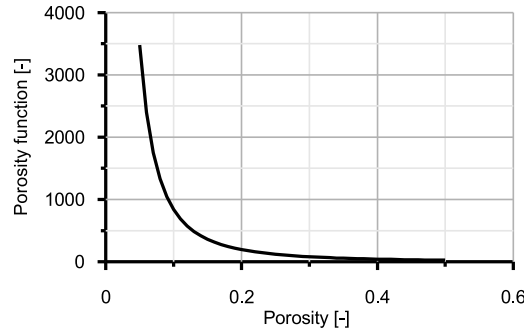


producto  $w_w f_w S_c$  permanece constante (hipótesis del estudio), dejando las dependencias funcionales  $\eta_D$  y  $d_{p,w_0}$ . De este modo, si  $\eta_D$  se incrementa,  $E_D$  también lo hace a igualdad de  $d_{p,w_0}$ . Por contra, si  $d_{p,w_0}$  presenta mayores valores,  $E_D$  se reduce a igualdad de  $\eta_D$ .

$$\eta_D = 3.5 \left( \frac{\varepsilon_{w_0}}{K} \right)^{\frac{1}{3}} Pe_{w_0}^{-\frac{2}{3}} \quad (4.23)$$

$$E_D = 1 - e^{-\frac{\eta_D w_w f_w S_c}{d_{p,w_0}}} \quad (4.24)$$

De acuerdo a la ecuación 4.23, la eficiencia  $\eta_D$  no solo depende del número de Peclet, sino que también depende de la función de la porosidad  $\varepsilon_{w_0}/K$ . Esta función de la porosidad evoluciona de tal modo que mayores porosidades implican menores valores de la misma (Figura 4.21).

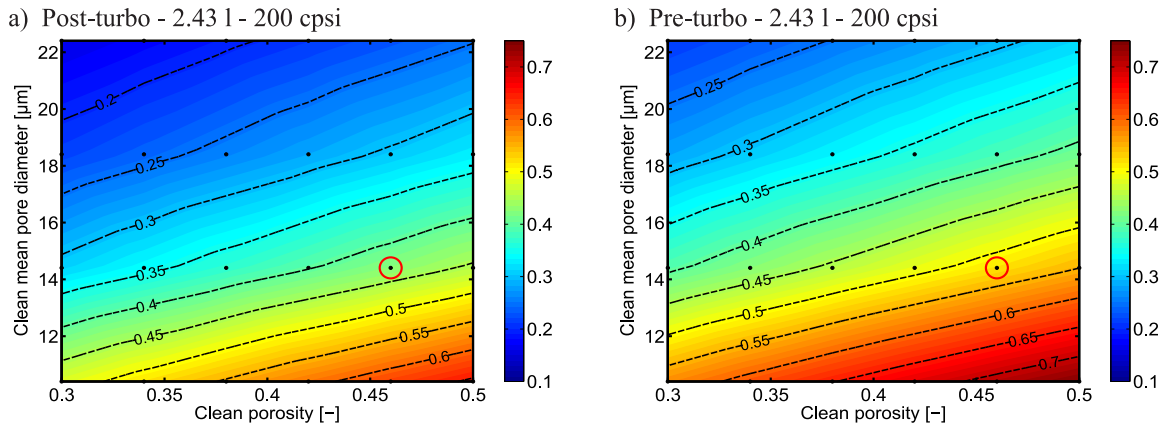


**Figura 4.21:** Efecto de la variación de  $\varepsilon$  en la función  $\varepsilon/K$ .

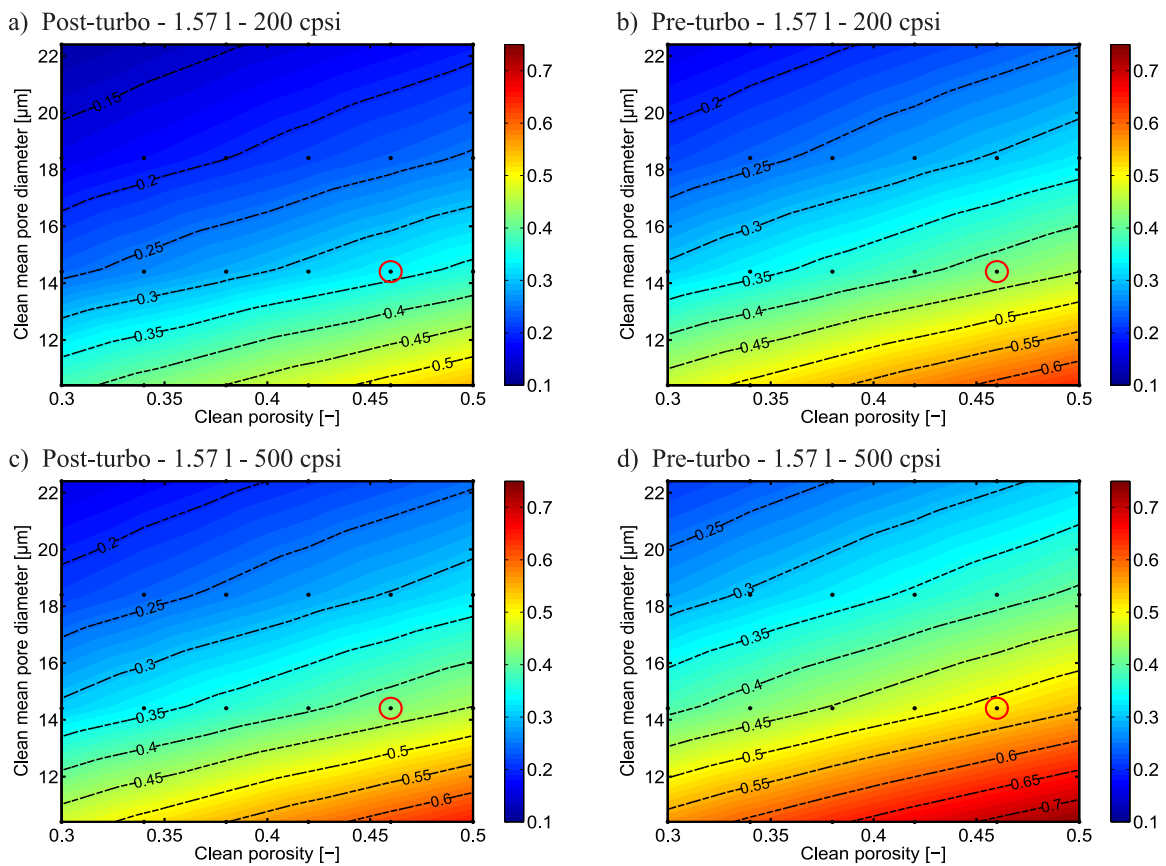
Aunque  $\eta_D$  depende de la función  $\varepsilon_{w_0}/K$ , el factor dominante lo constituye  $Pe_{w_0}$  al estar elevado a una potencia mayor. Esta dependencia es inversamente proporcional, de modo que las zonas con menor valor de  $Pe_{w_0}$  dan lugar a mayores  $\eta_D$  y, por tanto, mayores  $E_D$ . Sin embargo, la función  $\varepsilon_{w_0}/K$  va a reducir la sensibilidad de la eficiencia ante cambios en  $\varepsilon_{w_0}$ . Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir que moverse a valores mayores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  va a dar lugar a mayores  $\eta_D$  y, como consecuencia, mayores  $E_D$ . Todo esto queda patente en la Figura 4.22.

Por otro lado, cuando el filtro se ubica en configuración pre-turbo, los menores valores de  $Pe_{w_0}$  desembocan en mayores eficiencias debidas a este mecanismo ( $E_D$ ) respecto a la ubicación post-turbo tradicional, de acuerdo a la Figura 4.22.

En lo que respecta a la reducción de la longitud, si esta se consigue manteniendo  $SFA$  constante,  $E_D$  se reducirá fruto de los mayores números de Peclet. En contraposición, si esta reducción se consigue manteniendo  $A_f$  constante,  $E_D$  permanecerá prácticamente intacto debido a que  $Pe_{w_0}$  también lo hace. Esta conclusión queda facilitada con la comparación de las Figuras 4.22 y 4.23.



**Figura 4.22:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_D$  [-] en condiciones limpias.



**Figura 4.23:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_D$  [-] en condiciones limpias con longitud reducida.

### Eficiencia de filtrado por intercepción

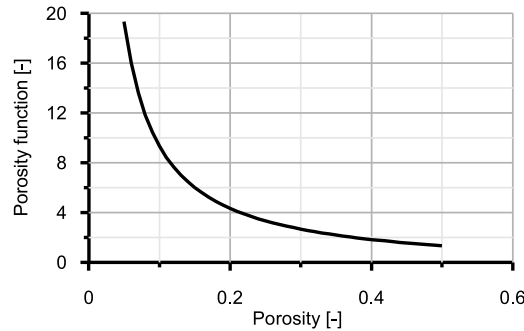
La eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida al mecanismo de deposición por intercepción ( $\eta_R$ ) está relacionada con la microestructura de la pared porosa por medio de la ecuación 4.25. Esta eficiencia de filtrado, al igual que la debida a la difusión Browniana, se extrapola al DPF completo ( $E_R$ ) haciendo uso de una ecuación de la misma índole (ecuación 4.26).

$$\eta_R = 1.5 \frac{N_R^2 \frac{\varepsilon_{w_0}}{K}}{1 + N_R \frac{\varepsilon_{w_0}}{K}} \quad (4.25)$$

$$E_R = 1 - e^{-\frac{\eta_R w_w f_w S_c}{d_{p,w_0}}} \quad (4.26)$$

En base a la ecuación 4.25, la eficiencia  $\eta_R$  no depende de las condiciones termo-fluidodinámicas y, por ello, no es necesario analizar las modificaciones referentes a estas condiciones. Sus dependencias se resumen en el parámetro de intercepción ( $N_R$ ), definido por la ecuación 4.27, y las funciones de la porosidad  $\varepsilon_{w_0}/K$  y  $(3 - 2\varepsilon_{w_0})/3\varepsilon_{w_0}$ , las cuales disminuyen con la porosidad (Figuras 4.21 y 4.24).

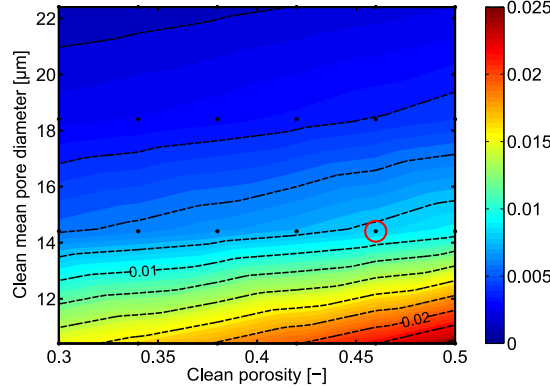
$$N_R = \frac{d_{part}}{d_{c,w_0}} \quad (4.27)$$



**Figura 4.24:** Efecto de la variación de  $\varepsilon$  en la función  $(3 - 2\varepsilon)/3\varepsilon$ .

Teniendo en cuenta lo anterior y basándose en la ecuación 4.27, un incremento en  $\varepsilon_{w_0}$  va a producir un aumento de  $N_R$ , ya que  $d_{c,w_0}$  decrece con  $\varepsilon_{w_0}$ . Los mayores  $N_R$ , junto con el hecho de que la función  $(3 - 2\varepsilon_{w_0})/3\varepsilon_{w_0}$  decrece con  $\varepsilon_{w_0}$ , van a dar lugar a valores de  $\eta_R$  y de  $E_R$  más elevados. Sin embargo, esta dependencia va a verse suavizada por la presencia de la función  $\varepsilon_{w_0}/K$  (ecuación 4.25), la cual decrece también con  $\varepsilon_{w_0}$  (Figura 4.21). Por otro lado, mayores  $d_{p,w_0}$  van a dar lugar a  $d_{c,w_0}$  mayores y, por tanto, valores del parámetro  $N_R$  menores. Estos menores valores del parámetro  $N_R$  desembocan en  $\eta_R$  más reducidos y, por consiguiente,  $E_R$  menores. De acuerdo a todo esto, moverse a valores

mayores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  va a dar lugar a mayores  $E_R$  (Figura 4.25).



**Figura 4.25:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_R$  [-] en condiciones limpias.

### Eficiencia de filtrado inercial

La eficiencia de filtrado de una unidad colectora debida al mecanismo de deposición inercial ( $\eta_I$ ) está ligada al número de Stokes ( $St$ ) por medio de la ecuación 4.29. Esta también se extrapola al DPF entero ( $E_I$ ) haciendo uso de una ecuación del tipo 4.30.

$$St = \frac{\rho S C F_{w_0} \rho_{s,w} u_w d_{part}^2}{9\mu \varepsilon_{w_0} d_{c,w_0}} = \frac{2\rho S C F_{w_0} \rho_{s,w} u_w d_{part}^2}{27\mu(1 - \varepsilon_{w_0})d_{p,w_0}} \quad (4.28)$$

$$\eta_I = \frac{St^2}{(St + 0.25)^2} \quad (4.29)$$

$$E_I = 1 - e^{-\frac{\eta_I w_w f_w S_c}{d_{p,w_0}}} \quad (4.30)$$

De acuerdo a las ecuaciones anteriores, un incremento en  $\varepsilon_{w_0}$  va a desembocar en  $St$  mayores. Teniendo en cuenta que  $\eta_I$  es creciente con  $St$ , lo anterior daría lugar a valores de  $\eta_I$  mayores y, por tanto, a  $E_I$  más elevados. Por otro lado, si  $d_{p,w_0}$  se incrementa, se tendrían  $St$  menores y, por consiguiente,  $\eta_I$  y  $E_I$  menores. De manera resumida, moverse a valores mayores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  va a dar lugar a mayores  $E_I$  (Figura 4.26).

Por otro lado y a diferencia de la eficiencia anterior, la debida al mecanismo inercial sí que depende de las condiciones termo-fluidodinámicas y se ve afectada con el cambio de ubicación del filtro. A pesar de los menores valores de  $u_w$  y de  $SCF_{w_0}$ , y de los valores ligeramente mayores de la viscosidad  $\mu$  en configuración pre-turbo, las mayores densidades del flujo en esta configuración dan lugar a incrementos en  $St$  (ecuación 4.28), a  $\eta_I$  más elevados y, finalmente, a  $E_I$  mayores (Figuras 4.26 y 4.27).

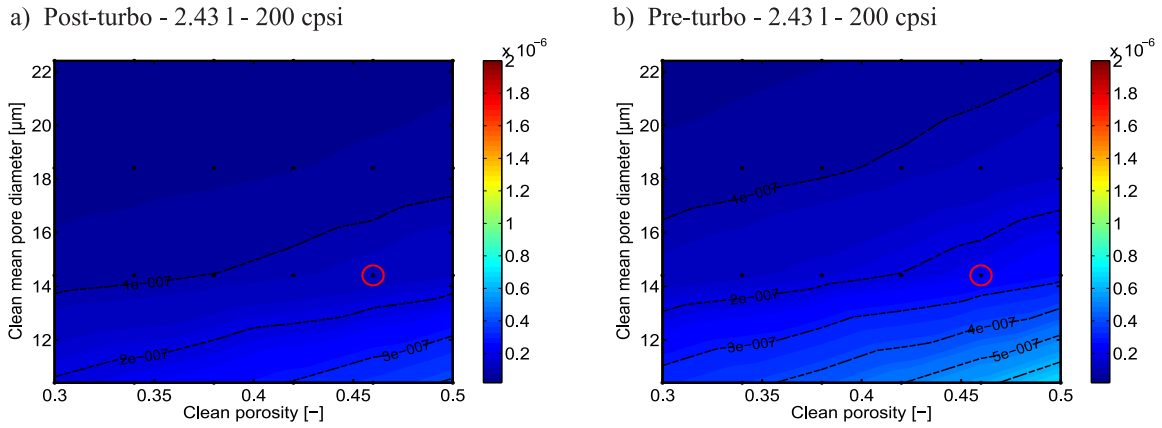


Figura 4.26: Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_I$  [-] en condiciones limpias.

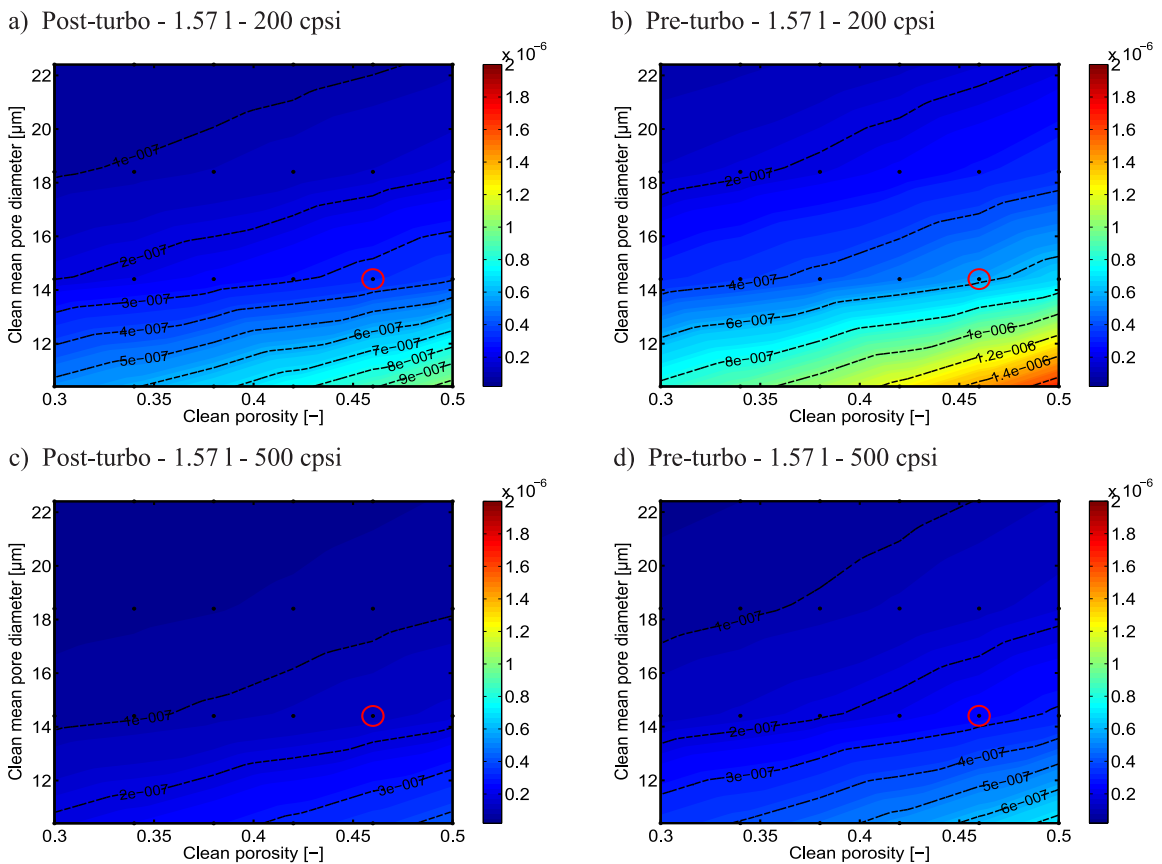


Figura 4.27: Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_I$  [-] en condiciones limpias con longitud reducida.

En cuanto a la reducción de la longitud se refiere, si esta se consigue manteniendo  $SFA$  constante, los mayores valores de  $u_w$  van a constituir el factor controlante que desemboca

en  $E_I$  más elevados. Por contra, si la reducción de la longitud se consigue manteniendo  $A_f$ ,  $u_w$  se mantendrá a niveles similares y el factor controlante que da lugar a  $E_I$  ligeramente mayores lo constituirá el mayor valor de  $SCF_{w_0}$  (Figuras 4.26 y 4.27).

### Eficiencia de filtrado de la pared porosa

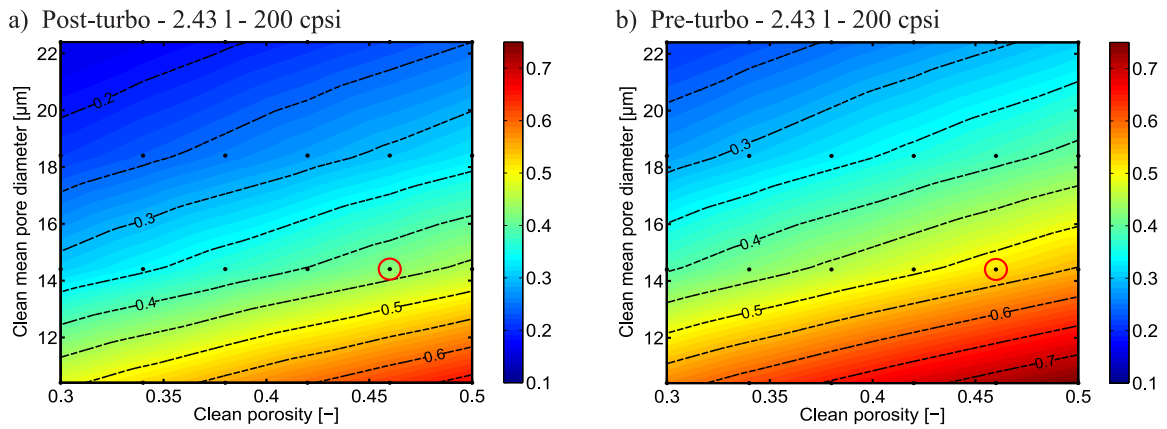
En último lugar, la eficiencia de filtrado de una unidad colectora de la pared porosa ( $\eta_{DRI}$ ) tiene en cuenta los tres mecanismos de deposición por medio de la ley de independencia estadística (ecuación 4.31) y también se extrapola al DPF entero ( $E_{f,w_0}$ ), haciendo uso de la ecuación 4.32.

$$\eta_{DRI} = (\eta_D + \eta_R + \eta_I) - (\eta_D\eta_R + \eta_R\eta_I + \eta_D\eta_I) + \eta_D\eta_R\eta_I \quad (4.31)$$

$$E_{f,w_0} = 1 - e^{-\frac{\eta_{DRI} w_w f_w S_c}{d_{p,w_0}}} \quad (4.32)$$

En base a la ecuación 4.31, cuanto mayor sea cada una de las eficiencias mayor serán  $\eta_{DRI}$  y  $E_{DRI}$ . Sin embargo, dado el tamaño de partículas fijado del orden del tamaño típico en motores Diésel ( $75 \text{ nm}$ ), la eficiencia debida al mecanismo Browniano es la que adquiere mayor relevancia. Este hecho se puede justificar con la mera observación de los resultados referentes a las eficiencias debidas a cada uno de los mecanismos de deposición (Figuras 4.22, 4.25 y 4.26).

Sabiendo lo anterior, el número de Peclet juega un papel clave en la eficiencia de filtrado, y se puede concluir que mayores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  van a dar lugar a mayores eficiencias  $E_{f,w_0}$ , tal y como se observa en la Figura 4.28.

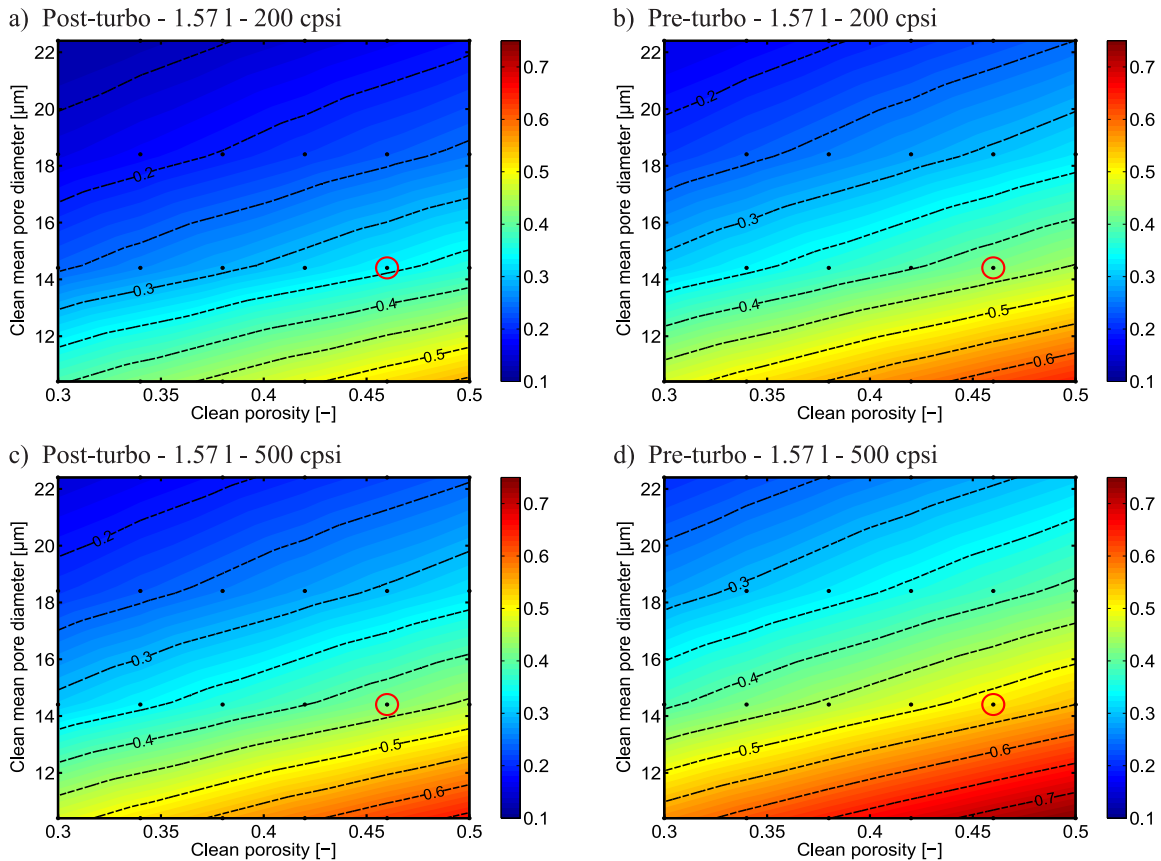


**Figura 4.28:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_{f,w_0}$  [-].

Por otro lado, la configuración pre-turbo presenta mayores eficiencias  $E_{f,w_0}$  en todo el rango microestructural, por motivos relacionados con los menores números de Peclet

(Figura 4.28).

En lo que se refiere a la reducción de la longitud, si esta se consigue manteniendo  $SFA$  constante, se tendrán menores  $E_{f,w_0}$ . Si esta reducción se consigue manteniendo  $A_f$  constante,  $E_{f,w_0}$  permanece a niveles similares (Figuras 4.28 y 4.29).



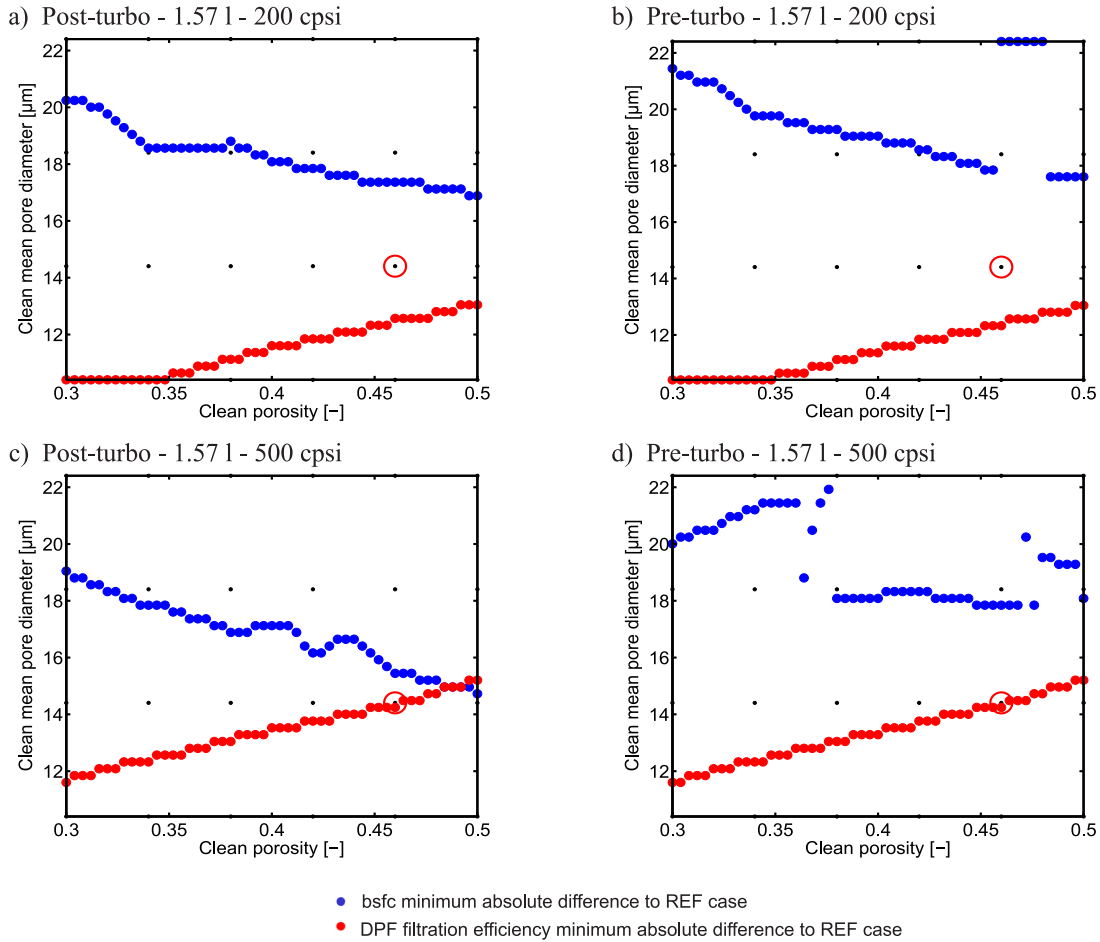
**Figura 4.29:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_{f,w_0}$  [-] con longitud reducida.

#### 4.4.3. Compromiso entre el consumo y la eficiencia de filtrado

La propia reducción del volumen del DPF resulta interesante desde el punto de vista de lograr DPFs más compactos, con menor inercia térmica y ahorrar en costes de fabricación. Como se ha ido comentando a lo largo del presente apartado, estas reducciones en el volumen logradas por medio de la longitud, suponen cambios tanto en la caída de presión y el consumo como en la eficiencia de filtrado. Las características de estos cambios son distintas atendiendo a si la longitud se reduce de manera que la superficie específica de filtrado ( $SFA$ ) se mantenga constante o a si se reduce manteniendo el área de filtrado ( $A_f$ ) constante.

Por un lado, si esta menor longitud se logra manteniendo  $SFA$  y reduciendo  $A_f$ , el consumo ( $bsfc$ ) se ve incrementado y la eficiencia de filtrado ( $E_{f,w_0}$ ) reducida. Bajo es-

tas condiciones, el hecho de lograr una solución de compromiso que implique la menor diferencia absoluta posible en las prestaciones respecto del DPF de referencia requiere de incrementar en gran medida el valor de  $\varepsilon_{w_0}$ , hasta tal punto que se saldría del rango escogido en el estudio (Figura 4.30 a) y b)). Dada la baja sensibilidad de la eficiencia de filtrado ante cambios en  $\varepsilon_{w_0}$ , resultaría más interesante reducir  $d_{p,w_0}$  para tratar de recuperar la eficiencia de filtrado perdida y cumplir la normativa, aunque el consumo quede penalizado.



**Figura 4.30:** Solución de compromiso al reducir la longitud en condiciones limpias.

Desde el punto de vista de las prestaciones del filtro, la reducción de la longitud manteniendo  $A_f$  constante resulta una solución de particular interés. Cuando la menor longitud se consigue de esta manera, el consumo se ve ligeramente reducido, a la vez que la eficiencia de filtrado se mantiene esencialmente constante. Bajo estas condiciones, recuperar las prestaciones del DPF de referencia implica ligeros incrementos de  $\varepsilon_{w_0}$  y de  $d_{p,w_0}$  (Figura 4.30 c) y d)), aunque lograr esto ya no sea tan importante al ser los consumos algo menores.

Tampoco hay que olvidar mencionar la configuración pre-turbo, puesto que esta supone menores consumos y mayores eficiencias de filtrado que la arquitectura tradicional post-



turbo para todo el rango microestructural. En esta arquitectura, lograr una solución de compromiso se torna tarea menos importante que en post-turbo. Teniendo en cuenta esto, se puede sacrificar un poco la mayor eficiencia de filtrado para lograr reducir todavía más el consumo del motor, incrementando  $d_{p,w_0}$  para ello.

## 4.5. Filtro en condiciones cargadas de hollín

A lo largo de esta sección, y al igual que se ha realizado en condiciones limpias, se pretende visualizar el comportamiento de la caída de presión, del consumo y de la eficiencia de filtrado en condiciones de acumulación de hollín frente a los cambios en el número de Peclet descritos en la metodología. Concretamente, se tratará de analizar el comportamiento del filtro una vez ha saturado.

### 4.5.1. Análisis de la caída de presión y el consumo

Esta vez, antes de seguir con el análisis de la caída de presión y del consumo, particular importancia cobra analizar, tanto la penetración en el sustrato poroso como los cambios que la acumulación de hollín ha producido en la microestructura del lecho colector, así como las propiedades implicadas en el estudio de la capa de partículas que surge.

#### Penetración en el sustrato poroso

En primer lugar, la fracción de pared porosa penetrada por el hollín ( $f_w$ ) juega un papel importante en la saturación del filtro, ya que separa la fracción de la pared porosa que acumula hollín de la que no. Esta se calcula en base al modelo 0D planteado en el capítulo 3 (ecuación 4.33).

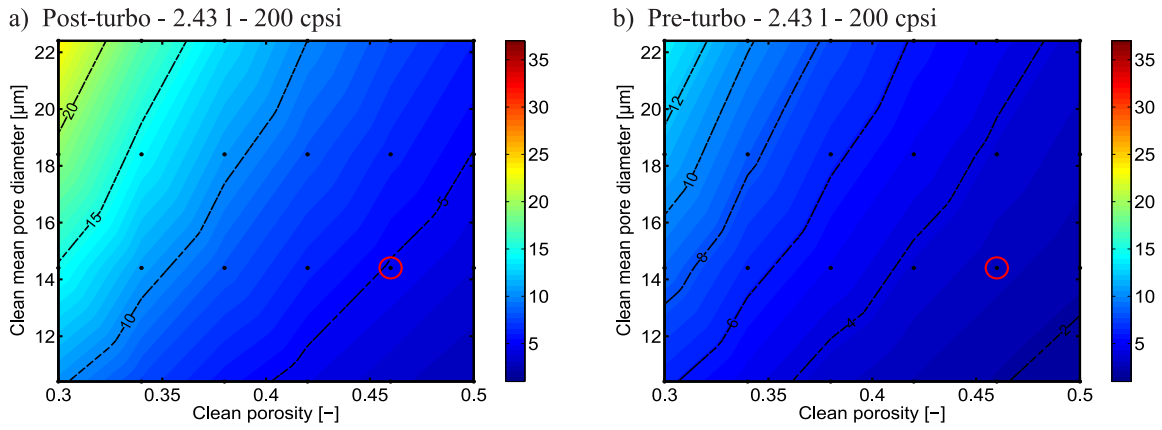
$$f_w = w_{sp}/w_w = 0.0019Pe_{w_0}/w_w \quad (4.33)$$

Atendiendo a lo anterior, el número de Peclet en condiciones limpias ( $Pe_{w_0}$ ) expuesto en las Figuras 4.19 y 4.20 permitiría justificar la evolución de  $f_w$ , a pesar de haber sido ponderado con la longitud de cada región de control.

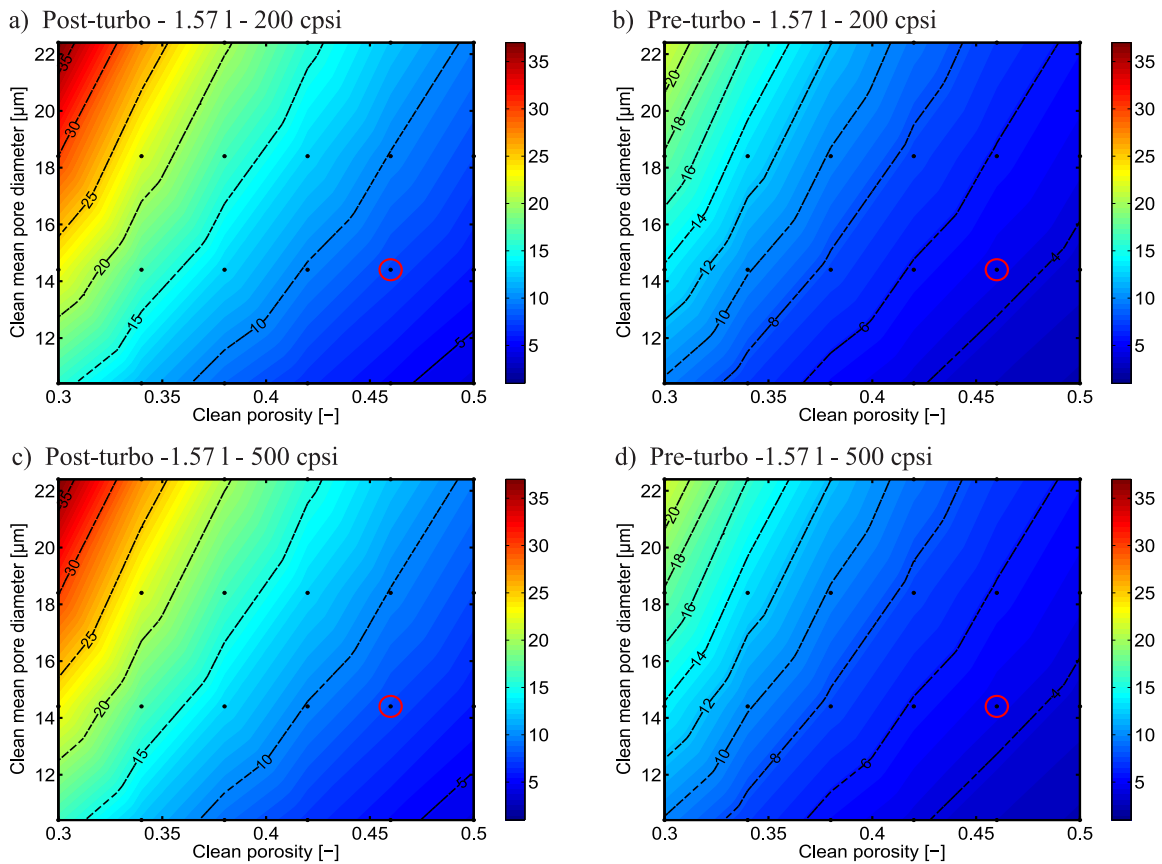
Teniendo en cuenta las tendencias de  $Pe_{w_0}$ , moverse a valores menores de  $\varepsilon_{w_0}$  y mayores de  $d_{p,w_0}$  proporciona mayores penetraciones  $f_w$ , tal y como queda patente en la Figura 4.31.

En lo que se refiere a cambiar la ubicación del filtro, la configuración pre-turbo ofrece menores valores de  $f_w$  (Figuras 4.31 y 4.32), dados los menores  $Pe_{w_0}$ .

Cuando se trata de reducir la longitud, si esta se reduce manteniendo  $SFA$  constante, los mayores  $Pe_{w_0}$  desembocan en  $f_w$  más elevados. Por otro lado, si la reducción de la longitud se consigue manteniendo  $A_f$  constante,  $w_w$  se reduce a la vez que los valores de  $Pe_{w_0}$



**Figura 4.31:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $f_w$  [%].



**Figura 4.32:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $f_w$  [%] con longitud reducida.

se mantienen a niveles similares. Por ello, aunque el espesor penetrado ( $w_{sp}$ ) se mantenga al hacerlo también  $Pe_{w_0}$ , la fracción penetrada  $f_w$  se incrementaría hasta valores similares a los conseguidos al mantener constante  $SFA$  (Figuras 4.31 y 4.32).

### Microestructura de la pared porosa

Para poder seguir con el análisis, se hace necesario visualizar y justificar los cambios que la acumulación de hollín ha producido en la microestructura correspondiente a la fracción de pared porosa penetrada.

En primer lugar, conviene visualizar como evoluciona el diámetro de las unidades celulares que envuelven a las unidades colectoras ( $d_{cell,w}$ ) con el cambio en la microestructura de la pared porosa limpia. Este diámetro viene dado por la ecuación 4.34.

$$d_{cell,w} = \frac{d_{c,w_0}}{(1 - \varepsilon_{w_0})^{\frac{1}{3}}} = \frac{3(1 - \varepsilon_{w_0})^{\frac{2}{3}}}{2\varepsilon_{w_0}} d_{p,w_0} \quad (4.34)$$

De acuerdo a su definición,  $d_{cell,w}$  crecería al reducirse  $\varepsilon_{w_0}$  o al incrementarse  $d_{p,w_0}$ , tal y como se visualiza en la Figura 4.33 a).

Por otro lado, el diámetro de las esferas colectoras ( $d_{c,w}$ ) se calcula, en condiciones de saturación, a partir de la ecuación 4.35, en la cual se ha sustituido la definición de la masa de saturación de las unidades celulares ( $m_{s,sat_{cell}}$ ).

$$d_{c,w} = 2 \left( \frac{d_{c,w_0}^3}{8} + \frac{3m_{s,sat_{cell}}}{4\pi\chi\rho_{s,w}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{d_{cell,w_0}^3\psi^3 - (1 - \chi)d_{c,w_0}^3}{\chi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.35)$$

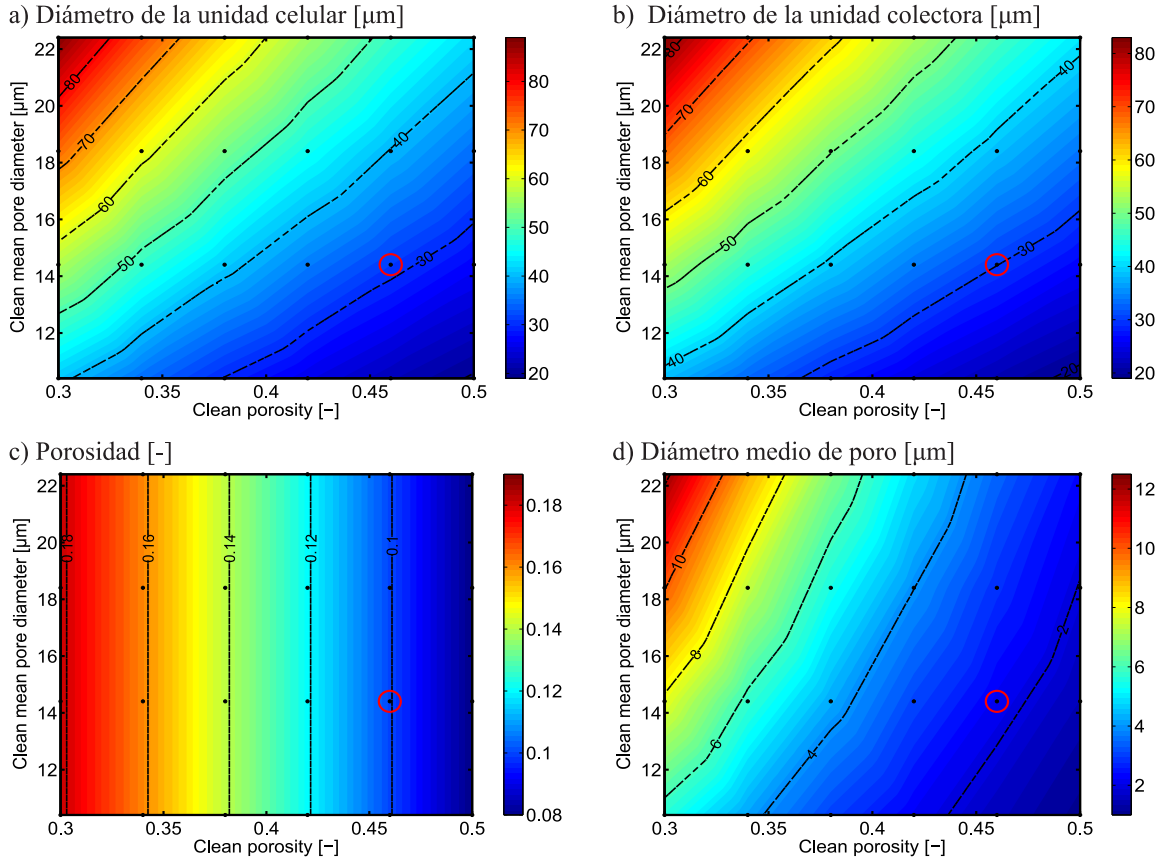
$$m_{s,sat_{cell}} = \frac{4}{3}\pi\rho_{s,w} \left( \left( \frac{\psi d_{cell,w}}{2} \right)^3 - \left( \frac{d_{c,w_0}}{2} \right)^3 \right) \quad (4.36)$$

Teniendo en cuenta esta ecuación y sabiendo que tanto el factor de forma ( $\chi$ ) como el factor de percolación ( $\psi$ ) han sido fijados,  $d_{c,w}$  depende de las tendencias en  $d_{c,w_0}$  y de  $d_{cell,w}$ , las cuales son esencialmente iguales (Figuras 4.3 y 4.33 a)). De este modo, se puede concluir que menores  $\varepsilon_{w_0}$  y mayores  $d_{p,w_0}$  producen incrementos en  $d_{c,w}$  (Figura 4.33 b)), manteniéndose su tendencia respecto a las condiciones limpias, aunque con valores mayores por la deposición de hollín alrededor de las esferas colectoras.

En lo que respecta a la porosidad con acumulación de hollín en condiciones de saturación ( $\varepsilon_w$ ), esta se obtiene a partir de la ecuación 4.37 tras realizar las sustituciones referentes.

$$\varepsilon_w = 1 - \frac{d_{c,w}^3}{d_{cell,w}^3} = \frac{1 - \varepsilon_{w_0}(1 - \chi) - \psi^3}{\chi} \quad (4.37)$$

De acuerdo a la ecuación 4.37,  $\varepsilon_w$  sería independiente de  $d_{p,w_0}$  y se reduciría al incrementar  $\varepsilon_{w_0}$ , sufriendo una especie de inversión (Figura 4.33 c)).



**Figura 4.33:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la microestructura de la pared porosa en condiciones de saturación.

En lo que se refiere al diámetro medio de poro en condiciones de saturación ( $d_{p,w}$ ), este se determinaría a partir de las tendencias en los parámetros microestructurales anteriores, haciendo uso de la ecuación 4.38.

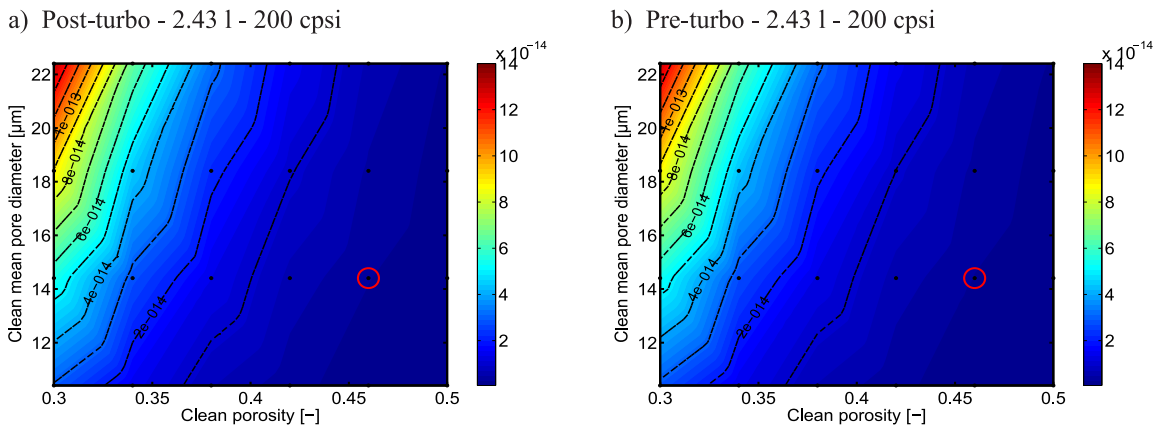
$$d_{p,w} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_w}{1 - \varepsilon_w} d_{c,w} \quad (4.38)$$

Basándose en la ecuación anterior, en la tendencia de  $d_{c,w}$  y en la inversión que sufre la porosidad en condiciones de saturación respecto a las condiciones limpias, incrementos en  $d_{p,w_0}$  y reducciones en  $\varepsilon_{w_0}$  dan lugar a mayores  $d_{p,w}$  (Figura 4.33 d)).

Por otro lado, la permeabilidad de la pared porosa cargada de hollín ( $k_w$ ) se calcula en base a las propiedades microestructurales con acumulación de hollín, tal y como queda mostrado en la ecuación 4.39.

$$k_w = f_K(\varepsilon_w) d_{c,w}^2 SCF_w \quad (4.39)$$

De manera similar a condiciones limpias, la tendencia de  $k_w$  con  $d_{p,w_0}$  viene fundamentalmente controlada por el cambio en  $d_{c,w}$ . Sin embargo, la tendencia con  $\varepsilon_{w_0}$  va a verse invertida respecto a las condiciones limpias, del mismo modo que le sucede a  $\varepsilon_w$ . En esta ocasión, la tendencia decreciente de  $d_{c,w}$  con  $\varepsilon_{w_0}$  incrementa la sensibilidad con la que  $k_w$  se ve afectada por la función  $f_K(\varepsilon_w)$ , creciente con  $\varepsilon_w$  (Figura 4.4) y, por consiguiente, decreciente con  $\varepsilon_{w_0}$ . Teniendo en cuenta lo mencionado, moverse a valores de  $\varepsilon_{w_0}$  menores y de  $d_{p,w_0}$  mayores va a proporcionar  $k_w$  mayores (Figura 4.34).



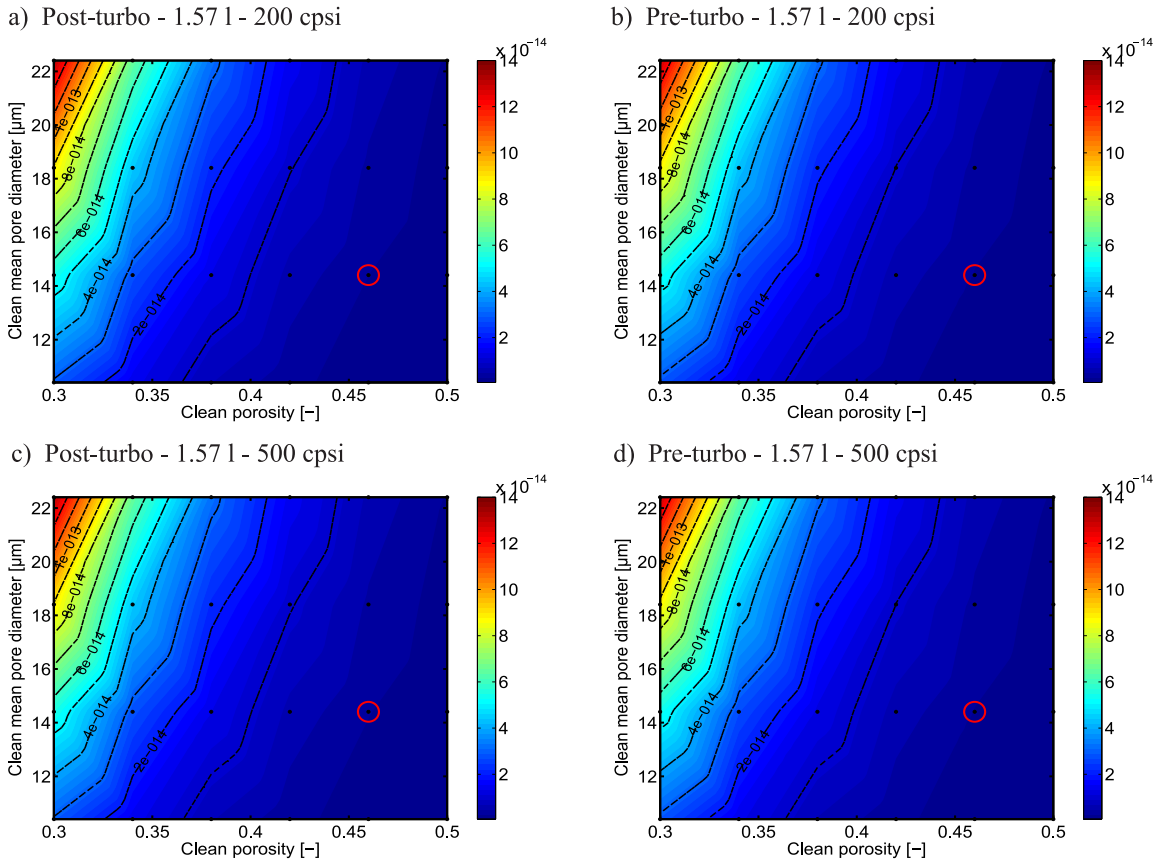
**Figura 4.34:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $k_w$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  (5 g de hollín).

Al igual que en condiciones limpias, las condiciones termo-fluidodinámicas a las que se enfrenta el filtro, cuantificadas a través del factor corrector  $SCF_w$  en la ecuación 4.39, tampoco toman especial importancia en condiciones cargadas cuando se habla de  $k_w$ . De este modo, cambiar la ubicación del filtro de post-turbo a pre-turbo no va a suponer diferencias notables sobre el parámetro  $k_w$  (Figura 4.34).

Tampoco los cambios termo-fluidodinámicos producidos al reducir la longitud van a dar lugar a diferencias notables en  $k_w$ , conclusión que se extrae de la comparación de las Figuras 4.34 y 4.35.

No obstante, esta permeabilidad  $k_w$  se correspondería con la fracción de pared porosa cargada, obviando la fracción limpia. La permeabilidad efectiva ( $k_{w,e}$ ) es la que se tiene en cuenta a efectos de la ley de Darcy, la cual depende de las permeabilidades de cada fracción de la pared porosa y está fuertemente condicionada por la penetración  $f_w$  (ecuación 4.40).

$$k_{w,e} = \frac{k_w k_{w_0}}{f_w k_{w_0} + (1 - f_w) k_w} \quad (4.40)$$

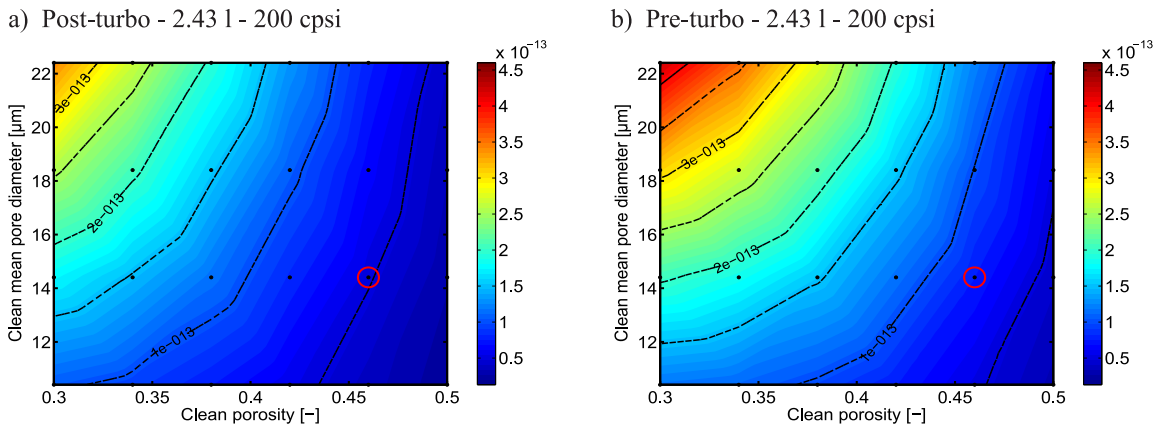


**Figura 4.35:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $k_w$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  con longitud reducida (5 g de hollín).

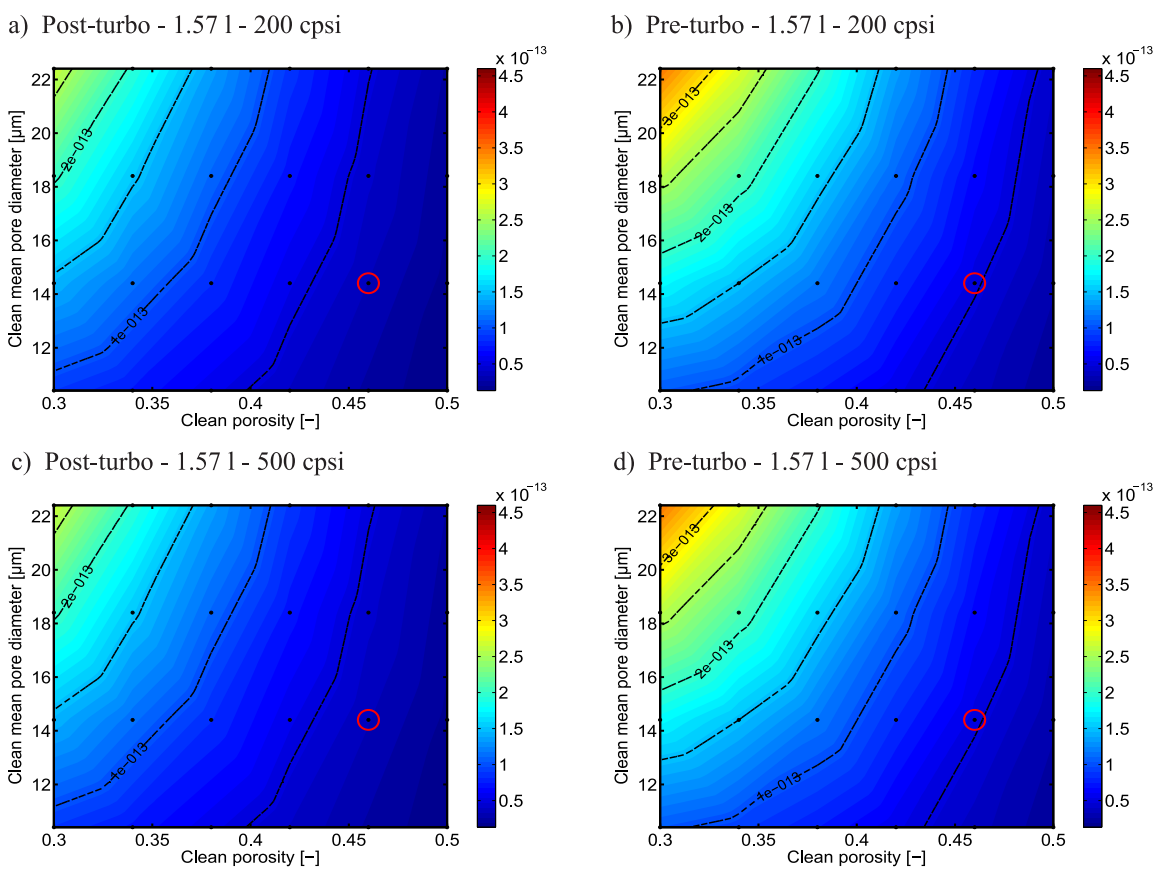
Teniendo en cuenta la ecuación 4.40, el valor de  $k_{w,e}$  se aproximará al de  $k_w$  a medida que  $f_w$  sea mayor. De esta manera, la tendencia en  $k_{w,e}$  va a ser un compendio entre los valores de  $k_{w_0}$  (Figuras 4.5 y 4.6), de  $k_w$  (Figuras 4.34 y 4.35) y de  $f_w$  (Figuras 4.31 y 4.32). Como resultado final y en lo que respecta a la variación de la microestructura de la pared porosa limpia, menores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y mayores de  $d_{p,w_0}$  van a dar lugar a  $k_{w,e}$  más elevados, tal y como se concluye tanto en la Figura 4.36 como en la 4.37.

Por otro lado, las menores penetraciones  $f_w$  en pre-turbo van a dar más peso a la permeabilidad de la fracción limpia de pared porosa  $k_{w_0}$ , cuyos valores son notablemente más elevados que los de la fracción cargada  $k_w$  (Figuras 4.5 y 4.36). Lo anterior concluye en mayores valores de  $k_{w,e}$  para esta configuración frente a la post-turbo tradicional (Figuras 4.36 y 4.37).

Por último, en lo que a la reducción de la longitud se refiere, los mayores valores de  $f_w$  conseguidos en ambas reducciones desembocan en menores  $k_{w,e}$  respecto de la longitud de referencia, conclusión que se confirma al comparar las Figuras 4.36 y 4.37.



**Figura 4.36:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $k_{w,e}$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  (5 g de hollín).

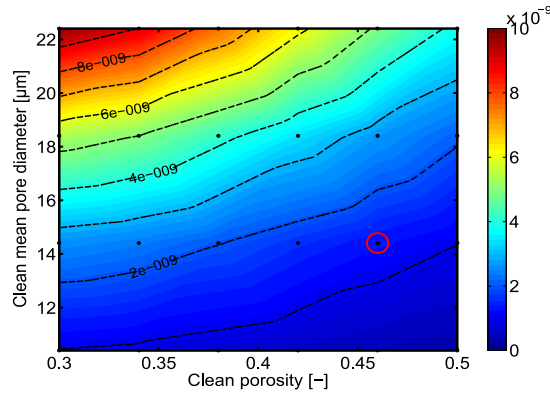


**Figura 4.37:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $k_{w,e}$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  con longitud reducida (5 g de hollín).

### Saturación de la pared porosa

Antes de analizar la saturación del filtro completo, se hace necesario comprender las características de saturación de cada una de las unidades celulares que lo componen, recurriendo a la masa de saturación de las mismas ( $m_{s,sat_{cell}}$ ).

Teniendo en cuenta la ecuación que define esta masa de saturación (ecuación 4.36), su tendencia será similar a la mostrada por los diámetros  $d_{cell,w}$  y  $d_{c,w_0}$ . De esta manera, menores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y mayores de  $d_{p,w_0}$  resultaran en mayores  $m_{s,sat_{cell}}$  (Figura 4.38), o dicho de otro modo, las unidades celulares necesitarán acumular más masa para saturar. También cabe remarcar la menor sensibilidad que  $m_{s,sat_{cell}}$  presenta ante cambios en  $\varepsilon_{w_0}$  respecto a cambios en  $d_{p,w_0}$ .



**Figura 4.38:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $m_{s,sat_{cell}}$  [g].

La penetración va a definir el número de unidades celulares de la pared porosa que saturan ( $n_{cell}$ ). Este número queda representado por la ecuación 4.43, tras aplicar las definiciones correspondientes y tras eliminar dependencias con parámetros que no se ven modificados en el presente estudio.

$$V_{sp} = 4\alpha w_w L_e N_{ic} f_w = 2A_{fr} L_e f_w \frac{\alpha w_w}{(\alpha + w_w)^2} = 2A_{fr} L_e f_w \frac{TIF - 1}{TIF^2} \quad (4.41)$$

$$V_{cell,w} = \pi \frac{d_{cell,w}^3}{6} = \frac{9\pi}{16} \frac{(1 - \varepsilon_{w_0})^2}{\varepsilon_{w_0}^3} d_{p,w_0}^3 \quad (4.42)$$

$$n_{cell} = \frac{V_{sp}}{V_{cell}} = \frac{32A_{fr} L_e f_w}{9\pi} \frac{\varepsilon_{w_0}^3}{(1 - \varepsilon_{w_0})^2 d_{p,w_0}^3} \frac{TIF - 1}{TIF^2} \propto L_e f_w \frac{\varepsilon_{w_0}^3}{(1 - \varepsilon_{w_0})^2 d_{p,w_0}^3} \quad (4.43)$$

En la relación de dependencias mostrada en la ecuación 4.43, la penetración  $f_w$  toma menor peso en cuanto a variación de los parámetros  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  se refiere. De este modo, mayores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  consiguen incrementar  $n_{cell}$  con menor sensibilidad por parte  $\varepsilon_{w_0}$ , tal y como queda representado en las Figuras 4.39 y 4.40. Desde este



punto de vista, el cambio en el tamaño de las unidades celulares tiene mayor repercusión sobre  $n_{cell}$  que el cambio en el volumen de penetración ( $V_{sp}$ ).

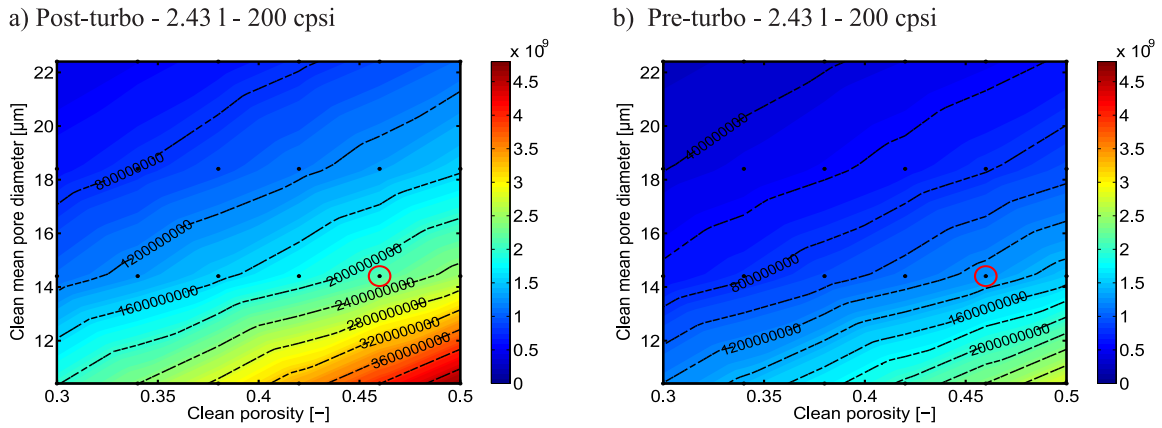


Figura 4.39: Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $n_{cell}$  [#].

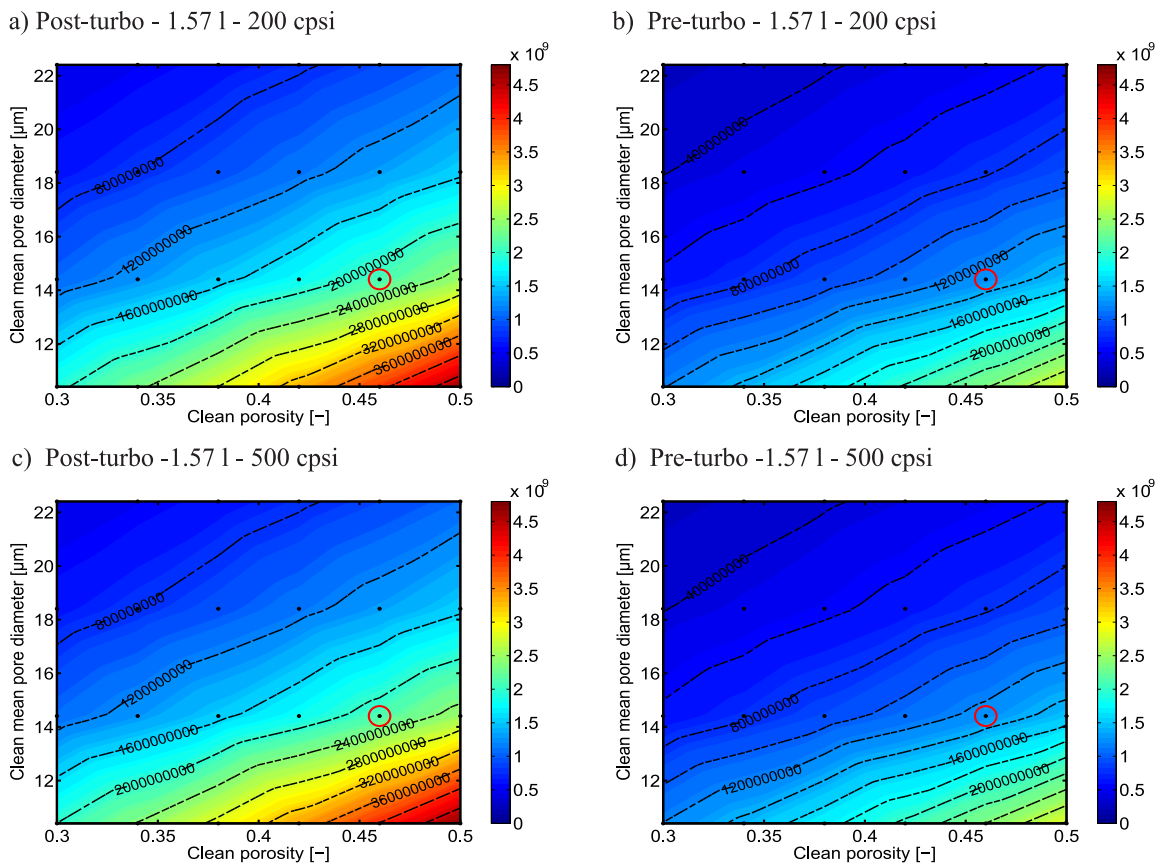


Figura 4.40: Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $n_{cell}$  [#] con longitud reducida.

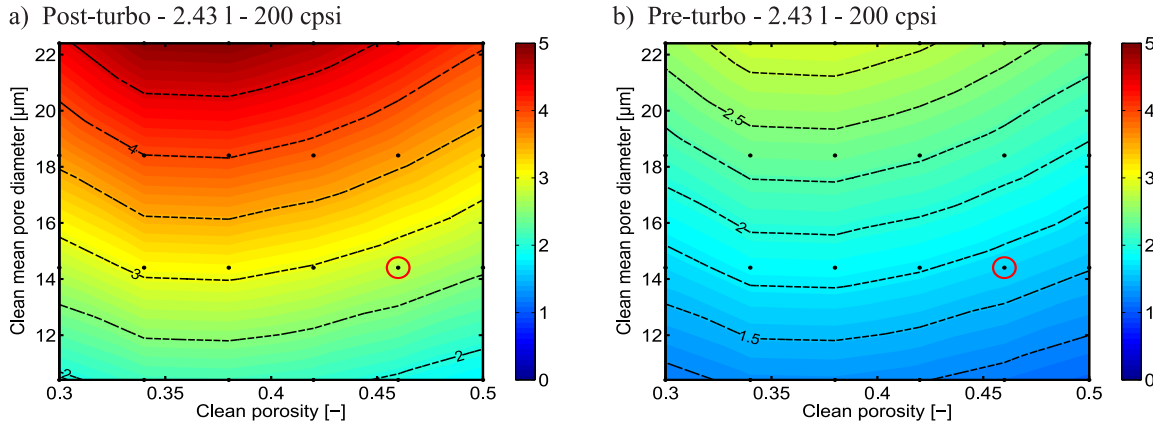
Por otro lado, los menores  $f_w$  presentes en configuración pre-turbo desembocarían en un menor  $V_{sp}$  a igualdad de geometría y, por consiguiente, valores de  $n_{cell}$  más reducidos (Figuras 4.39 y 4.40).

En cuanto a la reducción de la longitud, tanto las reducciones de la misma manteniendo la  $SFA$  constante como manteniendo  $A_f$  van a ser compensadas por los mayores valores de  $f_w$ , de acuerdo a la relación 4.43. De este modo, no se va a tener ninguna diferencia remarcada en  $n_{cell}$  respecto a la longitud de referencia, tal y como queda patente al comparar las Figuras 4.39 y 4.40. A pesar la ínfima diferencia, sí que se producen reducciones poco apreciables en  $n_{cell}$  al reducir la longitud.

Las tendencias en la masa de hollín de saturación del filtro completo ( $m_{sp,sat}$ ) serán un compromiso entre las tendencias de  $n_{cell}$  y de  $m_{s,sat_{cell}}$ , tal y como muestra la ecuación 4.44.

$$m_{sp,sat} = n_{cell}m_{s,sat_{cell}} \quad (4.44)$$

De acuerdo a esta ecuación y en lo que respecta a la variación de  $d_{p,w_0}$ , incrementos en este parámetro producen aumentos en  $n_{cell}$  y en  $m_{s,sat_{cell}}$  que desembocan en mayores  $m_{sp,sat}$ . Por otro lado y dado que  $n_{cell}$  es creciente con  $\varepsilon_{w_0}$  y  $m_{s,sat_{cell}}$  decreciente, el parámetro  $m_{sp,sat}$  alcanza un máximo con  $\varepsilon_{w_0}$ . Estas conclusiones quedan facilitadas en la Figura 4.41.

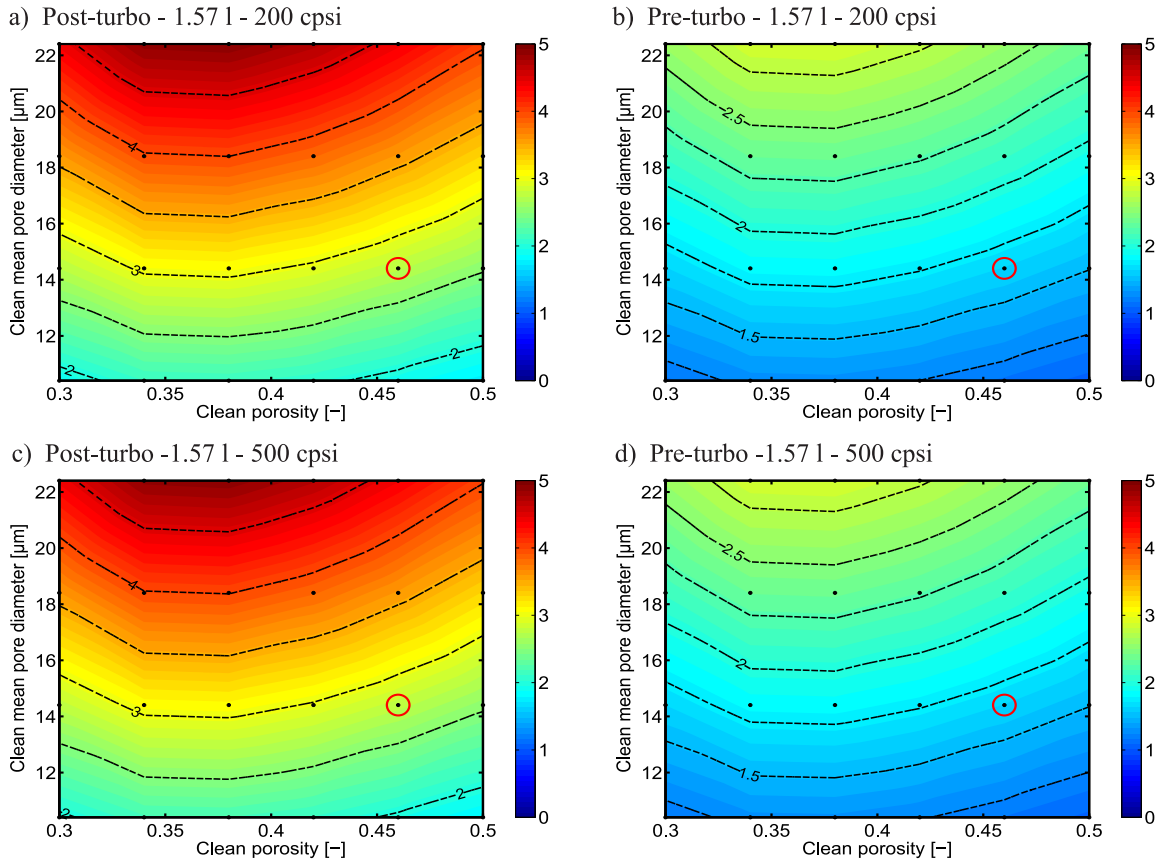


**Figura 4.41:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $m_{sp,sat}$  [g] (5 g de hollín).

En lo que respecta al cambio de ubicación del filtro, los menores valores de  $n_{cell}$  en pre-turbo, debidos a las menores penetraciones, van a desembocar en  $m_{sp,sat}$  menores, tal y como queda mostrado en la Figura 4.41.

Por otro lado, las ligeras reducciones en  $n_{cell}$  desembocan en valores de  $m_{sp,sat}$  ligeramente menores al reducir la longitud, tal y como se deduce de la comparación de las

Figuras 4.41 y 4.42). A pesar de lo anterior, este cambio es despreciable comparado con el producido al modificar la ubicación del filtro relativa a la turbina.

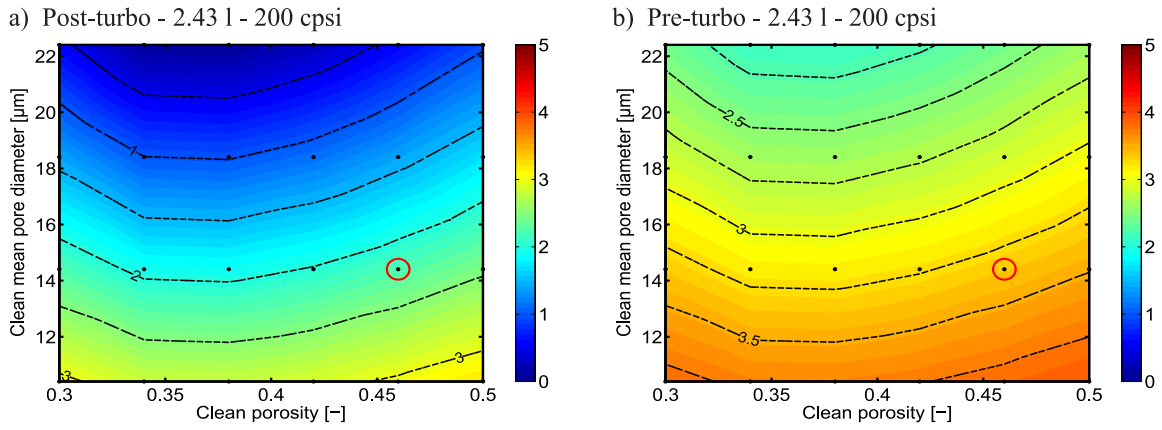


**Figura 4.42:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $m_{sp,sat}$  [g] con longitud reducida (5 g de hollín).

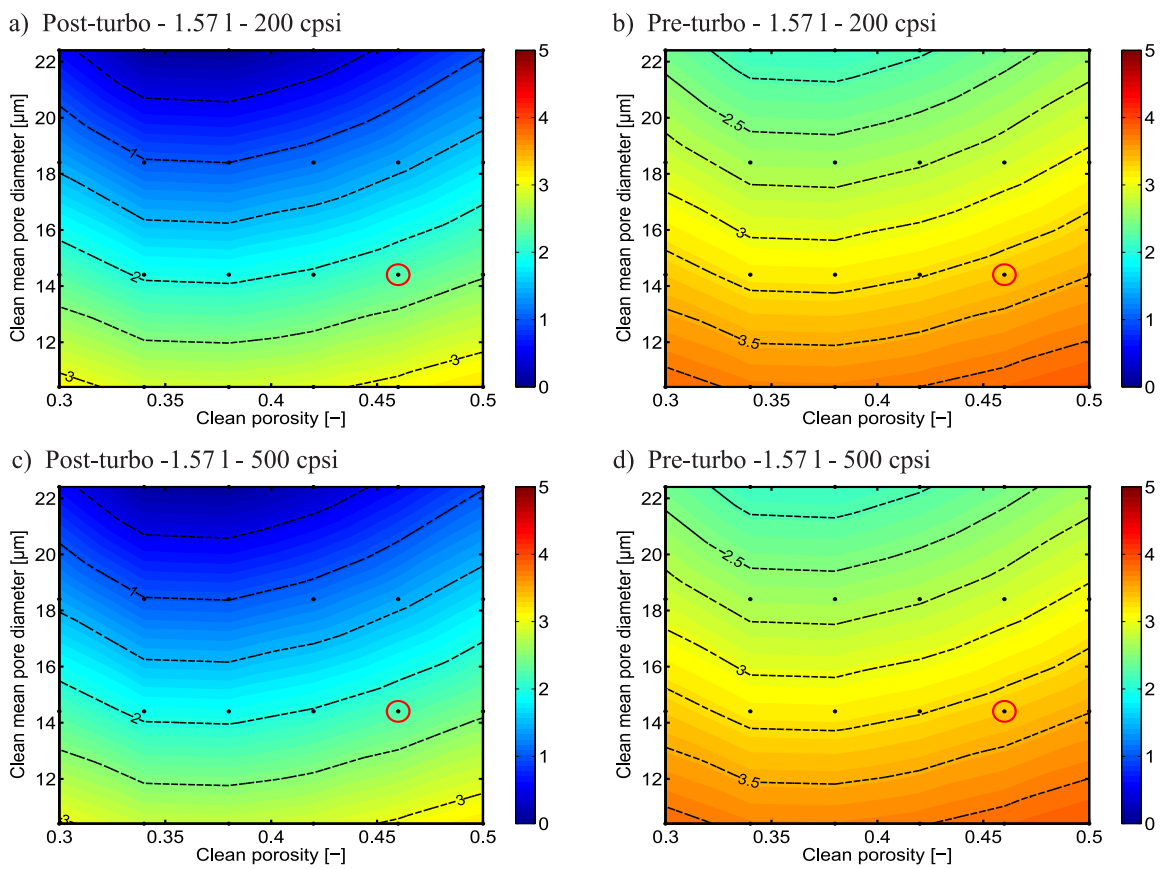
La masa que no se deposite en el interior de la pared porosa queda acumulada en la capa de partículas. Sabiendo lo anterior y recordando que la masa total acumulada por el filtro ha sido fijada, la masa acumulada en la capa de partículas ( $m_{pl}$ ) tiene un perfil complementario al de  $m_{sp,sat}$  en cuanto a microestructura del filtro limpio se refiere. Teniendo en cuenta esto, se concluye que  $m_{pl}$  decrece a medida que el parámetro  $d_{p,w_0}$  se incrementa y, en vez de alcanzar un máximo, alcanza un mínimo con  $\varepsilon_{w_0}$  (Figura 4.43).

En lo que a cambiar la configuración del filtro se refiere, la arquitectura pre-turbo presenta mayores  $m_{pl}$  por las menores penetraciones, las cuales dan lugar a menores valores de  $m_{sp,sat}$  (Figura 4.43).

Por otra parte, las ligeras reducciones en  $m_{sp,sat}$  al reducir la longitud dan lugar a ligeros incrementos de  $m_{pl}$ , aunque estas diferencias son despreciables de nuevo, tal y como se deduce al comparar las Figuras 4.43 y 4.44.



**Figura 4.43:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $m_{pl}$  [g] (5 g de hollín).



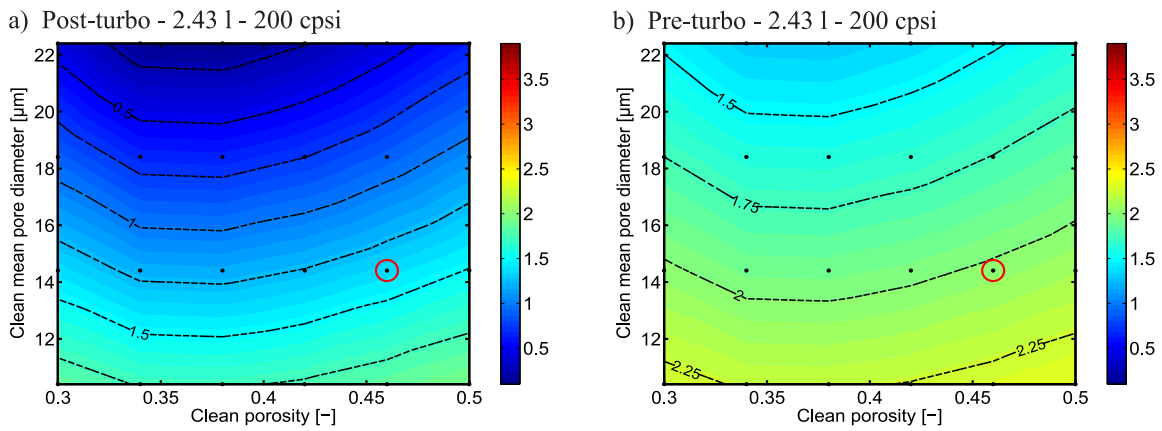
**Figura 4.44:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $m_{pl}$  [g] con longitud reducida (5 g de hollín).

En último lugar, el espesor de la capa de partículas ( $w_{pl}$ ) seguirá la ecuación 4.45, en la

cual las únicas variables son  $m_{pl}$ ,  $\alpha$  y  $L_e$ , atendiendo a las hipótesis del estudio pertinente.

$$w_{pl} = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{m_{pl}}{N_{ic}L_e\rho_{pl}}}}{2} = \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2m_{pl}TIF^2}{A_{fr}(TIF - 1)^2 L_e \rho_{pl}}} \right) \quad (4.45)$$

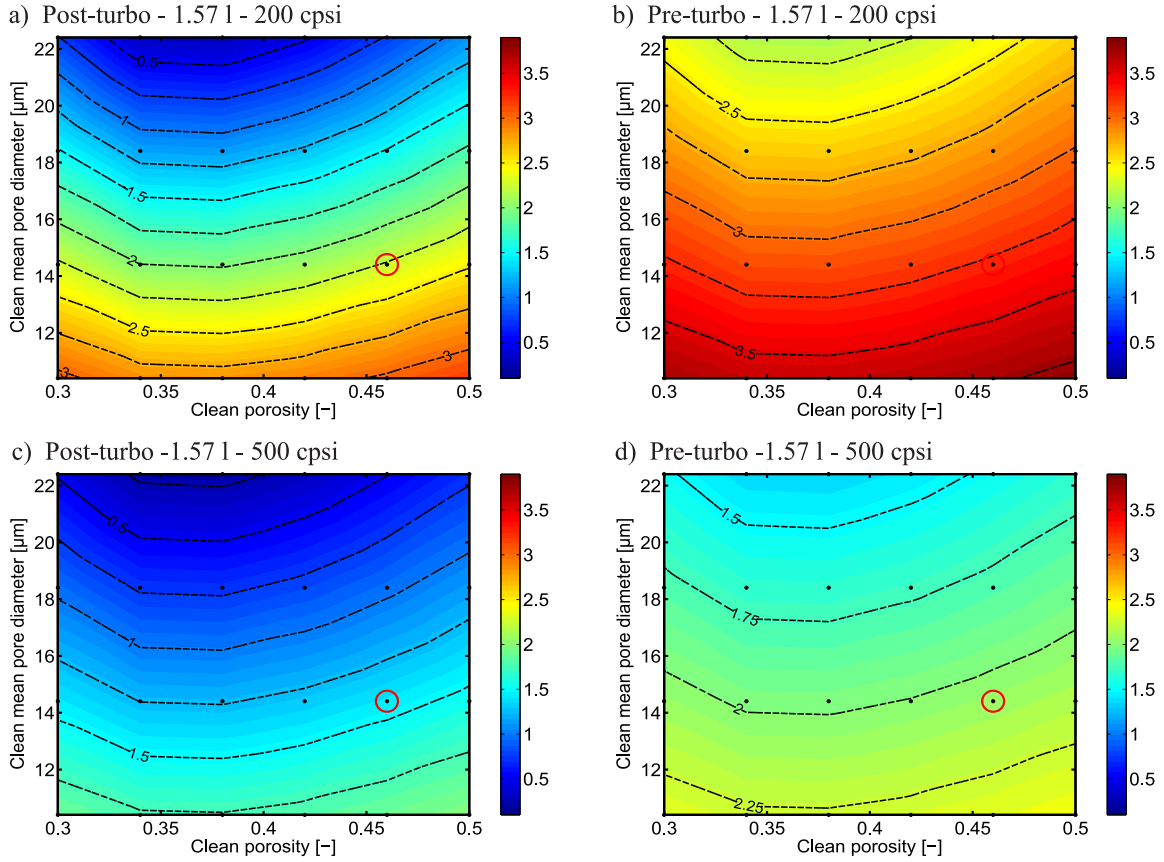
Fundamentándose en la ecuación 4.45, el perfil de  $w_{pl}$  va a ser idéntico al de  $m_{pl}$ . De acuerdo a lo anterior,  $w_{pl}$  decrece con incrementos en  $d_{p,w_0}$  y alcanza un mínimo con  $\varepsilon_{w_0}$  (Figura 4.45).



**Figura 4.45:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $w_{pl}$  [ $\mu m$ ] (5 g de hollín).

Dado que la densidad de la capa de partículas ( $\rho_{pl}$ ) ha sido fijada, cambiar la arquitectura a pre-turbo resulta en mayores valores de  $w_{pl}$  por las menores penetraciones (Figura 4.45), al igual que sucedía con  $m_{pl}$ . Estos mayores valores de  $w_{pl}$  supondrían cierta pérdida de capacidad de almacenamiento de hollín por parte del filtro a igualdad de geometría.

Por último y teniendo en cuenta que la reducción de la longitud no produce cambios notables en  $m_{pl}$ , si esta reducción se consigue manteniendo  $SFA$  constante, la propia disminución de la longitud contribuye a incrementar  $w_{pl}$  respecto al caso de referencia. Mencionado con otras palabras, se pierde algo de capacidad de almacenamiento de hollín ya que la capa se ha distribuido en una menor longitud. Por otro lado, si la reducción de la longitud se logra manteniendo  $A_f$  constante, el incremento en  $w_{pl}$  que produciría la menor longitud queda mitigado por la reducción de  $\alpha$ , resultando tan sólo en  $w_{pl}$  ligeramente mayores (Figuras 4.45 y 4.46). Sin embargo, el menor valor de  $\alpha$  implica que el tamaño máximo que puede alcanzar  $w_{pl}$  antes de que se obstruyan los canales es menor, perdiendo gran parte de la capacidad acumuladora del filtro.



**Figura 4.46:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $w_{pl}$  [μm] con longitud reducida (5 g de hollín).

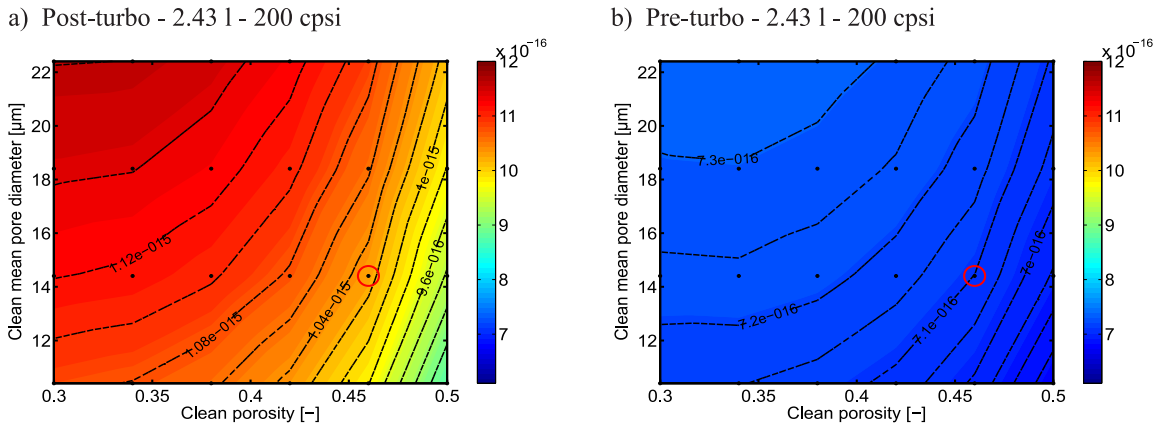
### Microestructura de la capa de partículas

En lo que respecta a la capa de partículas, su permeabilidad ( $k_{pl}$ ) viene dada por la ecuación 4.46.

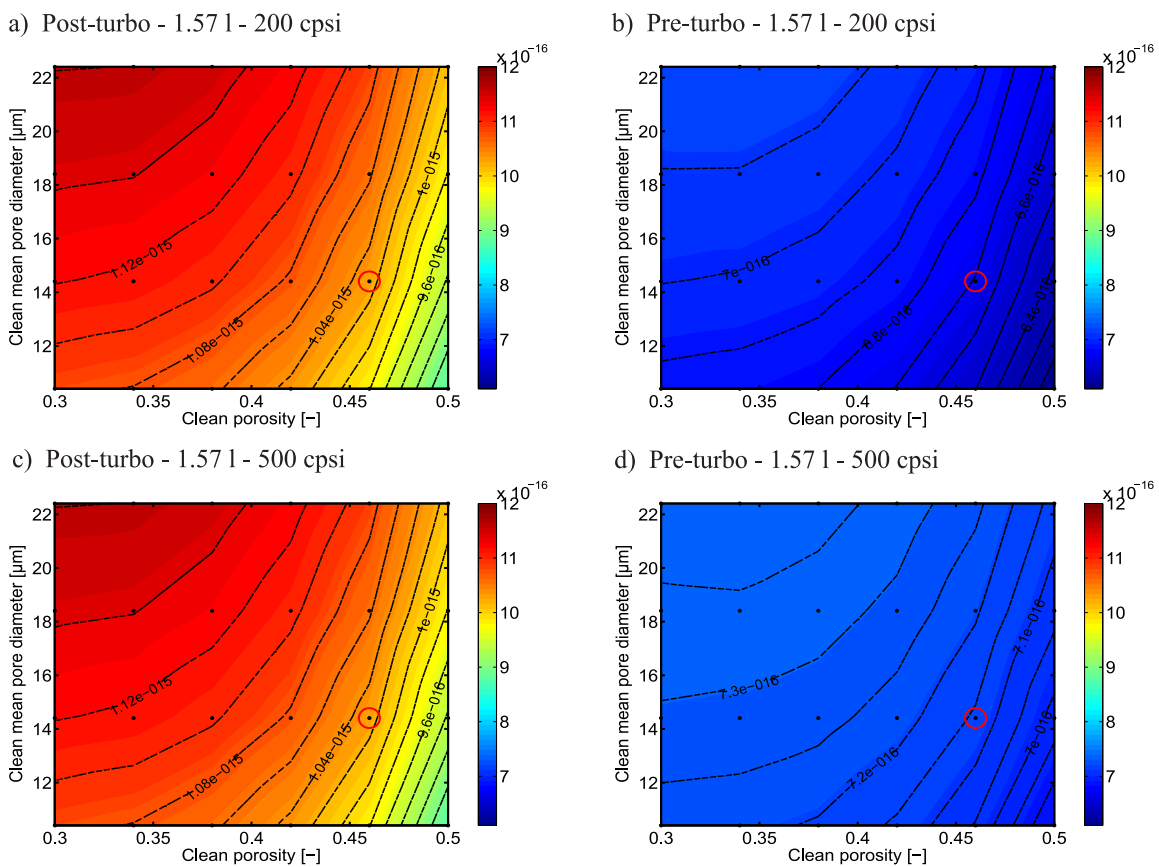
$$k_{pl} = f_K(\varepsilon_{pl})d_{pl}^2 SCF_{pl} \quad (4.46)$$

Dado que la microestructura de la capa de partículas ( $\varepsilon_{pl}$  y  $d_{c,pl}$ ) ha sido fijada al definir las hipótesis del estudio, la dependencia de  $k_{pl}$  va a quedar completamente en manos de las condiciones termo-fluidodinámicas a través del factor corrector  $SCF_{pl}$ . Teniendo en cuenta que las condiciones de presión a la entrada del filtro y, por tanto, el valor de  $SCF_{pl}$  dependen de la caída de presión del filtro y que esta caída de presión depende de  $k_{pl}$ , se tendría como una especie de bucle de interrelaciones. Esta interrelación se definiría de tal manera que las zonas de menor caída de presión van a dar lugar a mayores  $SCF_{pl}$  y, por ende, mayores  $k_{pl}$ .

Siendo consciente de lo anterior y con ayuda de las Figuras 4.47 y 4.48, se concluye que menores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y mayores de  $d_{p,w_0}$  van a dar lugar a mayores  $k_{pl}$ .



**Figura 4.47:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $k_{pl}$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  (5 g de hollín).



**Figura 4.48:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $k_{pl}$  [ $m^2$ ] en  $L_e/2$  con longitud reducida (5 g de hollín).

Por otro lado y a causa de la presencia de la VGT aguas abajo del filtro, las mayores

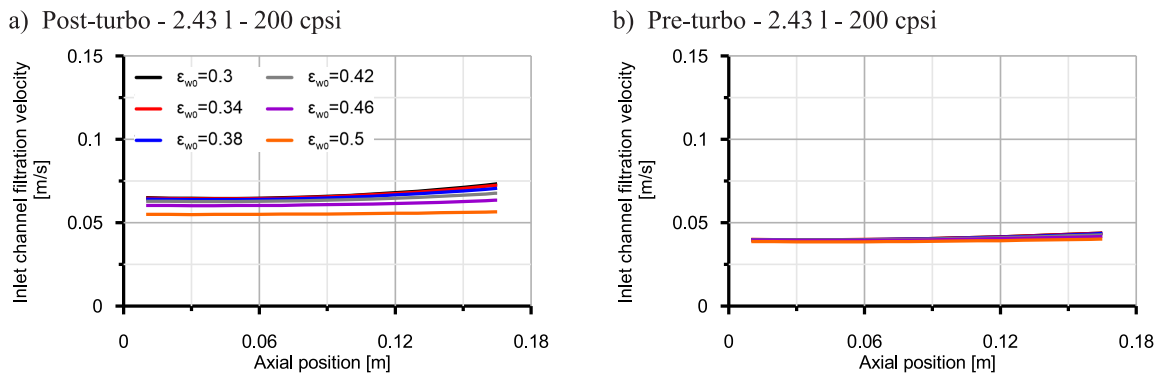
presiones y temperaturas a del flujo en configuración pre-turbo desembocan en menores valores de  $k_{pl}$ , tal y como se visualiza tanto en la Figura 4.47 como en la 4.48.

De nuevo, los cambios en las condiciones termo-fluidodinámicas producidos por las reducciones en la longitud van a ser de ínfima importancia comparados con los producidos con otro motivo, ya que estos no van a ser lo suficientemente marcados como para producir cambios notables en  $k_{pl}$  (Figuras 4.47 y 4.48).

### Velocidad de filtrado

Al igual que sucedía en condiciones limpias, la distribución axial de la velocidad de filtrado en los canales ( $u_w$ ) también resulta alterada con las modificaciones referentes al estudio bajo las condiciones cargadas de hollín descritas.

Esta vez, la distribución de  $u_w$  se torna más plana con la longitud axial, resultado de una deposición de masa de hollín homogénea a lo largo de la capa de partículas. Tal y como se observa en la Figura 4.49, mayores  $\varepsilon_{w_0}$  van a imponer valores de  $u_w$  ligeramente menores. No obstante, la distribución de  $u_w$  se ve afectada por  $\varepsilon_{w_0}$  en mayor medida en configuración post-turbo que en pre-turbo.



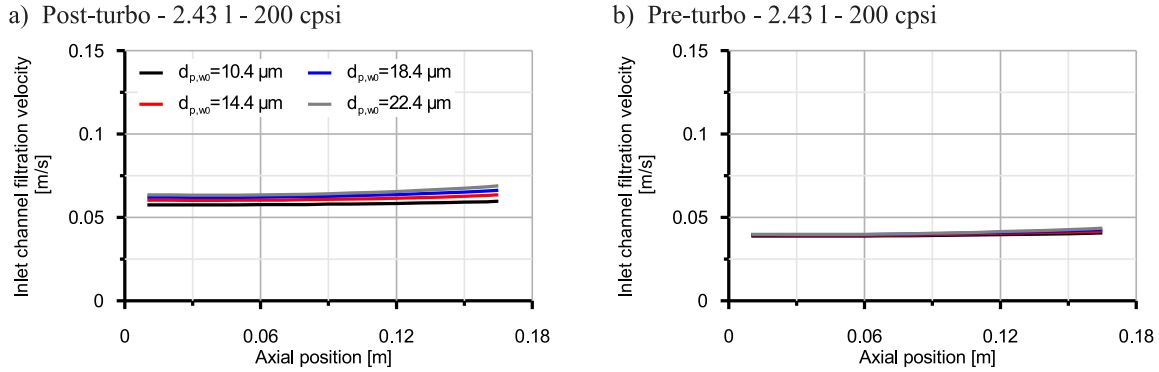
**Figura 4.49:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  en la distribución axial de  $u_w$  en el canal de entrada en condiciones de acumulación de hollín ( $5\text{ g}$ ) con  $d_{p,w_0} = 14.4\ \mu\text{m}$ .

Por otro lado, el efecto de  $d_{p,w_0}$  sobre la distribución de  $u_w$  se vuelve menos remarcado que el efecto de  $\varepsilon_{w_0}$ , tal y como se muestra en la Figura 4.49. En esta ocasión, menores  $d_{p,w_0}$  desembocan en perfiles de  $u_w$  con valores ligeramente menores, siendo también este efecto más apreciable en post-turbo que en pre-turbo.

De igual manera que en condiciones limpias, las mayores densidades aguas arriba del DPF en ubicación pre-turbo dan lugar a menores velocidades de filtrado a igualdad de gasto másico y área de filtrado (Figuras 4.49 y 4.50).

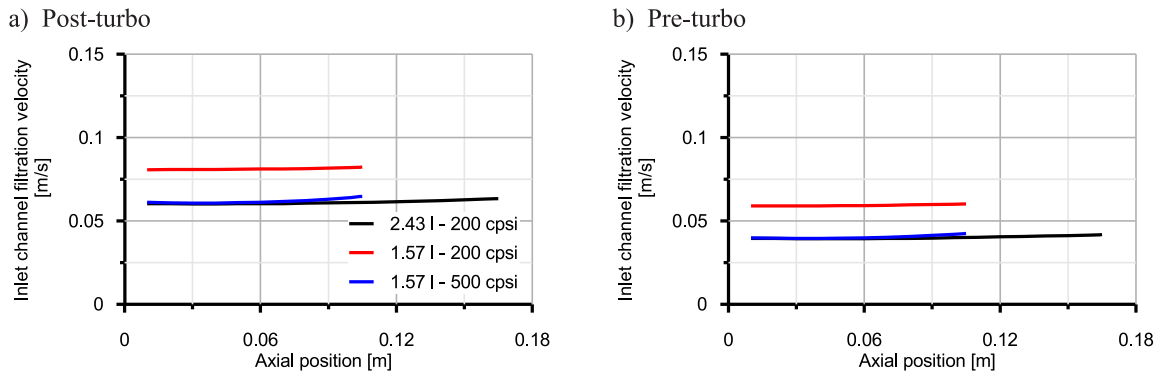
Las consecuencias sobre la distribución de  $u_w$  que tiene reducir la longitud son similares





**Figura 4.50:** Efecto de la variación de  $d_{p,w_0}$  en la distribución axial de  $u_w$  en el canal de entrada en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ .

a las producidas en condiciones limpias, pero teniendo en cuenta que los perfiles en esta velocidad son más planos. La reducción de la longitud manteniendo  $SFA$  constante da lugar a valores mayores de  $u_w$  por la reducción de  $A_f$ , mientras que la reducción de la longitud manteniendo  $A_f$  constante no produce ningún efecto aparente en la distribución de  $u_w$  (Figura 4.51).



**Figura 4.51:** Efecto de la reducción de la longitud en la distribución axial de  $u_w$  en el canal de entrada en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$  y  $d_{p,w_0} = 14.4 \mu\text{m}$ .

### Caída de presión

Del mismo modo que se ha realizado en condiciones limpias, también en condiciones cargadas se puede llegar a expresiones sencillas para cada una de las contribuciones a la caída de presión, tras aplicar simplificaciones de la misma índole a los desarrollos establecidos en [4]. En este caso, surge un parámetro en las expresiones de la caída de presión que, de cierto modo, se interpretaría como el ancho de canal libre de hollín normalizado con el ancho de canal ( $\Upsilon$ ), cuya expresión se obtiene teniendo en cuenta la ecuación 4.47. Así, las dependencias de las contribuciones a la caída de presión en condiciones de acumulación de

hollín quedan resumidas en las ecuaciones 4.48, 4.49 4.50 y 4.51.

$$\Upsilon = 1 - \frac{2w_{pl}}{\alpha} = \sqrt{1 - \frac{2m_{pl}TIF^2}{A_{fr}(TIF - 1)^2 L_e \rho_{pl}}} \quad (4.47)$$

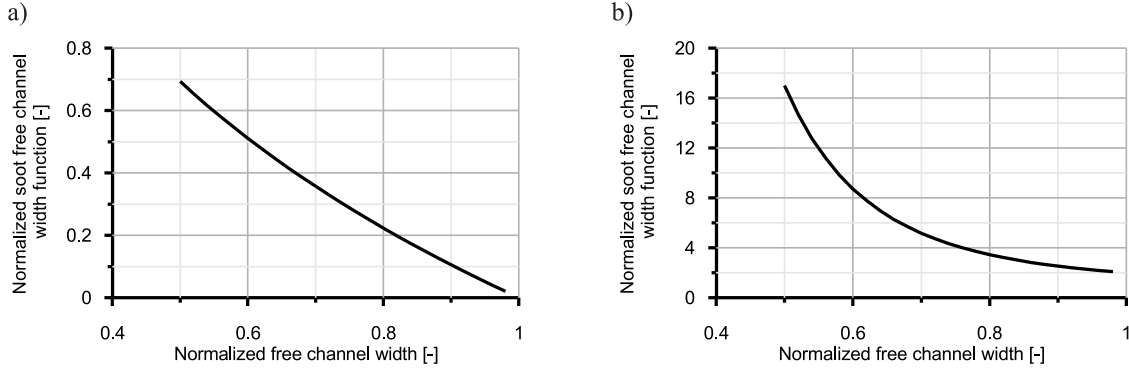
$$\Delta p_{Darcy,w} \propto \frac{\mu Q}{V_e} \frac{TIF^2}{(TIF - 1)^3} \frac{\alpha^2}{k_{w,e}} \propto \frac{\mu u_w \alpha}{k_{w,e}} \quad (4.48)$$

$$\Delta p_{Darcy,pl} \propto \frac{\mu Q}{V_e} \left( \frac{TIF}{TIF - 1} \right)^2 \frac{\alpha^2}{k_{pl}} \ln \left( \frac{1}{\Upsilon} \right) \propto \frac{\mu u_w \alpha}{k_{pl}} \ln \left( \frac{1}{\Upsilon} \right) \quad (4.49)$$

$$\Delta p_{fric} \propto \frac{\mu Q}{V_e} \left( \frac{TIF}{TIF - 1} \right)^2 \left( \frac{L_e}{\alpha} \right)^2 \left( 1 + \frac{1}{\Upsilon^4} \right) \propto \frac{\mu u_w L_e^2}{\alpha^3} \left( 1 + \frac{1}{\Upsilon^4} \right) \quad (4.50)$$

$$\Delta p_{mon/ie/oc} \propto \rho Q^2 \left( \frac{TIF}{TIF - 1} \right)^4 \frac{L_e^2}{V_e^2} \propto Q \propto u_w A_f \quad (4.51)$$

Al existir capa de partículas, conviene analizar como evolucionan las funciones  $\ln(1/\Upsilon)$  y  $(1 + 1/\Upsilon^4)$  con el parámetro  $\Upsilon$  para proceder con el análisis correspondiente. En base a la Figura 4.52, ambas funciones disminuyen con  $\Upsilon$ . Dado que mayores valores de  $\Upsilon$  implican menores  $w_{pl}$  relativos a  $\alpha$ , si el ratio  $w_{pl}/\alpha$  se incrementa, ambas funciones de  $\Upsilon$  tomarían mayores valores e incrementarían las pérdidas de presión correspondientes.

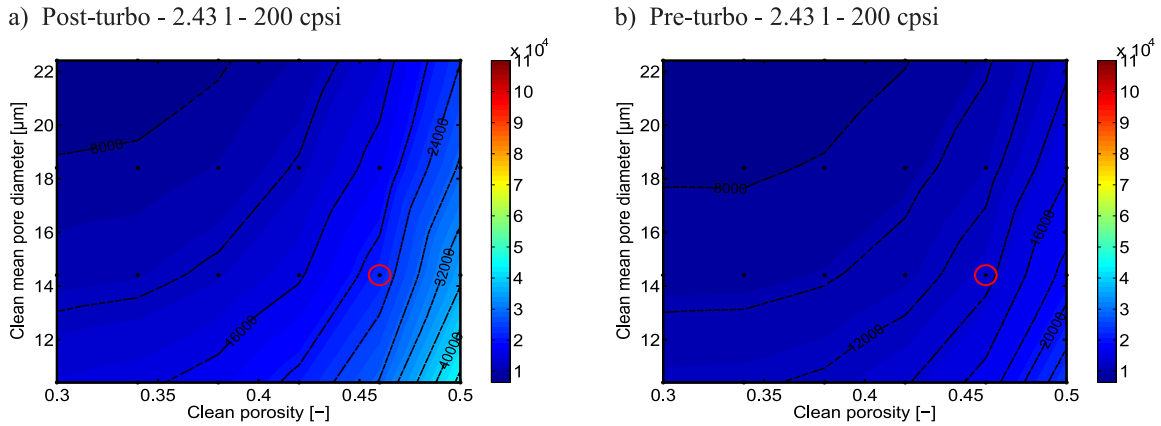


**Figura 4.52:** Efecto de la variación de  $\Upsilon$  en las funciones: a)  $\ln(1/\Upsilon)$  b)  $(1 + 1/\Upsilon^4)$ .

Sin embargo, dados los valores tan reducidos de  $w_{pl}$  (Figura 4.45 y 4.46) si se los compara con los valores que adquiere  $\alpha$ , no se espera que las variaciones producidas en el espesor de la capa de partículas afecten demasiado a la caída de presión.

En lo referente a la microestructura, la pérdida de presión se ve principalmente afectada por la permeabilidad, tanto de la propia pared porosa como de la capa de partículas, afectando a las respectivas contribuciones de Darcy (ecuaciones 4.48 y 4.49). De acuerdo a las tendencias en las permeabilidades (Figuras 4.36 y 4.47) y a la dependencia inversamente proporcional de las contribuciones de Darcy con estas permeabilidades, se concluye que

moverse a valores de  $\varepsilon_{w_0}$  menores y de  $d_{p,w_0}$  mayores implica menores caídas de presión en condiciones de acumulación de hollín tras saturación (Figura 4.53).



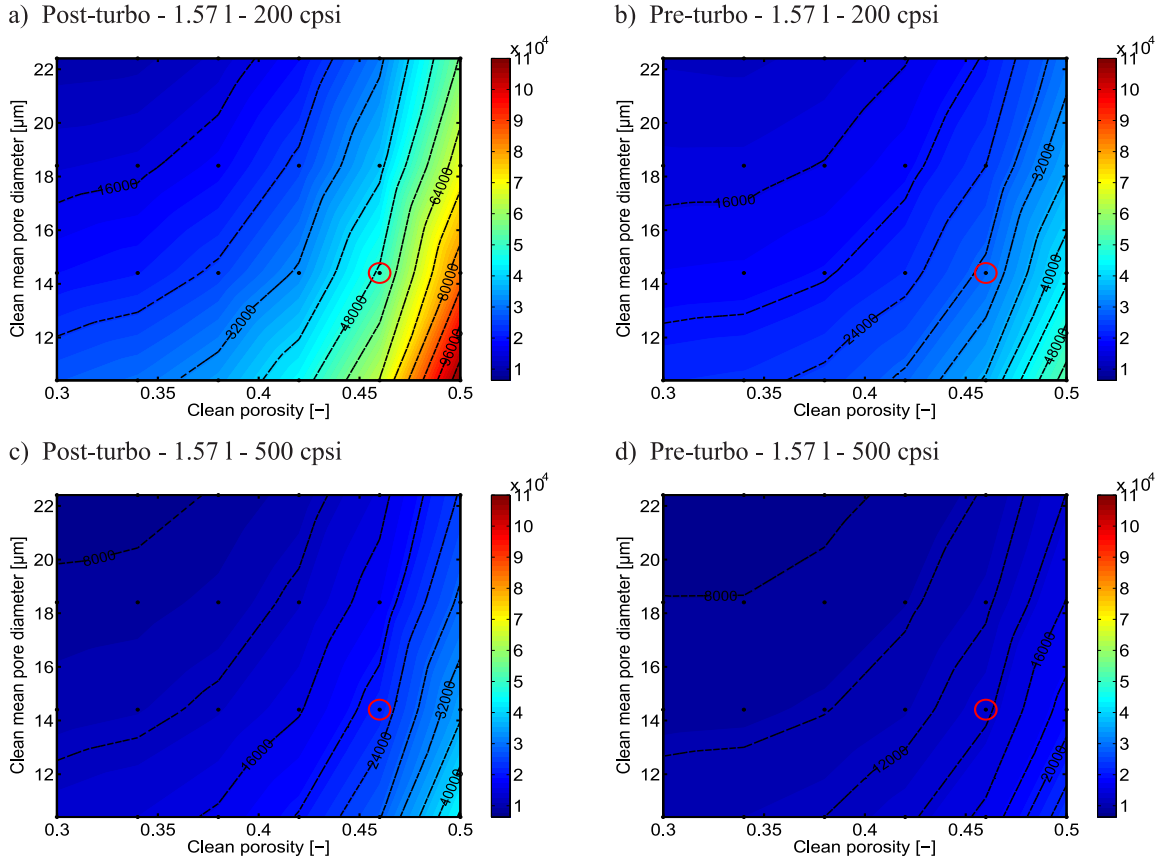
**Figura 4.53:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la caída de presión del DPF [ $Pa$ ] en condiciones de acumulación de hollín (5 g).

Al igual que en condiciones limpias, los menores valores de  $u_w$  constituyen el factor controlante que consigue reducciones en todas las contribuciones a la caída de presión en configuración pre-turbo (ecuaciones 4.48, 4.49, 4.50 y 4.51). Producto de las menores penetraciones en esta configuración, los mayores valores de  $k_{w,e}$  (Figura 4.36) también ayudarían a reducir las pérdidas de presión a través de la contribución de Darcy de la pared porosa (ecuación 4.48). Por otro lado, los mayores valores de  $w_{pl}$  (Figura 4.45) a igualdad de geometría en esta configuración contribuirían a incrementar las pérdidas de presión debidas a la ley de Darcy a través de la capa de partículas y a la fricción en los canales (ecuaciones 4.49 y 4.50), mientras que los menores valores de  $k_{pl}$  en pre-turbo (Figura 4.47) incrementarían la caída de presión únicamente a través de la contribución de la ley de Darcy de la capa de partículas. A pesar de estos incrementos, las reducciones conseguidas en pre-turbo toman mayor importancia y, como resultado final, la configuración pre-turbo ofrece menores caídas de presión bajo condiciones de acumulación de hollín (Figura 4.53), del mismo modo que lo conseguía en condiciones limpias.

En lo que a la reducción de la longitud respecta, las contribuciones se van a ver afectadas de manera similar a las condiciones limpias.

Si esta longitud se reduce manteniendo  $SFA$  constante, las contribuciones inerciales se reducen ligeramente fruto de las reducciones en  $Q$ , las cuales son producidas por los incrementos en la densidad del flujo debidos a las mayores caídas de presión. Los mayores valores de  $u_w$  resultan en mayores pérdidas de presión debidas a las contribuciones de Darcy que, en el caso de la contribución de pared porosa, se suman a los menores  $k_{w,e}$ . Los mayores valores de  $w_{pl}$  a igualdad de  $\alpha$  (Figuras 4.45 y 4.46) darían lugar a menores  $\Upsilon$  y, por tanto, contribuirían a incrementar tanto la contribución de Darcy correspondiente a la capa de partículas como la contribución debida a la fricción. Por otra parte, la propia

menor longitud disminuye la magnitud de la contribución de la fricción, eclipsando el incremento producido en estas pérdidas por los mayores valores de  $u_w$  y de  $w_{pl}$ . A pesar de todos los cambios anteriores, es de nuevo el incremento en las contribuciones de Darcy el que adquiere mayor relevancia y, como resultado final, la caída de presión en condiciones cargadas también se ve incrementada al reducir la longitud por este medio (Figuras 4.53 y 4.54).



**Figura 4.54:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la caída de presión del DPF [Pa] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida.

Si la reducción de la longitud se consigue a  $A_f$  constante, las contribuciones inerciales se ven ligeramente incrementadas debido a las menores densidades del flujo. La propia reducción de la longitud generaría disminuciones en la contribución de la fricción. Pero al reducir la longitud de esta manera,  $\alpha$  se incrementa y, dado que los valores de  $w_{pl}$  se mantienen esencialmente al mismo nivel (Figuras 4.45 y 4.46), el valor de  $\Upsilon$  quedaría reducido. Lo anterior se sumaría a los mayores valores de  $\alpha$ , eclipsando la disminución que conseguía la longitud sobre las pérdidas por fricción. A pesar de las mayores contribuciones debidas a la fricción, las pérdidas de presión debidas a la ley de Darcy se ven ligeramente reducidas por el menor valor de  $\alpha$  a costa de los menores  $k_{w,e}$  al disminuir la longitud. Como la contribución de Darcy adquiere mayor magnitud, la caída de presión en condiciones cargadas

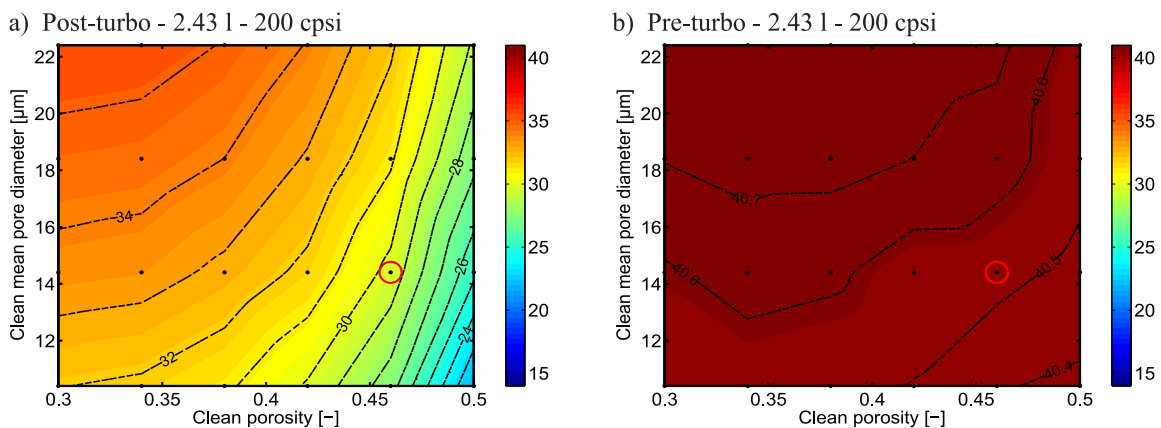
también disminuye ligeramente en ciertas zonas del mapa al reducir la longitud por esta vía (Figuras 4.53 y 4.54).

A lo largo de este apartado, cabe destacar el incremento en la caída de presión del DPF que la acumulación de hollín produce, ya que este incremento tendrá consecuencias sobre el consumo del motor.

### Posición de la VGT

Las conclusiones en lo que respecta a la posición de la VGT son muy similares a las extraídas en condiciones limpias. Esta posición viene influenciada por lo que suceda aguas abajo de la turbina.

De acuerdo a lo anterior, la posición de la VGT se ve fuertemente afectada por la caída de presión del filtro en configuración post-turbo. Tal y como queda mostrado en la Figura 4.55, la turbina se va cerrando a medida que la caída de presión es mayor con el fin de mantener el gasto másico constante. Además, esta posición se cierra en mayor medida que en condiciones limpias, dadas las mayores caídas de presión que produce la acumulación de hollín.



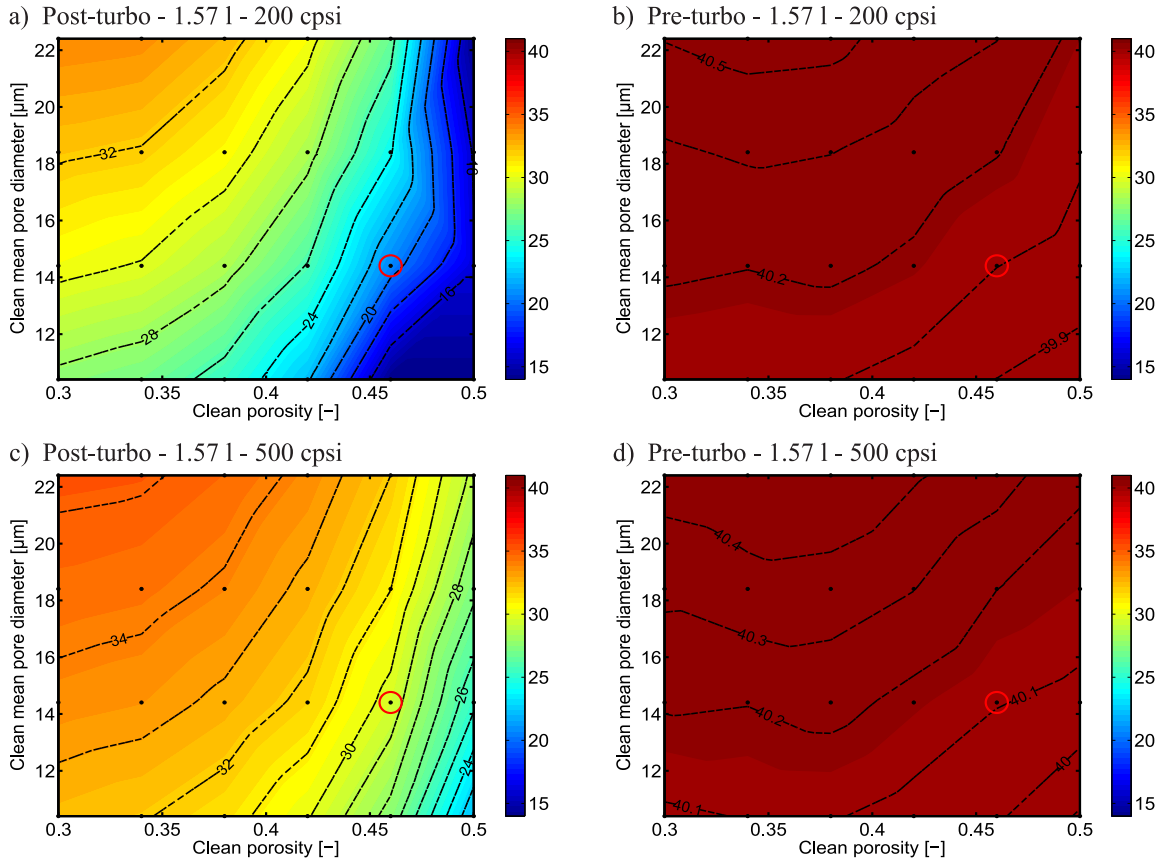
**Figura 4.55:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la posición de la VGT [%] en condiciones de acumulación de hollín (5 g).

Por otro lado, en configuración pre-turbo, el hecho de que la VGT esté situada aguas abajo del DPF provoca que la posición de la misma sea prácticamente independiente de la caída de presión del filtro, conclusión que se facilita en la Figura 4.55. Desde este punto de vista, la acumulación de hollín no produce ninguna consecuencia remarcable sobre la posición de la VGT.

Las conclusiones anteriores se vuelven a verificar con la Figura 4.56. Los cambios en la caída de presión que produce la reducción de la longitud se ven reflejados en modificaciones de la posición de la VGT en configuración post-turbo, mientras que esta posición no se ve

prácticamente afectada en pre-turbo.

Cabe destacar el caso de reducción de la longitud manteniendo  $SFA$  constante. En esta ocasión, las caídas de presión son tan elevadas en ciertas zonas de los mapas de colores que provocan que la turbina llegue a los límites de su mapa de operación, no pudiendo cerrarse más (Figura 4.56 a)).

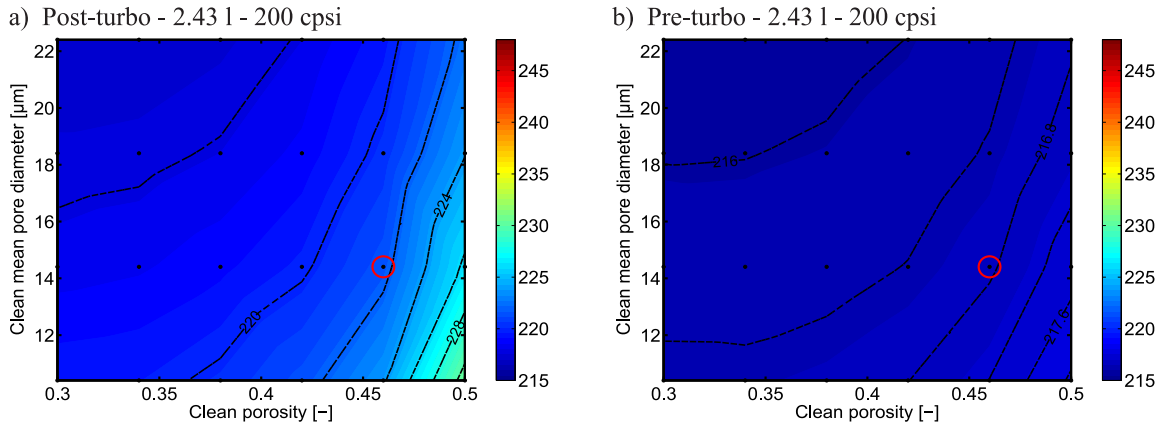


**Figura 4.56:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre la posición de la VGT [%] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida.

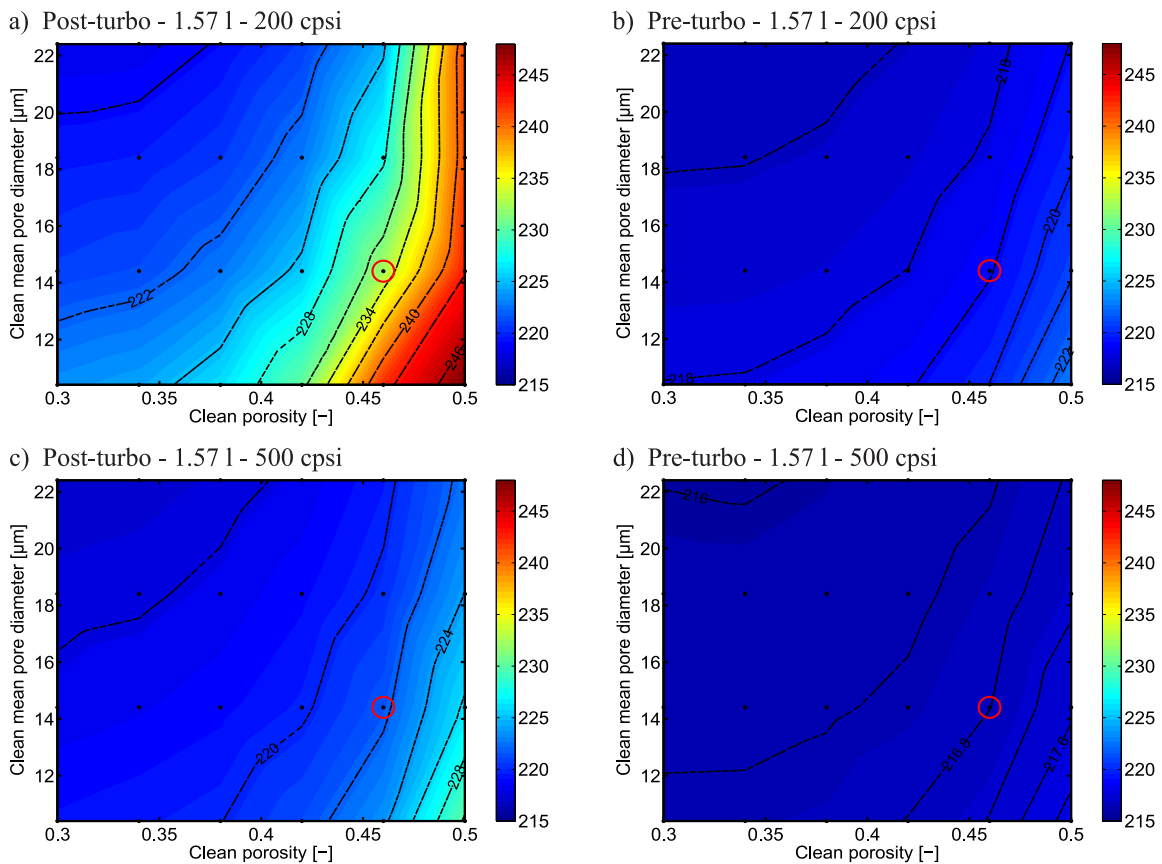
### Consumo específico

En último lugar y de igual manera que sucedía en condiciones limpias, el análisis del consumo específico ( $bsfc$ ) finaliza con las tendencias en la caída de presión y en la posición de la VGT, de tal modo que tanto mayores caídas de presión del DPF como un cierre en la VGT desembocan en un incremento en el  $bsfc$ .

Teniendo en cuenta lo anterior, moverse a valores de  $\varepsilon_{w_0}$  menores y de  $d_{p,w_0}$  mayores da lugar a reducciones en el  $bsfc$ , tal y como se visualiza en las Figuras 4.57 y 4.58.



**Figura 4.57:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre el  $bsfc$  [g/kWh] en condiciones de acumulación de hollín (5 g).



**Figura 4.58:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre el  $bsfc$  [g/kWh] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida.

En condiciones de acumulación de hollín, también los consumos en pre-turbo van a ser

menores que en post-turbo, resultado tanto de las menores caídas de presión como de la independencia de la posición de la VGT con esta caída de presión (Figuras 4.57 y 4.58). Por otro lado, los consumos no solo van a ser menores en pre-turbo, sino que también presentan menores sensibilidades ante cambios en la caída de presión que en post-turbo, englobando tanto los cambios producidos por la modificación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  como los producidos por la acumulación de hollín, tal y como se deduce si se comparan las Figuras 4.14 y 4.57.

En lo que respecta a la reducción de la longitud, se obtienen las mismas conclusiones que en condiciones limpias. Reducciones de la longitud manteniendo  $SFA$  constante dan lugar a incrementos en el  $bsfc$  respecto de la longitud de referencia. Por otro lado, reducciones de la longitud manteniendo  $A_f$  constante dan lugar a  $bsfc$  ligeramente menores (Figuras 4.57 y 4.58), aunque esencialmente similares. Por otra parte, también se va a tener menor sensibilidad por parte del consumo ante cambios en la longitud en configuración pre-turbo.

#### 4.5.2. Análisis de la eficiencia de filtrado

Del mismo modo que se ha realizado en condiciones limpias, el análisis de la eficiencia de filtrado sigue pautas similares, aunque teniendo en cuenta los cambios microestructurales explicados al acumular hollín y el surgir de la capa de partículas. Pues se debe hacer hincapié en que, a pesar de que la pared queda dividida en una fracción limpia y una que acumula hollín, la que acumula hollín toma el papel controlante a efectos de filtrado, ya que es esta la fracción que enfrenta al flujo.

#### Número de Peclet

Los cambios microestructurales en condiciones de acumulación de hollín van a tomar particular influencia sobre el número de Peclet ( $Pe_w$ ). Para realizar un análisis preciso en este número se recuerda su definición con la ecuación 4.52, en esta ocasión particularizada para condiciones cargadas.

$$Pe_w = \frac{u_w d_{c,w}}{\varepsilon_w D_{part}} \quad (4.52)$$

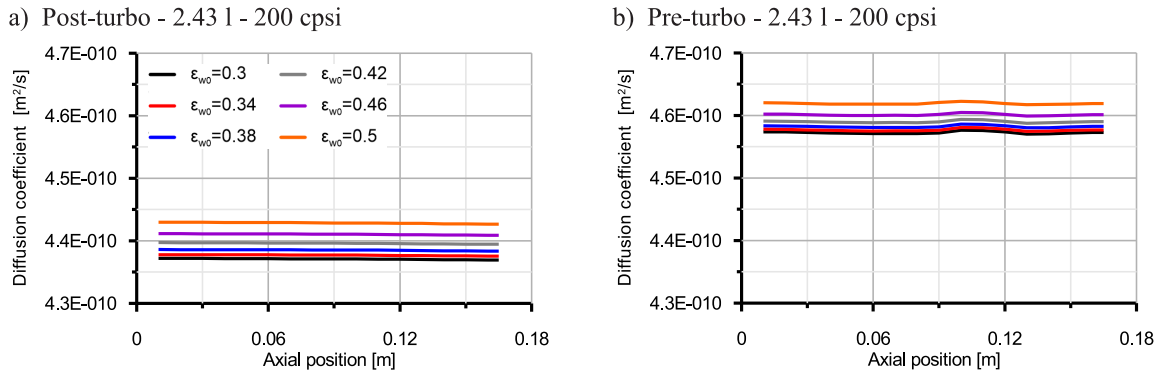
Sin embargo, al igual que en condiciones limpias, antes de entrar en el análisis propio de  $Pe_w$  conviene visualizar como se ve afectado el coeficiente de difusión de las partículas ( $D_{part}$ ) en condiciones de acumulación de hollín (ecuación 4.53).

$$D_{part} = \frac{Tk_B SCF_w}{3\pi\mu d_{part}} \quad (4.53)$$

En condiciones cargadas, los cambios en  $\varepsilon_{w_0}$  repercuten en mayores diferencias de caída de presión respecto a las condiciones limpias que afectarían a la densidad del flujo y, por

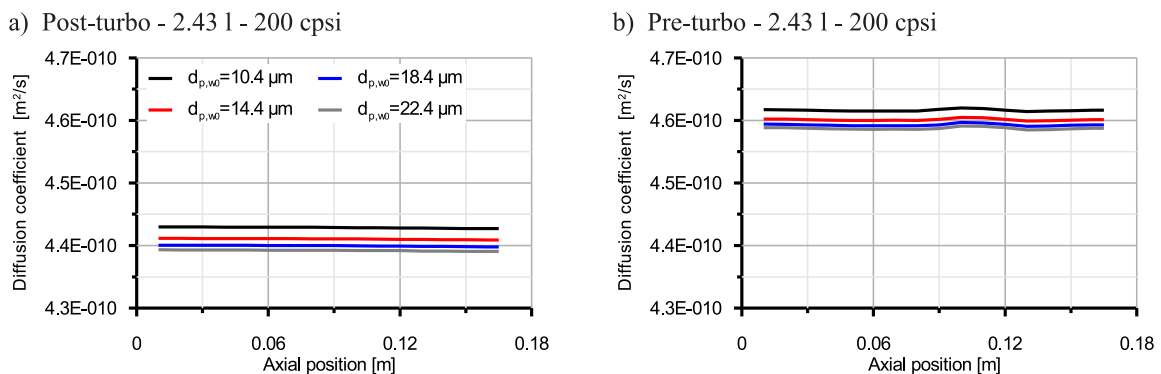


tanto, al valor de  $SCF_w$ . Sin embargo, el cambio dominante lo representa la dependencia de  $d_{p,w}$  con  $\varepsilon_{w_0}$  (Figura 4.33 d)). De esta manera, mayores  $\varepsilon_{w_0}$  imponen menores  $d_{p,w}$ , dando lugar a mayores  $Kn_w$  y, por consiguiente, mayores  $SCF_w$ . Como resultado final, mayores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  resultarían en mayores  $D_{part}$ , tal y como se deduce en la ecuación 4.53 y se observa en la Figura 4.59.



**Figura 4.59:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  en  $D_{part}$  en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con  $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ .

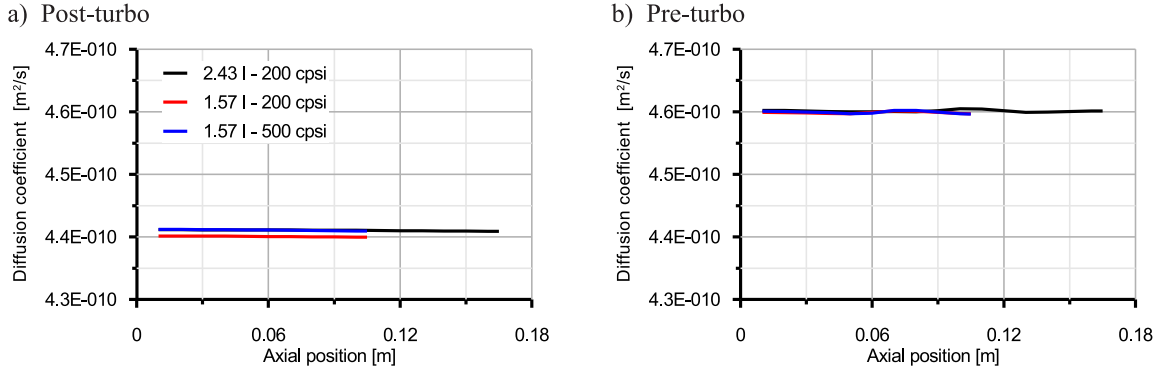
En lo que se refiere a  $d_{p,w_0}$ , sucede algo similar a la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  al producir también cambios en la caída de presión y en la densidad, pero de nuevo el factor controlante es el propio cambio en  $d_{p,w}$  que provoca la variación de  $d_{p,w_0}$ . Así, mayores  $d_{p,w_0}$  desembocarían en mayores  $d_{p,w}$ , que resultarían en menores valores del coeficiente  $D_{part}$  (Figura 4.60).



**Figura 4.60:** Efecto de la variación de  $d_{p,w_0}$  en  $D_{part}$  en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$ .

En lo que respecta a cambiar la ubicación del filtro y a pesar de los cambios producidos en  $SCF_w$  por este motivo, la temperatura juega el papel de factor controlante al igual que en condiciones limpias. De este modo, las mayores temperaturas en pre-turbo dan lugar a  $D_{part}$  más elevados, tal y como se muestra en las Figuras 4.59 y 4.60.

Por otra parte, los cambios en la caída de presión del DPF producidos al reducir la longitud no son suficientes como para desembocar en diferencias apreciables en  $D_{part}$ , a excepción del caso en el que se reduce la longitud a  $SFA$  constante en post-turbo, en el cual las elevadas caídas de presión (Figura 4.54 a)) producen reducciones algo más notorias en  $D_{part}$  (Figura 4.61).



**Figura 4.61:** Efecto de la reducción de la longitud en  $D_{part}$  en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con  $\varepsilon_{w_0} = 0.46$  y  $d_{p,w_0} = 14.4 \mu m$ .

Entrando con el análisis del número de Peclet y teniendo en cuenta lo explicado anteriormente con el coeficiente de difusión, la tendencia con  $d_{p,w_0}$  se va a mantener respecto a las condiciones limpias. Mayores  $d_{p,w_0}$  dan lugar a valores de  $d_{c,w}$  mayores y de  $D_{part}$  ligeramente menores, los cuales contribuyen a incrementar  $Pe_w$ , tal y como muestra la ecuación 4.52. Por contra, un incremento de  $\varepsilon_{w_0}$  produce menores  $d_{c,w}$  y menores  $\varepsilon_w$ , además de mayores valores de  $D_{part}$ . Lo anterior parece compensarse de cierto modo, dando lugar a una tendencia de  $Pe_w$  más plana con  $\varepsilon_{w_0}$  (Figura 4.62). Mencionado de otro modo, el Pécelet tiende a ser más independiente de  $\varepsilon_{w_0}$  tras haber acumulado hollín. También conviene resaltar los mayores valores del número de Peclet en condiciones cargadas, fruto de mayores tamaños en las unidades colectoras y menores porosidades.

Atendiendo al cambio de ubicación del DPF, sucede lo mismo que en condiciones limpias en lo que al Peclet respecta. Los menores valores de  $u_w$  en pre-turbo se suman a los mayores valores de  $D_{part}$  para dar lugar a  $Pe_w$  más elevados (Figura 4.62).

En lo que respecta a la reducción de la longitud, el cambio en  $Pe_w$  sigue siendo controlado por  $u_w$ . Si la reducción en la longitud del DPF se consigue manteniendo  $SFA$  constante, se tendrán mayores  $Pe_w$ , dados los mayores valores de  $u_w$ . Si la menor longitud se consigue manteniendo  $A_f$  constante,  $u_w$  permanece a niveles similares y, por ende,  $Pe_w$  también lo hace. Tan solo se producen ligeras reducciones en  $Pe_w$ , dados los incrementos en  $SCF_w$  por las menores caídas de presión, al igual que sucedía en condiciones limpias. Todo esto se concluye al comparar las Figuras 4.62 y 4.63.

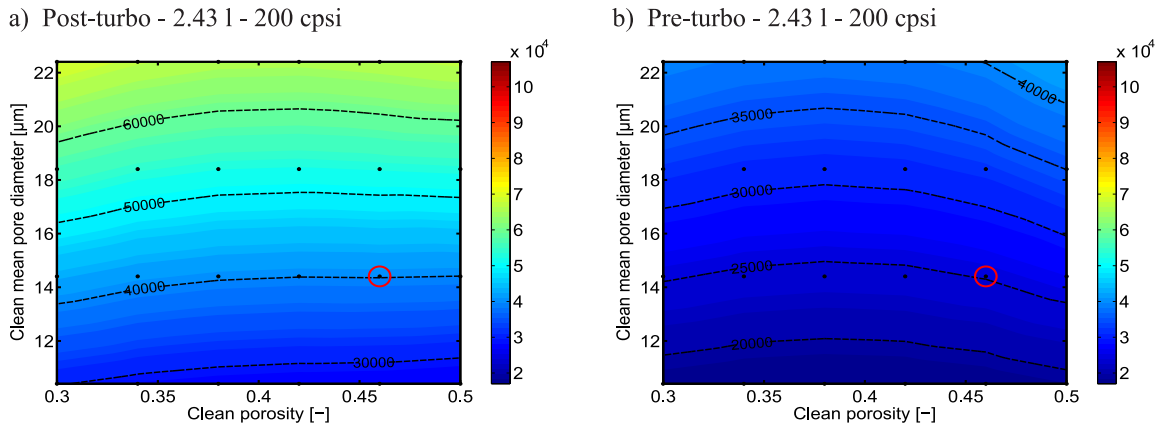


Figura 4.62: Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $Pe_w$  [-] (5 g de hollín).

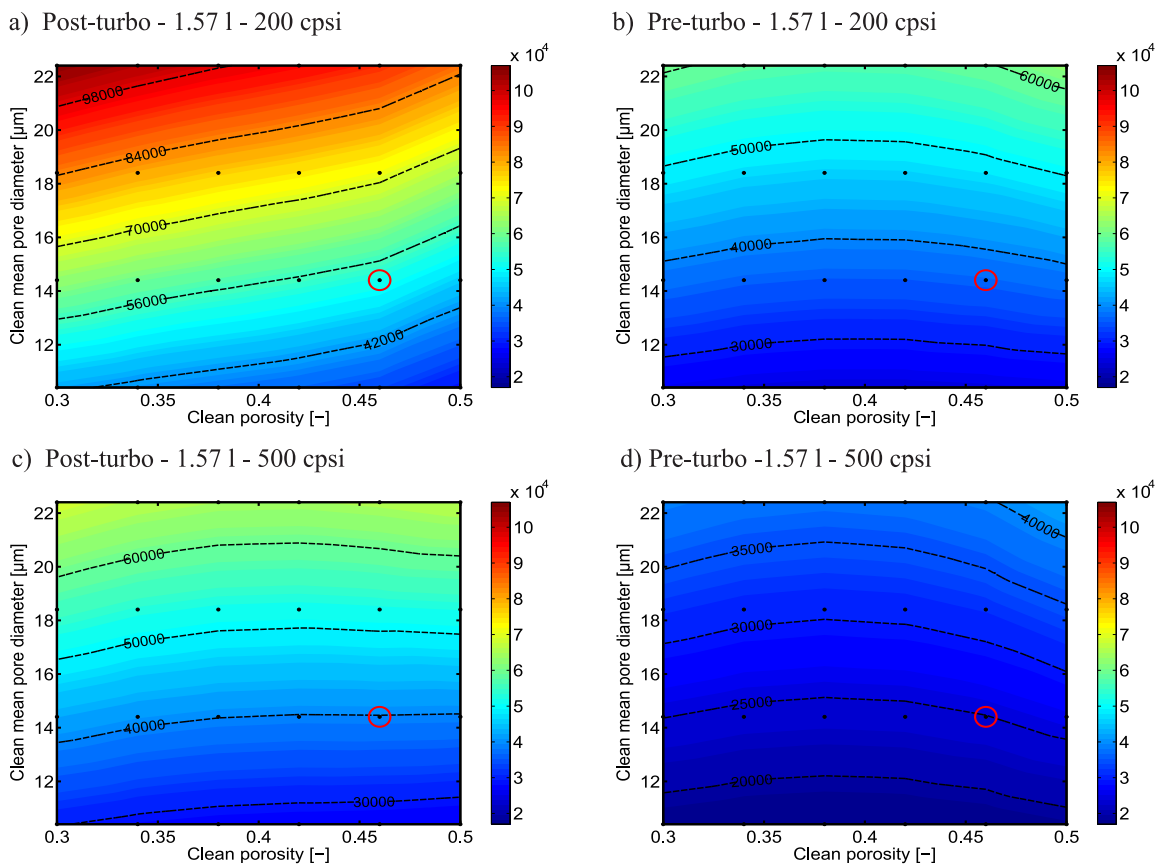


Figura 4.63: Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $Pe_w$  [-] con longitud reducida (5 g de hollín).

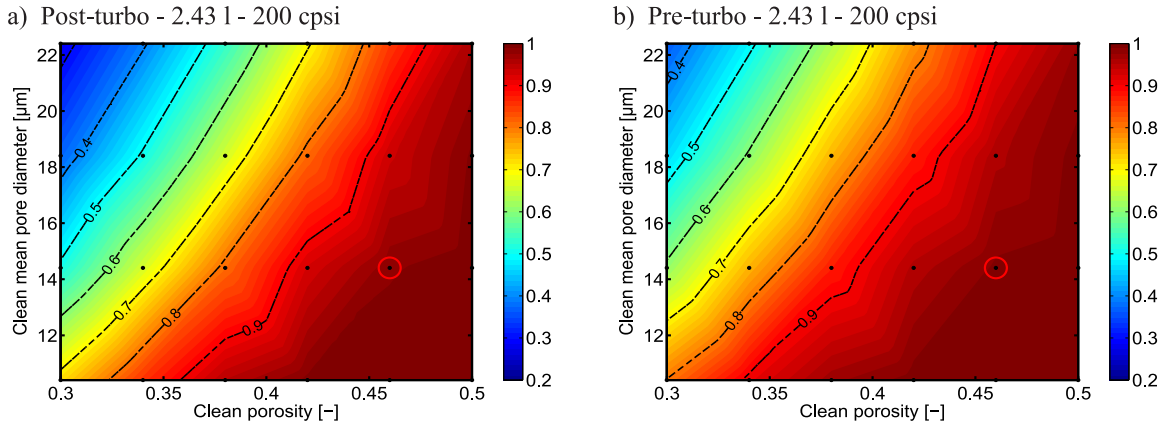
### Eficiencia de filtrado por difusión Browniana

Para proceder con el análisis referente en condiciones de acumulación de hollín, conviene recordar las definiciones aplicadas para el cálculo de la eficiencia de filtrado debida al mecanismo Browniano ( $E_D$ ), las cuales se proporcionan en las ecuaciones 4.54 y 4.55 en condiciones de acumulación de hollín. Además, también conviene recordar que el producto  $w_w f_w S_c$  permanece constante, dejando las dependencias funcionales  $\eta_D$  y  $d_{p,w}$ . Esta dependencia funcional establece que si  $\eta_D$  se incrementa,  $E_D$  también lo hace a igualdad de  $d_{p,w}$ . Por otro lado,  $E_D$  se reduce a igualdad de  $\eta_D$ , si  $d_{p,w}$  presenta mayores valores, hecho que sucede cuando  $\varepsilon_{w_0}$  disminuye o  $d_{p,w_0}$  se incrementa.

$$\eta_D = 3.5 \left( \frac{\varepsilon_w}{K} \right)^{\frac{1}{3}} Pe_w^{-\frac{2}{3}} \quad (4.54)$$

$$E_D = 1 - e^{-\frac{\eta_D w_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (4.55)$$

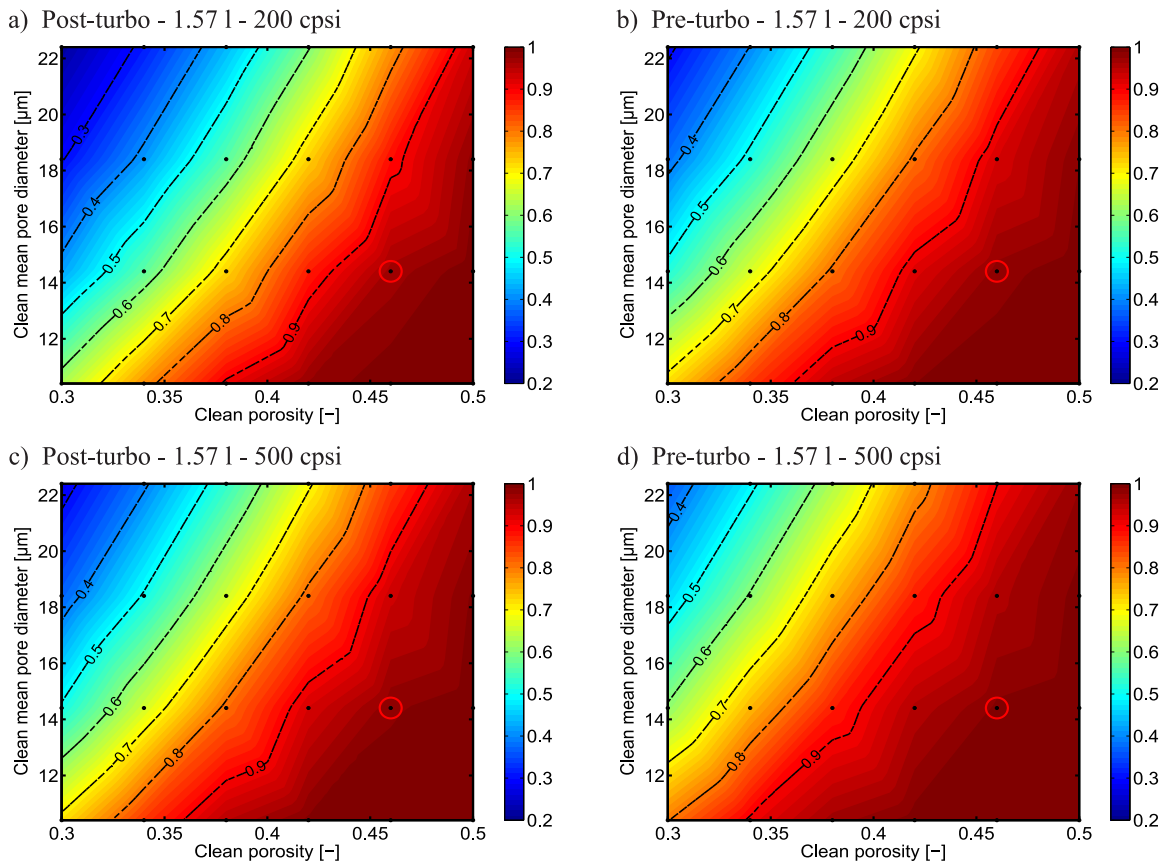
Al igual que en condiciones limpias, el factor dominante en esta eficiencia lo constituye  $Pe_w$  al estar elevado a una potencia mayor (ecuación 4.54). Sin embargo, la tendencia de  $\eta_D$  que produciría  $Pe_w$  se ve modificada por la presencia de la función  $\varepsilon_w/K$ , la cual es decreciente con  $\varepsilon_w$  (Figura 4.21) y, por consiguiente, creciente con  $\varepsilon_{w_0}$ . Dado que la tendencia de  $Pe_w$  con  $\varepsilon_{w_0}$  es esencialmente plana, la función  $\varepsilon_w/K$  condicionará como evolucione  $E_D$  con  $\varepsilon_{w_0}$ . De este modo, mayores  $\varepsilon_{w_0}$  van a desembocar en mayores  $\eta_D$ , a la vez que dan lugar a menores  $d_{p,w}$ , concluyendo ambos factores en un mayor valor de  $E_D$ . Por otro lado, los mayores  $Pe_w$  al incrementar  $d_{p,w_0}$  darían lugar a menores  $\eta_D$ . Estos menores  $\eta_D$  se sumarían a los mayores valores que alcanzaría  $d_{p,w}$  al incrementar  $d_{p,w_0}$  para concluir en menores  $E_D$ . Resumiendo, moverse a valores mayores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  va a dar lugar a mayores  $E_D$ , tal y como queda mostrado en la Figura 4.64.



**Figura 4.64:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_D$  [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g).

Las conclusiones extraídas al cambiar la ubicación del DPF con respecto a la turbina en condiciones de acumulación de hollín son las mismas que en condiciones limpias. Los menores valores de  $Pe_w$  en pre-turbo resultan en mayores  $E_D$  (Figura 4.64).

También se aprecian los mismos efectos que en condiciones limpias al reducir la longitud. Si esta se reduce manteniendo  $SFA$  constante, se tendrán menores  $E_D$  producto de los mayores  $Pe_w$ . Si la reducción se logra manteniendo  $A_f$  constante,  $E_D$  permanece prácticamente a los mismos niveles, dado que  $Pe_{w_0}$  también lo hace (Figuras 4.64 y 4.65).



**Figura 4.65:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_D$  [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida.

### Eficiencia de filtrado por intercepción

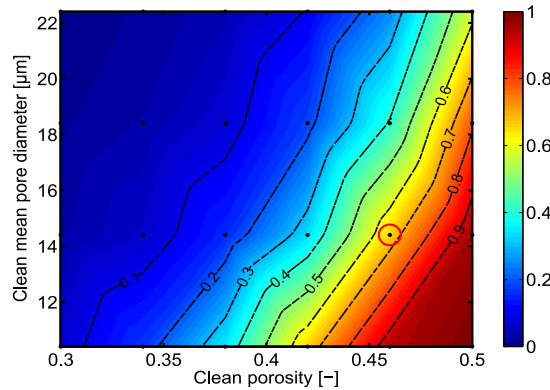
En el análisis referente a la deposición por intercepción, también conviene recordar la definición por medio de ecuaciones de la eficiencia de filtrado que lo representa ( $E_R$ ) en condiciones de acumulación de hollín (ecuaciones 4.57 y 4.58). Teniendo en cuenta que esta eficiencia solo depende de la microestructura, con analizar los cambios producidos por esta bastará.

$$N_R = \frac{d_{part}}{d_{c,w}} \quad (4.56)$$

$$\eta_R = 1.5 \frac{N_R^2}{1 + N_R} \frac{\varepsilon_w}{\frac{3-2\varepsilon_w}{3\varepsilon_w} K} \quad (4.57)$$

$$E_R = 1 - e^{-\frac{\eta_R w_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (4.58)$$

Por un lado, mayores  $\varepsilon_{w_0}$  dan lugar a menores  $d_{c,w}$  y, por tanto, desembocan en mayores valores del parámetro  $N_R$ , de acuerdo a la ecuación 4.56. Sin embargo, si  $\varepsilon_{w_0}$  se incrementa,  $\varepsilon_w$  se reduce, provocando mayores valores de la función  $(3 - 2\varepsilon_w)/3\varepsilon_w$  (Figura 4.24), que contribuyen a reducir  $\eta_R$  con  $\varepsilon_{w_0}$ . A pesar de esto, la función  $\varepsilon_w/K$  va a tomar el papel controlante en esta ocasión. De este modo, un incremento en  $\varepsilon_{w_0}$ , el cual se traduce en menores  $\varepsilon_w$ , va a dar lugar a mayores valores de la función  $\varepsilon_w/K$  (Figura 4.21). Esto concluiría con mayores  $\eta_R$  que, sumados al hecho de que  $d_{p,w}$  se reduce con el incremento de  $\varepsilon_{w_0}$ , darían lugar a mayores  $E_R$ . Por otro lado, mayores  $d_{p,w_0}$  van a dar lugar a  $d_{c,w}$  más elevados y, por consiguiente, valores del parámetro  $N_R$  menores. Estos menores valores de  $N_R$  concluirían en  $\eta_R$  más reducidos que, sumados a que  $d_{p,w}$  se incrementa con  $d_{p,w_0}$ , darían lugar a  $E_R$  menores. Resumiendo, moverse a valores mayores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  va a dar lugar a mayores  $E_R$  (Figura 4.66). Además, cabe remarcar los valores notablemente mayores que toma esta eficiencia en condiciones de acumulación de hollín respecto a condiciones limpias.



**Figura 4.66:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_R$  [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g).

### Eficiencia de filtrado inercial

No hay que olvidar realizar un análisis de la eficiencia referente al tercero de los mecanismos de filtrado, el inercial ( $E_I$ ). Por ello y de igual manera que en los otros mecanismos,

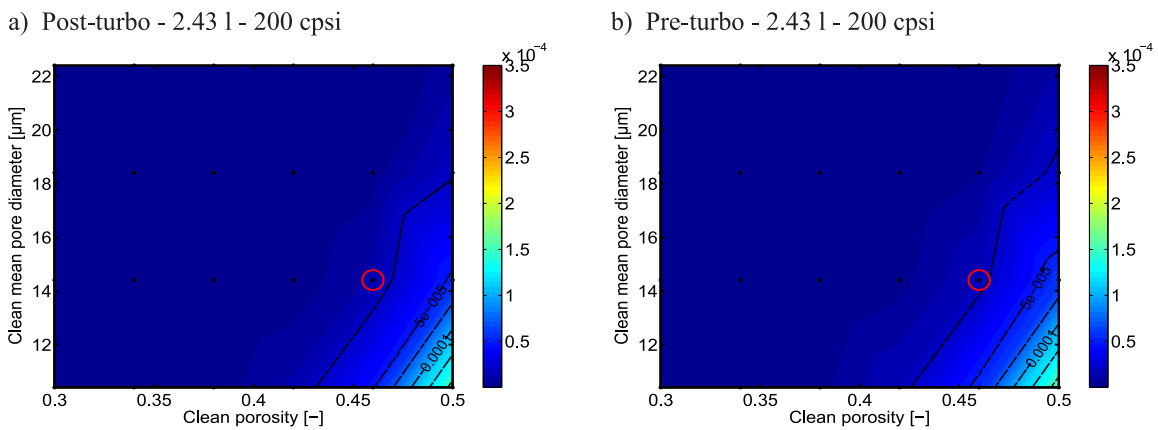
se proporcionan las ecuaciones que permiten el cálculo de la eficiencia que lo representa en condiciones de acumulación de hollín (ecuaciones 4.60 y 4.61).

$$St = \frac{\rho S C F_w \rho_{s,w} u_w d_{part}^2}{9 \mu \varepsilon_w d_{c,w}} \quad (4.59)$$

$$\eta_I = \frac{St^2}{(St + 0.25)^2} \quad (4.60)$$

$$E_I = 1 - e^{-\frac{\eta_I w_w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (4.61)$$

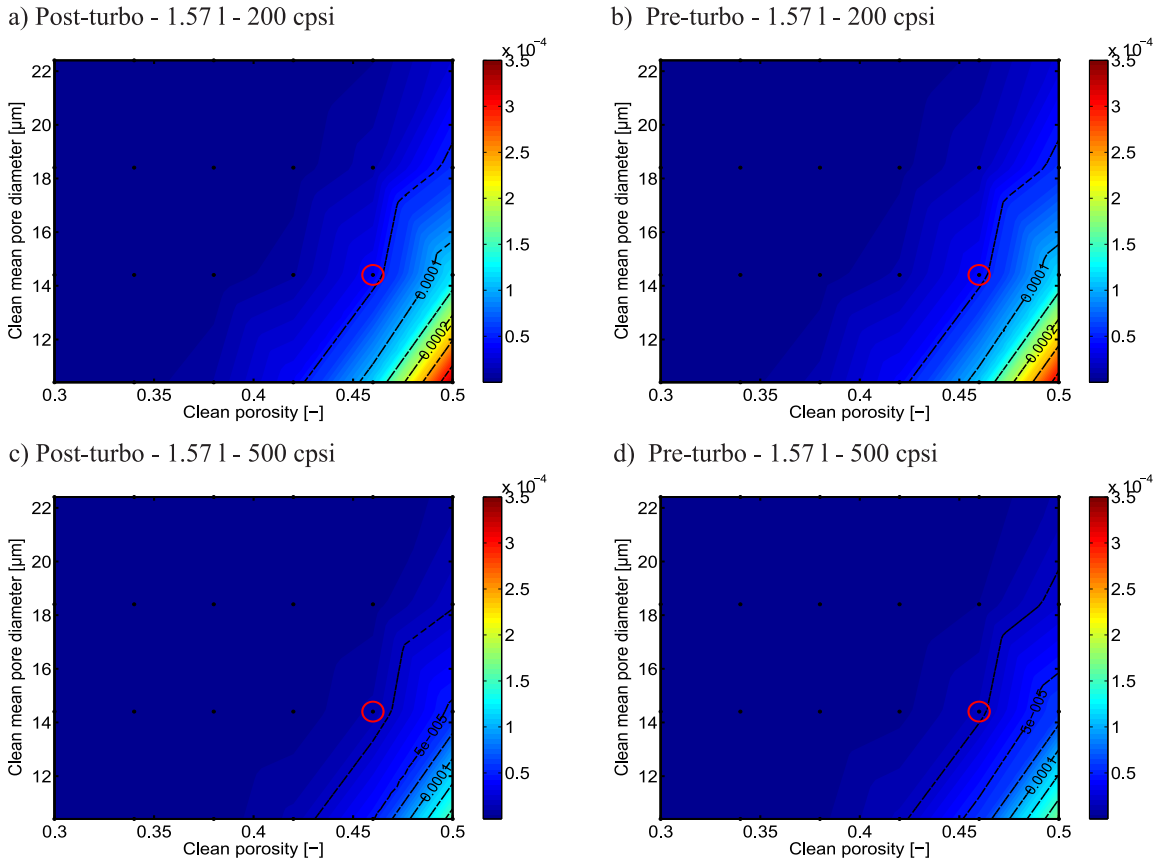
En lo que respecta a la microestructura, el cambio mandatorio en el número de Stokes va a venir representado por la presencia de  $\varepsilon_w$  y de  $d_{c,w}$  en la ecuación que lo define (ecuación 4.59). De este modo, un incremento en  $\varepsilon_{w_0}$  va a desembocar en  $St$  mayores, debido a que tanto  $\varepsilon_w$  como  $d_{c,w}$  se reducen. Esto daría lugar a valores de  $\eta_I$  mayores (ecuación 4.60), los cuales se sumarían a los menores  $d_{p,w}$  al incrementar  $\varepsilon_{w_0}$  para concluir en  $E_I$  más elevados. Por otro lado, incrementos en  $d_{p,w_0}$  producirían reducciones en  $St$ , dado que  $d_{c,w}$  sería mayor. En esta ocasión, los menores  $St$  dan lugar a  $\eta_I$  más reducidos que, sumados a los mayores  $d_{p,w}$  al incrementar  $d_{p,w_0}$ , resultan en  $E_I$  menores. Para resumir, moverse a valores mayores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  va a dar lugar a mayores  $E_I$  (Figura 4.67).



**Figura 4.67:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_I$  [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g).

En lo que se refiere a cambiar la configuración del filtro, aunque en esta configuración, además de mayores  $u_w$ , se tienen viscosidades del flujo ligeramente superiores y  $SCF_w$  ligeramente menores, son los mayores valores que toma la densidad del flujo los que dan lugar a mayores  $St$ . Lo anterior concluye en  $\eta_I$  más elevados y, finalmente, en  $E_I$  ligeramente mayores (Figura 4.67).

Por último, si la reducción de la longitud se consigue manteniendo  $SFA$  constante, los mayores valores de  $u_w$  van a desembocar en  $E_I$  más elevados respecto a la longitud de referencia. Este incremento en  $u_w$  al reducir la longitud por este medio parece compensar otros factores al cambiar la ubicación del filtro a pre-turbo, de modo que esta vez se tienen  $E_I$  ligeramente menores en pre-turbo que en post-turbo. Por otro lado, si esta reducción se consigue manteniendo  $A_f$ ,  $u_w$  se mantiene a niveles similares y el factor dominante lo constituye el mayor valor de  $SCF_w$ , provocado por las menores presiones a la entrada del DPF (Figuras 4.67 y 4.68), dando lugar a ligeros incrementos en  $E_I$  respecto a la longitud de referencia.



**Figura 4.68:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_I$  [-] en condiciones de acumulación de hollín (5 g) con longitud reducida.

### Eficiencia de filtrado de la pared porosa

De igual manera que en condiciones limpias, el análisis de la eficiencia de filtrado de la pared porosa en condiciones de acumulación de hollín ( $E_{f,w}$ ) finaliza teniendo en cuenta las eficiencias debidas a los tres mecanismos anteriores (ecuaciones 4.62 y 4.63).

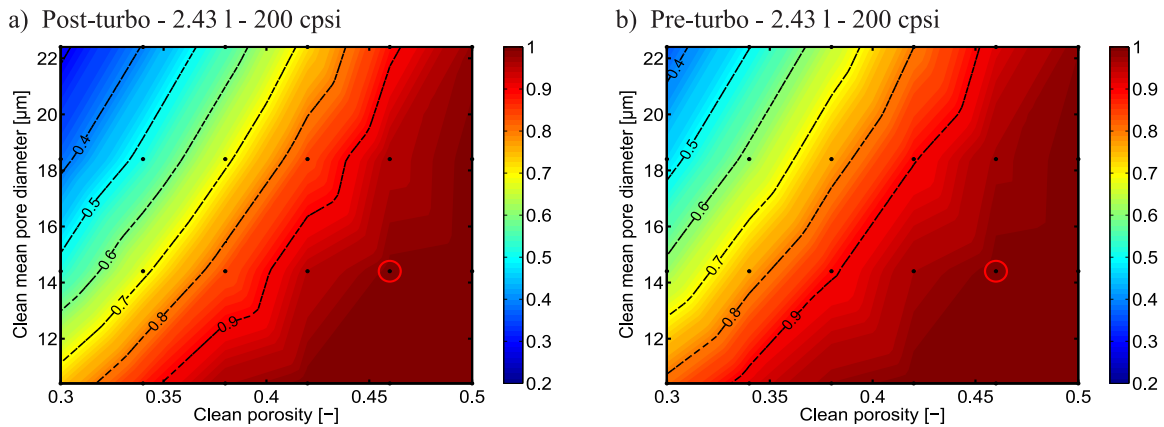
$$\eta_{DRI} = (\eta_D + \eta_R + \eta_I) - (\eta_D\eta_R + \eta_R\eta_I + \eta_D\eta_I) + \eta_D\eta_R\eta_I \quad (4.62)$$



$$E_{f,w} = 1 - e^{-\frac{\eta_D RI w f_w S_c}{d_{p,w}}} \quad (4.63)$$

Fundamentándose en la ecuación 4.62,  $\eta_{DRI}$  toma valores mayores cuanto mayor sea cada una de las eficiencias. En condiciones de acumulación de hollín, la eficiencia debida al mecanismo Browniano sigue adquiriendo un carácter mandatorio. Sin embargo, el mecanismo de intercepción comienza a adquirir una importancia comparable al mecanismo de difusión Browniana, aunque este último siga siendo el dominante. Por otro lado, la eficiencia debida al mecanismo inercial sigue sin tomar relevancia, de acuerdo al tamaño de las partículas fijado ( $75 \text{ nm}$ ). Todo esto se deduce al revisar los resultados referentes a las eficiencias debidas a cada uno de los tres mecanismos de filtrado (Figuras 4.64, 4.66 y 4.67).

Teniendo en cuenta que las eficiencias de los mecanismos dominantes siguen las mismas tendencias en cuanto a la microestructura se refiere, mayores valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y menores de  $d_{p,w_0}$  concluyen en mayores eficiencias  $E_{f,w}$  (Figura 4.69). Además, como la difusión Browniana sigue siendo el mecanismo que controla en mayor medida la eficiencia de filtrado, se puede decir que el número de Peclet sigue tomando particular influencia directa.

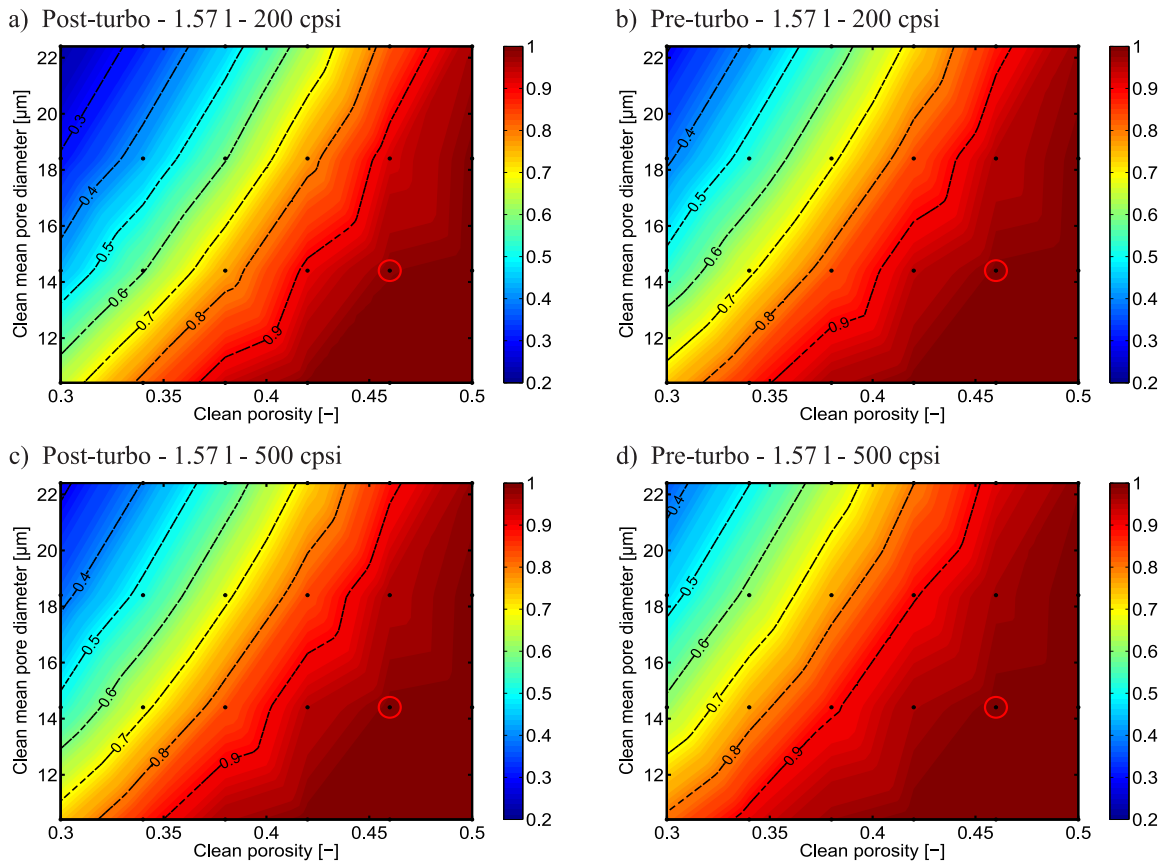


**Figura 4.69:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w_0}$  y  $d_{p,w_0}$  sobre  $E_{f,w}$  [-] ( $5 \text{ g}$  de hollín).

Por otro lado, recordando que la eficiencia debida al mecanismo de deposición por intercepción no depende de las condiciones termo-fluidodinámicas, los cambios que se produzcan con este motivo en la eficiencia de filtrado de la pared porosa serán causa de la difusión Browniana.

En base a lo anterior, cambiar la ubicación del filtro a configuración pre-turbo da lugar a mayores  $E_{f,w}$ , dados los menores números de Peclet (Figura 4.69). No obstante, en condiciones de acumulación de hollín, las diferencias en la eficiencia de filtrado entre configuración pre-turbo y post-turbo se tornan menos importantes en ciertas zonas de los mapas de colores dado su cercano valor a la unidad.

En último lugar, si la reducción de la longitud se consigue manteniendo  $SFA$  constante, se tienen menores  $E_{f,w}$ , mientras que si esta reducción se logra manteniendo  $A_f$  constante,  $E_{f,w}$  permanece esencialmente al mismo nivel, tal y como se deduce de la comparación de las Figuras 4.69 y 4.70. Al igual que al cambiar la ubicación del filtro, las diferencias en la eficiencia producidas al reducir la longitud no adquieren tanta importancia en ciertas zonas de los mapas de colores, dado su cercano valor a la unidad.



**Figura 4.70:** Efecto de la variación de  $\varepsilon_{w0}$  y  $d_{p,w0}$  sobre  $E_{f,w}$  [-] (5 g de hollín) con longitud reducida.

Cabe destacar el incremento tan abrupto que la acumulación de hollín produce en la eficiencia de filtrado. Físicamente, este incremento es debido a que una vez se comienzan a cerrar los poros de la pared porosa y a formarse una capa de partículas, se torna difícil que alguna de las partículas no quede filtrada.

### Eficiencia de filtrado de la capa de partículas

El hecho de que surja una capa de partículas que también actúa como medio filtrante incluye la necesidad de estudiar su eficiencia de filtrado ( $E_{f,pl}$ ) para contabilizarla junto con la eficiencia de la pared porosa. Teniendo en cuenta que el coeficiente  $\phi$  toma el valor

unidad en condiciones de saturación,  $E_{f,pl}$  será idéntica a  $E_{f,w}$ , de acuerdo a la ecuación 4.64.

$$E_{f,pl} = E_{f,w} \left( \frac{\phi - S_l}{1 - S_l} \right) = E_{f,w} \quad (4.64)$$

En base a lo anterior, tanto las conclusiones extraídas en la eficiencia de filtrado de la pared porosa como las Figuras referentes (Figuras 4.69 y 4.70) serán extrapolables a la eficiencia de filtrado de la capa de partículas.

### Eficiencia de filtrado global

En última instancia, la eficiencia de filtrado global del conjunto que constituye la pared porosa y la capa de partículas ( $E_{f,gl}$ ) viene dada en base a las eficiencias de los elementos que constituyen el conjunto a través de la ecuación 4.65, la cual ha sido particularizada para las condiciones de saturación.

$$E_{f,gl} = 1 - (1 - E_{f,w})(1 - E_{f,pl}) = 1 - (1 - E_{f,w})^2 \quad (4.65)$$

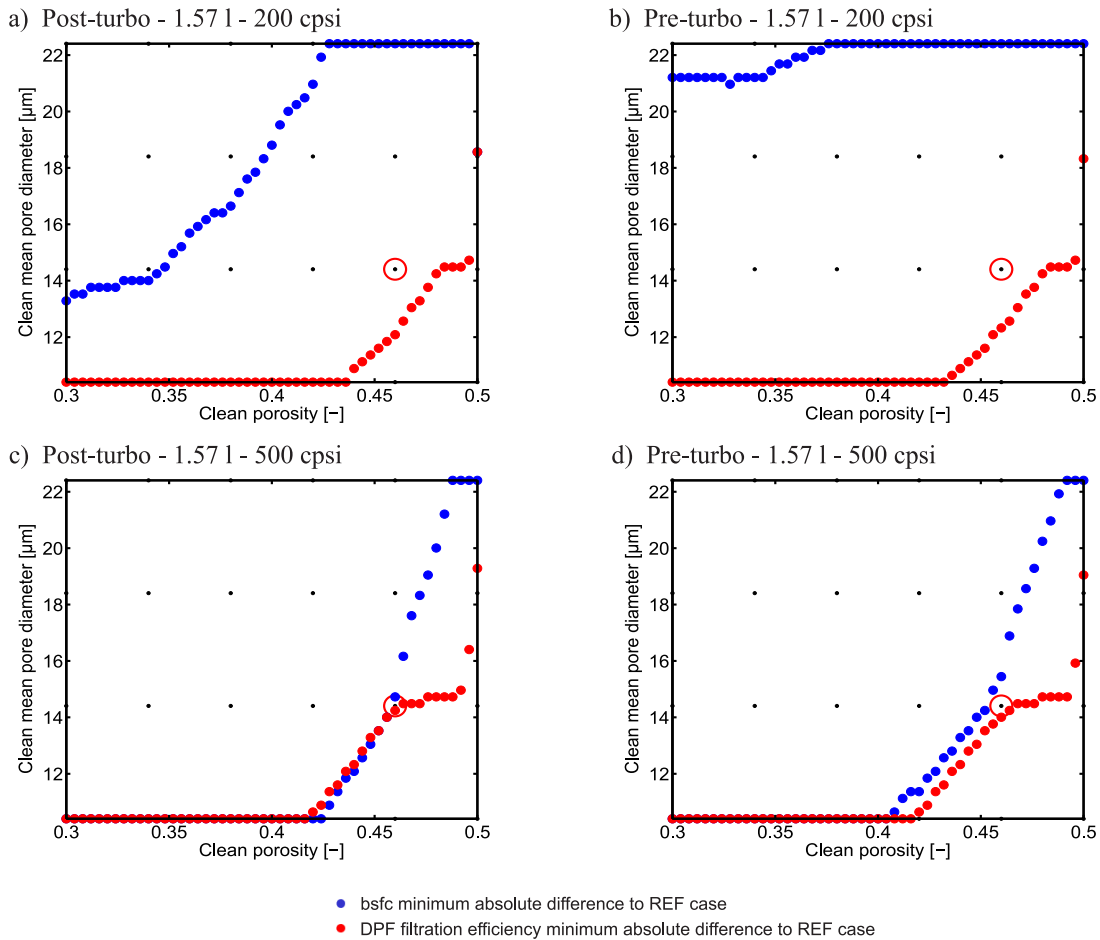
De acuerdo a la ecuación 4.65, que representa dos elementos filtrantes en paralelo, las conclusiones extraídas en la eficiencia de filtrado de la pared porosa serán aplicables también a la eficiencia de filtrado global del conjunto, ya que  $E_{f,gl}$  va a seguir la misma tendencia que  $E_{f,w}$  y que  $E_{f,pl}$ . No obstante, los valores de  $E_{f,gl}$  van a ser notablemente más elevados que los de las eficiencias por separado, dado que están dispuestas en paralelo.

#### 4.5.3. Compromiso entre el consumo y la eficiencia de filtrado

Del mismo modo que se ha realizado en condiciones limpias y dado el interés por conseguir sistemas de volumen más reducido, es interesante tratar de estudiar si se puede lograr esta reducción con el menor impacto posible en las prestaciones del filtro en condiciones de acumulación de hollín. Esta posibilidad va a depender de nuevo de las características de estas reducciones, ya que repercuten de diferentes maneras en el consumo y en la eficiencia de filtrado, atendiendo a si se realizan manteniendo la superficie específica de filtrado ( $SFA$ ) constante o a si se realizan manteniendo el área de filtrado constante ( $A_f$ ).

Al igual que en condiciones limpias, si la reducción de la longitud se realiza manteniendo  $SFA$  y reduciendo  $A_f$ , el consumo ( $bsfc$ ) se ve incrementado y la eficiencia de filtrado ( $E_{f,w}$ ) reducida. Sin embargo, en condiciones de acumulación de hollín, la tendencia del consumo con la porosidad del filtro limpio ( $\varepsilon_{w_0}$ ) se invierte con respecto a las condiciones limpias. A la hora de diseñar estos sistemas y dado que los DPFs acostumbran a operar en condiciones de acumulación de hollín, esta inversión se debe prever, junto con los intervalos de regeneración si esta es de carácter periódico. Además, también hay que ser

conscientes de la ligera pérdida de capacidad acumuladora de hollín que reducir la longitud supone. Bajo estas condiciones, lograr una solución de compromiso que de lugar a la menor diferencia absoluta posible respecto del DPF no es posible sin sacrificar o el consumo o la eficiencia de filtrado (Figura 4.71 a) y b)). Dados los valores aproximadamente iguales a la unidad de la eficiencia en ciertas zonas, no se tiene problemas en condiciones de acumulación de hollín en este aspecto. No obstante, hay que tener en cuenta que en limpio se perdía eficiencia de filtrado y convendría recuperarla reduciendo  $d_{p,w_0}$ , con el fin de cumplir la normativa en todo el rango de operación.



**Figura 4.71:** Solución de compromiso al reducir la longitud en condiciones de acumulación de hollín (5 g).

Por otro lado, si la reducción de la longitud se consigue manteniendo  $A_f$  constante, el consumo se ve ligeramente reducido manteniendo la eficiencia de filtrado. Bajo estas condiciones, es posible recuperar las prestaciones del DPF de referencia en un amplio rango de combinaciones de valores de  $\varepsilon_{w_0}$  y de  $d_{p,w_0}$  (Figura 4.71 c) y d)). Desde el punto de vista de las prestaciones, esta reducción de la longitud es más interesante que la otra. Sin embargo, tratar de mantener  $A_f$  constante mientras se reduce la longitud conlleva a la

necesidad de incrementar el número de canales y de hacerles espacio. Como el diámetro se mantiene constante, esto implica reducir  $\alpha$  y  $w_w$  (de acuerdo a la metodología del estudio), corriendo un mayor riesgo de obstrucción de los canales. Por este motivo, la reducción de la longitud por esta vía tiene un límite correspondiente a la pérdida de capacidad acumuladora de hollín que supone la reducción del ancho de los canales, pérdida de capacidad que es notablemente mayor que en el caso anterior.

Finalmente, dado que las eficiencias de filtrado son mayores en pre-turbo y que en condiciones de acumulación de hollín se tienen valores cercanos a la unidad en un amplio rango de combinaciones microestructurales, también en condiciones cargadas se torna tarea menos importante lograr una solución de compromiso en esta configuración. De este modo y al igual que en condiciones limpias, se podría sacrificar un poco la mayor eficiencia de filtrado para tratar de reducir todavía más el consumo, incrementando  $d_{p,w_0}$ .



# 5

## Conclusiones y trabajos futuros

---

A lo largo del presente proyecto, se ha realizado un exhaustivo estudio sobre las repercusiones que tiene variar el número de Peclet por distintas vías en las prestaciones de los filtros de partículas Diésel de flujo de pared, todo con el fin de lograr los objetivos expuestos en el primer capítulo. En concreto, estas prestaciones son la eficiencia de filtrado y la caída de presión del DPF, junto con su efecto sobre el consumo del motor. Para concluir el proyecto, en este capítulo se van a recopilar las principales conclusiones extraídas en este estudio. Además, se proporcionarán posibles desarrollos futuros que servirían para complementar o completar el presente trabajo.

### 5.1. Aportaciones y conclusiones

Para ser congruentes con la distribución del estudio a lo largo del proyecto, las conclusiones serán proporcionadas siguiendo el mismo orden, el cual se establece en base a las características que toma la variación del número de Peclet. De este modo, las conclusiones quedarían divididas atendiendo a si el número de Peclet se varía por medio de la microestructura del lecho colector que conforma la pared porosa del filtro o por medio de las condiciones termo-fluidodinámicas a las que hace frente.

En lo que respecta a la variación del número de Peclet por medio de la microestructura, esta se subdivide en la conseguida por la variación de la microestructura propia del filtro en condiciones limpias y en la conseguida por los cambios microestructurales que produce la acumulación de hollín en el interior de la pared porosa, concretamente, en condiciones de saturación. De acuerdo a esto, se resumen las conclusiones referentes:

- En primer lugar y atendiendo a la variación de la microestructura del filtro de partículas limpio, esta se ha conseguido a través de una variación de la porosidad y del diámetro medio de poro. Realizando esto, se han llegado a las siguientes conclusiones:
  - En lo que respecta a la variación de la porosidad en condiciones limpias, mayores valores de la misma resultan en menores números de Peclet, que desembocan en mayores eficiencias de filtrado. Atendiendo a la caída de presión, mayores porosidades concluyen en menores caídas de presión y, por tanto, menores consumos. En base a esto, un incremento en la porosidad en condiciones limpias

sería ventajoso, tanto desde el punto de vista de la caída de presión y del consumo, como de la eficiencia de filtrado. Sin embargo, tanto la caída de presión como la eficiencia de filtrado se ven afectadas por la porosidad en condiciones limpias con poca sensibilidad.

- En lo que respecta a la variación del diámetro medio de poro en condiciones limpias, mayores valores de este parámetro dan lugar a incrementos en el número de Peclet, los cuales concluyen en menores eficiencias de filtrado. Por otro lado, mayores valores de diámetro medio de poro desembocan en menores valores de la caída de presión y, por consiguiente, del consumo. No obstante, el efecto que produce la variación de este parámetro es más remarcado que el de la porosidad del filtro limpio. Dadas las tendencias inversas en la eficiencia de filtrado y en la caída de presión con el diámetro medio de poro en condiciones limpias, conviene lograr una solución de compromiso en lo que a este parámetro se refiere.
- En segundo lugar, la acumulación de hollín produce decrementos tanto en la porosidad como en el diámetro medio de poro, los cuales desembocan en mayores números de Peclet, mayores eficiencias de filtrado, mayores caídas de presión y, por ende, mayores consumos con respecto a las condiciones limpias. Además, la porosidad sufre una inversión en condiciones cargadas de hollín, de modo que mayores porosidades del filtro limpio concluyen en menores porosidades en condiciones de saturación. Esta inversión va a alterar la tendencia del número de Peclet con la porosidad del filtro limpio, volviéndola más independiente de la misma, y va a invertir las tendencias de la caída de presión y del consumo respecto a las condiciones limpias en lo que a porosidad del filtro limpio se refiere. En lo que respecta a las tendencias del número de Peclet, de la eficiencia de filtrado y de la caída de presión con el diámetro medio de poro del filtro limpio, estas se mantienen respecto a las condiciones limpias. Sobre todo lo anterior, especial importancia cobra el grado en el que penetra el hollín en la pared porosa, ya que mayores penetraciones van a dar más peso al cambio microestructural que la acumulación de hollín produce en lo que respecta a la caída de presión. Estas penetraciones crecen a medida que la porosidad del filtro limpio decrece y el diámetro medio de los poros del filtro limpio crece. Dado que estos sistemas acostumbra a operar en condiciones de acumulación de hollín, es necesario tener en cuenta la inversión que sufre la tendencia de la caída de presión con la porosidad del filtro limpio a la hora de diseñarlos, con el fin de lograr soluciones que cubran el mayor rango de operación posible con las mejores prestaciones posibles.

En lo que respecta a la variación del número de Peclet por medio del campo termofluidodinámico al que se enfrenta el filtro, esta se subdivide en la conseguida al cambiar la ubicación del filtro relativa a la turbina, de la configuración post-turbo tradicional a la pre-turbo, y en la conseguida al variar el área de filtrado mientras se reduce la longitud del filtro. De acuerdo lo anterior, se resumen las conclusiones correspondiente:

- En primer lugar, las mayores densidades y temperaturas en configuración pre-turbo dan lugar a menores velocidades de filtrado y mayores coeficientes de difusión de las partículas. Lo anterior desemboca en menores números de Peclet, concluyendo en mayores eficiencias de filtrado para todo el rango microestructural. Por otro lado,



las menores velocidades de filtrado suponen reducciones en la caída de presión y en el consumo, también en todo el rango microestructural. Las menores penetraciones propias de la configuración pre-turbo también contribuyen a una menor caída de presión cuando se tratan condiciones de acumulación de hollín. Además, el consumo presenta menos sensibilidad a los cambios microestructurales en esta configuración, tanto a los producidos por la variación de la microestructura en limpio como a los producidos por la acumulación de hollín. Por todo lo anterior, esta configuración queda dotada de especial interés con respecto a la post-turbo tradicional y se consiguen confirmar las conclusiones obtenidas en [4, 5].

- En segundo lugar, la reducción del área de filtrado se logra manteniendo el área específica de filtrado constante mientras se reduce la longitud del filtro. En añadido, se ha tratado de mantener el área de filtrado constante al reducir la longitud del filtro con el fin de comparar ambos métodos. Atendiendo a lo anterior, se obtienen una serie de conclusiones:
  - Reducir la longitud manteniendo el área específica de filtrado constante, da lugar a mayores velocidades de filtrado a igualdad de gasto másico, dado que este se redistribuye entre una menor área de filtrado. Las menores velocidades de filtrado desembocan en mayores números de Peclet, los cuales concluyen en menores eficiencias de filtrado en todo el rango microestructural. Por otro lado, las mayores velocidades de filtrado contribuyen a generar mayores caídas de presión y mayores consumos, también en todo el rango microestructural. Además, el hecho de que la longitud sea menor produce ligeras penalizaciones en la capacidad acumuladora de hollín del filtro, reduciéndola. Cabe remarcar que cobra especial importancia tratar de asegurar una elevada eficiencia de filtrado en todo el rango de operación del filtro con el fin de cumplir la normativa y, dado que esta crece con la acumulación de hollín, con asegurar el cumplimiento en condiciones limpias sería suficiente. Bajo estas condiciones de reducción de longitud, considerando condiciones limpias en configuración post-turbo y teniendo en cuenta la baja sensibilidad de la eficiencia de filtrado con la porosidad del filtro limpio, conviene tratar de recuperar la eficiencia de filtrado que se tenía con mayores longitudes para cumplir la normativa, reduciendo para ello el diámetro medio de poro del filtro limpio, aunque con ello se incrementaría la caída de presión todavía más. Las penalizaciones en las prestaciones que produce este método de reducción de la longitud conviene compensarlas con las ventajas que ofrece la configuración pre-turbo en términos de prestaciones. En esta configuración, teniendo en cuenta los mayores valores de la eficiencia de filtrado, se puede sacrificar la misma para lograr reducir todavía más la caída de presión y el consumo, incrementando con este fin el diámetro medio de poro del filtro limpio.
  - Mantener el área de filtrado a la vez que se reduce la longitud implica incrementar el número de canales por medio de la densidad de celdas. Para ello, se hace necesario reducir el ancho de los canales del filtro o el espesor de la pared porosa. De acuerdo a como se ha abordado el estudio, el ancho de los canales y el espesor de la pared porosa se reducirían en la misma medida. Todo esto conseguiría reducir ligeramente la caída de presión del filtro y el consumo para

todo el rango microestructural, a la vez que el número de Peclet y la eficiencia de filtrado se mantendrían a los mismos niveles, dado que la velocidad de filtrado se mantendría esencialmente constante a igualdad de gasto másico. Bajo estas condiciones de reducción de longitud, no se torna mandatorio tratar de recuperar las prestaciones que se tenían con mayor longitud y, por tanto, tampoco es necesario ningún cambio microestructural. Sin embargo, si se dispone el filtro en configuración pre-turbo, de nuevo se pueden sacrificar las mayores eficiencias de filtrado para conseguir reducciones todavía mayores en la caída de presión y el consumo. Desde este punto de vista, el área de filtrado juega un papel importante en las prestaciones del filtro y se confirman de nuevo las conclusiones extraídas en [4, 5]. A pesar de lo anterior, esta reducción se ve limitada por los menores valores del ancho de canal, ya que reducirlos en exceso supondría correr peligro por obstrucción de los canales. De este modo, la reducción de la longitud por esta vía implica una pérdida de la capacidad acumuladora de hollín del filtro, que es mayor que la que se perdía de la otra manera. Este mayor riesgo de obstrucción se podría compensar aprovechando las mayores temperaturas de la configuración pre-turbo con el fin de facilitar la activación de los procesos de regeneración pasiva.

Por todo lo afirmado, puede concluirse que se han desarrollado satisfactoriamente los objetivos propuestos en el trabajo.

## 5.2. Desarrollos futuros

No se puede cerrar el proyecto sin antes mencionar las posibles vías futuras de investigación a las que daría pie, del mismo modo que conviene mencionar los posibles estudios que completarían el proyecto desarrollado:

- En primer lugar, se propone estudiar los rangos de validez de la correlación empleada en el desarrollo del modelo 0D para el cálculo de la penetración del hollín en la pared porosa del filtro. Posteriormente a esto, se podría barajar la posibilidad de incluir este modelo 0D en el código de OpenWAM.
- Con el fin de abordar cualquier posible dependencia no cubierta en este proyecto, se propone investigar si alguno de los parámetros fijados en las hipótesis del estudio presenta alguna dependencia con el número de Peclet, cuyas características sean todavía desconocidas.
- Dada la no linealidad de la ecuación del número de Peclet y el carácter altamente pulsante en configuración pre-turbo, se propone investigar qué número de Peclet representa mejor los pulsos en esta configuración. Desde este punto de vista, hay dos opciones atendiendo a si este número es calculado a partir de cada una de las variables de las que depende promediadas en el intervalo de tiempo asociado al ciclo de motor, o a si este es calculado a partir de las variables instantáneas y, posteriormente, promediado a lo largo del ciclo de motor.

- 
- Para completar el proyecto, se propone realizar una serie de ensayos en banco motor con el fin de comprobar la fiabilidad de las simulaciones, tanto en configuración post-turbo como pre-turbo. Para ello, convendría elegir una microestructura del filtro limpio contemplada en el rango establecido en el estudio desarrollado.
  - El proyecto también podría ser completado ensayando varios filtros con una microestructura similar, pero diferentes longitudes, cubriendo los diferentes grados de libertad en la reducción de esta que han sido abordados en el presente trabajo. Todo esto con el fin de verificar las tendencias observadas a lo largo del estudio.



# Bibliografía

- [1] Sullivan J.L., Baker R.E., Boyer B.A., Hammerle R.H., Kenney T.E., Muniz L. y Wallington T.J. “*CO<sub>2</sub> emission benefit of diesel (versus gasoline) powered vehicles*”. Environmental Science and Technology 2004;38(12):3217e23.
- [2] Piqueras P. *Contribución al modelado termofluidodinámico de filtros de partículas Diésel de flujo de pared*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2010.
- [3] García-Afonso O. *Análisis teórico-experimental de la arquitectura pre-turbo de sistemas de post-tratamiento en MCI*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2013.
- [4] Serrano J.R., Climent H., Piqueras P. y Angiolini E. “*Analysis of fluid-dynamic guidelines in Diesel particulate filter sizing for fuel consumption reduction in post-turbo and pre-turbo placement*”. Appl. Energ. 2014;132:507-23.
- [5] Serrano J.R., Guardiola C., Piqueras P. y Angiolini E. “*Analysis of the aftertreatment sizing for pre-turbo DPF and DOC exhaust line configurations*”. SAE Technical Paper 2014-01-1498, 2014.
- [6] Serrano J.R., Climent H., Piqueras P. y Angiolini E. “*Filtration modelling in wall-flow particulate filters of low soot penetration thickness*”. Appl. Energy. 2016. Bajo revisión. EGY-D-15-02780R3.
- [7] Torregosa A.J., Serrano J.R., Arnau F.J. y Piqueras P. “*A fluid dynamic model for unsteady compressible flow in wall-flow Diesel particulate filters*”. Energy, 2011, 36, 671-684.
- [8] “*Regulation (EC) N 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information*”. Official Journal of the European Union, June 2007.
- [9] Rusell A. y Epling W.S. “*Diesel oxidation catalysts, catalysts review*”. Science and Engineering, Vol. 53(4), pp. 337-423, 2011.
- [10] Allansson R., Blakeman PG, Cooper B.J., Hess H., Silcock P.J. y Walker A.P “*Optimising the low temperature performance and regeneration efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (CR-DPF) system*”. SAE Technical Paper 2002-01-0428, 2002.

- [11] Konstandopoulos A.G. y Papaioannou E. “*Update on the science and technology of Diesel particulate filters*”. KONA Powder and Particle Journal, 26, pp. 36-65, 2008.
- [12] Bardasz E., Mackney D. Britton N., Kleinschenk G., Olofsson K. Murray I. y Walker A.P. “*Investigations on the interactions between lubricant-derived species and after-treatment systems on a state-of-the-art heavy duty Diesel engine*”. SAE Technical Paper 2003-01-1963, 2003.
- [13] Ogyu K., Ohno K., Hong S. y Komori T. “*Ash storage capacity enhancement of Diesel particulate filter*”. SAE Technical Paper 2004-01-0949, 2004.
- [14] Konstandopoulos A.G. y Johnson J.H. “*Wall-flow diesel particulate filters - Their pressure drop and collection efficiency*”. SAE Technical Paper 890405, 1989.
- [15] Posada F., Bandivadekar A. y German J. *Estimated cost of emission control technologies for light-duty vehicles. Part 2 - Diesel*. SAE Technical Paper 2013-01-0539, 2013.
- [16] “*Wall-flow monoliths*”. DieselNet Technology Guide, 2005.
- [17] Yuuki K., Ito T., Sakamoto H., Matsubara R., Hashimoto S. y Hamanaka T. “*The effect of SiC properties on the performance of catalyzed Diesel particulate filters (DPF)*”. SAE Technical Paper 2003-01-0383, 2003.
- [18] Ichiwaka S., Uchida Y., Otsuka A., Harada T. y Hamanaka T. “*Material development of high porous SiC for catalyzed Diesel particulate filters*”. SAE Technical Paper 2003-01-0380, 2003.
- [19] Payri F., Broatch A., Serrano J.R. y Piqueras P. “*Experimental-theoretical methodology for determination of inertial pressure drop distribution and pore structure properties in wall-flow Diesel particulate filters (DPFs)*”. Energy, 2011, 36, 6731-6744.
- [20] Konstandopoulos A.G. “*Flow resistance descriptors for Diesel particulate filters: definitions, measurements and testing*”. SAE Technical Paper 2003-01-0846, 2003.
- [21] Gulati S.T. “*Cell design for ceramic monoliths for catalytic converter application*”. SAE Technical Paper 881685, 1988.
- [22] Serrano J.R., Arnau F.J., Piqueras P. y García-Alfonso O. “*Packed bed of spherical particles approach for pressure drop prediction in wall-flow DPFs (Diesel particulate filters) under soot loading conditions*”. Energy, 2013, 58, 644-54.
- [23] Bisset E.J. “*Mathematical model of the thermal regeneration of a wall-flow monolith Diesel particulate filter*”. Chemical Engineering Science, 1984, 39, 1233-1244.
- [24] Cooper B.J., Jung H.J y Thoss J.E. “*Treatment of Diesel exhaust gases*”. Patent Application, US 4902487, 1990.
- [25] Bermudez V., Serrano J.R., Piqueras P. y García-Alfonso O. “*Analisis of heavy-duty turbocharged Diesel engine reponse under cold transient operation with pre-turbo after-treatment exhaust manifold configuration*”. International Journal of Engine Research, doi:10.1177/1468087412457670, 2012.

- 
- [26] <[www.openwam.org](http://www.openwam.org)>. Página web de OpenWAM, CMT-Motores Térmicos (Universitat Politècnica de València), 2012.
- [27] Galindo J., Serrano J.R., Arnau F.J. y Piqueras P. “*Description and analysis of a one-dimensional gas-dynamic model with independent time discretization*”. Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division 2008 Spring Technical Conference ICES2008, 2008.
- [28] Desantes J.M., Serrano J.R., Arnau F.J. y Piqueras P. “*Derivation of the method of characteristics for the fluid dynamic solution of flow advection along porous wall channels*”. Applied Mathematical Modelling 36 (7), 3134-3152, 2012.
- [29] Serrano J.R., Arnau F.J., Piqueras O.G. y García-Alfonso O. “*Application of the two-step Lax & Wendroff-FCT and the CE-SE method to flow transport in wall-flow monoliths*”. Int. J. Comput. Math., 2013;91(1):71?84.
- [30] Konstandopoulos A.G., Kostoglou M., Skaperdas E., Papaioannou E., Zarvalis D. y Kladopoulou E. “*Fundamental studies of Diesel particulate filters: transient loading, regeneration and aging*”. SAE Technical Paper 2000-01-1016, 2000
- [31] Payri F. y Desantes J.M. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Ed. Reverté, S.A., 2011, ISBN: 978-84-291-4802-2; Ed. Universitat Politècnica de València, 2011, ISBN: 978-84-8363-705-0, Ref: 0809\_04\_01\_04.





**Parte II**

**Pliego de condiciones**



# 1

## Ordenanzas de seguridad e higiene en el trabajo

---

En este capítulo se pretende exponer las ordenanzas a las cuales el trabajador debe atenerse a la hora de la realización de un proyecto y que se deberán cumplir, por parte de la empresa o centro de investigación, en términos de exigencias constructivas para preservar un ambiente adecuado para el trabajador. El proyectando como un trabajador más que contribuye al desarrollo de la empresa o centro de investigación mediante la realización del proyecto que constituye el Trabajo Fin de Grado, también debe de aferrarse a las ordenanzas que se le requiera y viceversa.

### 1.1. Obligaciones y derechos de los trabajadores

Es parte de la obligación de los trabajadores cooperar en la prevención de riesgos profesionales en la empresa o centro de investigación y el mantenimiento de la máxima higiene en la misma. Con este fin deben cumplir fielmente los preceptos de esta ordenanza y de sus instrucciones complementarias, así como las órdenes e instrucciones, que a tales efectos les sean dados por sus superiores.

Los trabajadores, expresamente, están obligados a:

- Recibir las enseñanzas necesarias sobre materia en seguridad e higiene y sobre salvamento y socorrismo en los centros de trabajo que les sean facilitados por la empresa o centro de investigación o en las instrucciones del Plan Nacional.
- Usar correctamente los medios de protección personal y cuidar de su perfecto estado de conservación.
- Dar cuenta inmediatamente a sus superiores de las averías y las deficiencias que puedan ocasionar peligros en el centro o puesto de trabajo.
- Cuidar y mantener su higiene personal para evitar enfermedades contagiosas o molestias a los compañeros de trabajo.
- Someterse a los reconocimientos médicos preceptivos y vacunaciones o inmunizaciones ordenados por las autoridades sanitarias competentes o por el servicio médico de la empresa.

- No introducir sustancias no autorizadas en el centro de trabajo. Tampoco debe presentarse o permanecer en el mismo en estado de embriaguez o de cualquier otro género de intoxicación.
- Cooperar en la extinción de siniestros y en el salvamento de las víctimas de accidentes de trabajo en las condiciones que, en cada caso, fueren racionalmente exigibles.
- Todo trabajador, después de solicitar de su inmediato superior medios de protección personal de carácter preceptivo para la realización de su trabajo, queda facultado para demostrar la ejecución del mismo, en tanto no le sean facilitados dichos medios, si bien debe dar cuenta del hecho al Comité de Seguridad e Higiene o a uno de sus compañeros, sin perjuicio, además de ponerlo en conocimiento de la Inspección Provincial de Trabajo.

## 1.2. Seguridad estructural

Todos los edificios permanentes o provisionales, deben ser de construcción segura y firme para evitar riesgos de desplome y los derivados de los fenómenos atmosféricos. Por este motivo los cimientos, pisos y demás elementos de los edificios deben de ofrecer resistencia suficiente para sostener y suspender con seguridad, las cargas para los que han sido calculados.

Además, para preservar esta seguridad, se debe indicar por medio de rótulos o inscripciones las cargas que los locales pueden soportar o suspender, quedando prohibido bajo cualquier concepto sobrecargar los pisos y plantas de los edificios.

## 1.3. Superficies y cubicación

Los locales de trabajo reunirán las siguientes condiciones mínimas:

- 3  $m$  de altura desde el piso al techo.
- 2  $m^2$  cuadrados de superficie por cada trabajador.
- 10  $m^3$  cúbicos para cada trabajador.

No obstante, en locales destinados a oficinas y despachos la altura a que se refiere el apartado 1 puede quedar reducida hasta 2.5  $m$ , pero respetando la cubicación que se establece en el tercer apartado y siempre que el aire se renueve con la suficiente frecuencia.

Para el cálculo de la superficie y el volumen requeridos, no se ha de tener en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

## 1.4. Suelos, techos y paredes

El pavimento debe constituir un conjunto homogéneo, llano y liso, de material consistente, no resbaladizo o susceptible de serlo con el uso y además de fácil limpieza. Debe estar al mismo nivel, y de no ser así, se han de tratar de salvar las diferencias de altura por medio de rampas con pendientes no superiores al 10 %.

Por otro lado, tanto los techos como las paredes, deben reunir las condiciones suficientes para resguardar a los trabajadores de las inclemencias del tiempo. Si han de soportar o suspender cargas deben reunir las condiciones que se establezcan para estos en el punto 1.2.

## 1.5. Disposiciones generales

Todos los lugares de trabajo o tránsito han de tener iluminación natural, artificial o mixta, pero en cualquier caso apropiado a las operaciones que en ellos se estén llevando a cabo. Aunque la luz, como se acaba de comentar puede ser natural o artificial, se debe intentar en la medida de lo posible que ésta sea natural.

Se debe intensificar la iluminación en máquinas peligrosas, lugares de tránsito con riesgo de caídas, escaleras y salidas de urgencia con el fin de preservar la seguridad en el ámbito de trabajo.

## 1.6. Iluminación de emergencia

En todo centro de trabajo, se ha de disponer de medios de iluminación de emergencia adecuados a las dimensiones de los locales y al número de trabajadores ocupados simultáneamente, capaces de mantener al menos durante una hora la intensidad de cinco luxes y mediante una fuente de energía que será independiente del sistema normal de iluminación.

## 1.7. Ventilación, temperatura y humedad

En los lugares de trabajo y sus anexos se debe mantener, por medios naturales o artificiales, unas condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor o de frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

En ningún caso, el anhídrido carbónico ambiental, debe sobrepasar la proporción de 50/10000, y el monóxido de carbono, la de 1/10000.

En locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y por trabajador, debe ser de al menos 30 m<sup>3</sup>, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios, ni a diez veces para trabajos que exijan un esfuerzo físico superior al normal. En el otro extremo, la circulación

de aire en locales cerrados debe ser acondicionada de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 m/min con temperatura normal, ni de 45 m/min en ambientes extremadamente calurosos.

En centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas, se debe evitar las variaciones bruscas por el medio de aplicación que se considere más eficaz. Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deben existir locales de paso para que los trabajadores se adapten gradualmente de unas condiciones a las otras.

De acuerdo con todo lo anterior, se fijan en locales destinados a un tipo de trabajo en particular y siempre que el procedimiento de fabricación lo permita, los siguientes límites de temperatura:

- Para trabajos sedentarios: de 17 a 22 °C.
- Para trabajos ordinarios: de 15 a 18 °C.
- Para trabajos que exijan acusados esfuerzos musculares: de 12 a 15 °C.

A pesar de estas limitaciones, todos los trabajadores deben estar debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor. La humedad relativa de la atmósfera debe oscilar entre el 40 al 60 %, salvo en instalaciones que haya peligro de generarse electricidad estática, en cuyo caso este valor se debe limitar necesariamente por debajo del 50 %.

## 1.8. Ruidos, vibraciones y trepidaciones

Los ruidos y vibraciones se deben tratar de evitar o reducir en la medida de lo posible en su foco de emisión, tratando de aminorar su propagación en locales en los que se encuentren personas trabajando.

De esta forma, el anclaje de máquinas y aparatos generadoras de ruidos, vibraciones y trepidaciones se ha de realizar con aplicación de las técnicas más eficaces, a fin de lograr su óptimo equilibrio estático y dinámico, tales como bancadas cuyo peso sea superior entre 1.5 y 2.5 veces el peso de la máquina que soportan, por aislamiento de la estructura general o por otros recursos técnicos.

Además del anclaje, las máquinas que produzcan ruidos o vibraciones molestas deben ser aisladas adecuadamente y en el recinto de aquellas, sólo debe trabajar el personal correspondiente para su mantenimiento durante el tiempo indispensable y con el equipamiento requerido para mantener los niveles de seguridad necesarios.

Se debe extremar el cuidado y mantenimiento de las máquinas u aparatos que produzcan vibraciones molestas o peligrosas a los trabajadores y muy especialmente los órganos móviles y los dispositivos de transmisión de movimiento de las vibraciones que generan

estas máquinas.

El control de ruidos agresivos en centros de trabajo no se limita únicamente al aislamiento del foco que los produce, sino que también se han de adoptar las prevenciones técnicas que se requieran para evitar que los fenómenos de reflexión y resonancia alcancen niveles peligrosos para la salud de los trabajadores.

### 1.9. Protección contra contactos en equipos eléctricos

En las instalaciones y equipos eléctricos, para la protección de las personas contra los contactos con partes habitualmente en tensión, se deben adoptar algunas de las siguientes prevenciones:

- Se debe tratar de alejar las partes activas de la instalación a una distancia suficiente del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan, para evitar un contacto fortuito o por la manipulación de objetos conductores.
- Se deben recubrir las partes activas con el aislamiento apropiado, que permita conservar indefinidamente las propiedades del conductor y que limiten la corriente de contacto a un valor inocuo para las personas.
- Se deben situar obstáculos que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. Los obstáculos de protección deben estar fijados en forma segura y ser capaces de resistir los esfuerzos mecánicos usuales. Para la protección contra los riesgos de contacto con las masas de las instalaciones que puedan quedar accidentalmente con tensión, se deben adoptar, en corriente alterna varios dispositivos de seguridad. Entre ellos están comprendidos los dobles aislamientos en los equipos y máquinas eléctricas, las conexiones equipotenciales, los dispositivos de corte automático o aviso como interruptores diferenciales o relés a tierra y la separación de los circuitos de utilización de las fuentes de energía por medio de transformadores o grupos convertidores.
- En el caso de que existan circuitos alimentados mediante corriente continua, también se deben de adoptar sistemas de protección adecuados para cada caso, similares a los que se acaban de mencionar para la corriente alterna.

### 1.10. Electricidad estática

Para evitar peligros por acumulación de electricidad estática, y especialmente aquellos que pueden venir propiciados por la producción de una chispa en ambientes inflamables, se deben de adoptar alguna o incluso ambas precauciones que a continuación se especifican:

- La humedad relativa del aire se debe mantener siempre con un valor por debajo del 50 %.
- Las cargas de electricidad estática que puedan acumularse en los cuerpos metálicos, deben ser neutralizadas por medio de la conexión de conductores a tierra.

### 1.11. Recomendaciones sobre materias inflamables

Con respecto al almacenamiento y a la manipulación de sustancias inflamables, dada su peligrosidad, se deben cumplir una serie de medidas con el fin de evitar cualquier accidente:

- Se prohíbe el almacenamiento conjunto de materiales que al reaccionar entre sí pueden originar incendios.
- Sólo se puede almacenar materiales inflamables en los lugares y con los límites cuantitativos señalados por los reglamentos técnicos vigentes. De esta forma se han de almacenar en locales distintos a los de trabajo. Si el local de trabajo es único, se debe construir recintos aislados.
- En los almacenes de materias inflamables, los pisos deben ser incombustibles y además impermeables, a fin de evitar la propagación del posible fuego y evitar escapes hacia sótanos, sumideros o desagües respectivamente.
- Antes de almacenar sustancias inflamables pulverizadas, se debe comprobar su enfriamiento.
- El llenado de los depósitos de líquidos inflamables, se debe efectuar lentamente y evitando la caída libre desde orificios de la parte superior, para evitar la mezcla de aire con los vapores explosivos. Estos recipientes de líquidos, además se han de rotular indicando su contenido y las precauciones necesarias que se han de tomar para su manipulación.
- Antes de almacenar envases de productos inflamables, se ha de comprobar su cierre hermético y si han sufrido algún deterioro o rotura, para evitar posibles fugas.
- El envasado y embalaje de sustancias inflamables se ha de efectuar, en la medida de lo posible, fuera de los almacenes de donde procedan, con las precauciones y equipo de protección adecuado a cada caso.

### 1.12. Prevención y extinción de incendios

En centros de trabajo que ofrezcan peligro de incendios, con o sin explosión, se han de adoptar las prevenciones que se indican a continuación, combinando su empleo con la protección general más próxima que puedan prestar los servicios públicos contra incendios disponibles:

- Donde existan conducciones de agua a presión, se han de instalar suficientes tomas o bocas de agua a distancia conveniente entre sí y cercanas a los puestos fijos de trabajo y lugares de paso personal.
- Cuando se carezca normalmente de agua a presión o ésta sea insuficiente, se deben instalar depósitos provistos de volumen de agua suficiente para poder combatir los posibles incendios.



- En los incendios provocados por líquidos, grasas, pinturas inflamables o polvos orgánicos, solo se ha de emplear agua, y esta debe estar además muy pulverizada.
- No se debe emplear agua para extinguir fuegos en polvos de aluminio o magnesio en presencia de carburo de calcio u otras sustancias que al contacto con el agua produzcan explosiones, gases inflamables o incluso nocivos.
- En incendios que afecten a instalaciones eléctricas con tensión, queda terminantemente prohibido el empleo de extintores de espuma química, soda ácida o agua.
- En la proximidad a los puestos de trabajo con mayor riesgo de incendio, se debe disponer, colocados en sitio visible y accesible fácilmente, extintores portátiles o móviles sobre ruedas, de espuma física o química, mezcla de ambas o polvos secos, anhídrido carbónico o agua, según convenga a la causa determinante del fuego a extinguir que sea más probable que haga su aparición.
- Cuando se empleen distintos tipos de extintores, estos deben ser rotulados con carteles indicadores del lugar o clase de incendio en el que deban emplearse. Estos extintores han de ser revisados periódicamente y cargados según las normas de las casas constructoras inmediatamente después de usarlos.
- El personal debe estar instruido, cuando sea necesario, en lo referente al peligro que presenta el empleo de tetracloruro de carbono y cloruro de metilo en atmósferas cerradas y de las reacciones químicas peligrosas que puedan producirse en los locales de trabajo entre los líquidos extintores y las materias sobre las que puedan proyectarse.
- En las dependencias con alto riesgo de incendio, queda terminantemente prohibido fumar o introducir cerillas, mecheros o útiles de ignición. Esta prohibición se ha de indicar con carteles visibles a la entrada y en los espacios libres de las paredes de tales dependencias.
- Se prohíbe igualmente al personal introducir o emplear útiles de trabajo, no autorizados por la empresa o centro de investigación que puedan ocasionar chispas por contacto o proximidad a sustancias inflamables.
- Es obligatorio el uso de guantes, manoplas, mandiles o trajes ignífugos, y de calzado especial contra incendios, que la empresa o centro de investigación ha de facilitar a sus respectivos trabajadores para uso individual.



**Parte III**

**Presupuesto**



# 1

## Introducción

---

El presente presupuesto corresponde al proyecto *Estudio de la Influencia del Número de Peclet sobre la Eficiencia de Filtrado y la Pérdida de Presión de Filtros de Partículas Diésel* realizado en el Instituto Universitario CMT - Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Cabe decir que, en cuanto a los recursos económicos se refiere, el propio Instituto de Investigación es el encargado de la financiación del proyecto, así como de asegurar su viabilidad en términos de herramientas informáticas, equipos, materiales y recursos humanos.

El fin del presente documento es proporcionar una estimación de la cuantía global necesaria para la realización del proyecto. El presupuesto se aborda por separado desde el punto de vista del coste parcial de la mano de obra, la amortización de los equipos necesarios para su desarrollo y el material fungible empleado. En última instancia se proporcionará el presupuesto global.

Para poder abordar el presupuesto se hace necesario definir la duración del proyecto, las etapas por las que ha pasado el mismo y la mano de obra que ha formado parte de la realización del mismo.

En lo que respecta a la duración del proyecto, este ha comprendido un periodo total de 8 meses.

En cuanto a la mano de obra participante, el proyecto ha requerido la dirección y tutela de un profesor contratado doctor (tutor del proyecto) y el apoyo de un doctorando (director experimental del proyecto), además de la realización del mismo por parte de un becario (autor del proyecto). A todos ellos se les corresponde una tasa horaria específica.

En relación a las fases del proyecto, en una primera etapa se definieron los objetivos del proyecto y los medios para su consecución. Para ello, se requirió la presencia del tutor y del director experimental del proyecto.

La segunda fase consta del desarrollo del estudio computacional propuesto en la primera fase, de su postprocesado y del análisis de sus resultados. Esta etapa, de duración aproximada de 8 meses, ha sido llevada a cabo por un estudiante de ingeniería aeroes-

pacial beneficiario de una beca de colaboración (autor del trabajo). Simultáneamente, se realizaban frecuentes reuniones con el fin de desarrollar análisis exhaustivos referentes a los resultados obtenidos.

Con todo esto ya se puede proceder a abordar una estimación del presupuesto que el proyecto conlleva.

# 2

## Balance de presupuesto

---

Los costes del proyecto se pueden dividir atendiendo a las fases del mismo según costes asociados a las reuniones y costes asociados al estudio computacional. Siguiendo esta división de los costes, se procede a realizar su balance.

### 2.1. Partida de reuniones

Mano de obra, amortización de unos equipos en particular y algunos de los materiales fungibles empleados en el proyecto conforman los gastos asociados a la partida de reuniones. Atendiendo a esto, se procede a realizar las estimaciones correspondientes.

#### 2.1.1. Costes de mano de obra

La mano de obra asociada a este motivo comprende principalmente el coste de un profesor contratado doctor, de un doctorando y de un becario (autor del trabajo), a los cuales les corresponde unas tasas horarias específicas de 50.00 €/h, 25.00 €/h y 15.00 €/h, respectivamente.

Como se ha mencionado, hubo reuniones a lo largo de casi la totalidad del periodo correspondiente al proyecto, cada una de ellas con diferentes integrantes.

Las reuniones referentes al establecimiento de los objetivos, correspondientes a la primera fase, se realizaron al comienzo del proyecto y en ellas formaron parte el profesor contratado doctor y el doctorando durante un tiempo total de 8 h. Su coste queda mostrado en la Tabla 2.1.

Las reuniones correspondientes a la realización propia del proyecto forman parte de la segunda fase. Estas reuniones se pueden agrupar en varios tipos según las personas que han participado en las mismas.

**Tabla 2.1:** Coste de mano de obra asociado a las reuniones correspondientes a la planificación del proyecto.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	<b>[h]</b>	<b>[€/h]</b>	<b>[€]</b>
Profesor contratado doctor	8	50.00	400.00
Doctorando	8	25.00	200.00
<b>Subtotal</b>			<b>600.00</b>

En primer lugar, las reuniones entre profesor contratado doctor y el autor del proyecto a razón de 30 min/semana se muestran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2:** Coste de mano de obra asociado a las reuniones entre profesor contratado doctor y becario.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	<b>[h]</b>	<b>[€/h]</b>	<b>[€]</b>
Profesor contratado doctor	16	50	800.00
Becario	16	15	240.00
<b>Subtotal</b>			<b>1040.00</b>

En segundo lugar, las reuniones realizadas entre profesor contratado doctor, doctorando y becario a razón de 30 min/semana se muestran en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3:** Coste de mano de obra asociado a las reuniones entre profesor contratado doctor, doctorando y becario.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	<b>[h]</b>	<b>[€/h]</b>	<b>[€]</b>
Profesor contratado doctor	16	50	800.00
Doctorando	16	25.00	400.00
Becario	16	15.00	240.00
<b>Subtotal</b>			<b>1440.00</b>

Finalmente, las reuniones entre doctorando y becario a razón de 1.5 h/semana se muestran en la Tabla 2.4.



**Tabla 2.4:** Coste de mano de obra asociado a las reuniones entre doctorando y becario.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	<b>[h]</b>	<b>[€/h]</b>	<b>[€]</b>
Doctorando	48	25.00	1200.00
Becario	48	15.00	720.00
<b>Subtotal</b>			<b>1920.00</b>

Con todo esto, el coste asociado a la mano de obra de la partida de reuniones se puede resumir como muestra la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5:** Coste de mano de obra asociado a la partida de reuniones.

<b>Concepto</b>	<b>Importe [€]</b>
Profesor contratado doctor	2000.00
Doctorando	1800.00
Becario	1200.00
<b>Subtotal</b>	<b>5000.00</b>

### 2.1.2. Costes de amortización de equipos

La partida de reuniones también lleva asociados unos costes debidos a la amortización de los equipos empleados. Estos equipos o licencias no han sido adquiridos durante y para la consecución de este trabajo por lo que el coste de compra de los mismos no se encontrará incluido, contabilizando únicamente la amortización de los mismos durante el periodo del proyecto. Además, los equipos empleados con este fin son diferentes a los empleados en otras fases del proyecto, en particular el ordenador con sus licencias correspondientes.

Para simplificar el balance se va a suponer que los equipos tienen un periodo de amortización total de 5 años y que el precio mostrado de las licencias, compradas de manera colectiva para la totalidad del Instituto, incluye 5 años de pago.

Estos costes aparecen reflejados en las Tablas 2.6 y 2.7.

**Tabla 2.6:** Coste de los equipos asociados a la partida de reuniones.

<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
	<b>[€]</b>
Ordenador	700.00
Licencia Microsoft Office 2013	230.00

**Tabla 2.7:** Equipos y coste de amortización de los equipos en la partida de reuniones.

<b>Coste equipos</b>	<b>930.00</b>	<b>[€]</b>
Período de amortización	5	[años]
Período amortizado	8	[meses]
Coste anual amortización	186.00	[€]
Coste mensual amortización	15.50	[€]
<b>Coste amortización de los equipos</b>	<b>124.00</b>	<b>[€]</b>

### 2.1.3. Costes de material fungible

Finalmente, la partida de reuniones queda definida teniendo en cuenta el material fungible empleado en la misma, el cual queda resumido en la Tabla 2.8.

Cabe mencionar que estos costes hacen referencia al material que ha sido consumido en su totalidad durante la realización del proyecto, descartando cualquier coste asociado a material con vida útil activa.

**Tabla 2.8:** Coste del material fungible asociado a la partida reuniones.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	<b>[-]</b>	<b>[€/ud]</b>	<b>[€]</b>
Papel	100	0.01	1.00
Bolígrafo	1	0.25	0.25
<b>Subtotal</b>			<b>1.25</b>

## 2.2. Partida de estudio computacional

El concepto asociado al estudio computacional no solo comprende el cálculo, sino que también comprende su postprocesado para facilitar la comprensión. Además, requiere de plasmar en documentos las conclusiones obtenidas a partir de los análisis referentes. Tal concepto conlleva unos gastos debidos a la mano de obra, amortización de equipos y material fungible, al igual que la partida de reuniones.

### 2.2.1. Costes de mano de obra

La mano de obra se corresponde con el trabajo llevado a cabo por el autor del proyecto durante las horas que se estima que ha realizado.

Teniendo en cuenta esto, el coste asociado a la mano de obra durante esta etapa se muestra en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9:** Coste de mano de obra asociado a la realización del estudio computacional.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	[h]	[€/h]	[€]
Becario	500	15.00	7500.00
<b>Subtotal</b>			<b>7500.00</b>

### 2.2.2. Costes de amortización de equipos

El principal programa utilizado para los cálculos es el software OpenWAM de acceso libre, por lo que los costes referentes a esta parte recaen sobre los programas auxiliares empleados para el postprocesado de los cálculos y los equipos utilizados para ello.

Sabiendo lo anterior, los equipos y costes de amortización de los mismos se resumen en las Tablas 2.10 y 2.11.

**Tabla 2.10:** Equipos en la partida de realización del estudio computacional.

<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
	[€]
Ordenador	600.00
Impresora	80.00
Licencia Corel Draw X5	150.00
Licencia Grapher 10	490.00
Licencia Microsoft Office 2013	230.00
Licencia Matlab 2012	500.00

**Tabla 2.11:** Amortización de los equipos en la partida de estudio computacional.

<b>Coste equipos</b>	<b>2050.00</b>	<b>[€]</b>
Período de amortización	5	[años]
Período amortizado	8	[meses]
Coste anual amortización	410.00	[€]
Coste mensual amortización	34.17	[€]
<b>Coste amortización de los equipos</b>	<b>273.33</b>	<b>[€]</b>

### 2.2.3. Costes de material fungible

Del mismo modo que se ha realizado hasta ahora, los materiales consumidos en esta fase del proyecto se resumen en la Tabla 2.12.

**Tabla 2.12:** Coste del material fungible asociado a la partida de estudio computacional.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Importe</b>
	<b>[-]</b>	<b>[€/h]</b>	<b>[€]</b>
Papel	100	0.01	1.00
Bolígrafo	2	0.25	0.50
Subrayador	2	0.85	1.70
Toner negro	1	80.00	80.00
Toner color	1	130.00	130.00
<b>Subtotal</b>			<b>213.20</b>

# 3

## Presupuesto global

---

Finalmente, se puede calcular el coste global del trabajo en base a todo lo anterior. Este coste global ha de ser tomado como una estimación de lo que implica cumplir los objetivos del proyecto, y se muestra en la Tabla 3.1.

Cabe destacar que los costes de la mano de obra no incluyen el IVA (21.00 %), mientras que los costes asociados a otros conceptos sí que lo incluyen.

**Tabla 3.1:** Coste total del proyecto aplicado el IVA asociado a la mano de obra.

<b>Concepto</b>	<b>Coste [€]</b>
Mano de obra (sin IVA)	12500.00
Mano de obra (con IVA)	15125.00
Amortización de los equipos	397.33
Material fungible	214.45
<b>Total</b>	<b>15736.78</b>