



## GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL USO DE LOS SISTEMAS DPF EN MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA



## **Guía de buenas prácticas para el uso de los sistemas DPF en maquinaria móvil no de carretera**

Documento elaborado en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 1) financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE y ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico - Swisscontact

La presente guía metodológica es de carácter informativo y no necesariamente refleja los puntos de vista u opiniones de las organizaciones y gobiernos participantes.

Las denominaciones utilizadas y la presentación del material de esta publicación no implican en lo absoluto la expresión de ninguna opinión sobre el estatus legal de un país, territorio, ciudad o área, sobre sus autoridades.

Lo contenido en este documento debe ser estudiado con cuidado, por las entidades o gobiernos interesados, considerando las condiciones locales propias (ej. riesgos para salud, viabilidad tecnológica, aspectos económicos, factores políticos y sociales, nivel de desarrollo, la capacidad nacional o local, entre otros) antes de adoptar total o parcialmente contenidos de esta guía directamente en instrumentos con validez jurídica.

Elaborado por:

**Mijahil Aliosha Reinoso Duran**  
Experto en Maquinaria Non-Road

Revisado por:

**Adrián Montalvo**  
Director Programa CALAC+

**Helberth Santiago Morales Pinilla**  
Coordinador Non-Road CALAC+

Fotografía de Portada:

TECSUP sede Lima, Perú; AVESCO Langenthal Suiza (abajo); Minicargador en vía pública en Lima, Perú (arriba).

Edición: febrero 2020

El Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina (CALAC+) persigue una visión de ciudades más sanas que reducen sus emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI), mediante el fomento de un cambio hacia autobuses urbanos y maquinaria móvil no de carretera libres de hollín y bajos en emisiones de carbono.

Esta guía forma parte de una serie de 7 documentos técnicos desarrollados por CALAC+ para fomentar el conocimiento y la gestión ambiental de reducción de emisiones de maquinaria en el contexto latinoamericano. Los temas tratados incluyen la generación de inventarios, estimación de contaminantes, sistemas de control de emisiones, políticas de estándares normativos y fiscalización de las medidas adoptadas.

*La Guía de buenas prácticas para el uso de los sistemas DPF en maquinaria móvil no de carretera* propone una serie de medidas asociadas al tratamiento post emisiones en motores reacondicionados o nuevos con DPF (Diesel Particle Filter) de manera que se garanticen sus propiedades de reducción de emisiones a lo largo de la vida útil de los motores de la maquinaria de construcción.

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. LA TECNOLOGÍA DPF.....</b>	<b>9</b>
<b>3. REACONDICIONAMIENTO CON DPF.....</b>	<b>17</b>
<b>4. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....</b>	<b>25</b>
<b>5. ACRÓNIMOS.....</b>	<b>32</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>34</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### **Efectos en la salud de las emisiones Diésel**

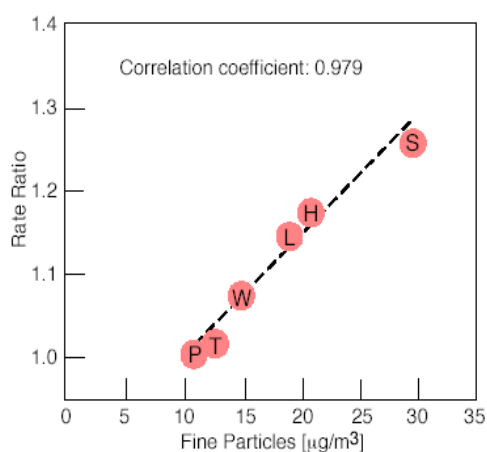
En la actualidad, prácticamente toda la maquinaria de construcción es propulsada por motores diésel, los que se prefieren a otras alternativas por su rendimiento energético, sus prestaciones y durabilidad.

No obstante, estos motores emiten pequeñísimas partículas que son nocivas para la salud y de alto impacto para el cambio climático. Son las partículas diésel ultrafinas, que, debido a su reducido tamaño, comparable al de los virus (en torno a los 100 nanómetros), y a su condición sólida e insoluble, pueden ingresar a través de los pulmones al torrente sanguíneo, depositándose posteriormente en diferentes partes del organismo. También son el transporte de otras sustancias tóxicas, tal como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs).

La incidencia que estas partículas tienen en las enfermedades respiratorias, en diversos tipos de cáncer y en los infartos al corazón, se encuentran suficientemente documentadas por la comunidad científica, tanto toxicológicamente (efectos en el organismo humano) como epidemiológicamente (estadísticos de la salud de la población).

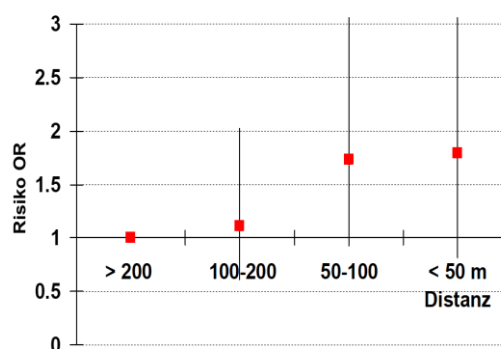
En cuanto a su impacto en el cambio climático, las partículas diésel están formadas por Carbono Negro (hollín), que es una sustancia de efecto invernadero clasificada como la número dos, después del CO<sub>2</sub>, en la responsabilidad por el calentamiento global. Adicionalmente, por tratarse de un contaminante de efecto invernadero de vida corta, su reducción presenta efectos inmediatos en el clima.

**Figura 1:** Correlación entre mortalidad y concentración de partículas.



Fuente: Dockery 1993

**Figura 2:** Riesgo de ataque cardiaco en relación con la distancia del hogar a la carretera.



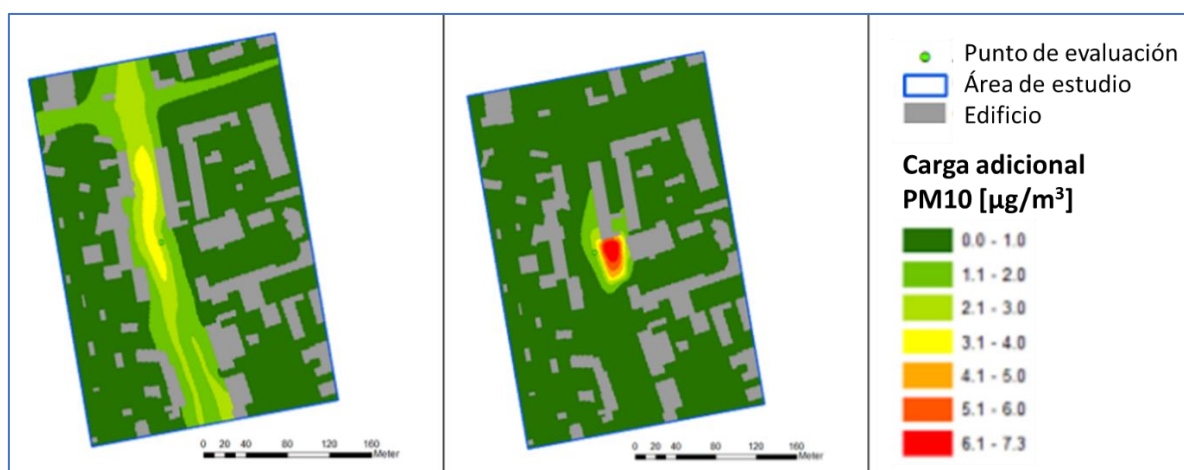
Fuente: Hoffmann 2006

### Maquinaria de construcción y contaminación atmosférica

El problema de la emisión de partículas de los motores diésel es particularmente crítico en la maquinaria de construcción urbana debido a que la legislación de emisiones para la maquinaria fuera de ruta se encuentra en general rezagada respecto de otras fuentes similares como los motores en ruta, principalmente en los países emergentes.

Un ejemplo de esto es el resultado obtenido por un modelo de cálculo realizado por el Instituto IFEU (Institut für Energie und Umweltforschung), con cinco máquinas de construcción estándar Stage II funcionando durante un año en horario de 8:00 a 16:00 hrs., entregando una carga de material particulado al aire, responsable del incremento de entre 6 a 7 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ], versus el aporte del tráfico circundante con 46.500 al día, y que representa un aumento de las concentraciones de entre 3 a 4 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]<sup>1</sup>.

**Figura 3:** Valor medio anual de la carga adicional local de MP10 del gas de escape causado por el tráfico (izquierda) y un sitio de construcción de la muestra (derecha) para el área de estudio.



Fuente: [UBA 2014]

### La solución

Consientes de este grave problema, las autoridades ambientales europeas han avanzado hacia la implementación de estándares más exigentes, con la incorporación de la norma Stage V, que obliga al cumplimiento de un límite máximo de emisiones de partículas ultrafinas. Estas se regulan mediante el límite de número de partículas (NP) por unidad de energía mecánica liberada por el motor ( $10^{12}$  part./kW-hr). Dicho estándar ha implicado la incorporación obligada de sistemas DPF (Diesel Particle Filter), en los motores de la maquinaria de construcción nueva. El sistema permite la filtración de las partículas ultrafinas en más de un 99% y puede ser instalado no sólo en los motores Stage V, que lo incorporan de fábrica, sino que, en la maquinaria en uso (recondicionamiento), lo que se hace necesario de considerar toda vez que la vida media de estas máquinas puede llegar a los 20 años, lo que hace sumamente lento el reemplazo de la flota por los nuevos motores Stage V.

<sup>1</sup> La información de este párrafo proviene de [BERLIN 2015]

**Figura 4:** Motor Caterpillar estándar Stage V de un cargador frontal con sistema de control de emisiones DPF y SCR.

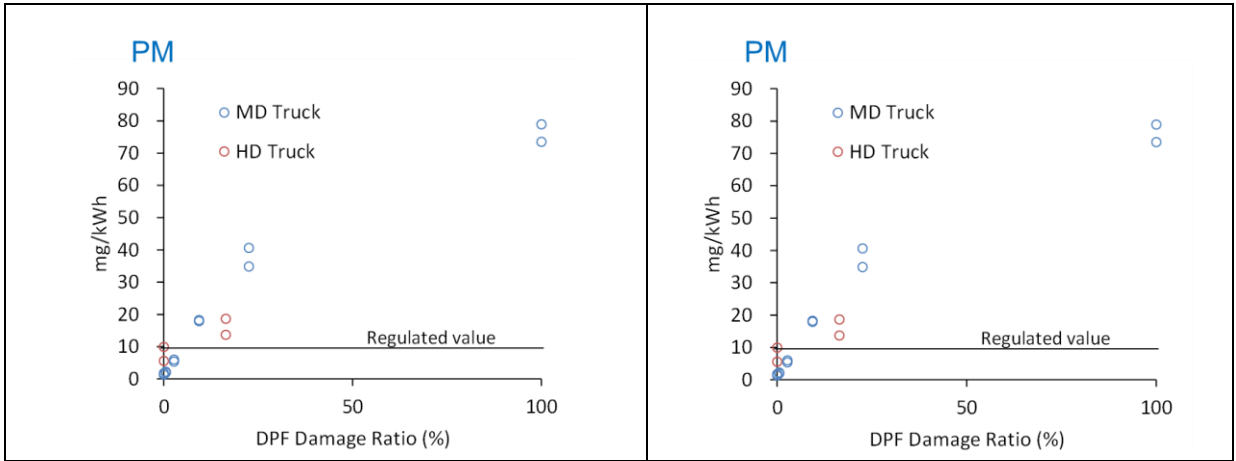


Fuente: Vista a AVESCO, Suiza 2018.

No obstante, la incorporación del DPF como sistemas de post tratamiento de emisiones, ha hecho que las emisiones de los motores reacondicionados o nuevos con DPF, sean muy sensibles a la condición de estos sistemas de post tratamiento, con un alto impacto en las emisiones del vehículo. Como resultado de lo anterior, una falla en un sistema de post tratamiento de un motor diésel puede incrementar las emisiones de 2 a 3 órdenes de magnitud.

Un estudio realizado por Yamada et al (NTSEL-2015), demostró que con daño del 0,5% en la superficie del DPF las emisiones de un motor Euro VI puede exceder el límite de emisiones de Número de Partículas (NP). Con un 100% de daño en el DPF las emisiones superaron el límite de NP en 40.000 veces. El alto impacto que tiene la falla de estos sistemas de post tratamiento, hace del cuidado bajo buenas prácticas de mantenimiento y control un tema prioritario.

**Figura 5:** Emisiones en función de la tasa de daño en un DPF.



Fuente: Yamada et al (NTSEL-2015)



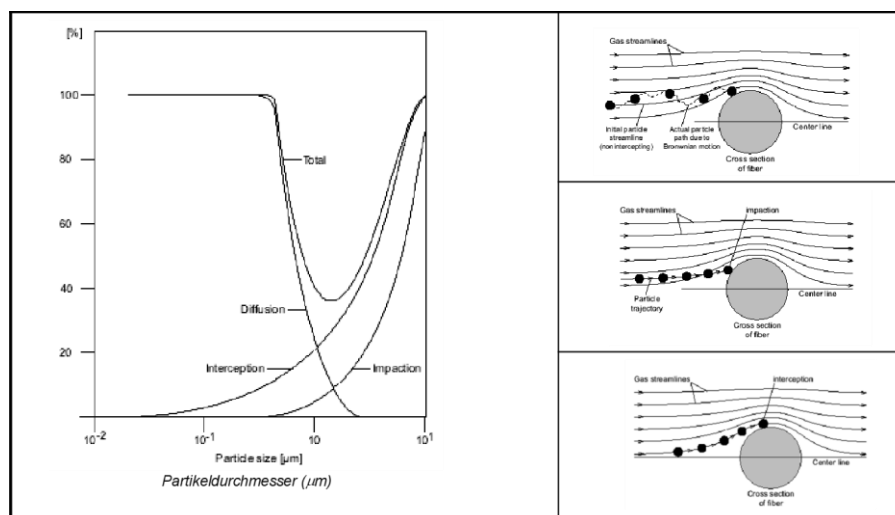
## 2. LA TECNOLOGÍA DPF

Los Filtros de partículas Diésel (DPF), son dispositivos que capturan las partículas provenientes de los motores Diésel. Este tipo de tecnología ha demostrado ser la más eficaz para el control de partículas diésel, tanto en masa (reduce aproximadamente el 90% de la masa del material particulado), como en número de partículas (reduce aproximadamente el 99% de la cantidad de partículas).

### Módulo filtrante

Los DPF retienen el material particulado que viaja en los gases de escape, haciéndolos pasar por un módulo filtrante (sustrato poroso). La retención de las partículas se produce mediante tres mecanismos, de los cuales el mecanismo preponderante depende del tamaño de las partículas, estos son: intercepción, difusión e impacto. Por intercepción se entiende el contacto de las partículas de mayor tamaño y masa en el flujo, que por razones de inercia siguen una trayectoria rectilínea dentro del sustrato poroso, impactando con las paredes de este, ante un cambio en la trayectoria del flujo. Por difusión se entiende el impacto de las partículas más pequeñas y livianas, afectadas por el movimiento browniano en dirección perpendicular al flujo, por lo tanto, con una alta probabilidad de impactar lateralmente con las paredes del sustrato. Por último, están aquellas partículas que, arrastradas por el flujo de gases, pasan suficientemente próximas a las paredes del sustrato como para hacer contacto (impacto). En todos los casos de contacto de las partículas con la superficie filtrante, las tensiones superficiales retienen a la partícula en las paredes del filtro.

**Figura 6:** Mecanismos físicos de deposición de nanopartículas en el material filtrante.

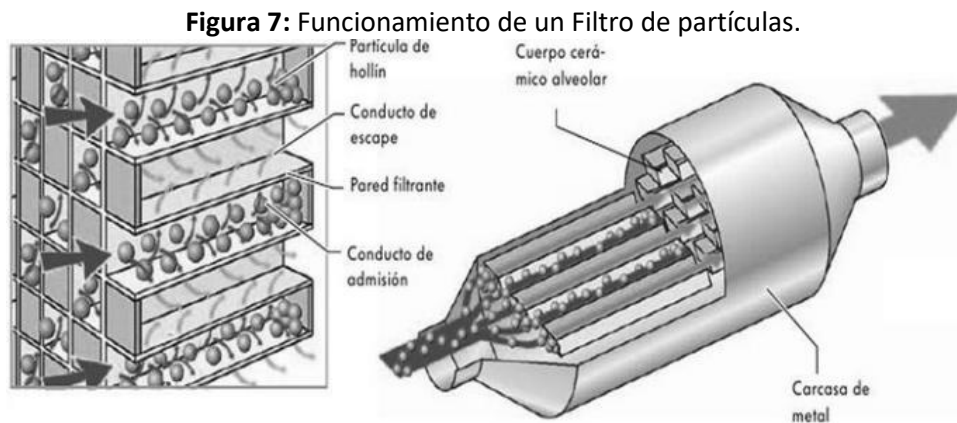


Fuente: TTM Mayer.

Ya que las partículas ultrafinas son filtradas principalmente por el fenómeno de la difusión es necesario, para los filtros diésel, optimizar dicho mecanismo considerando bajar la velocidad de

la partícula y aumentar la superficie del elemento filtrante. Esto resulta determinante a la hora de escoger un material filtrante cuya porosidad y tamaño optimicen este fenómeno. Existen diferentes materiales filtrantes, como por ejemplo la corderita, el carburo de silicio, metal sinterizado e incluso filtros desechables de papel.

En un filtro cerrado todos los gases de escape están forzados a pasar a través de las paredes. El gas limpio puede pasar a través de los poros mientras el material particulado queda atrapado dentro del filtro. Figura que se presenta a continuación, se muestra un esquema de un filtro de material particulado y su funcionamiento básico.

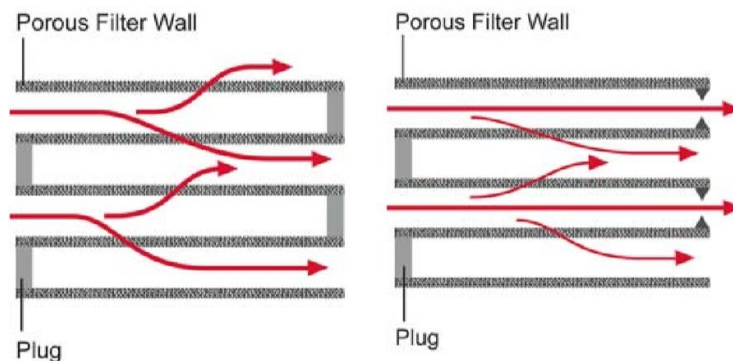


Fuente: Volks Wagen

Para el caso de los filtros abiertos, la fracción de los gases que pasan a través del sustrato poroso depende de al menos dos parámetros: las condiciones de operación del motor (torque y RPM) y la acumulación de partículas y cenizas que obstruyan el paso de los gases a través de los poros del sustrato (carga del sustrato). Por lo tanto, la fracción de gases filtrados, y la eficiencia total del filtro abierto son mayores mientras el sustrato se mantenga limpio y la velocidad de los gases de escape suficientemente baja. En la práctica se observa que la eficiencia de los filtros abiertos se deteriora con el uso, bajando del 30%<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> SAE 2009-01-1087, Mayer et al.

Figura 8: Esquema de un filtro cerrado (“full-flow filter”) y uno abierto (“partial flow filter”)

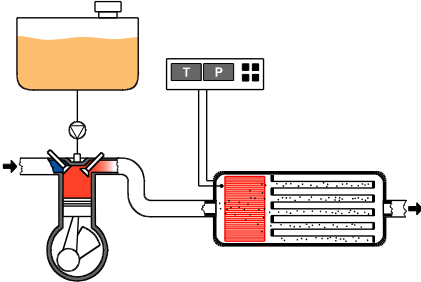
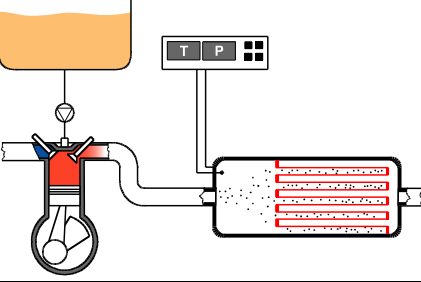
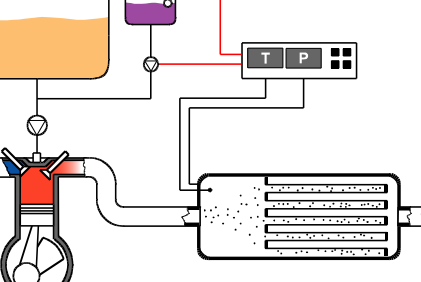


### Regeneración

En su volumen, el módulo filtrante tiene capacidad para almacenar una cantidad máxima de material particulado, sobre la cual se produce una obstrucción excesiva al paso de los gases de escape. Esta obstrucción se refleja en un incrementando de la contrapresión al motor. A fin de mantener una correcta operación del DPF es necesario entonces mantener la carga de partículas (hollín) por debajo de los valores máximos. Esto se consigue mediante el proceso de regeneración, que es la combustión del hollín o carbón retenido en el filtro, y que se lleva a cabo continuamente como parte del funcionamiento normal del DPF. No obstante, no todo el material retenido en el módulo filtrante se puede regenerar, pues existe material incombustible, principalmente ceniza proveniente del lubricante, partículas metálicas provenientes del desgaste por abrasión en el motor y silicatos provenientes del aire de admisión. Este material debe retirarse cada cierto tiempo mediante un proceso de limpieza externo.

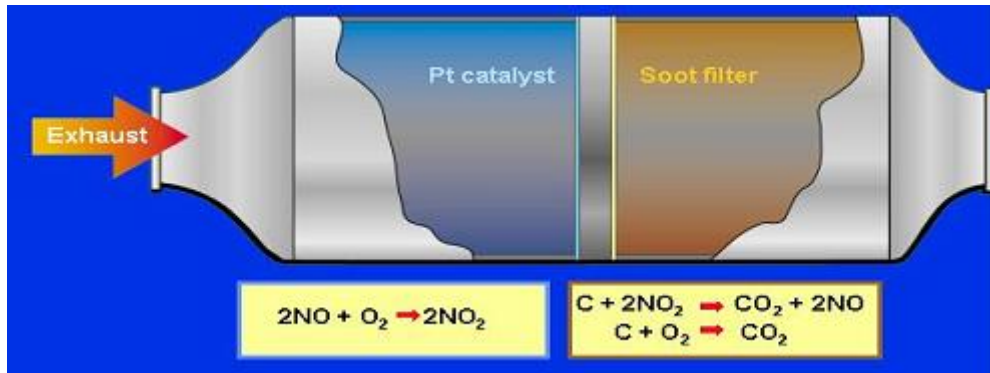
Para permitir un adecuado y permanente proceso de regeneración un parámetro fundamental es la temperatura de los gases de escape. Si bien en los gases de escape de los motores diésel existe en general suficiente concentración de Oxígeno para quemar el hollín retenido en el módulo filtrante (regenerar), la temperatura de estos gases puede ser insuficiente como para que esta regeneración ocurra espontáneamente a una tasa apropiada. Sólo a temperaturas por sobre los 600 °C las velocidades de regeneración son suficientes para evitar la acumulación de hollín y el consecuente aumento de la contrapresión. Por lo anterior se requiere contar con estrategias de apoyo a la regeneración, las que se indican a continuación.

- 1. Regeneración Pasiva:** En el ciclo de regeneración pasiva las partículas de hollín se queman (oxidan) de forma continua, utilizando sólo el calor proveniente de los gases de escape, y sin suministro de energía externa. Este tipo de regeneración utiliza un catalizador que acelera el proceso de oxidación. Este catalizador se puede incorporar de alguna de las formas siguientes:

 <p><b>Figura 9:</b> Esquema operación sistema CRT. Fuente: TTM Mayer</p>	<p><b>Sistema CRT:</b> Mediante un catalizador de oxidación diésel (DOC), incorporado justo antes del módulo filtrante, en la línea de los gases de escape. El catalizador acelera la conversión de NO, presente en los gases, a NO<sub>2</sub>. La oxidación del hollín se ve favorecida por la presencia del NO<sub>2</sub>.</p>
 <p><b>Figura 10:</b> Esquema operación DPX. Fuente: TTM Mayer</p>	<p><b>Sistema DPX:</b> Mediante un recubrimiento catalítico incorporado directamente en el módulo filtrante. En este caso el catalizador acelera la oxidación del hollín utilizando directamente el oxígeno presente en los gases.</p>
 <p><b>Figura 11:</b> Esquema operación FBC. Fuente: TTM Mayer</p>	<p><b>Sistema FBC:</b> Mediante la incorporación del catalizador en el combustible por medio de un estanque auxiliar de aditivo y un elemento dosificador. El catalizador incorporado se adhiere a las partículas facilitando la oxidación del hollín.</p>

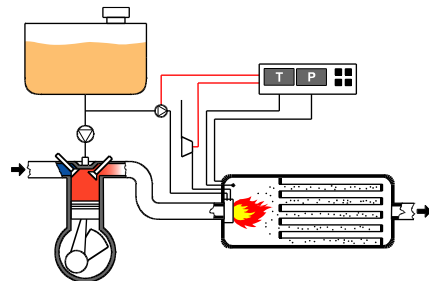
También es posible la combinación del sistema CRT y DPX (un DOC y un recubrimiento catalítico del elemento filtrante). En todos los casos la presencia del catalizador permite una velocidad de regeneración adecuada en el rango de temperaturas de los gases de escape. En este proceso, la presencia de oxígeno y temperaturas apropiados, siguen siendo críticos. También se debe considerar que estos sistemas son sensibles a la presencia de azufre en el combustible, por lo que se debe tener en cuenta la calidad del combustible utilizado. Por ejemplo, para sistemas CRT, no es recomendable contenidos de azufre mayores a 50 [ppm], lo que en todo caso debe ser especificado por el fabricante del sistema.

Figura 12: Esquema de funcionamiento de un sistema CRT.



Fuente: Johnson Matthey

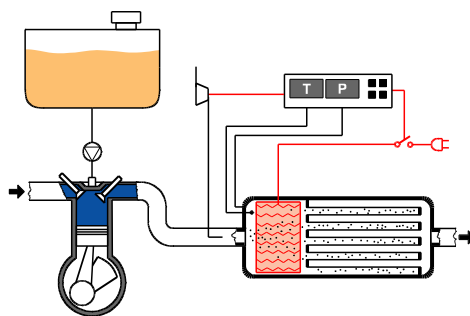
- 2. Regeneración Activa:** Cuando las temperaturas de operación del motor o la calidad del combustible no son las adecuadas para un sistema pasivo, se utilizan métodos de regeneración que permiten el suministro de energía adicional o que son menos sensibles al azufre. En general éstos consisten en un mecanismo que activa la regeneración de acuerdo con la señal de contrapresión en los gases de escape. Existen diferentes sistemas de regeneración activa, a continuación, se describen algunos de ellos:



**Figura 13:** Esquema regeneración con quemador de flujo total.

Fuente: TTM Mayer

**Quemador de flujo total:** Consiste en un quemador diésel puesto justo antes del módulo filtrante. De esta forma los gases de escape pueden ser calentados por sobre la temperatura de combustión del hollín (>600 °C), independientemente de las condiciones de operación del motor. El quemador se enciende conforme la señal de contrapresión y se apaga tan pronto como el filtro se encuentra libre de hollín. El sistema cuenta con dispositivos de suministro de combustible y aire y es controlado electrónicamente según señales de contrapresión y temperaturas antes y después del módulo filtrante.



**Figura 14:** Esquema regeneración eléctrica a bordo.

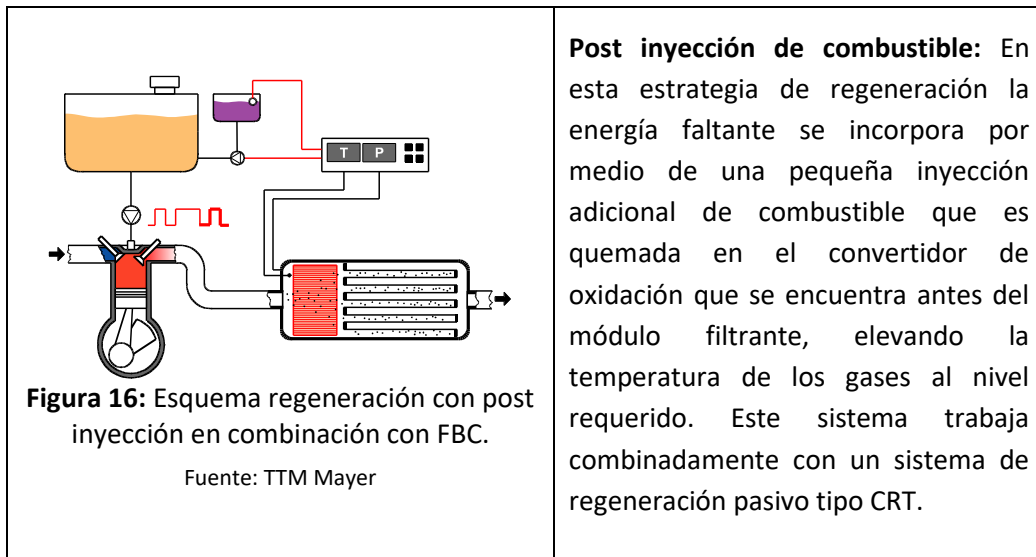
Fuente: TTM Mayer

**Regeneración eléctrica a bordo:** La regeneración se realiza durante la detención de la máquina, utilizando una conexión eléctrica a la red, que permite calentar los gases de escape en ralentí mediante un calentador eléctrico o, en caso de requerirse la detención del motor, calentando un flujo de aire suministrado por una bomba. Es un proceso que puede durar varias horas y se realiza en condiciones de combustión muy controladas. Para el caso de módulos filtrantes metálicos ("sintered metal filter"), es posible encontrar sistemas de regeneración eléctrica, combinados con regeneración pasiva, que utiliza como fuente de poder la propia batería de la máquina, requiriendo sólo mínimas cantidades de energía que permiten calentar muy localmente el hollín, gatillando el proceso de regeneración.



**Figura 15:** Esquema regeneración eléctrica a bordo combinado con FBC.

Fuente: HJS



- 3. Regeneración Externa:** En ocasiones, cuando es posible remover el módulo filtrante con frecuencia, por ejemplo, diariamente en el caso de motores pequeños, o recambiar el filtro por uno de reemplazo, es posible utilizar un método de regeneración externo. Esto es mediante el uso de un calentador eléctrico externo conectado a la red o un quemador externo, considerando eso sí que se trate de un proceso bien controlado y recomendado por el fabricante. También es posible una limpieza con agua a presión o aire comprimido. Una vez concluida la regeneración es posible reutilizar el filtro. En este caso es fundamental contar con un sistema de cierre rápido. También son posibles los filtros desechables de un solo uso (como los filtros de aceite).
- 4. Efectos de la altura:** Si bien existen experiencias exitosas de operación de sistemas DPF en estudios piloto realizados en Ciudad de México a 2,250 msnm, y en la operación de buses Euro V con DPF en Bogotá, es necesario considerar, que en altura la mezcla de los motores se enriquece producto de una menor disponibilidad de oxígeno. Esto tiene como consecuencia por una parte una mayor producción de hollín en el motor, generando una mayor demanda por regeneración y volumen del filtro, y por la otra una menor disponibilidad de Oxígeno en los gases de escape, requerido para una correcta combustión del hollín en el proceso de regeneración. Por lo anterior se recomienda evaluar previamente el desempeño de la tecnología en un programa piloto.

### Unidad de control electrónico

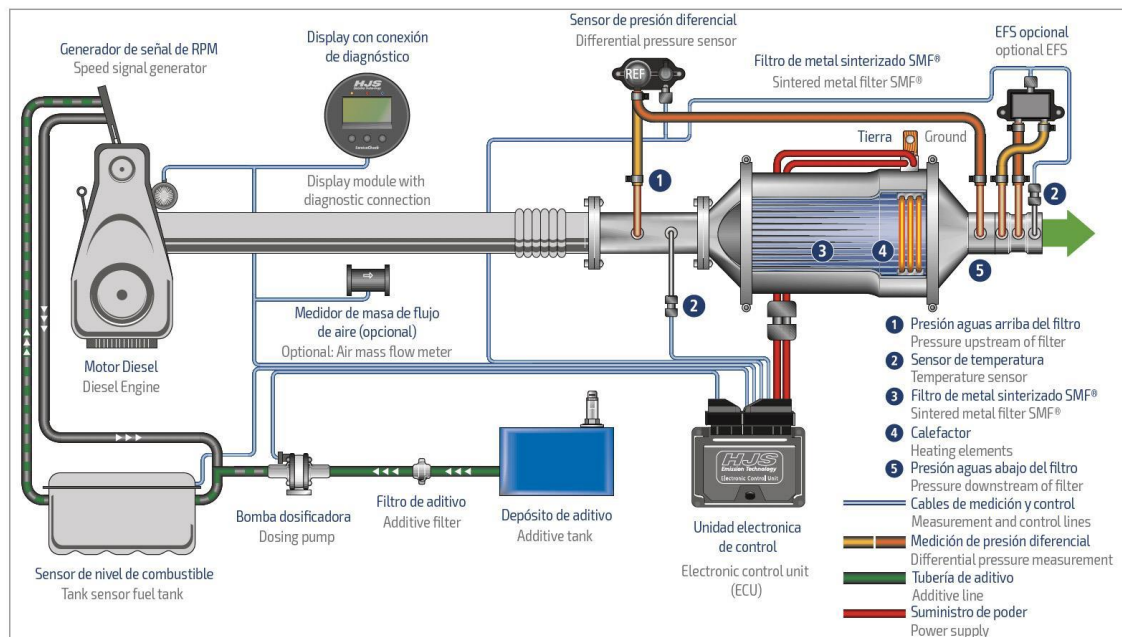
Dado que el DPF es un dispositivo que se instala en la línea de escape de los gases del motor y que por tanto puede representar una obstrucción en la salida de los gases, es necesario monitorear la contrapresión de los gases antes del filtro. El valor de contrapresión admisible es el especificado por el fabricante del motor o bien un valor acordado con el proveedor del sistema DPF, de acuerdo a recomendaciones técnicamente justificadas. En todo caso no son recomendables contrapresiones por sobre los 200 [mbar].

Todos los sistemas DPF deben estar equipados con un dispositivo de control electrónico que monitoree al menos la contrapresión antes del filtro y preferentemente la temperatura de los gases de escape, de tal forma que si se sobrepasa el valor límite de contrapresión, o las

temperaturas de los gases de escape no son las adecuadas, se enciende una alarma claramente perceptible (luz de advertencia), para que el operador o el personal de mantenimiento verifique el correcto funcionamiento del DPF y del motor. Generalmente el sistema cuenta con valores umbrales que activan una pre-alarma de advertencia que precede a la principal, para que haya tiempo a la intervención de los responsables del mantenimiento. La unidad deja registro histórico de la contrapresión y la temperatura, como así también de los eventos o alarmas señalizadas, de las últimas semanas de operación.

No obstante lo anterior, la unidad de control electrónico del DPF puede ser mucho más compleja, dependiendo del sistema de regeneración que se emplee, pudiendo incorporar el monitoreo de otras variables tales como el nivel de aditivo FBC, velocidad del motor, temperatura del motor, flujo de aire de admisión, etc. Asimismo, puede tener que actuar no solamente sobre el encendido de la alarma sino que sobre la bomba de dosificación de aditivo, el encendido del calentador eléctrico, inyección de combustible de post inyección, etc.

**Figura 17:** Esquema de componentes y operación de un monitor para sistema SMF-AR de HJS.



Fuente: HJS (<https://www.dlsbv.nl/product/hjs-smf-ar-12/>)



### 3. REACONDICIONAMIENTO CON DPF

Como se ha dicho antes, los cada vez más exigentes estándares de emisión en material particulado (MP) y número de partículas (NP), para motores diésel de la maquinaria nueva, han obligado a la incorporación de los sistemas DPF. Es el caso del estándar Stage V y también en algunas aplicaciones Tier 4. Sin embargo, también es posible alcanzar dichos niveles de emisión en MP y NP, en la maquinaria en uso, con motores de estándares anteriores. Para esto es necesario el reacondicionando de estos motores con sistemas DPF equivalentes en calidad y eficiencia a los que se utilizan en la maquinaria nueva. Lo anterior permite alcanzar importantes reducciones de contaminación, por ejemplo, en las flotas de maquinaria de construcción urbana, mucho antes de esperar el recambio de éstas por maquinaria nueva.

El reacondicionamiento de estos motores consiste en la instalación de un dispositivo DPF a la salida de los gases de escape, con la finalidad de purificar las emisiones, reteniendo el material particulado generado en la combustión en el motor. El reacondicionamiento con DPF requiere una serie de cuidados y prevenciones para preservar su integridad y buen funcionamiento.

**Figura 18:** Bulldozer oruga Caterpillar D8R parte de la flota del Ministerio de Obras Públicas de Chile, reacondicionada con DPF.



Fuente: Seminario Internacional: Maquinaria de Construcción Libre de Hollín, Santiago de Chile.

#### Condiciones de operación del motor

Para un reacondicionamiento exitoso es necesario que el motor se encuentre en buenas condiciones de mantenimiento, de lo contrario existe riesgo de un funcionamiento incorrecto del DPF y que éste se dañe. Algunos requisitos básicos son los siguientes:

- 1. Mantenimiento del motor:** Un requisito previo al reacondicionamiento con DPF, para asegurar su operación, es garantizar el correcto estado y funcionamiento del motor usado, el que debe ser mantenido de acuerdo con las especificaciones del fabricante, por lo que previo a la instalación del filtro se requiere un diagnóstico y mantenimiento de los siguientes componentes:
  - Filtro de admisión, realizar cambio según especificaciones del fabricante
  - Filtro de aceite, realizar cambio según especificaciones del fabricante
  - Sistema de inyección, realizar diagnóstico y mantenimiento según especificaciones del fabricante.

- Turbocargador, realizar diagnóstico y mantenimiento según especificaciones del fabricante.
- Sistema de refrigeración, realizar diagnóstico y mantenimiento según especificaciones del fabricante.
- Compresión de cilindros, realizar diagnóstico y mantenimiento según especificaciones del fabricante.
- Juego de válvulas, realizar diagnóstico y mantenimiento según especificaciones del fabricante.
- Verificar que no existan fugas en el sistema de admisión o de escape.
- Verificar correcta fijación en el sistema de escape.
- Verificar valores de emisión de contaminantes según especificaciones del fabricante.
- Verificar valores de emisión de ruido según las especificaciones del fabricante.

Antes de instalar el filtro de partículas, se deben comprobar todas las funciones anteriores, excepto en el caso de unidades nuevas. Si los valores de ajuste difieren de las especificaciones del fabricante, deben ajustarse correctamente o sustituirse los componentes defectuosos por piezas nuevas.

**2. Consumo de lubricante del motor:** La presencia excesiva de residuos de lubricante en los gases de escape puede afectar drásticamente el funcionamiento del DPF. El contenido de cenizas incombustibles en dichos lubricantes y que se acumulan en el filtro, acelera los requerimientos de limpieza, al obstruir gradualmente el paso de los gases de escape. También el alto contenido de azufre del lubricante inhibe el proceso de regeneración del filtro y deteriora el recubrimiento catalítico en los sistemas CRT. Por último, las trazas de lubricante sin quemar que llegan al filtro y se depositan en él pueden generar, al quemarse durante el proceso de regeneración, puntos de alta temperatura que fracturan el material filtrante. Por lo anterior, el consumo de aceite lubricante en el motor no debe superar las especificaciones del fabricante, siendo en todo caso menor que el 0,5% del consumo de combustible. También es importante verificar que no haya fugas de lubricante desde el turbo a los gases de escape. Para el motor sólo debe usarse lubricante Low-SAPS, los que tienen bajo contenido de azufre y cenizas.

**3. Opacidad de los gases de escape:** La turbidez de los gases de escape es un indicador de desperfectos en el motor que aumentan la emisión de hollín (humo negro) o de lubricante quemado en los gases de escape (humo azul). Esta debe medirse con un opacímetro de flujo parcial con cámara de medición estándar de longitud equivalente de 430 [mm]. Un exceso de hollín en los gases, que supere la tasa de regeneración en el sistema DPF, se traducirá en acumulación de hollín en el filtro por sobre los valores de diseño recomendados ( $\leq 5$ [gr/l]), pudiendo ocasionar obstrucción del DPF o incluso una regeneración que dañe el material filtrante.

Los valores de opacidad, antes de la instalación y durante el uso del filtro, no deben exceder a los recomendados por el fabricante del sistema DPF o exceder los valores de referencia que se indican a continuación:

Estándar del motor	Coefficiente de extinción [ $m^{-1}$ ]
--------------------	--

	Valor máximo
Stage II o inferior	2
Stage IIIA o StageIIIB	0,8
Stage IV	0,5

Fuente: [Berlín 2015].

**Figura 19:** Distintos casos de reacondicionamiento de maquinaria móvil fuera de ruta.



Fuente: TTM Mayer.

### **Certificación del Sistema DPF**

Para garantizar que el filtro que se usará en el reacondicionamiento cumple con los requisitos de calidad y eficiencia necesarios hay que considerar la certificación del sistema DPF. Existen distintas instituciones públicas y privadas, de diferentes países, que extienden la certificación de estos sistemas (organismo certificador). Lo hacen sobre la base de un conjunto de ensayos llevados a cabo por laboratorios reconocidos por dichos organismos certificadores. Es finalmente el organismo certificador quien se hace responsable de extender la certificación en base a los resultados obtenidos en los ensayos. Es por ello que es de suma importancia utilizar sistemas certificados por organismos de prestigio y en lo posible contar con organismos locales en cada país que entreguen a su vez un reconocimiento local a dichas certificaciones (aprobación local). Tal es el caso de Chile, que ha reconocido localmente en su legislación en esta materia las certificaciones VERT<sup>3</sup>, FOEN<sup>4</sup> y CARB Nivel 3<sup>5</sup>. En este caso una aprobación local ha sido extendida por el Ministerio de Transportes a través del Centro de Control y Certificación Vehicular para aplicaciones específicas de reacondicionamiento, incluyendo algunas pruebas locales adicionales a la certificación original.

El tipo de ensayos que se deben cubrir en una certificación son los siguientes:

- Prueba en laboratorio de la eficiencia de retención del filtro, con valores mínimos en NP<sup>6</sup> o MP de 97% y 85% respectivamente. La eficiencia durante la regeneración debe ser de al menos 80% en NP.

<sup>3</sup> Es una asociación privada con oficinas en Suiza dedicada a la promoción de las mejores tecnologías para el control de las emisiones (<https://www.vert-dpf.eu/>). Para acceder al listado de sistemas certificados <https://www.vert-dpf.eu/j3/images/pdf/article/48/VERT-Filter-Liste-Sept-2017.pdf>

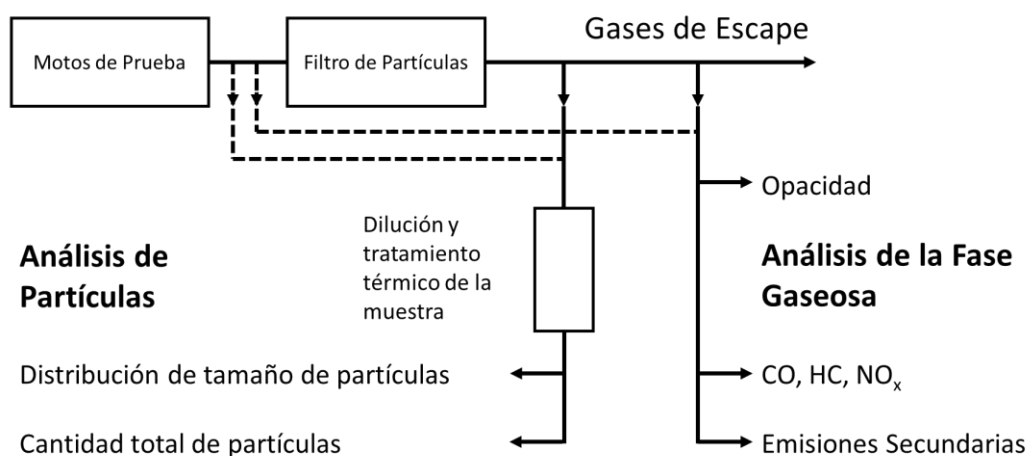
<sup>4</sup> Oficina Federal Suiza del Medioambiente, que cuenta con un listado de sistemas certificados en <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/info-specialists/particle-filter-list/particle-filter-system-types.html>.

<sup>5</sup> Concejo de California para el Recurso Aire, que cuenta con un listado de sistemas certificados en <https://www.arb.ca.gov/diesel/verde/vt/cvt.htm>

<sup>6</sup> Para tamaños de partículas entre 20-300 nm

- Prueba en laboratorio de emisiones secundarias. Para evitar la formación de sustancias tóxicas producto de la actividad catalítica en el sistema, se verifican incrementos o presencia de emisiones secundarias (NO<sub>2</sub>, HAP, dioxinas, etc.).
- Pruebas de durabilidad en campo. Estas pruebas se realizan con el sistema instalado en una aplicación real, para examinar la correcta operación y la eficiencia del sistema después de un periodo de funcionamiento. Aquí se verifican también valores máximos de contrapresión admisibles (< 200 mbar) y que en caso de sustitución del silenciador por instalación del filtro no haya incrementos en la emisión de ruido.

Figura 20: Esquema del diseño de ensayos para la certificación VERT.



Fuente: Reelaborado a partir de TTM Mayer.

### Selección del Sistema DPF

Como se ha visto no existe una única solución en la aplicación de un sistema DPF para el reacondicionamiento y el filtro debe adaptarse a la máquina de construcción y sus condiciones de operación con el fin de optimizar el funcionamiento y los costos del sistema.

La experiencia del proveedor es clave, específicamente que cuente con experiencia práctica en el reacondicionamiento de maquinaria de construcción con sistemas DPF.

Los criterios de diseño más importantes son el perfil de temperatura de la máquina, el espacio de instalación disponible y el tamaño del filtro de partículas. El tamaño del filtro se diseña en función del tamaño del motor y del volumen de escape, de forma que se respete la contrapresión máxima admisible de escape especificada por el fabricante del motor. También es necesario considerar las emisiones de hollín del motor a la hora de seleccionar el tamaño del filtro ya que mientras mayor la opacidad se pueden requerir filtros de mayor tamaño y asegurar regeneraciones más frecuentes.

Dado que una mayor temperatura de los gases de escape facilita la regeneración del hollín y entonces un mayor número de métodos de regeneración estarán disponibles, se recomienda determinar la temperatura de los gases de escape de la máquina durante un período de unas pocas semanas bajo todas las condiciones de operación previstas (pre datalogging). Basándose en estos datos, se puede seleccionar un sistema de regeneración adecuado.

Dado que efectos estacionales (invierno-verano) pueden modificar levemente las temperaturas de escape, es recomendable la aislación térmica del sistema de escape y del filtro, y procurar la instalación del filtro fuera del alcance del flujo de aire del ventilador del motor. Esto es particularmente importante cuando el pre datalogging se ha llevado a cabo en verano.

Un criterio general para la selección de sistemas pasivos CRT, CCRT o DPX es el porcentaje de tiempo total en que las temperaturas de los gases están por sobre los 250 °C y que debe ser mayor al 50%, en caso contrario se recomienda considerar sistemas combinados o activos.

Otro criterio que debe cumplirse para la selección de un sistema pasivo CRT es la razón en masa de NO<sub>x</sub>/Hollín, que debe ser superior a 25 veces. Esto ya que en estos sistemas se requiere de suficiente NO<sub>x</sub> para producir el NO<sub>2</sub> que participa en la oxidación del hollín. Este parámetro puede ser crítico en motores con sistemas de control de NO<sub>x</sub> como EGR o SCR, por lo que se debe tener en consideración en la selección del sistema como en su ubicación (por lo general se debe ubicar antes del SCR).

**Figura 21:** Descarga de datos de máquina excavadora JCB en proceso de pre datalogging.



Fuente: Programa reacondicionamiento flota Ministerio de Obras Públicas de Chile – Universidad de Santiago – año 2017.

### **Instalación, ensayo y aprobación**

Esta parte tiene por objetivo especificar las precauciones y criterios para tener en cuenta como parte del procedimiento de instalación del sistema DPF y los ensayos y registros que se debe realizar del proceso de instalación, con la finalidad de descartar fallas por errores en la instalación y asegurar una correcta operación del sistema.

En el procedimiento de instalación debe considerar los siguientes pasos:

- Comprobación del motor y estado de la máquina.
- Reemplazo del silenciador por el DPF u otra ubicación aceptable.

- Verificación de aspectos de visibilidad y seguridad.
- Ensayo de funcionamiento del DPF y aprobación conjunta de la instalación.

**1. Comprobación del motor y estado de la maquinaria:**

Como se ha señalado anteriormente, la maquinaria que se vaya a reacondicionar debe estar en buenas condiciones técnicas y de mantención. Al momento de la instalación se debe dejar registro de las buenas condiciones técnicas en un formulario como el que se propone en el Anexo I. Ahí se señalan también las pruebas que se deben realizar y el registro correspondiente.

**2. Reemplazo del silenciador por el DPF u otra ubicación aceptable:**

En general, y si las dimensiones del silenciador y del DPF lo permiten, la mejor alternativa para la ubicación del nuevo sistema DPF es en el lugar del silenciador, dentro del compartimiento del motor. Por lo anterior una de las condiciones importantes de verificación de funcionamiento correcto del filtro es la medición de ruido, como se señala en Anexo I.

**3. Verificación de aspectos de visibilidad y seguridad:**

En el caso de la instalación del filtro en el compartimiento del motor, dado que la temperatura de la carcasa del filtro, producto del sistema de regeneración, puede estar a mayor temperatura que el silenciador original, se debe considerar la protección de los componentes que se encuentran dentro del compartimiento del motor y que puedan ser inflamables o de baja temperatura de fusión (ductos de combustible, ductos de freno, ductos hidráulicos situados en las inmediaciones del filtro, etc.). El tipo de aislación requerido debe ser resuelto por el instalador del DPF. En el caso de instalaciones de DPF que se encuentren fuera del compartimiento del motor es necesario considerar sistemas de protección al contacto, para evitar accidentes.

Para las instalaciones fuera del compartimiento del motor, debe considerarse que las estructuras de protección de la cabina contra el vuelco o la caída de objetos no deben dañarse durante el montaje, ya sea por perforaciones o soldaduras. Tampoco podrán obstruirse las salidas de paso o de emergencia de la cabina del conductor previstas por el fabricante. Todos los cables de conexión deben colocarse libres de abrasión y protegidos contra el sobrecalentamiento.

Los filtros de partículas se colocarán de forma que no obstruyan la visión requerida por el operador desde el asiento del conductor, para una operación segura. Este objetivo puede lograrse colocando el filtro en lugar del silenciador dentro, del compartimiento del motor. Si no puede evitarse la instalación en el campo de visión, debe garantizarse que el uso del equipo de trabajo sea seguro de acuerdo con los criterios técnicos que apliquen. Esto puede garantizarse mediante el uso de espejos o cámaras especiales. Durante el trabajo, las ayudas visuales no deben verse obstruidas por las partes móviles de la máquina.

En cuanto al problema del campo visual, se recomienda revisar la normativa técnica más actualizada al respecto, como por ejemplo ISO 5006 Earth-moving machinery — Operator's field of view — Test method and performance criteria.

**Figura 22:** Sistemas de espejos o cámaras que permiten solucionar problemas de visibilidad por instalación de DPF.



Fuente: [BERLIN 2015].

#### 4. Ensayo de funcionamiento del DPF y aprobación conjunta de la instalación:

Concluida la instalación del DPF es necesario probar su correcto funcionamiento. Se debe generar un formulario ad-hoc con el registro de los resultados de las pruebas y verificaciones que se realicen y la aprobación de la instalación por parte del propietario de la máquina o su encargado técnico y del representante de la empresa responsable por la instalación (ver una propuesta de formulario de registro en Anexo I). El responsable de la instalación, de no ser el mismo fabricante del sistema DPF, deberá contar con la debida autorización del fabricante del DPF para realizarla. Lo anterior a efecto de que no se afecte la garantía del producto.

A continuación, se lista las pruebas y verificaciones que se deben realizar:

- a. Identificación del propietario de la máquina y del responsable de la instalación.
  - i. Identificación empresa propietaria de la máquina y datos de persona de contacto.
  - ii. Identificación empresa instaladora y datos de persona de contacto.
  - iii. Identificación empresa fabricante del sistema DPF y datos de persona de contacto.
- b. Identificación de componentes instalados.
  - i. Código/modelo del sistema DPF asignado por el fabricante.
  - ii. Tipo de material filtrante (corderita, carburo de silicio, metal sinterizado, etc.)
  - iii. Método de regeneración (CRT, CCRT, DPX, FBC, quemador diésel, quemador eléctrico, etc.).
  - iv. Número de parte y número de serie de los componentes instalados (módulo filtrante, catalizador, carcasa, soportes, etc.)
  - v. Fabricante, número de parte y número de serie del monitor (datalogger) y del sistema de dosificación de aditivo.
- c. Pruebas y verificaciones.
  - i. Valores de opacidad en aceleración libre antes del DPF y después del DPF. La opacidad antes del DPF debe estar en el rango recomendado por el fabricante del DPF (ver Capítulo 3. Reacondicionamiento con DPF, punto 3. Opacidad de los gases de escape). La opacidad después del DPF debe ser menor a 0,24 m<sup>-1</sup>.

- ii. Valores de NP en ralentí. La medición de las emisiones de NP después del DPF deben estar por debajo de 250.000 #/cm<sup>3</sup>. Para la medición debe usarse un instrumento que cumpla con la norma suiza SR 941.242 o norma equivalente para la medición de partículas sólidas en campo.
- iii. Valores de ruido en escape: Se debe registrar el valor de ruido en dBA en respuesta rápida. El micrófono debe ubicarse a 0.5 m de distancia de la salida del escape y 45° respecto de la línea del flujo de salida de los gases (Ver esquema en Anexo 2). No deben existir superficies reflectantes tales como muros, edificaciones u otros vehículos a menos de 3 metros de distancia. Los valores de ruido registrados con el DPF instalado deben ser iguales o menores que los registrados con el silenciador.
- iv. Contrapresión de los gases de escape. Dejar registro de los valores de contrapresión mediante lectura en línea desde el monitor, para la condición estable de velocidad del motor en ralentí y a máximas RPM del motor. Se debe dejar registro de estos valores de contrapresión con silenciador original y con DPF instalado.
- v. Verificar que no existan fugas en el sistema de admisión o de escape.
- vi. Verificar correcta fijación en el sistema de escape.
- vii. Verificar que no existan fugas de aceite, agua u algún otro fluido del motor o el chasis.



---

## 4. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

---

Para asegurar el buen funcionamiento del sistema DPF y la estabilidad de las emisiones, son necesarios la inspección regular y las mantenciones del filtro y el motor. Las mantenciones preventivas, organizadas conforme las indicaciones del fabricante del motor y del filtro, son obligatorias, particularmente porque el filtro es sensible a las fallas que pueda presentar el motor, y porque a su vez, las características típicas que indicaban fallos en el motor, como humo blanco, humo azul u exceso de hollín, no se pueden detectar después de la instalación del filtro, ya que el filtro de partículas elimina estos efectos.

### **Verificación visual periódica**

Es recomendable la verificar a intervalos regulares de la hermeticidad del tubo de escape, la sujeción del sistema filtrante, las conexiones eléctricas y la línea de medición de presión del monitor. Presencia de hollín en el tubo de escape indica una falla en el filtro.

### **Monitor o Datalogger para el control del funcionamiento**

El monitor o datalogger almacena los datos de la contrapresión (y temperatura si corresponde), de los gases de escape. Cualquier superación del límite programado, gatilla una alarma del monitor. El análisis de los datos registrados permite una evaluación detallada del sistema filtrante y facilita las decisiones para las acciones correctivas y mantenimiento preventivo. El tiempo de registros almacenados en su memoria circular depende del tamaño de esta memoria y del nivel de actividad de la maquinaria, pero en todo caso se debe considerar que al menos almacene tres meses de operación.

El filtro puede afectar el funcionamiento del motor solamente a través de la contrapresión que generan a los gases de escape, la que puede ser levemente superior a la contrapresión original del motor antes de la instalación del DPF. Dado que esta mayor contrapresión debe ser vencida por el motor, el consumo de combustible se puede incrementar hasta entre un 2% a 3%, pero no impacta al motor, salvo que exceda por un tiempo prolongado el límite recomendado por el fabricante o los 200 mbar máximo tolerable. El objetivo del monitor es prevenir que esto ocurra, activando señales luminosas de advertencia, que indican la necesidad de servicio del filtro y/o del motor.

Las alarmas avisan acústica y/o visualmente al conductor. Además, estas alarmas son almacenadas en la memoria del monitor a prueba de manipulación. Las alarmas usuales son:

- Pre-alarma si la contrapresión supera los 150 [mbar] (Amarilla).
- Alarma principal si la contrapresión supera los 200 [mbar] (Roja).
- Filtro dañado si la contrapresión decrece rápidamente.

Estas alarmas y advertencias luminosas y/o acústicas deben ser estrictamente respetadas. Ya que ignorarlas puede resultar en un sobrecalentamiento del sistema y producir daños en el filtro y el motor. El monitor registra todas las alarmas ignoradas, generando información que puede ser usada para la validación de la garantía del producto.

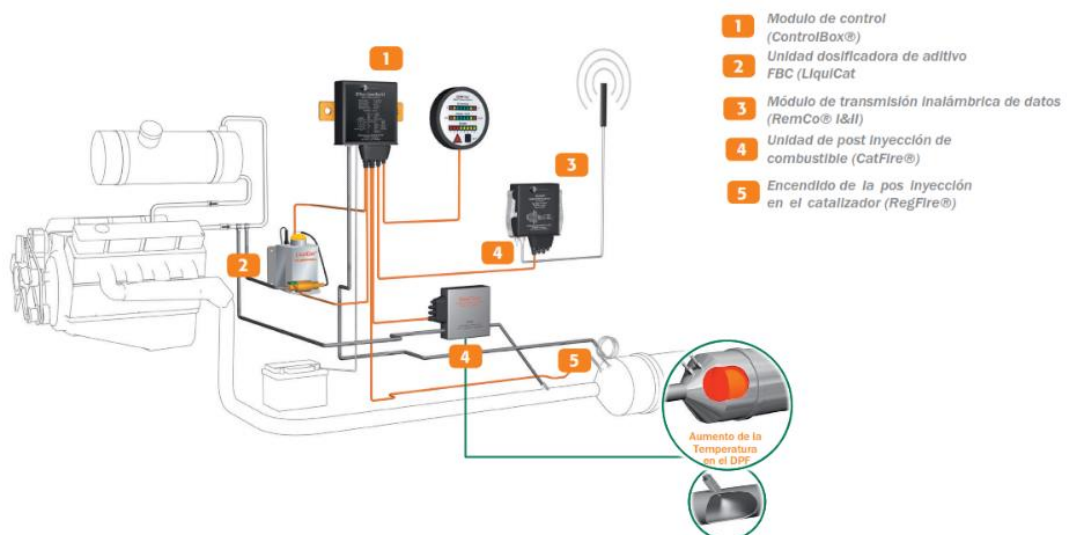
En la actualidad se puede contar con monitores que permiten la transmisión de los datos inalámbricamente, por ejemplo vía GSM, a una estación central de supervisión. También pueden transmitir las alarmas que se generan.

La contrapresión puede aumentar debido a la acumulación del hollín en el filtro, producto de aumentos transitorios en la emisión de partículas en una determinada condición de carga. No obstante, estos aumentos deben ser rápidamente superados en el proceso de regeneración del filtro. Distinto es en el caso de la acumulación sostenida de hollín, lo que puede significar fallas en la estrategia de regeneración o fallas en el motor que han elevado las emisiones de hollín por sobre los parámetros normales.

Uno de los principales riesgos de no respetar las señales de alarma del monitor es la acumulación excesiva de hollín en el filtro, la que puede llevar a una regeneración no controlada, es decir con una carga de hollín por sobre las condiciones de diseño del filtro, que puede provocar temperaturas dañinas para el material filtrante y los demás componentes del sistema.

En todo caso, es normal el incremento gradual de la contrapresión en el filtro por acumulación de cenizas provenientes del lubricante y otras sustancias incombustibles como metales por abrasión o desgaste del motor y silicatos del aire de admisión. Este es un aumento gradual que se produce en el lapso de 1.000 a 2.000 horas y que se soluciona con la limpieza del filtro para extraer los materiales incombustibles acumulados.

**Figura 23:** Conjunto de dispositivos y conexiones de un monitor CPK para distintos sistemas de regeneración.



Fuente: Elaboración propia a partir de diagrama CPK.

### Calidad del lubricante y el combustible

Para disminuir la acumulación de cenizas, prolongar el tiempo entre limpiezas y aumentar la durabilidad del filtro, se deben utilizar lubricantes de motor Low SAPS, de bajo contenido de Azufre y Ceniza.

El combustible diésel utilizado en un motor diésel con filtro de partículas debe cumplir con las normas de combustible actuales para bajo azufre. El uso de combustibles de alto contenido de azufre (> 50 ppm) puede anular la garantía del filtro de partículas. Para contenido de azufre mayores se deben usar sistemas filtrantes especiales tolerantes al azufre. Es necesario informarse sobre las restricciones al contenido de azufre en el combustible que indique el fabricante del sistema DPF.

### **Limpieza y eliminación de cenizas del filtro**

Como indicado anteriormente, el filtro debe ser limpiado periódicamente de las cenizas cuando la regeneración habitual del sistema DPF no permita llevar la contrapresión por debajo de 200 [mbar]. El intervalo usual de limpieza es de entre 1.000 a 2.000 horas de operación, cuando se usa un lubricante de motor bajo en cenizas. Los filtros metálicos pueden limpiarse manualmente con una hidro lavadora. Esto se debe hacer encima de un separador de aceite y no se deben inhalar las gotas suspendidas.

Los filtros cerámicos se deben limpiar con agua caliente, vapor o aire comprimido y requieren una máquina especial de limpieza. Las habituales usan un horno para calentar el elemento filtrante a 650°C, para quemar el hollín y posteriormente remover la ceniza con un chorro pulsante de aire. El aire se introduce a gran velocidad en los canales de la matriz del filtro. El impulso resultante actúa también en el extremo del canal del filtro y afloja incluso los tapones de ceniza más resistentes. Con esto la eficiencia de limpieza puede alcanzar el 99%.

La limpieza se puede repetir 5-6 veces durante la vida del filtro. La ceniza es un residuo tóxico y debe disponerse de acuerdo con las regulaciones locales. Para proteger la salud ocupacional, la limpieza del filtro se debe hacer en una máquina herméticamente cerrada.

Al limpiar el filtro, tenga en cuenta las recomendaciones del fabricante del DPF, dado que hay un gran número de filtros diferentes con propiedades diferentes y el proveedor del filtro debe especificar el procedimiento para una limpieza adecuada.

Para evitar tiempo de parada de la maquinaria durante la limpieza, se puede considerar, como parte de la planificación del mantenimiento, un stock suficiente de filtros de reemplazo, que se puedan utilizar durante este procedimiento. En esto la gerencia de mantenimiento debe tener en cuenta la compatibilidad entre los sistemas de los distintos tipos de maquinaria y el costo asociado de dicho stock.

Las cenizas y los materiales residuales, dependiendo de la legislación local, pertenecen a la categoría de residuo peligroso y pueden requerir ser eliminados por parte una empresa de limpieza autorizada.

Hay proveedores de servicios que se encargan del servicio de limpieza y eliminación completa. La persona de contacto para ello es el proveedor del filtro de partículas.

**Figura 24:** Componentes de un sistema de limpieza de filtros.



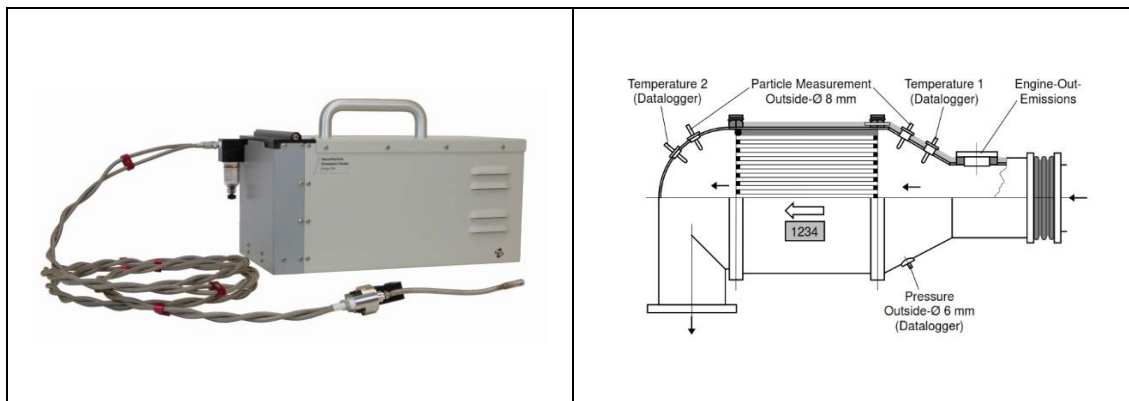
Fuente: Purexhaust S.A.

### Verificación de los gases de escape

Después de la instalación del filtro y cada 500 horas, como parte del mantenimiento general de la máquina, se debe realizar una medición de los gases de escape para un buen diagnóstico del estado del motor, del filtro y contar con datos confiables en caso de garantía.

- 1. Medición de NP:** Es el mejor parámetro para determinar la condición de eficiencia del filtro. Debe medirse en ralentí usando un instrumento NP certificado. Para aprobar el ensayo se debe cumplir  $NP \leq 250.000 \text{ [#/cm}^3\text{]}$ . Si NP es  $> 250.000 \text{ [#/cm}^3\text{]}$ , entonces se recomienda hacer una segunda medición antes del filtro para determinar la eficiencia de filtración. La eficiencia debe ser al menos de 95%. La causa de la baja eficiencia pueden ser daños en el filtro. Si menos del 10% de la superficie del filtro está dañada se puede reparar en un centro especializado. De lo contrario el filtro debe ser reemplazado. Los valores medidos deben ser registrados y comparados con los medidos en las pruebas de aceptación de la instalación.
- 2. Medición de opacidad:** Esta medición es útil para conocer la condición del motor por lo que se debe medir antes y después del filtro. La medición se realiza en aceleración libre con un opacímetro de flujo parcial certificado. Los valores antes del filtro deben cumplir con la especificación del fabricante del motor y con los valores recomendados por el fabricante del filtro. De lo contrario se debe realizar mantenimiento al motor. Los valores de opacidad después del filtro no deben superar  $0,24 \text{ [1/m]}$ .
- 3. Puerto de medición antes del filtro:** Se debe exigir al fabricante del filtro que disponga de un puerto de medición en el cabezal de entrada de la carcasa del filtro (como se muestra en la Figura 24), que permita el acceso de las sondas de medición de los instrumentos de opacidad y NP.

**Figura 25:** Derecha: ubicación de la toma para emisiones antes del DPF. Izquierda: Instrumento de medición de emisiones diésel en NP, para trabajo en campo.



Fuente: Manuales TSI – TTM Mayer.

### Fallas típicas y sus causas

A continuación, se presenta una lista de síntomas de fallas, sus causas y acciones a tomar. En todo caso estas indicaciones no reemplazan las instrucciones del fabricante del motor y del DPF en cada caso.

Síntoma	Causa	Acción
<ul style="list-style-type: none"> <li>Alarma de contrapresión inesperadamente baja, de acuerdo con valores del fabricante.</li> <li>Alarma de contrapresión inesperadamente alta (conforme valores definidos por el fabricante) y no regresa a cero con el motor detenido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ducto de contrapresión o conexión, tapados o con fuga.</li> <li>Ducto de contrapresión demasiado estrecho.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limpiar ducto y conexión.</li> <li>Verificar fugas y/o estrangulación del ducto.</li> <li>Instalar ducto de mayor tamaño y en pendiente para el escurrimiento.</li> <li>Instalar trampa de condensados.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensor de presión defectuoso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambiar sensor.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Emisiones visibles de humo negro y contrapresión alta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Filtro sobrecargado de hollín.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Producir regeneración a carga completa del motor.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fallas en la regeneración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Readaptar estrategia de regeneración a las condiciones de operación.</li> <li>Limpiar el filtro en horno de limpieza y aire comprimido.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Emisiones visibles de humo negro y contrapresión baja.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elemento filtrante roto o dañado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reemplazar el elemento filtrante.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>By-pass entre el elemento filtrante y la carcasa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reemplazar el elemento filtrante.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Incremento rápido en la contrapresión. Ausencia de regeneración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de gases de escape muy bajas en</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambiar condiciones de operación de la maquinaria.</li> </ul>

Síntoma	Causa	Acción
	<ul style="list-style-type: none"> <li>relación con valores históricos.</li> <li>Motor con exceso de humo.</li> <li>Falla del turbo.</li> <li>Falla de válvula EGR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar aislación térmica del DPF.</li> <li>Verificar motor y sistema de inyección de combustible.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrapresión se incrementa independiente de la regeneración del filtro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exceso de cenizas provenientes del lubricante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambiar por lubricante Low SAPS y ajuste el motor para quemar menos aceite.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formación de yeso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilice combustibles y lubricantes bajos en azufre (LowSAPS).</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cenizas provenientes del aditivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir la dosificación o concentración del aditivo.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fibras provenientes del silenciador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reubique el DPF antes del silenciador.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exceso de abrasión del motor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Repare el motor.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>La contrapresión no disminuye después de la limpieza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbón en los poros del elemento filtrante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quemar en horno antes de la limpieza.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depósitos pegajosos en el filtro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quemar en horno antes de la limpieza.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ceniza sinterizada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reemplazar el elemento filtrante.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura después del filtro inusualmente alta de acuerdo con valores históricos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regeneración no controlada por exceso de hollín</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar alarmas de contrapresión.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regeneración demasiado rápida o no controladas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar dosificación de aditivo.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar emisiones HC altas.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Potencia del motor decrece</li> <li>Consumo de combustible aumenta demasiado (&gt;5%).</li> <li>Temperatura del refrigerante aumenta demasiado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrapresión del DPF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si la contrapresión esta correcta entonces no es problema del DPF</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar contrapresión</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Humo azul o gris claro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo excesivo de lubricante del motor o del turbo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar motor.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Depósitos de hollín en el escape.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daños en el módulo filtrante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medir NP u opacidad a la salida del escape.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Humos visibles en la aceleración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demasiada inyección de combustible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar inyección a plena carga.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Turbo con retardo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar turbo.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daños en el módulo filtrante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reemplazar el elemento filtrante.</li> </ul>

Síntoma	Causa	Acción
<ul style="list-style-type: none"><li>· Humos excesivos antes del DPF (opacidad).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Turbo dañado.</li><li>· Límite de plena carga.</li><li>· Inyectores</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Revisar turbo.</li><li>· Revisar sistema inyección.</li></ul>

### **Instrucción del personal de servicio de las máquinas de construcción**

El propietario de la maquinaria reacondicionada debe asegurarse de que su personal técnico de mantenimiento y operadores reciban una capacitación completa sobre la operación y mantenimiento de todos los componentes del sistema, y cómo reaccionar ante las señales de la luz de advertencia del monitor. Esta debiera estar a cargo del fabricante del filtro de partículas o del instalador. El personal técnico debiera contar con la documentación de dicha capacitación tanto como de los manuales de uso y mantenimiento del sistema.

El personal técnico de mantenimiento y los responsables de la operación de las flotas de maquinaria debieran también capacitarse en todas las buenas prácticas descritas en el presente documento. La incorporación de un filtro de partículas en el sistema de escape de las máquinas de construcción es un aporte muy importante para la salud de la población y los trabajadores en los sitios de construcción, pero es también un desafío en la incorporación de protocolos de mantenimiento más estrictos y de buenas prácticas en el cuidado del sistema.

## 5. ACRÓNIMOS

---

<b>CRT</b>	Trampa de regeneración continua (Continuously Regeneration Tramp).
<b>CCRT</b>	CRT con recubrimiento catalítico en el módulo filtrante (Catalyzed CRT).
<b>DOC</b>	Convertidor de Oxidación Diésel (Diesel Oxidation Catalyst).
<b>DPF</b>	Filtro de Partículas Diésel (Diésel Particle Filter).
<b>DPX</b>	Filtro de Partículas Catalizado (Marca Registrada).
<b>EGR</b>	Recirculación de Gases de Escape (Exhaust Gas Recirculation).
<b>FBC</b>	Catalizador Transportado por el Combustible (Fuel Born Catalyst).
<b>HAP</b>	Hidrocarburo Aromático Policíclico.
<b>MP, MP10</b>	Material Partículas, Material Particulado de 10 [ $\mu\text{m}$ ].
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Nitrógeno.
<b>NP</b>	Número de Partículas.



---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---

- [TTM 2008] "Particle Filter Retrofit for all Diesel Engines", HAUS DER TECHNIK, A. Mayer et al, 2008.
- [TTM 2005] "Elimination of Engine Generated Nanoparticles", HAUS DER TECHNIK, A. Mayer et al, 2005.
- [BERLIN 2015] "Beratungsleitfaden für die Partikelfilternachrüstung. Umweltstandards für Baumaschinen im Hoch- und Tiefbau im Rahmen öffentlicher Aufträge", Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, H. Volker, 2015.
- [FOEN 2010] "Abgaswartung und Kontrolle von Maschinen und Geräten auf Baustellen", Erarbeitet und herausgegeben von der Arbeitsgruppe Baumaschinen, FOEN, 2010.
- [3CV 2005] "Guía para la Instalación de Sistemas de Post Tratamiento de Emisiones en Buses de Transantiago", Subsecretaría de Transportes, 3CV, 2005.
- [USACH 2017] "Programa piloto para la implementación de sistemas de post-tratamiento de emisiones para material particulado en maquinaria de construcción", Universidad de Santiago de Chile, 2017.
- [UBA 2014] "Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand", UBA-TEXTE 24/2014.

## ANEXO I

### Protocolo de pruebas de aceptación del filtro de partículas

Filtro de Partículas	
Fabricante (marca)	
Identificación (número de repuesto, número de serie)	
Tipo	
Número del certificado de conformidad	
Fecha de instalación	
Monitor/Datalogger	
Tipo	
Sistema de dosificación de aditivo	
Tipo	
Vehículo/unidad	
Categoría	
Fabricante (marca)	
Tipo	
Año de construcción	
VIN	
Motor	
Fabricante (marca)	
Tipo	
Año de construcción	
Potencia nominal de acuerdo con la etiqueta del vehículo	
Horas de funcionamiento o km al momento de la instalación	
Medida de aceptación sin filtro	
Opacidad en K [1/m] en aceleración libre	
Medición de ruido en el escape a 45°/0.5 m a la velocidad del motor [1/min]	
Medida de aceptación con filtro	
Opacidad en K [1/m] en aceleración libre	
Medición de ruido en el escape a 45°/0.5 m a la velocidad del motor [1/min]	
Contrapresión del filtro a la velocidad del motor [1/min]	
Opacímetro	
Fabricante (marca)	
Tipo	
Sonómetro	
Fabricante (marca)	
Tipo	
Inspección	
Fecha de inspección	
Inspector	
Timbre instalador/Fecha/Firma	



Es un Programa de:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE**

Ejecutado por:



[calac@swisscontact.org.pe](mailto:calac@swisscontact.org.pe)

[www.programacalac.com](http://www.programacalac.com)

Facebook: @CALACplus

Twitter: @Calacplus

Prolongación Arenales N°722, Miraflores

Lima 15074 – Perú

Teléfonos: +511 2641707, 2642547

Fax: +511 2643212

[www.swisscontact.org](http://www.swisscontact.org)