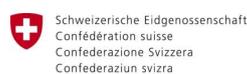


# GUÍA METODOLÓGICA



## GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE POLÍTICAS “SOOT FREE” EN LA MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA



Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE



*CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact*

## **Guía metodológica para la construcción de políticas “soot free” en la 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+

**Guissele Nancy Castillo Coila**  
Coordinadora CALAC+ para Perú

Fotografía de Portada:

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

Edición: febrero 2020

LOS TEXTOS PUEDEN SER MENCIONADOS TOTAL O PARCIALMENTE CITANDO LA FUENTE

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 metodológica para la construcción de políticas “soot free” en la maquinaria móvil no de carretera* propone aprovechar la oportunidad para la implementación de políticas y medidas regulatorias. Estas medidas deben priorizar la reducción significativa del hollín en las emisiones diésel, debido a su toxicidad y sus impactos en el cambio climático.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. HOLLÍN EN LAS EMISIONES DIÉSEL: IMPACTO EN LA SALUD Y CAMBIO CLIMÁTICO .....	5
3. CERTIFICACIÓN DE EMISIONES Y TECNOLOGÍAS DE CONTROL EN MOTORES DIÉSEL NO DE CARRETERA .....	9
4. PROGRAMAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN: ALGUNOS EJEMPLOS.....	16
5. COMBUSTIBLES Y TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS .....	20
6. CONCLUSIONES .....	22
7. BIBLIOGRAFÍA .....	24

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

En América Latina, a diferencia de lo acontecido con los vehículos en ruta, las emisiones de la maquinaria móvil no de carretera no se han cuantificado suficientemente<sup>1</sup>, aunque la experiencia internacional muestra una importante contribución de este sector a la contaminación del aire<sup>2</sup>.

Esto ha retrasado la implementación de políticas de reducción de emisiones tales como por ejemplo los estándares de emisión para motores nuevos o el reacondicionamiento de los motores usados con sistemas de post tratamiento. Dado lo anterior, existe una oportunidad para reducir significativamente las emisiones de estas fuentes a través de la implementación de políticas y medidas regulatorias en un sector mayoritariamente desregulado.

Para enfrentar adecuadamente el diseño de dichas políticas es necesario considerar la gran responsabilidad que tienen los motores Diésel en el total de las emisiones provenientes de este sector<sup>3</sup>. En esta discusión el contenido de hollín en las emisiones diésel llega a ser una prioridad, debido a la toxicidad de dichas emisiones y sus impactos en el cambio climático. Con base en estos antecedentes las políticas y medidas que se analizan apuntan a las tecnologías que permitan contar con maquinaria libre de hollín.

---

## 2. HOLLÍN EN LAS EMISIONES DIÉSEL: IMPACTO EN LA SALUD Y CAMBIO CLIMÁTICO

---

En las emisiones de los motores Diésel no de carretera<sup>4</sup> coexisten varios contaminantes que se encuentran regulados en la legislación europea y estadounidense, debido a su impacto en la salud de las personas. Dentro de estos contaminantes se distinguen los Óxidos de Nitrógeno, los Hidrocarburos no quemados, el Monóxido de Carbono y el Material Particulado. De estos, la mayor atención se centra en la reducción de los Óxidos de Nitrógeno (NOx) y el Material Particulado (MP), por su toxicidad y por las altas emisiones de estos contaminantes que presentan estos motores.

El MP de los motores diésel se entiende, según la legislación internacional, como la masa de todas las sustancias emitidas por el escape que, por medio de un procedimiento de muestreo y dilución, son capturadas en un filtro a 52° Celsius. Producto de esta definición técnica de la medición, el MP de un motor Diésel puede contener las siguientes sustancias:

- **Hollín:** Pequeñas partículas de carbón sólido (20-30 nm) que se forman en el proceso de combustión y que luego se aglomeran en partículas de mayor tamaño (~100 nm). Forma parte de la fracción insoluble del MP.

---

<sup>1</sup> Para los propósitos del presente documento la maquinaria móvil no de carretera no contempla locomotoras, aviones o barcos.

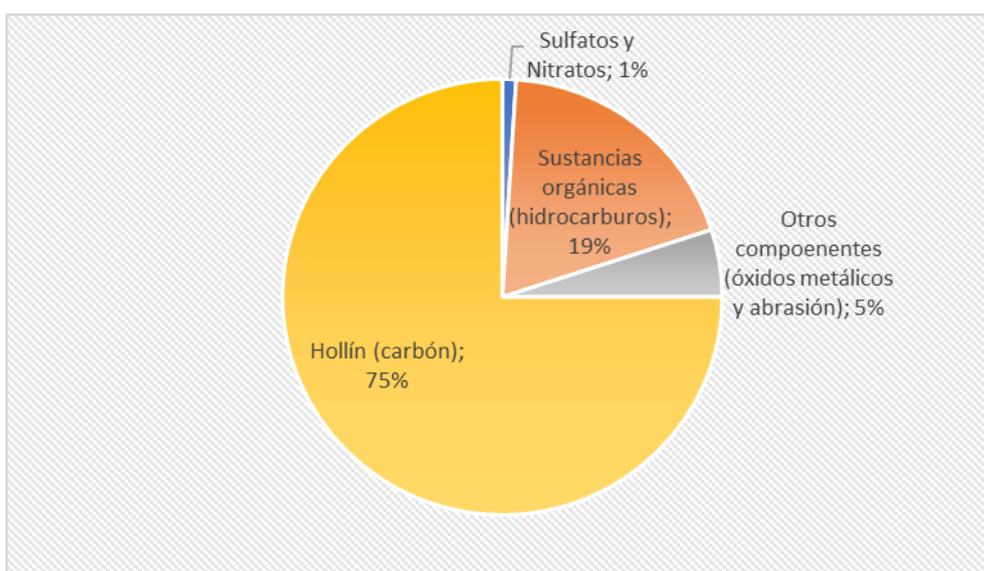
<sup>2</sup> La maquinaria no de carretera representa un 39% y 25% de las emisiones totales de MP de las fuentes móviles en Estados Unidos y la Unión Europea respectivamente (participación mayor que la de los vehículos pesados en ambos casos). [ICCT2016]

<sup>3</sup> A manera de ejemplo 87% de las emisiones de NOx y 94% de las emisiones de MP provienen de la maquinaria en los rubros construcción, industria, forestal y agricultura, sectores todos donde los motores Diésel son predominantes [ICCT 2016].

<sup>4</sup> En adelante se entenderá por motor no de carretera al que se instale en la maquinaria móvil no de carretera.

- **Volátiles:** Sustancias en fase líquida producto de la condensación de hidrocarburos no quemados (parte de la fracción orgánica soluble) y sulfatos producidos a partir del contenido de azufre del combustible (parte de la fracción soluble en agua).
- **Cenizas y otros:** Partículas sólidas formadas por óxidos de metal (cenizas), provenientes del lubricante u otros aditivos del combustible, y por las partículas de abrasión del motor (pistones). Al igual que el hollín forman parte de la fracción insoluble.

**Figura 1:** Substancias que componen el MP medido en masa de acuerdo con su definición legal (en base a un motor diésel de vehículo pesado).



Fuente: Elaboración propia a partir de [VAASA 187].

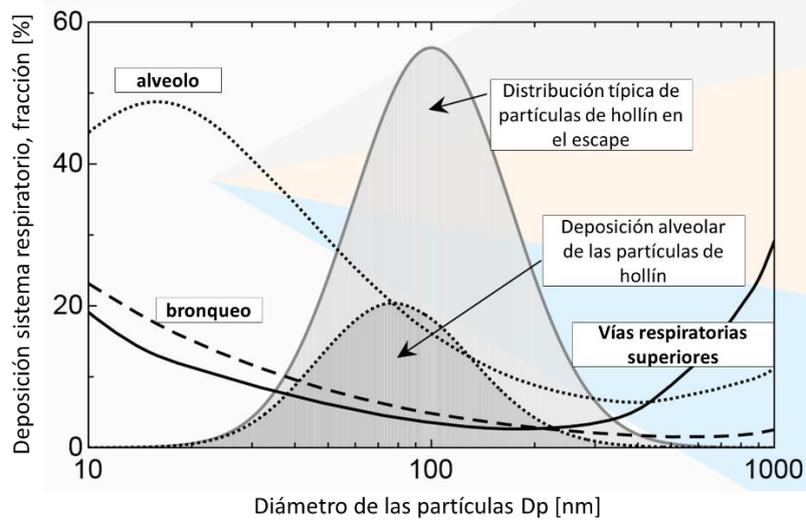
Los efectos epidemiológicos y toxicológicos<sup>5</sup> del MP diésel han colocado a este contaminante en primera prioridad de atención. Entre los efectos epidemiológicos más relevantes estudiados se encuentran la clasificación de las emisiones diésel como cancerígenas en grado 1 por la OMS<sup>6</sup>.

Especial atención en los estudios toxicológicos ha tenido el hollín, por tratarse de la fracción insoluble y persistente del MP. También en cuanto a la distribución de tamaño estas partículas se encuentran en el rango de mayor penetración en el sistema respiratorio.

**Figura 2:** Distribución de tamaño de las partículas de hollín y su deposición en el sistema respiratorio.

<sup>5</sup> La toxicología hace el estudio de los efectos de los contaminantes sobre el organismo humano mientras que la epidemiología hace el estudio de los efectos de éstos sobre la población humana.

<sup>6</sup> [OMS 2012]

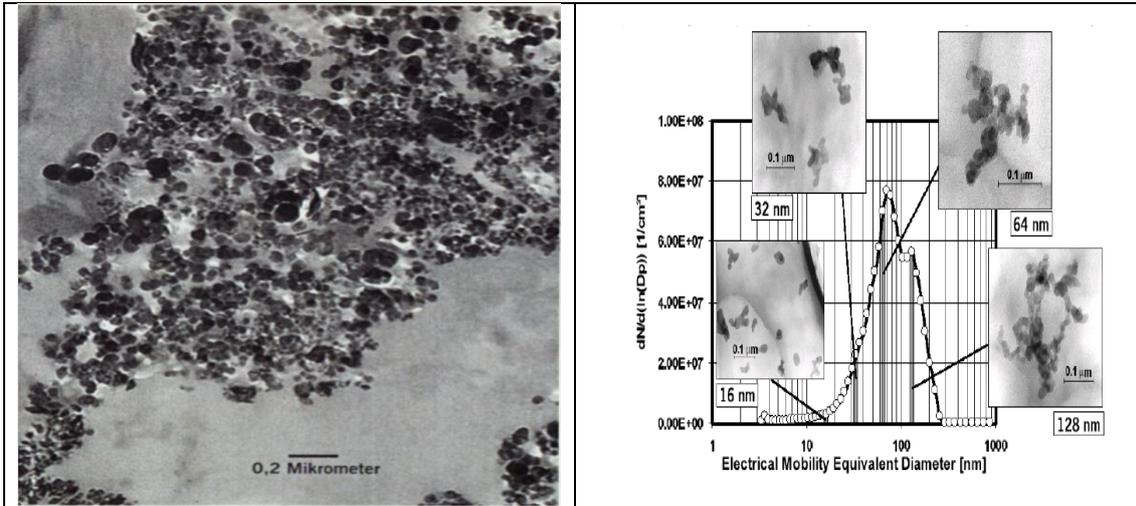


Fuente: Health Effects of Fine Airborne Particles - PhD. Markus Kasper, Matter Engineering. Presentación en Santiago de Chile, mayo 2005.

Desde el punto de vista toxicológico, las partículas de hollín tienen dos propiedades que son críticas para la salud: son altamente respirables y son inorgánicas e insolubles. Es decir, son partículas que se introducen profundamente en los pulmones y que no pueden ser destruidas por los mecanismos de defensa del organismo, ni tampoco diluidas en los fluidos del cuerpo. Adicionalmente estas partículas de tamaño nanométrico, capaces por su tamaño de penetrar la capa celular de los alveolos, se pueden transportar por medio del torrente sanguíneo, a otros órganos del cuerpo<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> [ETH 2004]

**Figura 3:** Deposición de las partículas de hollín en los pulmones (izquierda) y su distribución de tamaño (Derecha).



Fuente: Health Effects of Fine Airborne Particles - PhD. Markus Kasper, Matter Engineering. Presentación en Santiago de Chile, mayo 2005.

Sin embargo, respecto de la métrica para la medición del hollín, y de las partículas diésel en general, se presenta un dilema, por cuanto en la medición del MP en masa las partículas de mayor tamaño tienen la mayor ponderación en el resultado, contradiciendo la lógica del impacto en salud. Por ejemplo, en una concentración de 10  $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ , dependiendo del tamaño de las partículas, se pueden encontrar las siguientes cantidades:

**Tabla 1:** Relación entre el tamaño y la cantidad de partículas para igual concentración en masa.

	<b>Diámetro</b>	<b>Número [1/cm<sup>3</sup>]</b>
	20 nm	2.400.000
	500 nm	153
	2,5 $\mu\text{m}$	1

Fuente: Institut für Epidemiologie – Oberdörster et al. – 1994

Conforme la métrica de la masa sería equivalente emitir una sola partícula de 2,5  $\mu\text{m}$  que 2.400.000 partículas de 20 nm, aunque desde el punto de vista de la salud los efectos son muy distintos.

Ante toda esta evidencia, la legislación en Europa ha avanzado en la regulación de emisiones de motores no de carretera, incluyendo para la fase Stage V, la métrica del número de partículas sólidas, lo que es consistente con la caracterización del hollín presente en dichas emisiones. De esta forma se ha incorporado en la legislación europea una nueva definición para la medición de las partículas diésel, esto es la cantidad de partículas sólidas por sobre 23 nm y hasta 2,5  $\mu\text{m}$ .

Consistente con esta última definición, la construcción de políticas libres de hollín en maquinaria no de carretera debe considerar la métrica del número de partículas, de manera complementaria a la medición de la masa para evaluar correctamente el impacto en la salud.

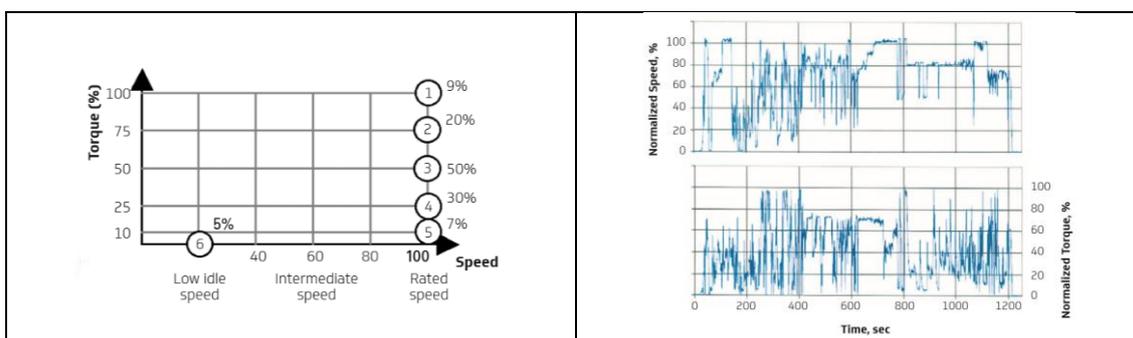
En relación con los efectos en cambio climático, el hollín o carbono negro, tiene influencia sobre el clima mediante dos mecanismos principales: 1) absorbiendo directamente la luz solar, 2) reduciendo la reflectividad de la nieve o el hielo por deposición. El hollín tiene una responsabilidad muy importante en el calentamiento global, la que por unidad de masa emitida llega a ser entre 460 a 1.500 veces mayor que la del CO<sub>2</sub><sup>8</sup>.

### 3. CERTIFICACIÓN DE EMISIONES Y TECNOLOGÍAS DE CONTROL EN MOTORES DIÉSEL NO DE CARRETERA

Una de las primeras políticas en la mitigación de las emisiones de los motores diésel no de carretera, es la regulación de las emisiones mediante la certificación de tipo, conocido en inglés como “type approval”. Ésta consiste en la fijación de límites de emisión para motores nuevos, definidos por rangos de potencia nominal.

En la certificación de tipo, un motor representativo de las unidades a comercializar es ensayado mediante un ciclo de operación característico según las condiciones de operación de la maquinaria. Para ello se definen distintos puntos de torque y velocidad del motor. El ciclo puede ser estacionario (a velocidad constante en cada punto) o transitorio (velocidad variable). En la Figura 5, se muestra algunos ejemplos de ciclo.

**Figura 4:** Ciclos de operación para la medición de emisiones en motores no de carretera. A la izquierda un ciclo estacionario (NRSC) y a la derecha un ciclo transitorio (NRTC). Para NRSC se utilizan porcentajes de ponderación del resultado de las emisiones en cada punto de medición. La velocidad del motor se indica como un porcentaje de la velocidad nominal. El torque se representa como un porcentaje del torque máximo para cada punto de operación.

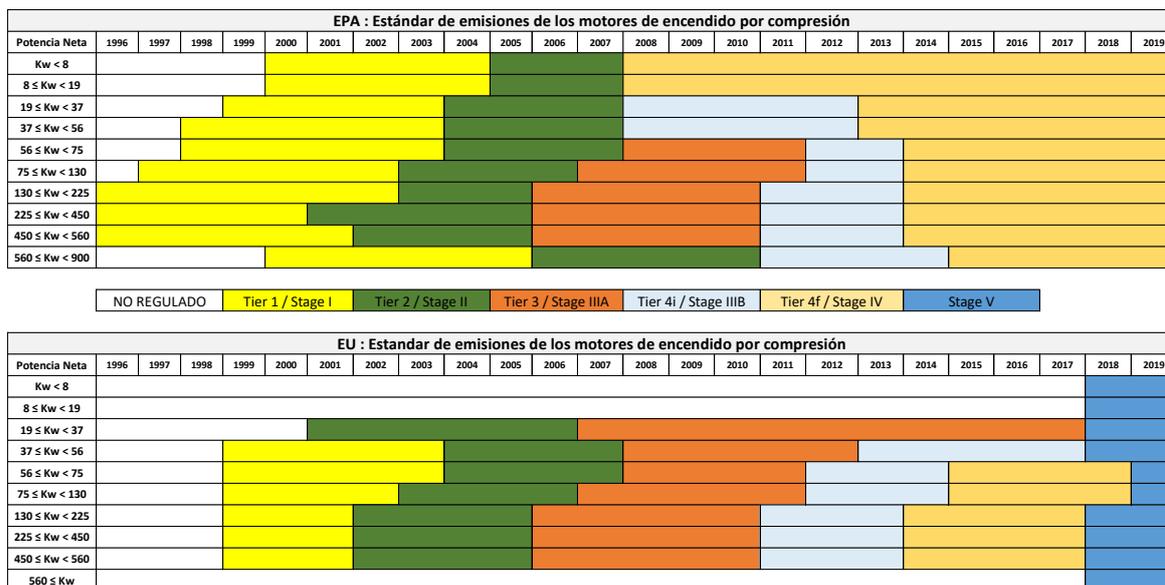


Fuente: On and off-highway commercial vehicles, Worldwide emissions standards (2018-2019), Delphi Technologies.

Los límites de emisión se definen según el rango de potencia al que pertenece el motor y de acuerdo con una serie de niveles normativos cada vez más exigentes y dispuestos cronológicamente.

<sup>8</sup> <https://ccacoalition.org/en/slcps/black-carbon>

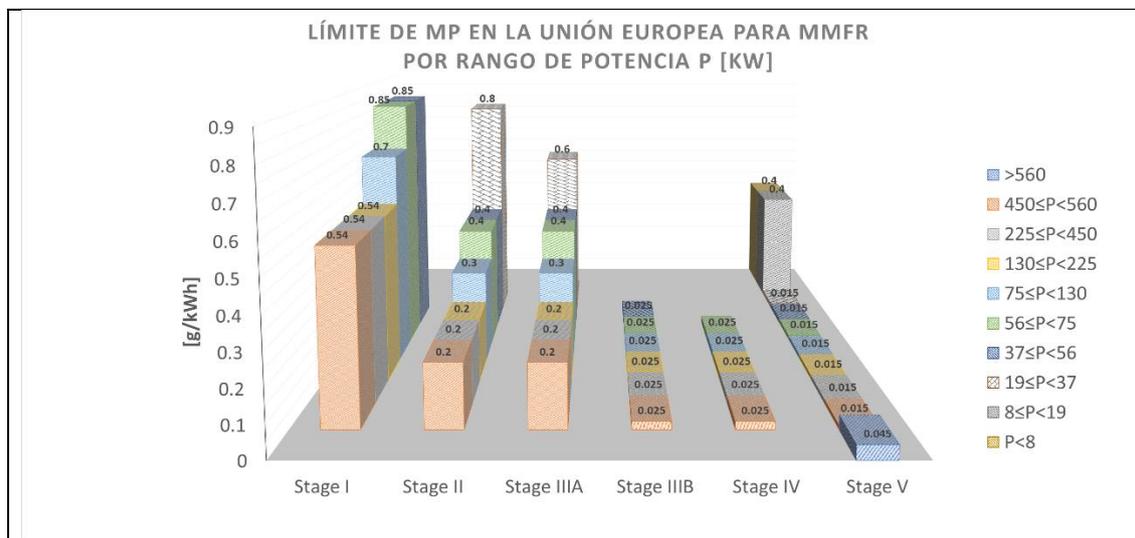
**Figura 5:** Calendario de implementación de los niveles normativos en la Unión Europea y Estados Unidos.

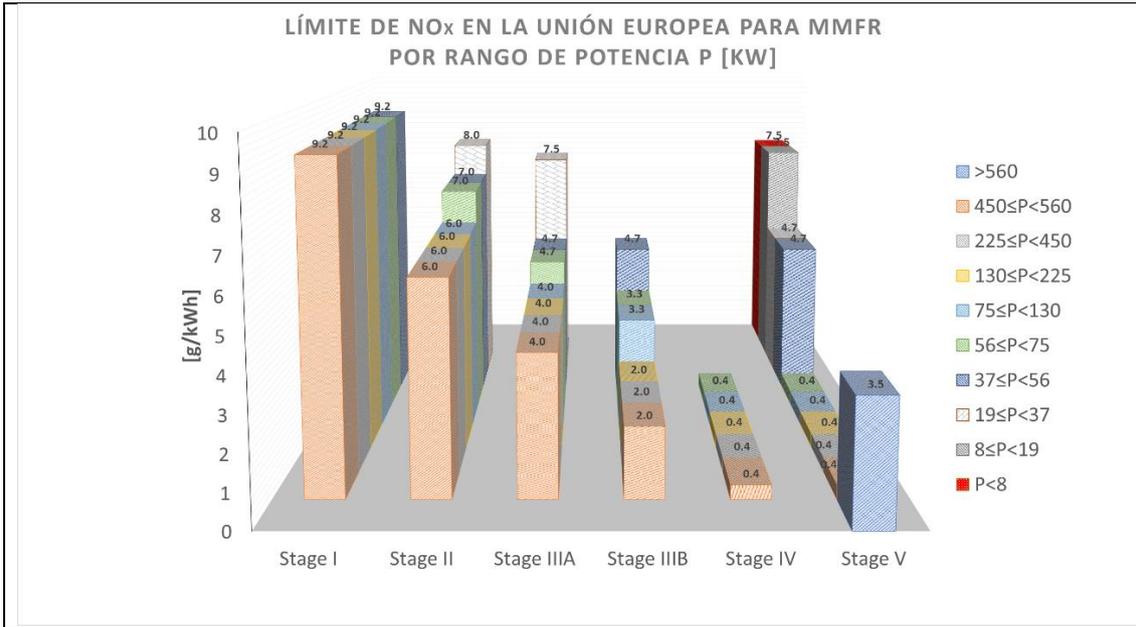


Fuente: Actualizado a partir de [Geasur 2013].

En las **Figura 6:** Límites de MP y NOx en la legislación de la Unión Europea para motores Diésel, por rango de potencia. Figura 6 y 8, se muestran una comparación de los límites para MP y NOx de la Unión Europea y de Estados Unidos, para motores Diesel.

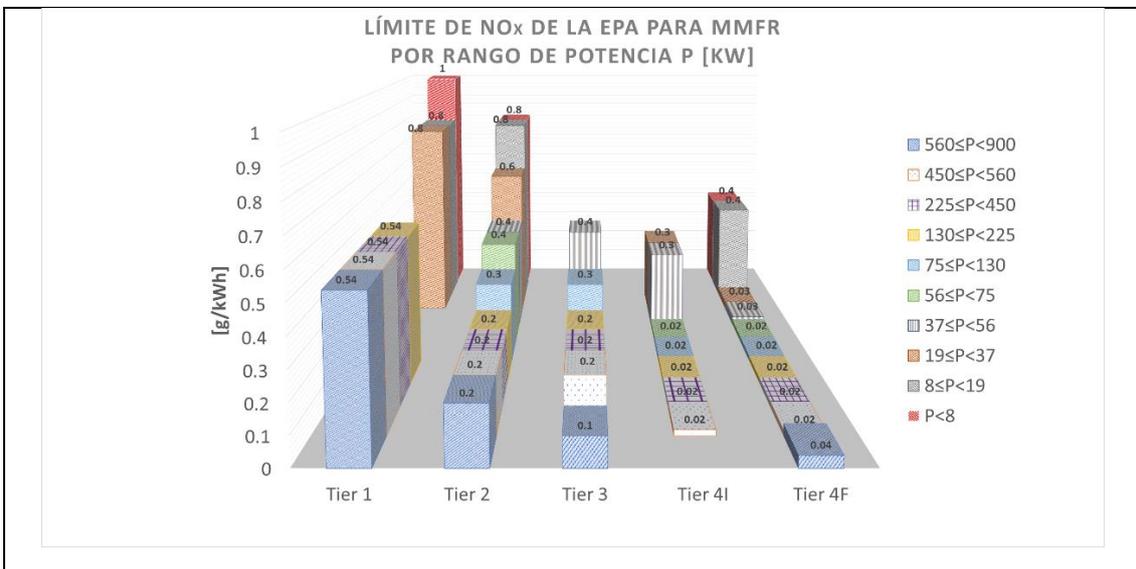
**Figura 6:** Límites de MP y NOx en la legislación de la Unión Europea para motores Diésel, por rango de potencia.

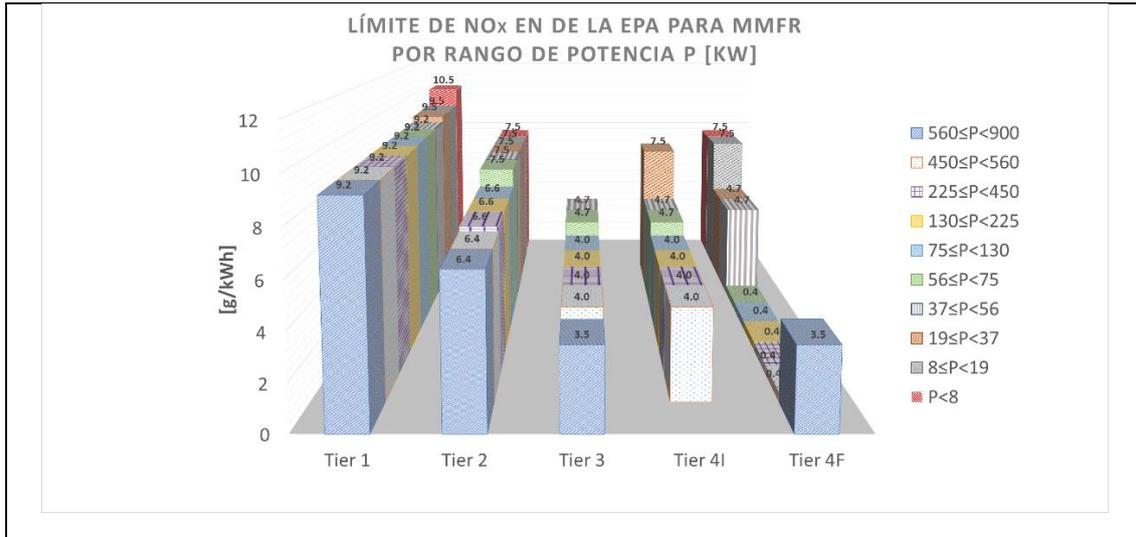




**Nota:** En las fases (Stage) donde se omite el valor límite para la categoría, es porque en ese rango de potencia sigue aplicando la fase (Stage) anterior.  
 Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7:** Límites de MP y NO<sub>x</sub> en la legislación EPA para motores Diésel, por rango de potencia.





**Nota:** En las fases (Tier) donde se omite el valor límite para la categoría, es porque en ese rango de potencia sigue aplicando la fase (Tier) anterior.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, a diferencia de la regulación EPA que los regula desde Tier1, los motores mayores a 560 [kW] y los menores que 19 [kW], no fueron regulados por la legislación europea hasta Stage V. Respecto de los rangos intermedios ( $560 < P \leq 19$ ), se observa que el valor límite tiende a ser inversamente proporcional al tamaño (potencia), del motor. Esto se explica por lo siguiente:

- El impacto como porcentaje del precio, del costo de desarrollar motores o sistemas de post tratamiento para estándares de emisión es mayor mientras más pequeño sea el motor<sup>9</sup>.
- La intensidad de uso y el volumen de los gases de escape de los motores pequeños es menor.

Las reducciones más significativas en los valores de MP y NO<sub>x</sub> se producen en Stage IIIB/Tier 4i y en Stage IV/Tier 4f, respectivamente, con reducciones cercanas al 90% y 80%. Lo anterior en los rangos de potencia entre 56-560 [kW], para el caso del MP, y en los rangos 560-75 [kW], para el caso del NO<sub>x</sub>.

Hasta el nivel normativo Stage IIIA/Tier 3, el control de las emisiones se realizó mediante las siguientes estrategias tecnológicas:

#### **Sistema de inyección:**

Mediante el uso de sistemas de inyección de alta presión y de control electrónico se puede conseguir una mejor atomización del combustible y variar la dosificación y tiempos de inyección. Esto permite mejorar la mezcla aire/combustible y controlar la formación del NO<sub>x</sub> y el MP. Un ejemplo es la tecnología Common Rail.

#### **Turbocargador:**

<sup>9</sup> [ICCT 2018]

Permite aumentar el aire de admisión mediante compresión, mejorando la relación aire/combustible. El diseño de turbocargadores con geometría variable permite que desarrolle mejores rendimientos en todo el rango de operación del motor. La incorporación de un enfriador del aire comprimido permite reducir las temperaturas de combustión. Mejora las emisiones de MP y NOx.

#### **Recirculación de Gases de Escape (EGR):**

Es la recirculación de un porcentaje de los gases de escape al motor, lo que permite reducir las temperaturas de las temperaturas de combustión, reduciendo las emisiones de NOx. Mediante un enfriador de los gases recirculados, es posible mejorar las reducciones de NOx.

#### **Modificaciones al motor:**

Corresponde a la modificación de parámetros de diseño del motor tales como la geometría de los cabezales de los cilindros y la cámara de combustión, posición de los inyectores, número de válvulas, razón de compresión, geometría de la entrada y salida de gases. Permite reducciones de MP y NOx.

A partir del nivel normativo Stage IIIB/Tier 4i, para obtener los límites de MP más exigentes, el control de las emisiones en estos motores requirió el uso de sistemas de post tratamiento como los que se indican a continuación:

#### **Convertidor de Oxidación Diésel (DOC):**

Es un sustrato monolítico que permite el paso del flujo de gases de escape a través de canales abiertos en ambos extremos y que está recubierto con metales preciosos que permiten la oxidación de la fracción orgánica soluble del MP. Esto permite reducciones de MP en masa de hasta un 20%, pero ninguna reducción en NP.

#### **Filtro de Partículas Diésel (DPF):**

Es un sustrato filtrante, de alta eficiencia en la retención de partículas sólidas (>97%), a través del cual pasa la totalidad de los gases de escape y que cuenta con un sistema de regeneración para quemar (oxidar) el hollín retenido.

#### **Reducción Catalítica Selectiva (SCR):**

Es un catalizador que usa amonio como agente para reducir el NO y el NO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Su eficiencia de reducción varía fuertemente con la temperatura. El amonio es generado

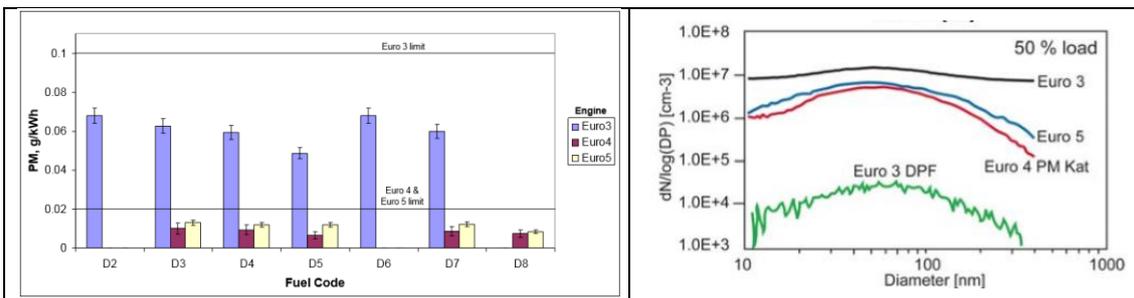
a partir de una solución de urea que se inyecta a los gases de escape. Dependiendo de las temperaturas de los gases de escape su eficiencia puede llegar al 90%.

La selección de una combinación de sistemas de post tratamiento depende del ajuste hecho en el motor. Cuando el motor se encuentra ajustado hacia una mezcla más pobre, existe un compromiso cruzado que permite mejorar el consumo de combustible y bajar las emisiones de MP, pero aumentando las temperaturas de combustión y por ende la generación de NOx. Es posible en este caso cumplir con el estándar Stage IIIB/Tier 4i reduciendo el exceso de NOx con un sistema SCR. A la inversa, si el motor se encuentra ajustado hacia una mezcla más rica, es posible cumplir con la norma bajando las emisiones de NOx en el motor, pero reduciendo el exceso de MP utilizando una combinación de EGR+DOC+DPF. De esta forma se reduce el exceso de MP principalmente en el DPF. No obstante, como se observa en la Figura 8, donde se muestran diversas mediciones realizadas en motores Diésel, para distintas configuraciones de sistemas de post tratamiento y niveles normativos, sólo el uso del DPF permite reducciones de NP de al menos dos órdenes de magnitudFigura 1.

En lo que sigue, el paso normativo Stage IV/Tier 4f, implica fundamentalmente una reducción importante del NOx, pero sin modificar el MP, por lo que es posible alcanzar estos niveles mediante la incorporación de un SCR a la combinación EGR+DOC+DPF, o adicionando al SCR, ya instalado en la fase anterior, un sistema EGR para obtener una reducción adicional de este contaminante (EGR+SCR) y eventualmente un DOC (EGR+DOC+SCR).

En la práctica, menos del 50% de los motores no de carretera Stage III/Tier 4i o Stage IV/Tier 4f, cuentan con DPF<sup>10</sup>. Esto significa que los beneficios en salud de reducir la norma en masa, son parciales por cuanto no garantiza una reducción significativa del NP. Es por ello que para el estándar Stage V la legislación de la Unión Europea incorporó el límite  $NP \leq 1 \cdot 10^{12}$ , para los rangos de potencia entre  $19 \leq P \leq 560$ . Este estándar si garantiza el uso de DPF en el post tratamiento de las emisiones y los respectivos beneficios en salud y cambio climático.

**Figura 8:** Comparación de resultados de emisiones medidos en NP y MP para distintas tecnologías de control de emisiones Diésel.



<sup>10</sup> [ICCT 2018]

<p>Bar chart showing ELPI stages 1-7, Total N, kWh-1 for Euro 3, Euro 4, and Euro 5 engines across fuel specifications D2 to D8. The y-axis is logarithmic from 1E+09 to 1E+14. Euro 3 is blue, Euro 4 is red, and Euro 5 is yellow.</p>	<p>Line graph showing dN/log(DP) [cm-3] vs Diameter [nm] for Euro 3, Euro 3 DPF, Euro 4 PM Kat, and Euro 5 at 100% load. The x-axis is logarithmic from 10 to 1000 nm, and the y-axis is logarithmic from 1.0E+3 to 1.0E+8.</p>
<p>Emisiones de partículas en motores Diésel medidas en masa (MP, gráfico superior) y número (Total N, gráfico inferior), para ciclo estacionario (ESC). Motor Euro 3, motor Euro 4 (con DPF), Motor Euro 5 (con SCR), con distintas especificaciones de combustibles (D2 a D8).                  Fuente: [CONCAWE 2005]</p>	<p>Emisiones de partículas diésel en número (NP), para motores Diésel Euro 3, Euro 3 con DPF, Euro 4 con PM Kat (filtro parcial), Euro 5 (con SCR), en dos niveles de carga (50% y 100%).                  Fuente: [SAE 2007]</p>

---

#### 4. PROGRAMAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN: ALGUNOS EJEMPLOS

---

Considerando el prolongado tiempo de vida de la maquinaria móvil no de carretera<sup>11</sup>, muchos países han adoptado políticas que permitan adelantar los beneficios de las tecnologías de control. A continuación, se explican dos tipos de programa que han resultado exitosos en Europa.

##### **Programa de reacondicionamiento con DPF**

Como se ha visto, el filtro de partículas ha resultado ser la única tecnología de post tratamiento que permite prácticamente eliminar el hollín de las emisiones de los motores Diésel. El reacondicionamiento de estos motores consiste en la instalación de un dispositivo DPF a la salida de los gases de escape, generalmente en reemplazo del silenciador, con la finalidad de purificar las emisiones, reteniendo el material particulado generado en la combustión en el motor.

Una de las experiencias más importantes de reacondicionamiento con DPF en maquinaria móvil no de carretera, corresponde a Suiza, donde con motivo de la construcción del túnel San Gotardo (57 km de largo), se inició un programa experimental de reacondicionamiento en 1990, con el objetivo de reducir las concentraciones de partículas diésel en el ambiente laboral. Para el año 1998 se contaba con un programa de certificación de DPF para el reacondicionamiento, que consideraba una eficiencia mínima de 97% medido en NP. En el año 2002 el reacondicionamiento con filtro de partículas de la maquinaria en construcciones subterráneas se hace obligatoria por la SUVA<sup>12</sup>, y la Oficina Federal del Medio Ambiente (FOEN), entrega una guía con recomendaciones para los grandes sitios de construcción de superficie.

En el año 2009, FOEN emite una ordenanza que hace obligatorio el reacondicionamiento para toda máquina de construcción con un motor Diésel de más de 37 kW<sup>13</sup>.

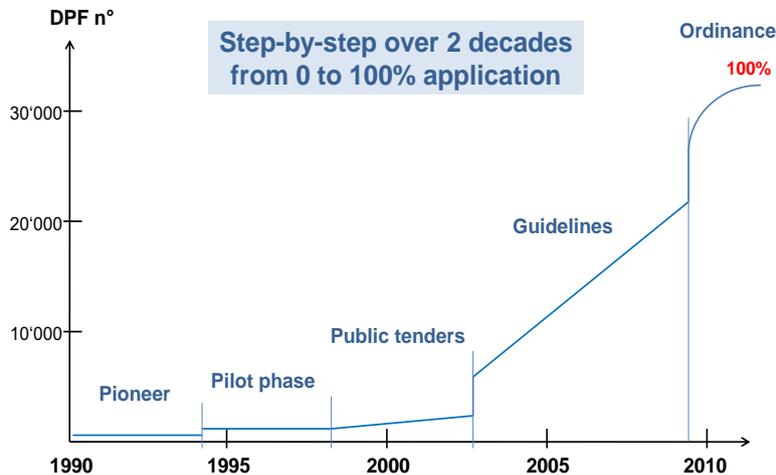
---

<sup>11</sup> Por ejemplo, la Agencia Ambiental Europea considera como tiempo de vida para los tractores y cosechadoras 10 años para un cargador frontal y 14 años para un minicargador (EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016).

<sup>12</sup> Fondo Nacional Suizo de Seguro contra accidentes, regula las condiciones ambientales en el trabajo.

<sup>13</sup> Para motores entre 18 y 37 kW la ordenanza hace obligatorio el uso de maquinaria nueva con DPF.

**Figura 9:** Reacondicionamiento con DPF de la maquinaria de construcción en Suiza.



Fuente: Construction machines with DPF – Experience in Switzerland. PhD. Gerhard Leutert. Presentación en Chile, Julio 2015.

La Ordenanza sobre Control de la Contaminación del Aire (OAPC), adicionalmente al reacondicionamiento para la maquinaria usada, consideró para la maquinaria nueva el cumplimiento del estándar europeo de emisiones del motor, más el cumplimiento de un límite de emisiones en NP de  $1 \cdot 10^{12}$  o el uso de un DPF certificado por FOEN para una eficiencia mayor al 97% en NP. Esto incluso antes que entrara en vigor el estándar Stage V con el límite de NP.

De esta forma FOEN llegó a autorizar 84 familias de motores, con 500 diferentes tipos de motor, para maquinaria de construcción, que cumplían el estándar y 44 tipos de DPF distintos, aplicables a motores usados o nuevos.

En todo caso el éxito de un programa de reacondicionamiento tiene que ver con la implementación de una serie de buenas prácticas tales como:

- Condiciones de mantenimiento del motor.
- Uso de filtros certificados en eficiencia y en durabilidad<sup>14</sup>.
- Correcta selección del sistema DPF.
- Verificación y seguimiento de las instalaciones.

Las condiciones de mantenimiento y de verificación y seguimiento son muy relevantes ya que la pérdida de eficiencia es lineal con el porcentaje de la superficie del DPF dañado<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> La Regulación UN ECE R132, entrega requisitos para la aprobación de tipo de dispositivos de control de emisiones para el reacondicionamiento de maquinaria móvil no de carretera.

<sup>15</sup> 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 con DPF 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.

### Zonas de Baja Emisión

Las Zonas de Baja Emisión (ZBE) corresponden a una experiencia de gran difusión en las ciudades de Europa y que establece un área específica en la cual la circulación de vehículos y/o el uso de maquinaria de construcción quedan limitados según su desempeño ambiental. Lo anterior mediante la exigencia del cumplimiento de un estándar ambiental de aprobación de tipo (Stage para la maquinaria de construcción), o mediante el reacondicionamiento con sistemas de post tratamiento como el DPF.

Si bien no se encuentra en las ZBE un esquema común es posible identificar las variables o atributos a considerar en su definición:

- **Flota Regulada:** Se regulan las fuentes móviles y las máquinas de construcción. Para la maquinaria se utiliza en general la misma clasificación de potencias establecida en las normas de emisiones.
- **Exigencia de emisiones:** Se prioriza la reducción del MP y NOx, por lo cual se enfoca a vehículos diésel, estableciendo límites de emisión conforme los estándares de aprobación de tipo (StageIIIA, StageIIIB, StageIV o StageV).
- **Área regulada:** Puede abarcar grandes áreas urbanas (Londres) o pequeñas zonas céntricas de la ciudad (Suecia).
- **Reacondicionamiento:** En general se permite o estimula el reacondicionamiento con sistemas de post tratamiento, para los que se establecen requerimientos de certificación y eficiencias mínimas.
- **Gradualidad:** En general los esquemas de implementación de ZBE consideran la gradualidad, con una primera fase de implementación de exigencias menores, para alcanzar los objetivos en una fase final (Londres 2008/2010/2012, Holanda 2008/2010/2013, Dinamarca 2008/2010).

PAIS	REGIÓN	REQUERIMIENTO
Austria	Viena	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stage IIIA o superior para toda la maquinaria de construcción.</li> <li>• Stage IIIB o superior para la maquinaria nueva.</li> </ul>
Dinamarca	Copenhague	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dentro de una zona de baja emisión debe aprobar la instalación de un DPF.</li> </ul>
Suecia	Gotemburgo, Malmö y Estocolmo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stage IIIA, exenciones permitidas bajo solicitud.</li> </ul>
Reino Unido	Londres	<p>Potencias entre 37-560 kW:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes Sitios de construcción en el área Gran Londres: Stage IIIA.</li> <li>• Cualquier sitio de construcción en zonas centrales: Stage IIIB.</li> </ul>
Alemania	Berlín	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stage IIIB toda la maquinaria de construcción.</li> <li>• Stage IIIA para maquinaria &lt;37 kW.</li> <li>• Maquinaria anterior debe estar equipada con DPF.</li> </ul>
	Mainz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquinaria de construcción de licitaciones públicas para obras de construcción debe estar equipada con DPF.</li> </ul>
	Bremen	<p>Requerimiento de emisiones para maquinaria de construcción de licitaciones públicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 19 a 37 kW Stage IIIA, si no, reacondicionado cn DPF.</li> <li>• 37 a 560 kW Stage IIIB, si no, reacondicionado con DPF.</li> <li>• Cuando el reacondicionamiento no es técnicamente factible la maquinaria se exceptúa.</li> </ul>
	Baden-Württemberg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 19 a 37 kW:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2017: Stage IIIA o DPF.</li> <li>○ 2019: Stage IIIA y DPF.</li> </ul> </li> <li>• 37 a 56 kW:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2017: Stage IIIB o DPF.</li> </ul> </li> <li>• 56 a 560 kW:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Stage IV o DPF.</li> </ul> </li> </ul>

Fuente: <https://urbanaccessregulations.eu/>

---

## 5. COMBUSTIBLES Y TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS

---

### **GNC/GNL**

Dentro de los combustibles alternativos más recurrentes en la revisión de opciones para reemplazar a los motores Diésel, se encuentra el Gas Natural Comprimido (GNC) o Licuado (GNL). Este combustible se puede usar en motores de encendido por chispa, denominados también de Ignición Positiva (PI). Históricamente los motores de encendido por chispa han presentado menores emisiones de partículas que un motor Diésel, por lo que no se ha requerido su control. No obstante, la alta eficiencia de retención de los filtros diésel, ha hecho que sus emisiones de partículas se hagan comparable a la de los motores Diésel con filtro (Ver Figura 10).

No obstante, un vehículo a GNC o GNL, que funcione con inyección directa, tiene un proceso de combustión muy similar al diésel y es capaz de emitir tantas partículas como un motor Diésel, excepto que cuente también con un filtro de partículas (GPF). Es por esta razón que la legislación de la Unión Europea ha incorporado a la norma Stage V el límite de NP en motores no de carretera con de encendido por chispa (PI).

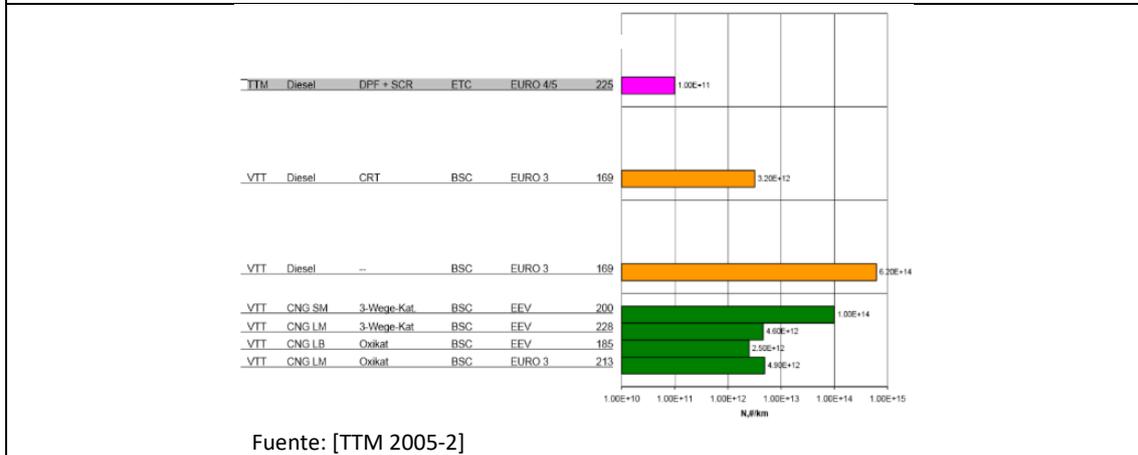
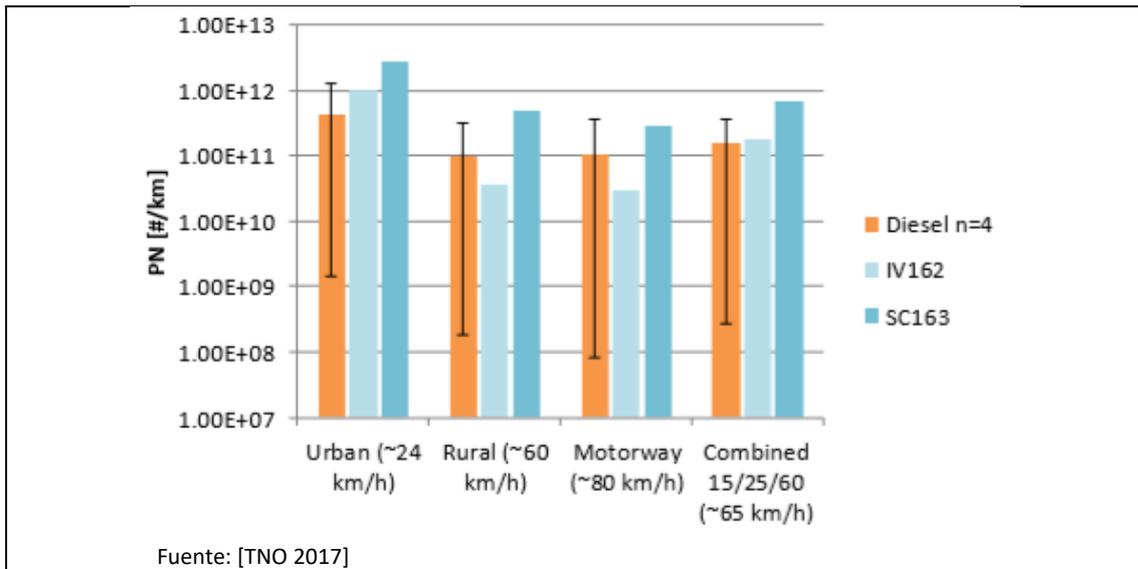
### **Electrificación**

La electrificación completa o híbrida de la propulsión y el trabajo mecánico de la maquinaria no de carretera es muy atractiva desde el punto de vista ambiental y de salud laboral ya que no tienen emisiones por el tubo de escape. También esta tecnología resulta atractiva desde el punto de vista de eficiencia energética, si se piensa que la máxima eficiencia de un motor Diésel alcanza 35% versus el 90% de un motor eléctrico.

No obstante, la electrificación en este rubro debe vencer algunos desafíos tal como una mayor complejidad de los accionamientos híbridos y condiciones ambientales más agresivas por las altas temperaturas, vibraciones y polvo, a los que este tipo de maquinaria está expuesto con frecuencia. Esto hace más difícil garantizar la fiabilidad y la vida útil requeridos.

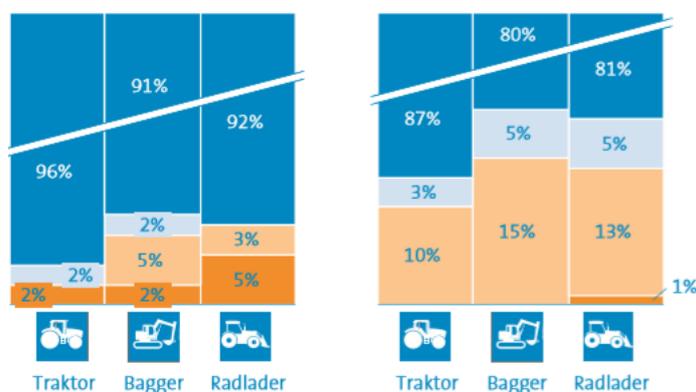
En Europa y EE.UU., se espera que los accionamientos híbridos representen entre el 10% y el 20% de las ventas en las tres categorías de máquinas de la clase de potencia de 56 a 150 kW en 2030. En Europa y los EE.UU., los accionamientos puramente eléctricos apenas desempeñan un papel. En China, se prevé que los accionamientos eléctricos representen hasta el 8% de las dos categorías de maquinaria de construcción estudiadas. En China, el suministro de energía para estos accionamientos se realiza a menudo por cable, lo que muestra ventajas económicas considerables en comparación con la instalación de una batería en un vehículo.

**Figura 10:** Gráfico superior: Emisiones de NP medidas en ruta (PEMS) de cuatro motores diésel Euro VI (con DPF), comparadas con dos motores GNL Euro VI (IV162 y SC163). Gráfico inferior: Tres motores Diésel con diferente estándar de emisión comparados en NP con motores a GNC.



En la clase de potencia de 19 a 56 kW, se espera que los tres mercados considerados representen hasta un 5% de las ventas de accionamientos eléctricos en 2030. Las diferencias regionales son menos pronunciadas, con la excepción de que aquí también en China se utiliza un cable para el suministro de energía en la maquinaria de construcción. Primeras máquinas en el área de tractores pequeños y las pequeñas máquinas de construcción ya están disponibles en varios fabricantes. Para el usuario, son decisivas para la compra unas exigencias muy individuales a la máquina. Estos pueden ser, por ejemplo, emisiones de ruido o funcionamiento local libre de emisiones.

**Figura 11:** Proyección de electrificación de maquinaria construcción al 2030. Izquierda 19 a 56 [kW], a la derecha 56 a 150 [kW].



Fuente: [VDMA 2018]

En términos de soluciones híbridas ya se comercializan algunas tecnologías que permiten recuperar la energía mientras, por ejemplo, se baja una carga, para ser acumulada y aprovechada cuando una sobredemanda de energía es requerida, apoyando el trabajo del sistema hidráulico en el izado, reduciendo el consumo de combustible, el tamaño de los motores y permitiendo la operación del motor Diésel en rangos de mayor eficiencia. No obstante, para que sean soluciones libres de hollín, estas tecnologías híbridas requerirán el uso de un motor Diésel con DPF.

En el año 2015 comenzó un esfuerzo conjunto entre Volvo Construction Equipment, junto con Skanska Suecia, varias universidades suecas y la Agencia Sueca de Energía para implementar un sitio de trabajo en una cantera, totalmente electrificado. Según el uso de los diferentes tipos de maquinaria, se consideraron diferentes soluciones de electrificación. Las excavadoras y las trituradoras, que permanecen mucho tiempo en un lugar, se conectaron a la red eléctrica mediante un cable. Mientras que dumpers y cargadores se electrificaron mediante el uso de baterías. Junto con eliminar las emisiones de los gases de escape la experiencia demostró una reducción del 70% en los costos de energía y un 25% en el costo de operaciones.

## 6. CONCLUSIONES

- La métrica correcta para evaluar las tecnologías “soot free” corresponde a la medición de número de partículas (NP), pues es la que cuenta con la suficiente sensibilidad instrumental y está mejor vinculada a los efectos en la salud.
- La implementación de estándares de aprobación de tipo en motores no de carretera permite mejorar sólo gradualmente las emisiones, considerando que la renovación de la flota de maquinaria no de carretera es aún más lenta que la flota de vehículos de carretera. Por lo tanto, se requieren enfoques de política y normativos sobre el mejoramiento de emisiones de la flota existente.
- Dentro de los estándares europeos y estadounidenses para motores nuevos, sólo la fase Stage IIIA/Tier 4i, representa una reducción importante del MP en masa y por ende del hollín en masa. No obstante no necesariamente representa una reducción significativa del NP, ya que esto depende del tren de dispositivos de post tratamiento seleccionados por el fabricante. En la práctica menos del 50% de los motores con dichos estándares incorporan DPF.
- Dentro de los sistemas de post tratamiento desarrollados para el cumplimiento de las normas de aprobación de tipo, sólo el uso del DPF garantiza una reducción significativa del NP.
- Como estrategias para acelerar las reducciones de hollín proveniente de la maquinaria no de carreta, existen al menos dos alternativas usadas principalmente en Europa: El reacondicionamiento con DPF y las Zonas de Baja Emisión.
- El reacondicionamiento con DPF permite reducir de manera inmediata las emisiones de toda la flota, pero requiere de un conjunto de buenas prácticas en el cuidado de la tecnología y la selección de la flota para asegurar su sostenibilidad en el largo plazo.
- En cuanto a las Zonas de Baja Emisión, permite acelerar la renovación de la flota por tecnologías más limpias con estándares de aprobación de tipo, pero la posibilidad de garantizar beneficios en salud y cambio climático dependerá de la métrica de la exigencia, si esta es en NP, conllevará la incorporación de DPF o tecnología Stage V con DPF.
- Respecto del combustible GNC/GLP, el combustible por sí mismo no asegura reducciones significativas de NP, salvo que se asocie a un estándar Stage V, el cual incluye límite en NP incluso para los motores encendidos por chispa (PI), que usan GNC.
- La electrificación total y parcial (hibridación) de la maquinaria no de carretera es un concepto que se está incorporando en la industria y ya existen soluciones disponibles. No obstante, todo este desarrollo tiene que vencer algunos desafíos importantes en cuanto a las condiciones de trabajo de este tipo de maquinaria y su uso intensivo de energía. Sin embargo hay proyecciones de entre un 4% a un 20% de penetración al 2030 entre híbrido y eléctrico, dependiendo del tipo de maquinaria y su rango de potencia. De estos porcentajes se espera que entre 1% y 5% sea completamente eléctrico.

---

## 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- [GEASUR 2014] “Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país”, estudio realizado por Geasur el año 2014.
- [FOEN 2015] “Non-road energy consumption and pollutant emissions”, Bern 2015
- [ICCT 2016] “Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment”. Tim Dallmann and Aparna Menon. White Paper, ICCT, 2016.
- [OMS 2012] “IARC: DIESEL ENGINE EXHAUST CARCINOGENIC”. International Agency for Research on Cancer, PRESS RELEASE N° 213, 2012
- [ICCT 2018] “Costs of Emission Reduction Technologies for Diesel Engines Used in Non-Road Vehicles and Equipment”. Tim Dallmann et al. Working Paper, ICCT, 2018.
- [TTM 2005] “Elimination of Engine Generated Nanoparticles”. Mayer et al. HAUS DER TECHNIK FACHBUCH. 2005
- [CONCAWE 2005] “Fuel effects on the characteristics of particle emissions from advanced engines and vehicles”. R, Carbone et al. Report N°1/05, CONCAWE, 2005.
- [SAE 2007] “Nanoparticle-Emission of EURO 4 and EURO 5 HDV Compared to EURO 3 With and Without DPF”, A. Mayer et al. SAE 2007-01-1112.
- [TNO 2017] “Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions”. Robin Vermeulen. TNO 2017 R11336.
- [TTM 2005-2] “Erdgas-Ottomotor oder Dieselmotor?. für Busse des öffentlichen Verkehrs heute und morgen”. A. Mayer. 2005
- [VDMA 2018] “Antrieb im Wandel. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen und ihre Auswirkung auf den Maschinen und Anlagenbau und die Zulieferindustrie. Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch im Urteil der 21 neuesten Untersuchungen”. VDMA-FVA-FVV-FEV CONSULTING. 2018.
- [ETH 2004] “The Respiratory Tract as Portal of Entry for Inhaled Ultrafine/Nanosized Particles”. Günter Oberdörster Dept. of Environmental Medicine University of Rochester, NY. 8th International ETH-Conference on Combustion Generated Particles – 2004.



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)