

2002-07-17

**CALIDAD DEL AIRE.
PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y
CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE FLUJO
PARCIAL NECESARIOS PARA EVALUAR LAS
EMISIONES DE HUMO GENERADAS POR LAS
FUENTES MÓVILES ACCIONADAS CON DIÉSEL.
MÉTODO DE ACELERACIÓN LIBRE**



E: AIR QUALITY. MEASUREMENT PROCEDURE AND CHARACTERISTICS OF THE PARTIAL FLOW EQUIPMENT FOR EVALUATING EXHAUST GAS SMOKE EMISSIONS FROM DIESEL-POWERED MOBILE SOURCES. FREE ACCELERATION TEST

CORRESPONDENCIA:

DESCRIPTORES: emisión de gases; vehículos diesel; contaminación atmosférica; calidad del aire.

I.C.S.: 13.040.50

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. 6078888- Fax 2221435

Prohibida su reproducción

Primera actualización
Editada 2002-08-05

PRÓLOGO

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, **ICONTEC**, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993.

ICONTEC es una entidad de carácter privado, sin ánimo de lucro, cuya Misión es fundamental para brindar soporte y desarrollo al productor y protección al consumidor. Colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado del país, para lograr ventajas competitivas en los mercados interno y externo.

La representación de todos los sectores involucrados en el proceso de Normalización Técnica está garantizada por los Comités Técnicos y el período de Consulta Pública, este último caracterizado por la participación del público en general.

La NTC 4231 (Primera actualización) fue ratificada por el Consejo Directivo en 2002-07-17

Esta norma está sujeta a ser actualizada permanentemente con el objeto de que responda en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.

A continuación se relacionan las empresas que colaboraron en el estudio de esta norma a través de su participación en el Comité Técnico 000015 Calidad de aire.

CENTRO DE DIAGNÓSTICO AUTOMOTOR
DEL VALLE
COMERKOL LTDA.
COMPAÑÍA COLOMBIANA AUTOMOTRIZ-
MAZDA
CONVENIO DEL DEPARTAMENTO
ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE
"DAMA" Y LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER "UIS"

DIESEL Y TURBOS
GENERAL MOTOR - COLMOTORES
GOLD - ELECTRONICS
MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE
PSI COLOMBIA LTDA.

Además de las anteriores, en Consulta Pública el Proyecto se puso a consideración de las siguientes empresas:

AMBIENCOL INGENIEROS
ASOCIACIÓN NACIONAL DE
INDUSTRIALES - ANDI
BEAR ENGINEERING
CUMMINS DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DEL
MEDIO AMBIENTE - DAMA
DETROIT DIESEL
EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS
- ECOPETROL

FEDERACIÓN NACIONAL DE
COMERCIANTES - FENALCO
MINISTERIO DE TRANSPORTE
PANAMERICAN EQUIPMENT
SOCIEDAD DE FABRICACIÓN DE
AUTOMOTORES S.A. - SOFASA
TECNOINGENIERÍA LTDA.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ICONTEC cuenta con un Centro de Información que pone a disposición de los interesados normas internacionales, regionales y nacionales.

DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN

**CALIDAD DEL AIRE.
PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS
DE FLUJO PARCIAL NECESARIOS PARA EVALUAR LAS EMISIONES
DE HUMO GENERADAS POR LAS FUENTES MÓVILES ACCIONADAS
CON DIÉSEL. MÉTODO DE ACELERACIÓN LIBRE**

1. OBJETO

La presente norma tiene como objeto establecer la metodología para evaluar las emisiones de humo del escape de los vehículos accionados con diesel, realizadas en condiciones de aceleración libre y cuyo resultado será comparado con lo establecido en la reglamentación ambiental vigente.

Así mismo, se establecen las características técnicas mínimas de los equipos de flujo parcial, necesarios para realizar y certificar dichas mediciones dentro del desarrollo de los programas de control vehicular.

2. DEFINICIONES

Para el propósito de esta norma se aplican las siguientes definiciones, sin perjuicio de lo establecido en la reglamentación vigente:

2.1 Año modelo: dato que identifica el año de producción del tipo de vehículo automotor.

2.2 Calibración: conjunto de operaciones mediante las cuales se establece, bajo condiciones especificadas, la relación existente entre el valor indicado por un medidor de opacidad de humos dado y los valores correspondientes a un filtro o elemento de opacidad conocida¹.

2.3 Centro de diagnóstico automotor: instalación o local equipado con los instrumentos definidos por esta norma, para hacer medición de las emisiones contaminantes emitidas por el tubo de escape de los vehículos.

2.4 Errores máximos permisibles (de un instrumento de medición): valores extremos de un error permitido por las especificaciones, las regulaciones, etc para un instrumento dado.²

2.5 Fuente móvil: fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse. Para efectos de la presente especificación, son fuentes móviles los vehículos

¹ Esta definición se emplea para los propósitos de esta norma y no coincide con lo establecido en la NTC 2194

² Definición tomada de la NTC 2194:1997 "Vocabulario de Términos Básicos y Generales en Metrología."

automotores, con excepción de las motocicletas y los vehículos equipados con motores de dos (2) tiempos.

2.6 Fuente móvil a diesel: fuente móvil que utiliza para su operación un motor accionado con combustible diesel.

2.7 Hardware: equipo físico que conforma un sistema de cómputo, como los aparatos y componentes magnéticos, mecánicos, eléctricos o electrónicos; distintos a los programas (software) que se ejecutan o son parte del sistema.

2.8 Humo blanco y azul: partículas compuestas especialmente de líquidos (agua, combustible y aceite) incoloros (gotas) que reflejan y refractan la luz observada. El color observado resulta del índice de refracción del líquido en las gotas y del tamaño de las mismas. El humo blanco se debe usualmente a la condensación de vapor de agua o gotas líquidas de combustible. El humo azul es consecuencia, usualmente, de las gotas generadas por la combustión incompleta de combustible o aceite lubricante.

2.9 Humo diésel: partículas, incluidos aerosoles, suspendidos en la corriente gaseosa del escape de una fuente móvil a diésel, que absorbe, refleja o refracta la luz.

2.10 Humo negro: partículas compuestas de carbón (hollín), que son expulsadas como producto del proceso de combustión del motor.

2.11 Linealidad del medidor de humos: medida de la desviación máxima absoluta de los valores medidos por el medidor de humo con relación a los valores de referencia.

2.12 Medición instrumental del humo: cualquier técnica que involucre la medición directa de una propiedad intrínseca del humo sin acudir al juicio o a la comparación humana.

2.13 Método de extinción de luz: cualquier técnica que implique la medición de la cantidad de luz que no logra atravesar una columna de humo.

2.14 Método de filtración: cualquier método que implique la medición de la cantidad de partículas de hollín recolectadas al hacer pasar los gases de escape a través de un medio filtrante.

2.15 Opacidad (N): fracción de la luz expresada en porcentaje (%), que al ser enviada desde una fuente se le impide llegar al receptor del instrumento observador y que se expresa en función de la transmitancia.

$$N = 100 (1 - \text{Transmitancia})$$

2.16 Opacímetro: tipo de medidor de humo diseñado para medir la opacidad de una corriente o una muestra de humo mediante el principio de extinción de luz.

2.17 Opacímetro de tipo muestreo (también denominado opacímetro de flujo parcial): medidor de humo que toma continuamente una muestra de una porción de la totalidad de los gases de escape que fluyen y los dirige a una celda de medida. Con este tipo de medidores de humo, la trayectoria óptica efectiva es función del diseño del medidor de humo.

2.18 Prueba abortada: prueba que por factores externos a la prueba misma no puede llegar a su fin y no genera un número consecutivo para la emisión del correspondiente certificado de emisiones en los programas de control establecidos por las autoridades competentes.

2.19 Operador: persona capacitada para realizar la prueba de humos, y que trabaja para el centro de diagnóstico automotor autorizado.

2.20 Prueba rechazada: prueba que llega a su fin y posee un número consecutivo. El rechazo se puede dar por incumplimiento de los requisitos dados en la verificación previa o del requisito de opacidad o de las condiciones de prueba durante el ensayo³

2.21 Software de aplicación: programa específico para la solución de un problema de aplicación.

2.22 Sonda de muestreo: elemento que se introduce en el tubo de escape del vehículo con el objeto de tomar una muestra de los gases de escape del mismo.

2.23 Sensor de temperatura: elemento que se utiliza con el fin de determinar la temperatura del aceite lubricante del cárter del motor.

2.24 Sensor de revoluciones por minuto del motor: elemento que se utiliza con el fin de determinar las revoluciones por minuto del motor.

2.25 Temperatura normal de operación: temperatura del aceite del motor, establecida por el fabricante o ensamblador del vehículo, para la operación normal del motor. Cuando no se disponga de la especificación del fabricante o ensamblador del vehículo, la temperatura normal de operación se logra cuando el aceite en el cárter del motor ha alcanzado como mínimo los 60°C.

2.26 Transmitancia (T): es la fracción de luz, expresada en porcentaje (%), que al ser transmitida desde una fuente, a través de una trayectoria oscurecida por humo, llega al receptor del instrumento observador.

$$T = 1 - \frac{\text{opacidad}}{100}$$

2.27 Ley de Beer-Lambert: para propósitos de medición del humo diésel, se puede utilizar una ecuación que expresa la relación entre la opacidad de una corriente de humo, la longitud de trayectoria óptica efectiva a través de la corriente, y la opacidad del humo por unidad de longitud de trayectoria.

$$T = \text{Luz transmitida} / \text{Luz incidente} = e^{-KL}$$

y

$$N = 100 (1 - e^{-KL})$$

³ Los operarios deben estar en capacidad para determinar la causa que genera el rechazo de la prueba. Cuando el rechazo sea generado por incumplimiento de las condiciones de la prueba, el ensayo debe ser repetido, sin solicitar la reparación del vehículo.

Donde:

T	=	es la transmitancia
K	=	es la densidad del humo
N	=	opacidad
L	=	longitud de trayectoria óptica efectiva

2.28 Densidad del humo (K) (conocida también como “Coeficiente de extinción de luz” o “Coeficiente de absorción de luz”): medio fundamental para cuantificar la capacidad de una corriente de humo o del humo de una muestra para oscurecer la luz. Por convención, la densidad del humo se expresa en metros a la menos uno (m^{-1}). La densidad del humo es una función del número de partículas de humo por unidad de volumen de gas, la distribución por tamaño de las partículas de humo, y las propiedades de absorción y dispersión de las partículas. Sin la presencia de humos azules o blancos, la distribución de tamaño y las propiedades de absorción / dispersión son similares para todas las muestras de gases de escape diésel y la densidad de humo es principalmente una función de la densidad de las partículas de humo. La densidad de humo o coeficiente de absorción, K , (o m^{-1}), de una corriente de humo se define de la siguiente manera, a partir de la ley de Beer- Lambert:

$$K = - (1/L) \ln (1 - N/100)$$

Donde:

K	=	densidad del humo m^{-1}
L	=	es la longitud de trayectoria óptica efectiva en m
N	=	opacidad en porcentaje

2.29 Longitud de la trayectoria óptica efectiva (L): longitud del haz de luz entre el emisor y el detector que es interceptado por la corriente de escape.

2.30 Marcha mínima o ralenti: velocidad del motor requerida para mantenerlo funcionando y sin carga, y en neutro (para cajas manuales) y en parqueo (para cajas automáticas).

2.31 Velocidad gobernada: velocidad máxima que puede alcanzar el motor antes de que se produzca la reducción o corte del suministro de combustible, para evitar daños por sobrerrevoluciones. Es un parámetro especificado por el fabricante del motor.

2.32 Gobernador de velocidad: sistema limitador de la velocidad del motor que impide que éste sobrepase la velocidad gobernada.

2.33 Zona de medida del medidor de humo: longitud efectiva entre la fuente de luz y el detector del medidor de humo por entre los cuales atraviesan los gases de escape e interactúan con el haz de luz del medidor de humo.

3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA OPACIDAD

3.1 CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales pueden afectar los resultados de la prueba de humos en aceleración libre, por lo cual se debe cumplir con lo siguiente:

- temperatura ambiente: debe estar por encima de 2 °C (36 °F);
- los recintos en donde se realicen las pruebas no deben favorecer una concentración de gases que puedan afectar la medición y perjudicar la salud de los operadores;
- humedad: no debe existir humedad visible, neblina o lluvia en el área donde se efectúe la medición de opacidad.

3.2 PREPARACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

3.2.1 Antes de llevar a cabo el ensayo de aceleración libre, debe configurarse la unidad de datos del medidor de humo. Se recomienda consultar las instrucciones de operación provistas por el fabricante de la unidad de procesamiento, para procedimientos específicos de configuración; sin embargo, se deben cumplir los siguientes pasos funcionales.

- se debe seleccionar como unidad de medida, aquella requeridos por la autoridad ambiental competente (porcentaje de opacidad ó densidad de humo).
- solamente, en el caso de requerirse el reporte de unidades en porcentaje de opacidad, la unidad de procesamiento de datos debe realizar las correcciones de Beer-Lambert, como se describen en el anexo B, para corregir el resultado de la prueba a las condiciones de medida del tubo de escape estándar. Para este fin es indispensable suministrar los valores de potencia nominal del motor o el diámetro del tubo de escape, de acuerdo con lo establecido en el numeral 3.2.6.
- si se emplea una fuente luminosa del medidor de humo de LED (diodo emisor de luz) rojo y se van a realizar correcciones de longitud de onda de la fuente de luz dentro de la unidad de procesamiento de datos, se deben realizar las selecciones adecuadas para activar estos cálculos (véase el Anexo B).

3.2.2 La unidad configurada se debe encender e inicializar, asegurándose del correcto estado de mantenimiento y calibración de la misma, de acuerdo con las instrucciones contenidas en el manual de operación provisto por el fabricante y lo establecido en la presente norma.

3.2.3 Antes de efectuar las mediciones de humo, el medidor de humo debe verificar los valores de cero y escala máxima (algunos medidores pueden realizar en forma automática las revisiones de cero y escala máxima. En otros medidores la secuencia debe realizarse manualmente).

3.2.3.1 Calentamiento del medidor. Antes de cualquier revisión o ajuste de cero y/o escala máxima, el medidor de humo debe calentarse y estabilizarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Si el medidor de humo está equipado con un sistema de

purga de aire, a fin de evitar que se llene de hollín el medidor óptico, se recomienda activar este sistema y ajustarlo de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

El equipo no debe permitir mediciones si no ha superado su tiempo o temperatura de calentamiento.

3.2.3.2 Cero del medidor de humo. Con el medidor en el modo de lectura de opacidad, y sin bloqueo del haz luminoso del medidor de humo, se ajusta la lectura para presentar opacidad de $0,0 \% \pm 1,0 \%$ ó $0,00 \text{ m}^{-1} \pm 0,10 \text{ m}^{-1}$, si se calibra en unidades de densidad de humo (K).

3.2.3.3 Escala total del medidor de humo. Con el medidor de humo en el modo de lectura de opacidad, y evitando que cualquier luminosidad alcance el detector, se ajusta la lectura del medidor para que presente opacidad de $100,0 \% \pm 1,0 \%$, o si se efectúa la calibración del recorrido de la escala del medidor de humo y el fabricante lo requiere, con el medidor de humo en el modo de lectura de Densidad de Humo (K), se instala un filtro de densidad neutra de valor conocido entre el emisor de luz y el detector. El filtro de densidad neutra debe cumplir con los requisitos de precisión del numeral 4.3.1, y debe presentar un valor nominal en la escala de $1,5 \text{ m}^{-1}$ a $5,5 \text{ m}^{-1}$. Se ajusta la lectura del medidor de humo para presentar el valor nominal del filtro en $\pm 0,10 \text{ m}^{-1}$.

3.2.4 Una vez el medidor de humo ha realizado lo establecido en 3.2.3, un mensaje en la pantalla del mismo le indicará al operador que puede introducir la sonda de prueba en el tubo de escape del vehículo, a la profundidad indicada por el fabricante. Si el diseño del tubo de escape del vehículo no permite que sea insertada a esta profundidad, se requiere del uso de una extensión del tubo de escape, la cual debe garantizar que no se presente dilución de la muestra.

3.2.5 Digitar la información del cliente y del vehículo respectivo, de acuerdo con lo establecido en el numeral 8.

3.2.6 Se debe determinar la potencia nominal del vehículo solamente en el caso de reporte de resultados en porcentaje de opacidad. En este caso, los valores de potencia nominal del vehículo deben ser asignados directamente por el software de aplicación de acuerdo con la marca y línea del vehículo a partir de una base de datos ingresada y suministrada por la autoridad competente.

En caso de que el motor del vehículo haya sido modificado y su potencia no corresponda a la de marca y línea originales, el software debe permitir digitar el valor de la potencia, el cual será el nominal inscrito en la placa o calcomanía de reglaje fijada en el motor. Solamente, cuando sea imposible acceder a la información anterior referente a la potencia, el software de aplicación debe permitir ingresar el valor del diámetro externo real del tubo de escape, a fin de que el software de aplicación relacione esta información con una longitud real efectiva (L_s) y realice los cálculos descritos en el Anexo B.

3.3 INSPECCIÓN Y PREPARACIÓN PREVIA POR PARTE DEL OPERARIO

3.3.1 Sobre el vehículo se deben verificar los siguientes puntos.

- a) Si el vehículo es de transmisión manual, ésta debe estar en posición neutro y el pedal del embrague debe estar libre.

- b) Si el vehículo es de transmisión automática, ésta debe colocarse en posición de parqueo, si la transmisión no dispone de esta posición, deberá entonces colocarse en neutro⁴.
- c) Se debe verificar que no existan obstáculos que impidan el avance libre del pedal del acelerador en todo su recorrido. Si existen tales obstáculos la prueba debe rechazarse.
- d) Las ruedas del vehículo deben estar bloqueadas o el vehículo debe estar inmovilizado para evitar que se ponga en movimiento durante la prueba.
- e) El aire acondicionado del vehículo debe estar apagado.
- f) Si el vehículo está equipado con freno de motor o de escape, éstos deben desactivarse.
- g) Todo el sistema de precalentamiento del aire de admisión debe estar apagado.
- h) Deben estar desactivados todos aquellos dispositivos instalados en el motor o en el vehículo que alteren las características normales de velocidad del motor y que tengan como efecto la modificación de los resultados de la prueba de aceleración libre o que impidan su ejecución adecuada.
- i) Se registran los valores de velocidad ralentí y gobernada⁵
- j) Se debe verificar que el gobernador de la bomba de inyección esté limitando la velocidad del motor, para lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento.

Con el motor en ralentí, se presiona lentamente el acelerador y se permite que la velocidad del motor se incremente gradualmente para alcanzar su velocidad gobernada. A medida que se incrementa la velocidad se debe prestar atención a cualquier indicación visible o sonora que pueda poner en duda las buenas condiciones del motor o del vehículo.

Si no hay señales de problemas, se debe permitir que el motor incremente su velocidad hasta tal punto en que sea posible comprobar que el gobernador limita la velocidad máxima del motor. Si hay algún indicio de que la capacidad limitadora del gobernador no está operando, o que se esté presentando algún daño en el motor o alguna condición insegura para el personal o el equipo, debe liberarse inmediatamente el acelerador y rechazarse la prueba de aceleración libre.

- k) Se debe verificar que no existan fugas en el tubo de escape, silenciador, tapa de llenado del tanque de combustible, tapa de llenado del aceite del motor y en las uniones al múltiple de escape o alguna salida adicional a las de diseño, que provoquen una dilución de los gases del escape o una fuga de los mismos. En caso de que alguna de estas circunstancias se presente, el operario debe ingresar al sistema la información correspondiente, para que el software del medidor de

⁴ Las condiciones de ensayo respecto a este numeral pueden ser modificadas para algunas marcas de vehículos automáticos, mediante la expedición de condiciones particulares definidas por la autoridad ambiental.

⁵ En caso de que no se cuente con la información del fabricante del motor sobre el valor de la velocidad gobernada o ralentí se debe determinar dichas velocidades experimentalmente, al momento de verificar que el gobernador de la bomba de inyección limite la velocidad del motor. (véase el numeral 3.3.1 j))

humo permita la generación del certificado de rechazo de la prueba para dicho vehículo.

- l) Se verifica la temperatura del aceite del motor, la cual debe estar dentro de los rangos de temperatura normal de operación. Si el motor no cumple con los requisitos de temperatura de operación, se pone en marcha el motor/vehículo bajo carga durante al menos 15 min, o hasta que la temperatura del aceite indique que se han alcanzado dichas temperaturas normales de operación del motor.

3.3.2 Se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones especiales de instalación:

- la sonda del medidor de humo de flujo parcial deberá insertarse en el tubo de escape enfrentando la corriente y en dirección del flujo del humo, siguiendo las instrucciones del fabricante. La distancia entre el borde interior del extremo abierto de la sonda de muestra y la pared del tubo de escape debe ser de al menos 5 mm (0,917 pulgadas).

Para el muestreo del humo sólo deben emplearse sondas o tubos de muestreo, o líneas, especificados por el fabricante del medidor de humo. Se deben seguir estrictamente las recomendaciones del fabricante en cuanto a la longitud de la línea de muestreo.

- al efectuar la medición de opacidad en vehículos equipados con múltiples salidas de escape, no es necesario medir el humo de cada salida de escape. Se debe seguir el siguiente método.

Si no existe diferencia apreciable entre el humo del escape que sale de cada salida del escape múltiple, se debe medir el humo de la salida de escape que permita instalar más fácilmente el opacímetro. Esta determinación debe tomarse por observación visual del humo emitido durante el ciclo preliminar de aceleración libre indicado en el numeral 3.4.

Si existe una diferencia apreciable entre el nivel de humo proveniente de cada una de las salidas del escape, se debe instalar el opacímetro y efectuar el ensayo de aceleración libre sobre la salida de escape que por observación visual parezca tener el mayor nivel de humo.

- Se debe disponer de un tacómetro para medir la velocidad del motor, el cual debe instalarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante. La información de velocidad deberá ser capturada por la unidad de procesamiento del equipo para que mediante indicaciones visuales en pantalla, le informe al operador si debe presionar el acelerador, liberarlo o dejar el vehículo en ralentí según lo especifica el ciclo de aceleración libre del numeral 3.4.

3.4 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

3.4.1 Ciclos de aceleración libre

Con el vehículo acondicionado en la forma indicada en el numeral 3.3 y con el motor operando en ralentí y a temperatura normal de operación; el operador debe desarrollar la siguiente secuencia:

- oprimir completamente el acelerador en un tiempo menor a un segundo;
- mantener el acelerador completamente oprimido hasta que el motor alcance su velocidad gobernada, luego de alcanzarla, debe mantenerla de 2 s a 4 s y después soltar el acelerador para que el motor regrese a su velocidad de ralentí.

Nota. Si a los 5 s de estar el acelerador completamente oprimido, el motor no ha alcanzado su velocidad gobernada, el software de aplicación del equipo deberá rechazar la prueba.

- una vez suelto el acelerador deben transcurrir 15 s antes de iniciar el siguiente ciclo de aceleración libre.

El vehículo debe recibir por lo menos cuatro ciclos de ensayo empleando la secuencia anteriormente descrita. El primer ciclo permite que el operador de la prueba se familiarice con el movimiento adecuado del acelerador, y además retirar el hollín remanente que se pudiera acumular en el sistema de escape del vehículo durante su operación previa. Con los tres ciclos restantes se determinan los valores de humo máximos promediados en 0,5 s, corregidos para cada uno de los tres ciclos de aceleración libre, empleando los algoritmos de procesamiento de datos de humo descritos en los Anexos A y B.

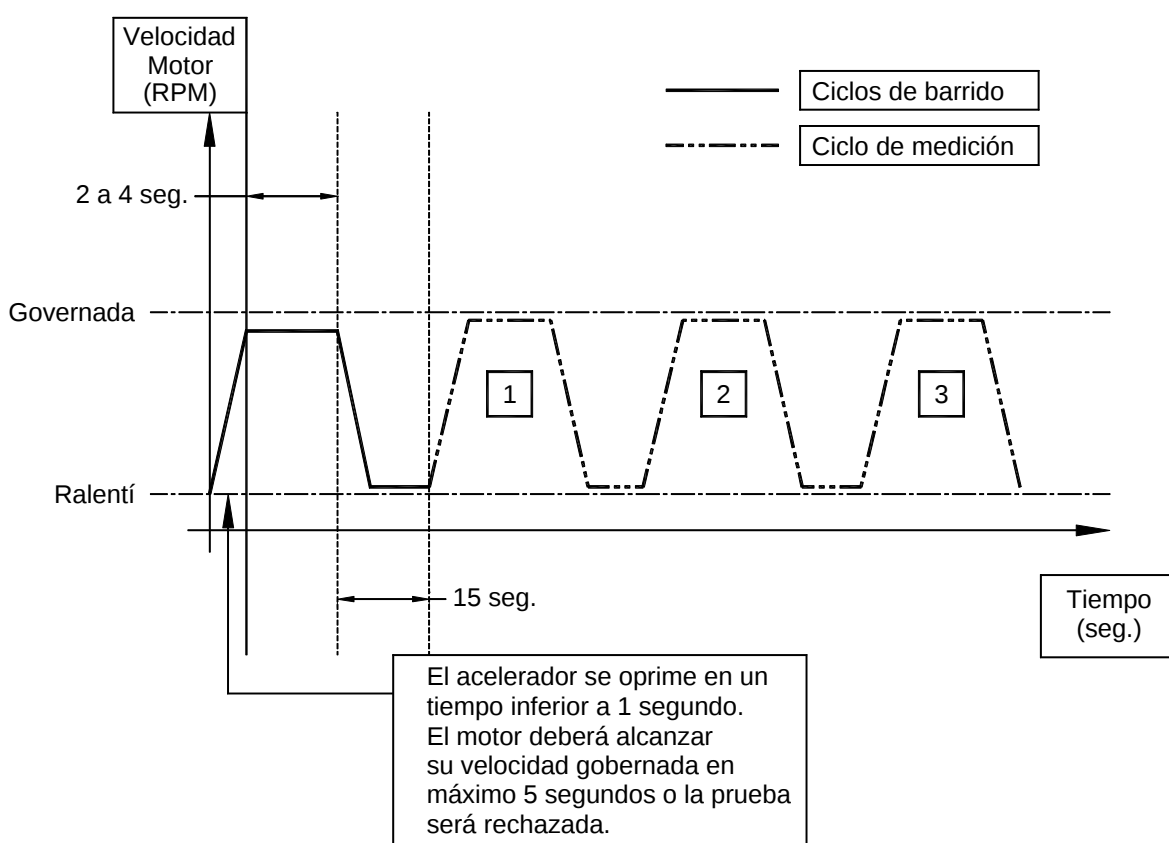


Figura 1. Ciclos de aceleración libre

3.4.2 Criterios de validación del ensayo

Se deben considerar válidos los resultados de ensayo del numeral 3.4.1 sólo después de que se haya cumplido con los siguientes criterios.

- los valores de desviación del cero del medidor de humo luego del ensayo no deben exceder $\pm 2,0$ % de opacidad para mediciones de humo realizadas en opacidad ó $\pm 0,15 \text{ m}^{-1}$ para mediciones efectuadas en densidad de humo K.
- la diferencia aritmética entre los valores mayores y menores de humo promedio máximo en 0,5 s de los tres ciclos de ensayo no debe exceder de 5,0 % de opacidad ó $0,5 \text{ m}^{-1}$, para mediciones en densidad de humo. Como ejemplo ilustrativo se da el siguiente caso, un vehículo obtiene los siguientes resultados de opacidad en los tres ciclos de medición: 45 % de opacidad, 47 % de opacidad y 50 % de opacidad. La diferencia aritmética de los valores mayores y menores es 50 % de opacidad – 45 % de opacidad = 5 % de opacidad. En este caso específico la prueba se considera válida.

3.4.3 Ensayos inválidos

3.4.3.1 Si los datos del ensayo de humo del numeral 3.4.1 no cumplen los criterios de validación de ensayo del numeral 3.4.2, se recomienda repetir el proceso de medición (véase el numeral 3.4.1), verificando con anterioridad que el cero del medidor de humo, posterior al ensayo no se exceda a causa de una desviación positiva del cero; la causa probable es la acumulación de hollín en la óptica del medidor de humo. Es necesario interrumpir la exposición al humo de escape antes de volver a poner en cero el medidor.

3.4.3.2 Si después de repetir la prueba:

- a) Los resultados continúan sin cumplir los criterios de validación del numeral 3.4.2 y persiste alguna la circunstancia descrita en el numeral 3.4.3.1, entonces la prueba debe ser abortada y repetida posteriormente hasta que se hayan resuelto las anomalías del equipo;
- b) Los resultados continúan sin cumplir los criterios de validación del ensayo y se verifica que no se presenta la circunstancia descrita en el numeral 3.4.3.2 literal a), el operario debe ingresar al sistema la correspondiente información de falla, para que el software del medidor de humo permita la generación del certificado de rechazo de la prueba para dicho vehículo, ya que esta situación es indicadora de un mal funcionamiento del motor.

3.4.4 Cálculo y reporte del resultado final del ensayo

Si se cumple con los criterios de validación del numeral 3.4.2, se deben considerar los datos como válidos y el ensayo se habrá completado. El resultado final del ensayo será el promedio aritmético de los valores de opacidad de los tres ciclos de medida, cada uno de los cuales se ha obtenido aplicando el promedio máximo de 0,5 s calculado conforme a lo señalado en el Anexo A.

El software de aplicación del equipo debe comparar el resultado final de la prueba con lo establecido en la reglamentación ambiental vigente, y de acuerdo con el resultado deberá

emitir el certificado de aprobación o rechazo en los términos y características establecidas por la autoridad competente.

Nota. El cálculo del valor promedio de 0,5 s de cada ciclo de prueba lo deberá realizar automáticamente la unidad de procesamiento del equipo de medida de humo, mediante la incorporación de dispositivos de hardware o software que efectúen el filtraje de la señal conforme al algoritmo indicado en el Anexo A.

4. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE ENSAYO

Esta sección ofrece especificaciones para el equipo de ensayo requerido y auxiliar que se emplea en el ensayo de aceleración libre.

4.1 REQUISITOS GENERALES PARA EL EQUIPO DE MEDICIÓN DE HUMO

Para realizar la prueba de aceleración libre se requiere el uso de un equipo de medición de humos que debe tener tres unidades funcionales. Estas unidades pueden integrarse en un solo componente o suministrarse como un sistema de componentes conectados entre sí. Las tres unidades funcionales son:

- a) Un opacímetro de flujo parcial que cumpla con las especificaciones del numeral 4.2.
- b) Una unidad de procesamiento de datos capaz de realizar las funciones descritas en los Anexos A y B, que además permita controlar la ejecución de la prueba, almacenar los resultados en medio magnético e imprimir los certificados de aprobación o rechazo de la prueba, conforme a lo descrito en el numeral 5.
- c) Dispositivos de impresión y registro para emitir los certificados. Adicionalmente, el equipo debe disponer de los elementos para almacenamiento magnético y transmisión de los datos requeridos por la autoridad ambiental correspondiente.

4.2 REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA EL OPACÍMETRO

4.2.1 Linealidad

La linealidad debe ser $\pm 2 \%$ de opacidad ó $\pm 0,30 \text{ m}^{-1}$ en densidad de humo, cuando se verifique mínimo en tres puntos, por ejemplo 0 %, 100 % y un valor intermedio el cual se puede obtener empleando un filtro de valor conocido que cumpla con las especificaciones dadas en el numeral 4.3.1.

4.2.2 Tasa de desviación del cero

No debe exceder el $\pm 1 \%$ de la opacidad/hora.

4.2.3 Requisitos de tiempo de respuesta del instrumento

4.2.3.1 Requisito de tiempo total de respuesta del instrumento. El tiempo total de respuesta del instrumento (t) debe ser: $0,500 \text{ s} \pm 0,015 \text{ s}$; se define como la diferencia entre los tiempos cuando el resultado del medidor de humo alcanza el 10 % y el 90 % de la escala total, cuando la opacidad del gas que se mide está cambiando en menos de 0,01 s; debe incluir todos los tiempos de respuesta física, eléctrica y del filtro. Matemáticamente, se representa con la siguiente ecuación. (Para una metodología más detallada y un cálculo de ejemplo, véase el Anexo A).

$$t = \sqrt{t_p^2 + t_e^2 + t_F^2}$$

Donde:

t	=	tiempo total de instrumento
t_p	=	tiempo de respuesta física
t_e	=	tiempo de respuesta eléctrica
t_F	=	tiempo de respuesta del filtro

4.2.3.2 Tiempo de respuesta física (t_p). Es la diferencia entre los tiempos cuando la salida de un receptor de respuesta rápida (con un tiempo de respuesta de no más de 0,01 s) alcanza el 10 % y el 90 % de la desviación completa cuando la opacidad del gas que se mide cambia en menos de 0,1 s.

El tiempo de respuesta física se define sólo para el medidor de humo y excluye la sonda y la tubería de muestra. Sin embargo, en algunos sistemas de medición de humo en uso, la sonda y la línea de muestra pueden afectar de manera significativa el tiempo de respuesta general del sistema. De ser necesario, se debe tener en cuenta esto para cualquier sistema de medición de humo particular.

Para medidores de humo del tipo de flujo parcial donde la zona de medición es una sección recta de la tubería de diámetro uniforme, se puede calcular la respuesta física por medio de la siguiente ecuación:

$$t_p = 0,8 * V/Q$$

Donde:

Q	=	tasa de flujo de gas que se encuentra a través de la zona de medición;
V	=	volumen de la zona de medición.

Para tales instrumentos, la velocidad del gas que se encuentra a través de la zona de medición no debe diferir en más del 50 % de la velocidad promedio sobre el 90 % de la longitud de la zona de medición.

Para todos los medidores de humo, debe medirse el tiempo de respuesta si la respuesta física se calcula como superior a 0,2 s.

4.2.3.3 Tiempo de respuesta eléctrica (t_e). Se define como el tiempo necesario para que el resultado del registrador vaya del 10 % de la escala máxima al 90 % del valor de escala máxima, cuando se coloca una pantalla completamente opaca en frente de la fotocelda en menos de 0,01 s, o se apaga el diodo emisor de luz (LED). Esto a fin de incluir todos los efectos del tiempo de respuesta del resultado del registrador.

4.2.3.4 Tiempo de respuesta del filtro (t_F). En la mayoría de medidores de humo será necesario filtrar la señal de humo para lograr un tiempo de respuesta general de $0,500 \text{ s} \pm 0,015 \text{ s}$. La mayoría de medidores de humo presentan un tiempo de respuesta eléctrica muy rápido, aunque los tiempos de respuesta física variarán de un dispositivo a otro dependiendo del diseño y flujo de gas.

El Anexo A especifica el algoritmo del filtro digital de segundo orden que debe emplearse.

4.2.3.5 Determinación del valor de humo pico. Se debe emplear el algoritmo en el Anexo A para determinar los niveles pico de humo de escape.

4.2.4 Fuente de luz y detector del medidor de humo

4.2.4.1 Fuente de luz. La fuente de luz debe ser una lámpara incandescente con una temperatura de color en el rango de 2 800 K a 3 250 K, o un diodo emisor de luz (LED) verde con un pico espectral entre 550 nm y 570 nm.

En forma alternativa, se puede emplear un LED rojo siempre y cuando se realice la corrección apropiada de longitud de onda luminosa en la forma descrita en el Anexo B.

4.2.4.2 Detector de luz. El detector de luz debe ser una fotocelda o un fotodiodo (con un filtro, si es necesario). En el caso de una fuente luminosa incandescente, el detector debe presentar una respuesta espectral de pico en la escala de 550 nm a 570 nm y debe tener una reducción gradual en la respuesta a valores menores al 4 % del valor de respuesta pico por debajo de 430 nm y por encima de 680 nm.

4.2.4.3 Los rayos del haz luminoso deben ser paralelos dentro de una tolerancia de 3° del eje óptico. El detector debe diseñarse de modo tal que no se vea afectado por rayos de luz directos o indirectos con un ángulo de incidencia superior a 3° en el eje óptico.

4.2.4.4 Cualquier método tal como el de purga de aire que se emplea para proteger la fuente luminosa y el detector del contacto directo con el hollín del escape debe diseñarse para minimizar cualquier efecto desconocido en la longitud de trayectoria óptica efectiva del humo medido. Para los medidores de humo del tipo de flujo parcial especificados, el fabricante debe dar cuenta de cualquier efecto de la característica de protección al especificar la longitud de trayectoria óptica efectiva del medidor.

4.2.4.5 La tasa de muestreo y digitalización de las unidades de procesamiento de datos debe ser de al menos 20 Hertz (es decir, al menos 10 muestras de datos por intervalo de 0,5 s). En forma adicional, el producto del incremento (segundos) de tiempo de muestreo de datos y la mitad de la tasa de muestreo de datos (Hz) redondeada al valor entero superior más cercano deben estar dentro del rango de 0,500 s a 0,510 s.

4.3 ESPECIFICACIONES PARA EQUIPOS AUXILIARES DE ENSAYO

4.3.1 Filtros de densidad neutra

Cualquier filtro de densidad neutra empleado en conjunto con la calibración del medidor de humo, mediciones de linealidad, o configuración del rango de la escala, debe tener valor conocido dentro del 0,5 % de opacidad ó de $0,04 \text{ m}^{-1}$ de densidad de humo. Se debe revisar la precisión del valor mencionado del filtro por lo menos cada año empleando una referencia trazable a un patrón nacional.

4.3.2 Tacómetro

El equipo de medición de la velocidad del motor debe tener un error máximo permisible de: ± 100 rpm

4.4 MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR DE HUMO

El mantenimiento y servicio al medidor de humo se debe realizar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Adicionalmente, se debe efectuar el ajuste de cero y de recorrido de escala antes de cada ensayo de aceleración libre (numeral 3.4.1), se debe revisar periódicamente la linealidad de la respuesta del medidor de acuerdo con las recomendaciones del fabricante en la escala para el rango de medición de interés empleando filtros de densidad neutral que cumplan con los requisitos del numeral 4.3.1. Se recomienda corregir las no linealidades que sobrepasen el 2 % de opacidad o el $0,30 \text{ m}^{-1}$ de densidad de humo, antes de reasumir el ensayo con el medidor.

Es responsabilidad de los centros de diagnóstico automotor tener los manuales de operación y servicio del equipo de medición de humo disponibles para uso de los operarios y consulta de las autoridades.

4.5 REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA LA UNIDAD DE PROCESAMIENTO

La unidad de procesamiento, además de estar en capacidad de realizar los cálculos de los Anexos A y B, debe cumplir con los requisitos de software y hardware de los numerales 5 y 6.

5. ESPECIFICACIONES DEL SOFTWARE

5.1 SISTEMA OPERATIVO

Las características del sistema operativo deben ser definidas por el ensamblador del equipo o por el diseñador del software de aplicación.

No obstante, el sistema operativo debe ser compatible con IBM, garantizar capacidad multifunción y de comunicación con todo tipo de ambientes, y permitir la transmisión de información en formato ASCII con encriptación⁶.

5.2 SECUENCIAS FUNCIONALES AUTOMÁTICAS

El software deberá garantizar el desarrollo automático y secuencial de las funciones relacionadas con: la preparación y ejecución de la prueba de aceleración libre para la medición de opacidad de los humos diésel, el cumplimiento de los requerimientos funcionales y estructurales del opacímetro para efectuar una adecuada toma y análisis de la muestra, el almacenamiento, transferencia de la información e impresión de los resultados de la prueba.

Como mínimo debe garantizar el desarrollo automático y secuencial de las siguientes funciones:

⁶ La forma de encriptación deberá ser definida por la autoridad ambiental competente.

- acceso del operario mediante una clave;
- ingreso de información tal como la identificación del vehículo, del usuario y los datos de la prueba (fecha, ciudad, hora, dirección, etc.). Los datos relacionados con la identificación del centro de diagnóstico deben aparecer automáticamente en la pantalla, ya que esta información debe ser registrada al momento de instalar el software de aplicación;
- las secuencias relacionadas con la preparación del equipo de medición, preparación del vehículo y procedimiento de medición, definidas en los numerales 3.2, 3.3 y 3.4 de la presente norma, respectivamente;
- los requisitos del medidor en relación con la realización del cero automático, las necesidades de calibración, requisitos sobre el tiempo de calentamiento, bloqueos automáticos, entre otras.

El software de aplicación debe permitir la realización de estas pruebas, chequeos y requisitos de forma automática, presentando mensajes en la pantalla que instruyan de manera adecuada y conveniente al operario y bloqueando las demás funciones del mismo cuando sea necesario y hasta tanto no se hayan realizado los procedimientos o funciones indicadas, de acuerdo con lo establecido en la presente especificación.

5.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SOFTWARE DE APLICACIÓN

El software debe poseer la capacidad de producir resultados de configuración múltiple en formato de archivo plano encriptado (ASCII), para ser entregado a la autoridad ambiental competente en modo directo, vía módem o a través de Internet.

El software de aplicación debe demostrar en su pantalla el número asignado al centro de diagnóstico reconocido, el serial y marca del opacímetro, la cantidad de certificaciones realizadas, fecha y hora actuales y versión del programa

El software de aplicación debe generar un procedimiento para obtener copias de seguridad, las cuales deben cumplir los requisitos definidos por la autoridad competente.

5.4 CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD PROPORCIONADAS POR EL SOFTWARE DE APLICACIÓN

El software de aplicación debe proporcionar características de seguridad para el equipo, los programas, la información almacenada y en general para la prueba, de manera que asegure la mayor confiabilidad en la realización de la misma.

Como mínimo, el software de aplicación, debe:

- impedir la visualización de los resultados de la prueba, hasta tanto éstos no hayan sido encriptados, impresos, y grabados en el disco duro;
- impedir el acceso al sistema operativo, a la raíz del disco duro o a cualquier programa de exploración de contenido del disco duro o de los programas, e impedir la eliminación o modificación de cualquier resultado de la prueba, programas o archivos almacenados;

- restringir el acceso al medidor de humos y a su operación sólo a los operarios autorizados, a través de la asignación de contraseñas;
- impedir la realización de las pruebas cuando el equipo no haya alcanzado sus requisitos de estabilidad, temperatura de operación y, en general, todos aquellos requisitos en la presente especificación, hasta tanto los mismos no estén dentro de los parámetros fijados;
- advertir al operario a través del aviso en pantalla y no permitir el funcionamiento del medidor de gases, es decir, mantener automáticamente bloqueado el equipo, hasta tanto no se verifique la capacidad de recibir y almacenar información en el disco duro;
- evitar que se adicionen o modifiquen los registros de las bases de datos almacenadas en el disco duro, en forma manual o automática, mediante la utilización de disquete, disco compacto, Internet o cualquier otro dispositivo, si esto ocurre, el software de aplicación no debe permitir el inicio de la operación de análisis por parte del equipo;
- llevar un registro de la fecha (año, mes, día) y hora en la cual se realizó la copia de seguridad de la información que la autoridad competente defina como necesaria, estos datos hacen parte de la información por reportar a la autoridad competente;
- a petición de la autoridad ambiental, activar un bloqueo automático en la secuencia de prueba, cuando se le haya intentado alterar o violar los programas o archivos del medidor;
- permitir el ingreso de la secuencia numérica de los certificados de aprobación oficiales;
- llevar un control automático sobre el número de certificados (aprobados y rechazados) expedidos, que permita descontar o debitar cada uno de los certificados de aprobación expedidos de los ingresados originalmente, y evitar la expedición de aprobaciones o rechazos adicionales cuando se hayan agotado los certificados ingresados originalmente de manera secuencial;
- asignar un nuevo número consecutivo a los duplicados de certificados de una medición anterior, el cual reemplazará al anterior y conservará los resultados de la prueba original;
- comprobar la presencia y la debida conexión y comunicación con el computador de al menos una impresora;
- tomar un registro completo (fecha, hora y demás información que se haya digitado) cada vez que una prueba haya sido abortada.
- Para efectos de lo establecido en los anteriores ítemes, los proveedores o fabricantes de equipos deben proporcionar un código de seguridad a la respectiva autoridad competente o a quien ésta designe para el control y auditoría de los equipos.
- En caso de falla del equipo, sólo se podrá restaurar la información a partir de los archivos de seguridad, bajo el control de la autoridad ambiental competente.

5.5 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES DE SEGURIDAD

La protección de los resultados de la prueba, los archivos, los programas e infraestructura física podrán contar, además de las características de seguridad proporcionadas por el software de aplicación, con sistemas electromecánicos de protección adicionales.

6. ESPECIFICACIONES DE HARDWARE

El hardware debe soportar el funcionamiento del software de aplicación propuesto, de tal manera que cuente con los dispositivos necesarios para manejar configuración múltiple en formato de archivo plano (ASCII), y pueda establecer comunicación con un servidor remoto.

Así mismo, se debe contar con los dispositivos necesarios para registrar, almacenar y mantener seguramente la información, según los requisitos establecidos por la autoridad competente, y para asegurar un funcionamiento autónomo durante el tiempo definido, también, por la autoridad competente.

7. UTILIZACIÓN DEL EQUIPO

El equipo especificado en esta norma sólo puede ser empleado en las labores propias de control de humos, cuando haya sido aprobado para este fin por la autoridad competente, y debe ser de utilización exclusiva para esta labor.

Además, no se debe permitir el autoarranque por programas obtenidos independientemente por terceros o desde cualquier tipo de dispositivo o periférico.

8. REPORTE Y ALMACENAMIENTO DE RESULTADOS

El software de aplicación y el hardware del medidor de humos deben permitir, como mínimo, el registro de la información de las Tablas 1 a 6, para ser remitidos a la autoridad ambiental competente, en los términos que ésta requiera.

Tabla 1. Datos del centro de diagnóstico automotor

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Número del CDA	4	AU	
Nombre del CDA	40	AU	
NIT o CC	10	AU	
Dirección	40	AU	Emplear abreviaturas definidas por Catastro Nacional o autoridad competente
Teléfono 1	7	AU	
Teléfono 2	7	AU	
Ciudad	5	AU	Emplear código de ciudades asignado por el DANE o autoridad competente
Número de resolución expedida por la autoridad ambiental competente	4	AU	
Fecha Resolución	10	AU	AAAA/MM/DD

AU Automático (llenado automáticamente por el programa)
CDA Centro de diagnostico automotriz
AAAA/MM/DD Año mes día

Tabla 2. Datos del medidor de humos

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Serie del medidor	10	AU	
Marca medidor	10	AU	
Nombre del programa	20	AU	
Operador que realiza la prueba	3	AU	Código por listado
Versión del programa	5	AU	

AU Automático (llenado automáticamente por el programa)
 AAAA/MM/DD Año mes día

Tabla 3. Datos de la prueba

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Número de consecutivo de la prueba	6	AU	
Fecha de realización de la prueba	10	AU	AAAA/MM/DD
Hora de inicio de la prueba	5	AU	HH:MM
Hora de finalización de la prueba	5	AU	HH:MM
Fecha de aborto de la prueba	10	AU	
Hora de aborto de la prueba	5	AU	
Causa del aborto de la prueba	1	E	Código por listado de posibles causas. Estas causas son: – Fallas del equipo de medición – Falla súbita de fluido eléctrico – Bloqueo forzado del equipo – Ejecución incorrecta de la prueba

AU Automático (llenado automáticamente por el programa)
 E Escogencia
 AAAA/MM/DD Año mes día
 HH:MM Hora-minutos

Tabla 4. Datos del propietario del vehículo

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Nombre completo / razón social	40	D	
Tipo de documento	1	E	Según listado emitido por la autoridad ambiental competente
Número del documento de identificación	10	D	
Dirección	40	D	Emplear abreviaturas definidas por Catastro Nacional o autoridad competente
Teléfono	7	D	
Ciudad	5	E	Emplear código de ciudades asignado por el DANE o autoridad competente

E Escogencia (A partir de listados propios del programa)
 D Digitar (Para ser digitados por el operador)

Tabla 5. Datos del vehículo

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Marca	3	E	Según códigos listado definido por autoridad ambiental competente
Línea	3	E	Según códigos listado definido por autoridad ambiental competente
Año modelo	4	E ó D	
Placa	6	D	
Cilindraje en cm ³	4	D	
Clase de vehículo	2	E	Según códigos definidos por el Ministerio de Transportes
Servicio	1	E	Según códigos definidos por el Ministerio de Transportes
Número de motor	15	D	
Numero VIN o serie	17	D	
Número Licencia de tránsito (tarjeta de propiedad)	16	D	
Modificaciones al motor	1	E	
Potencia del motor (valor necesario solo para reporte de resultados en porcentaje de opacidad)	3	A*	
Diámetro exterior real del tubo de escape en mm. (valor necesario solo para reporte de resultados en porcentaje de opacidad)	3	D*	Se recomienda emplear la NTC 3721 para redondeo de cifras significativas

E Escogencia (A partir de listados propios del programa)
 D Digital (Para ser digitados por el operador)
 A Automático (asignado por el sistema)
 * Este valor solo será digitado de acuerdo con lo especificado en el numeral 3.2.6

Tabla 6. Resultados de las pruebas

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Comprobación de funcionamiento del gobernador	1	E	
rpm velocidad gobernada medida	4	AU	
Temperatura de aceite del motor	3	AU	
rpm en ralentí	4	AU	
Resultados ciclo preliminar	2	AU	
Resultados primer ciclo	2	AU	
Resultados segundo ciclo	2	AU	
Resultados tercer ciclo	2	AU	
Resultados final del ensayo (promedio de los tres ciclos finales de prueba)	2	AU	
Inspección visual:			
- Fugas tubo de escape	1	E	
- Fugas en el silenciador	1	E	
- Presencia tapa llenado combustible	1	E	
- Presencia tapa aceite motor	1	E	
- Salidas adicionales a las del diseño	1	E	
- Presencia de humo blanco o azul	1	E	

Continúa . . .

Tabla 6. (Final)

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Causas de rechazo (cuando este evento sucede)	1	E	Código por listado de posibles causas. Estas causas son: – falla en inspección visual preliminar (véase numeral 3.3.1 k); – presencia de obstáculos que impidan el libre recorrido del acelerador; – el gobernador de la bomba de inyección no limita la velocidad del motor; – Durante la medición no se alcanza la velocidad gobernada antes de 5 segundos; – Indicación de mal funcionamiento del motor (ver 3.4.3.2 b)); – Incumplimiento de niveles máximos permitidos por la autoridad competente.

AU Automático (llenado automáticamente por el programa)
E Escogencia

9. APÉNDICE

9.1 NORMAS QUE DEBEN CONSULTARSE

Las siguientes normas contienen disposiciones que, mediante la referencia dentro de este texto, constituyen disposiciones de esta especificación. En el momento de la publicación, eran válidas las ediciones indicadas. Todas las normas están sujetas a actualización; los participantes, mediante acuerdos basados en esta norma, deben investigar la posibilidad de aplicar la última versión de las normas mencionadas a continuación:

NTC 3711:1995, Reglas para redondeo de valores numéricos.

Anexo A (Normativo)**Algoritmo de filtro de segundo orden empleado para calcular un valor máximo de humo promedio en 0,500 s****A.1 INTRODUCCIÓN**

Este Anexo explica la forma como crear y emplear el algoritmo recomendado del filtro digital pasabajos de Bessel en un medidor de humo para filtrar las lecturas de humo de alta frecuencia que se producen durante un ensayo de aceleración súbita. Este Anexo, en particular, describe la metodología empleada para diseñar un filtro pasabajos de Bessel de segundo orden con un tiempo de respuesta como el que se requiere para una aplicación de medidor de humo particular. Este Anexo también describe el procedimiento para determinar el ensayo de aceleración súbita final. Así mismo, se presentan dos cálculos de ejemplo detallando la selección de coeficientes de filtro Bessel y su uso a fin de ilustrar los conceptos en forma más clara.

El filtro digital Bessel descrito en este Anexo es un algoritmo de filtro digital pasabajos de segundo orden (2 polos). Es el filtro recomendado para emplearse en el diseño de medidores de humo con tiempos de respuesta generales de 0,500 s en la forma requerida en el numeral 3.5 de esta norma. Se seleccionó el tipo de filtro Bessel puesto que permite el paso de todas las señales que no cambian mucho con el tiempo, pero bloquea efectivamente todas las señales con componentes de alta frecuencia. Sus características de fase lineal también le posibilitan un retardo constante sobre una escala de frecuencia limitada. También puede pasar las formas de onda transitorias con distorsión mínima cuando se emplea como filtro de tipo promedio corriente. Se seleccionó un método digital debido a la relativa facilidad de implantación de un algoritmo de software en la mayoría de los medidores de humo. No obstante, también pueden usarse filtros análogos Bessel que empleen los circuitos electrónicos adecuados.

A.2 ABREVIATURAS

B	=	constante de parámetro Bessel. Equivale a $\frac{\sqrt{5}-1}{2}$
f _c	=	frecuencia de corte Bessel empleada para controlar la respuesta filtrada.
t _e	=	tiempo de respuesta eléctrica del medidor de humo (segundos).
t _F	=	tiempo de respuesta del filtro (segundos).
t _{Fd}	=	tiempo de respuesta de filtro deseada (segundos).
t _p	=	tiempo de respuesta física del medidor de humo (segundos).
t ₁₀	=	tiempo de ensayo cuando la respuesta de salida a una respuesta de incremento de entrada es igual al 10 % de la entrada de incremento.
t ₉₀	=	tiempo de ensayo cuando la respuesta de salida a una respuesta de incremento de entrada es igual al 90 % de la entrada de incremento.
Δt	=	tiempo entre dos valores de opacidad almacenados (período de muestreo en segundos).

X_i	=	entrada de filtro Bessel en número de muestra (i).
X_{i-1}	=	entrada de filtro Bessel en el número de muestra (i-1).
X_{i-2}	=	entrada de filtro Bessel en número de muestra (i-2).
Y_i	=	salida de filtro Bessel en el número de muestra (i).
Y_{i-1}	=	salida de filtro Bessel en número de muestra (i-1).
Y_{i-2}	=	salida de filtro Bessel en el número de muestra (i-2).

A.3 DISEÑO DE UN FILTRO PASABAJOS BESSEL

El diseño del filtro digital de pasabajos Bessel de 0,500 s es un proceso de múltiples etapas que puede involucrar varios cálculos iterativos para determinar coeficientes. Esta sección ofrece un método para determinar la cantidad deseada de filtro para los medidores de humo con diferentes tiempos de respuesta eléctrica y física, o diferentes tasas de muestreo. Los filtros Bessel se pueden diseñar de manera que se acomoden a los diseños de filtro que presenten tiempos de respuesta que vayan de 0,010 a 0,500 s y tasa de digitalización de 50 Hz y más.

Se recomienda realizar todos los cálculos de filtro Bessel en unidades de opacidad en pro de la consistencia entre medidores de humo. Si se requiere reportar el resultado del medidor de humo en unidades de densidad, se puede emplear la ley Beer-Lambert para convertir los resultados finales de opacidad en resultados de densidad y realizar cualquier corrección de tamaño del tubo de escape. Se recomienda realizar esta conversión sólo después de que se hayan realizado todas las ecuaciones de filtro Bessel debido a la no-linealidad de la ley Beer-Lambert.

A.3.1 CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESPUESTA DEL FILTRO DESEADO (T_{FD})

Antes de diseñar un filtro digital Bessel, es necesario determinar el tiempo de respuesta física (t_p) y el tiempo de respuesta eléctrica (t_e), para el medidor de humo pertinente. Estos parámetros son necesarios a fin de lograr un tiempo de respuesta general de 0,500 s. En algunos medidores de flujo parcial esto puede requerir de datos experimentales. Para otros medidores de humo, se pueden emplear los procedimientos y ecuaciones del numeral 4.2.3 indicado en esta norma.

Una vez se conocen los valores de t_p y t_e , se puede determinar el tiempo de respuesta del filtro deseado (t_{Fd}) por medio de la Ecuación A.1.

$$t_{Fd} = \sqrt{0.500^2 - (t_p^2 + t_e^2)}$$

(Ecuación A.1)

A.3.2 CÁLCULO DE FRECUENCIA DE CORTE DE FILTRO BESSEL (F_c)

El tiempo de respuesta de filtro Bessel (t_F) se define como el tiempo en el cual la señal de salida (Y_i) alcanza el 10 % (Y_{10}) y el 90 % (Y_{90}) de un incremento de entrada de escala máxima (X_i) que ocurre en un tiempo inferior a 0,01 s. La diferencia en tiempo entre el 90 % de la

respuesta (t_{90}) y el 10 % del tiempo de la respuesta (t_{10}) define el tiempo de respuesta (t_F). Entonces,

$$(t_F) = (t_{90}) - (t_{10}) \quad (\text{Ecuación A.2})$$

Para que el filtro opere en forma adecuada, el tiempo de respuesta de filtro (t_F) debería encontrarse dentro del 1 % del tiempo de respuesta deseado (t_{Fd}), esto es

$$[(t_F) - (t_{Fd})] < (0,01 * (t_{Fd}))$$

A fin de crear un filtro donde t_F se aproxime a t_{Fd} , se debe determinar la frecuencia de corte adecuada (f_c). Se trata de un proceso iterativo de selección sucesiva de mejores valores de (f_c) hasta que

$$[(t_F) - (t_{Fd})] < [0,01 * (t_{Fd})].$$

El primer paso del proceso consiste en calcular un primer valor intuitivo para f_c empleando la Ecuación A.3.

$$f_c = p / (10 * t_{Fd}) \quad (\text{Ecuación A.3})$$

Entonces, se calculan los valores de B, Ω , C y K por medio de las Ecuaciones desde la A.4 hasta la A.7.

$$B = 0,618\ 034 \quad (\text{Ecuación A.4})$$

$$\Omega = \frac{1}{\tan(p * \Delta t * f_c)} \quad (\text{Ecuación A.5})$$

$$C = \frac{1}{1 + (\Omega * \sqrt{3} * B) + B * \Omega^2} \quad (\text{Ecuación A.6})$$

$$K = 2 * C * [B * W^2 - 1] - 1 \quad (\text{Ecuación A.7})$$

Δt = tiempo entre dos valores de opacidad almacenados (es decir, período de muestreo (segundos)).

Entonces, se emplean los valores de K y C en la ecuación A8 con el fin de calcular la respuesta del filtro Bessel a la entrada de determinado incremento. Debido a la naturaleza recursiva de la

ecuación A.8, se emplean los valores de X y Y enunciados a continuación, para comenzar el proceso.

$$Y_i = Y_{i-1} + C * [X_i + 2 * X_{i-1} + X_{i-2} - 4 * Y_{i-2}] + K * (Y_{i-1} - Y_{i-2}) \quad (\text{Ecuación A.8})$$

Donde:

$$X_i = 100$$

$$Y_{i-1} = 0$$

$$X_{i-2} = 0$$

$$Y_{i-1} = 0$$

$$Y_{i-2} = 0$$

Como se muestra en el ejemplo del numeral A.7.1, se calcula Y_i para valores sucesivos de $X_i = 100$ hasta que el valor de Y_i haya sobrepasado el 90 % de la entrada del incremento (X_i). La diferencia de tiempo entre la respuesta del 90 % (t_{90}) y la respuesta del 10 % (t_{10}) define el tiempo de respuesta (t_F) para dicho valor de (f_c). Puesto que los datos son digitales, se puede requerir de interpolación lineal para calcular con precisión t_{10} y t_{90} .

Si el tiempo de respuesta no se acerca lo suficiente al tiempo de respuesta deseado, es decir, si

$$[(t_f - (t_{fd}))] > [0,01 * (t_{fd})],$$

entonces se debe repetir el proceso iterativo con un nuevo valor de (f_c). Las variables (t_F) y (f_c) son aproximadamente proporcionales entre sí, de modo que se recomienda seleccionar el nuevo (f_c) con base en la diferencia entre (t_F) y (t_{Fd}) como se muestra en los cálculos del ejemplo del numeral A.5.1.

A.4 EMPLEO DEL ALGORITMO DE FILTRO DE BESSEL

La frecuencia de corte adecuada (f_c) es la que produce el tiempo de respuesta de filtro deseado (t_{Fd}). Una vez que se ha determinado esta frecuencia por medio del proceso iterativo, se especifican los coeficientes adecuados de algoritmo del filtro Bessel para las Ecuaciones desde la A.4 hasta la A.7. Entonces se pueden programar la ecuación A.8 y los coeficientes en el medidor de humo a fin de producir el filtro deseado.

La ecuación de filtro Bessel (Ecuación A.8) es de naturaleza recursiva. Por tanto, requiere de algunos valores de entrada iniciales de X_{i-1} y X_{i-2} y valores de salida iniciales Y_{i-1} y Y_{i-2} , para iniciar el algoritmo. Se puede asumir que estos presentan una opacidad del 0 %. En el numeral A.7.3 se muestra un cálculo de ejemplo detallado.

A.5 DETERMINACIÓN DEL VALOR MÁXIMO DE HUMO PROMEDIADO EN 0,500 s

A continuación se selecciona el valor de humo máximo para un ciclo de ensayo de aceleración súbita ($Y_{máx}$) de los valores individuales Y_i calculados empleando la ecuación A.8 (después de que se aplican correcciones de longitud de onda de fuente luminosa y Beer-Lambert adecuadas). Este es el resultado de final para el ciclo de ensayo y se emplea en combinación con los resultados de otros ciclos de aceleración súbita a fin de determinar un resultado de aceleración súbita final.

En forma de ecuación:

$$Y_{max} = \text{Máximo } (Y_i) \quad (\text{Ecuación A.9})$$

A.6 DETERMINACIÓN DEL RESULTADO DE ENSAYO FINAL

Si se ha cumplido con los criterios de validación de ensayo del numeral 5.4.4, el resultado de ensayo de aceleración súbita debe computarse tomando el promedio simple de los tres valores máximos de humo promedio en 0,500 s corregidos, obtenidos de los tres ciclos de ensayo de aceleración súbita.

$$A = \frac{(Y_{max,1} + Y_{max,2} + Y_{max,3})}{3} \quad (\text{Ecuación A.10})$$

A.7 EJEMPLO DE INCORPORACIÓN DE UN FILTRO BESSEL EN UN DISEÑO DE MEDIDOR DE HUMO

Este ejemplo ilustra el modo como un medidor de flujo completo con un tiempo rápido de respuesta eléctrica y física puede implementar el algoritmo de filtro Bessel: el medidor de humo de muestra presenta las siguientes características:

- | | | | |
|----|-------------------------------|---|---------|
| a) | Tiempo de respuesta física | = | 0,020 s |
| b) | Tiempo de respuesta eléctrica | = | 0,010 s |
| c) | Tasa de muestreo | = | 100 Hz |
| d) | Período de muestreo | = | 0,01 s |

A.7.1 PRIMERA ITERACIÓN PARA CALCULAR LA FRECUENCIA DE CORTE DE FUNCIÓN DE BESSEL (F_c)

Esta sección muestra los cálculos iniciales que se realizan para calcular el valor correcto de la frecuencia de corte (f_c).

Los resultados de la ecuación A1 señalan que la respuesta de filtro deseado (t_{Fd}) es de 0,499 5 (para mayor sencillez, se debe emplear un valor de 0,50 en los cálculos de la muestra). Esto puede ser lo típico de un medidor de flujo completo con un tiempo de respuesta eléctrica y

física muy rápido, lo cual sugiere que la mayoría del proceso de filtro deseado en 0,500 s será realizado por el filtro digital en vez del instrumento.

$$t_{Fd} = 0,4995 = \sqrt{0,500^2 - (0,020^2 + 0,010^2)} \quad (\text{Ecuación A.11})$$

Al insertar los valores correctos de Δt y t_F en las ecuaciones desde la A.2 hasta la A.7, se determinan los coeficientes de función de Bessel. En la Tabla A.1 se muestran dichos coeficientes.

Tabla A1 Coeficientes de Bessel iniciales

Ecuación A.1	t_F	0,500
Ecuación A.2	f_c	0,628 3
Ecuación A.4	B	0,618
Ecuación A.5	Ω	50,655 506 3
Ecuación A.6	C	0,000 603 96
Ecuación A.7	K	0,914 270 370
	Δt	0,01

A continuación pueden insertarse los coeficientes Bessel en la ecuación A.8 junto con la función de entrada de incremento (es decir, una entrada de opacidad del 0 % a una opacidad del 100 % en 0,01 s), para ilustrar el efecto del filtro Bessel en la respuesta de incremento como función de tiempo. En la Tabla A.2 se muestra la función de incremento de entrada como X_i . A fin de simular la respuesta del incremento, $X_i = 100$. Esto creará el salto súbito de 0 % a 100 %.

En la Tabla A.2 se muestra la salida filtrada Bessel como Y_i . Los dos puntos de salida de interés son el 10 % del punto de respuesta y el 90 % del punto de respuesta. Estos son los valores donde Y_i excede primero el 10 % y el 90 %. Puesto que la salida Y_i es digital, los puntos del 10 % y el 90 % exactos deben ser interpolados de la Tabla A.2. Los cuatro puntos que limitan los puntos de 10 % y 90 % se indican por una "X" en la columna de índice de la Tabla A.2. Estos son números índice 9, 10, y 64, 65.

Para este caso específico, se emplean las siguientes fórmulas de interpolación para calcular los valores de $t_{10\%}$ y $t_{90\%}$.

$$t_{10\%} = 0,01 * \frac{9 + (10 - 8,647)}{10,260 - 8,647} = 0,0984 \text{ s} \quad (\text{Ecuación A.12})$$

$$t_{90\%} = 0,01 * \frac{64 + (90 - 89,834)}{90,427 - 89,834} = 0,6428 \text{ s} \quad (\text{Ecuación A.13})$$

Enseguida se calcula la diferencia entre $t_{90\%}$ y $t_{10\%}$ y se observa si se acerca lo suficiente a t_F (suficientemente cerca quiere decir dentro del 1 %, ó en este caso 0,005).

$$0,6428 - 0,0984 = 0,5444 \quad (\text{Ecuación A.14})$$

El cálculo muestra que el tiempo de respuesta del filtro es de 0,544 4 s empleando un valor de f_c de 0,628 3. La diferencia entre este valor y el valor deseado de 0,50 es 0,044 4 el cual es cerca de un 10 % mayor que el deseado. Por tanto, se tendrá que realizar otro intento de alcanzar el tiempo de respuesta deseado. Puesto que 0,544 4 se excede en cerca de un 10 %, se emplea una frecuencia de corte (f_c) que represente un 10 % más grande para la segunda iteración.

A.7.2 SEGUNDA ITERACIÓN PARA CALCULAR LA FRECUENCIA DE CORTE DE LA FUNCIÓN DE BESSEL (F_C)

Para la segunda iteración, se escoge un valor de 0,690 para el valor de f_c . Este representa aproximadamente el 10 % por encima del valor empleado previamente. Cuando se emplea este valor, se obtienen los coeficientes de función Bessel que aparecen en la Tabla A.3.

Las respuestas del filtro Y_i fueron recalculadas también para el escalón de entrada X_i . La tabla completa de entradas (X_i) y las respuestas (Y_i) (Análogas a la Tabla A.2) no se muestran. Sin embargo, los valores de t_{10} y t_{90} y la diferencia entre ellos fueron calculados y se muestran en la Tabla A.4. En este caso, la diferencia entre el tiempo de respuesta del filtro y el tiempo respuesta deseada del filtro de 0,50 s es 0,004 9. Esto es menor que el criterio de diferencia del 1 % (0,005 s). Entonces, el valor de 0,692 para el corte de frecuencia (f_c) es el correcto para esta aplicación del medidor de humos

A.7.3 CÁLCULO DE MUESTRA DE LA RESPUESTA DE OPACIDAD DEL FILTRO BESSEL

Una vez se ha determinado el valor adecuado para la frecuencia de corte (f_c), se emplean las ecuaciones desde la A.4 hasta la A.8 a fin de calcular los valores de opacidad filtrados (Y_i), para cualquier valor de opacidad de entrada determinado (X_i). Posteriormente, la respuesta filtrada máxima se selecciona y reporta como la lectura de humo para dicho ciclo de aceleración súbita particular.

Tabla A.2 - Simulación inicial del efecto del filtro de BESSEL (usado para determinar f_c)

Índice	Tiempo	X_i	X_{i-1}	X_{i-2}	Y_i	Y_{i-1}	Y_{i-2}
0	0,00	100	0	0	0,060	0,000	0,000
1	0,01	100	100	0	0,297	0,060	0,000
2	0,02	100	100	100	0,754	0,297	0,060
3	0,03	100	100	100	1,414	0,754	0,297
4	0,04	100	100	100	2,256	1,414	0,754
5	0,05	100	100	100	3,264	2,256	1,414
6	0,06	100	100	100	4,423	3,264	2,256
7	0,07	100	100	100	5,715	4,423	3,264
8	0,08	100	100	100	7,128	5,715	4,423
→ 9	0,09	100	100	100	8,647	7,128	5,715
→ 10	0,10	100	100	100	10,260	8,647	7,128
11	0,11	100	100	100	11,956	10,260	8,647
12	0,12	100	100	100	13,723	11,956	10,260
13	0,13	100	100	100	15,552	13,723	11,956
14	0,14	100	100	100	17,432	15,552	13,723
15	0,15	100	100	100	19,355	17,432	15,552
16	0,16	100	100	100	21,312	19,355	17,432
17	0,17	100	100	100	23,297	21,312	19,355
18	0,18	100	100	100	25,301	23,297	21,312
19	0,19	100	100	100	27,319	25,301	23,297
20	0,20	100	100	100	29,344	27,319	25,301
21	0,21	100	100	100	31,372	29,344	27,319
22	0,22	100	100	100	33,396	31,372	29,344

Continúa . . .

Tabla A.2 (Final)

índice	Tiempo	X_i	X_{i-1}	X_{i-2}	Y_i	Y_{i-1}	Y_{i-2}
23	0,23	100	100	100	35,413	33,396	31,372
24	0,24	100	100	100	37,417	35,413	33,396
25	0,25	100	100	100	39,406	37,417	35,413
26	0,26	100	100	100	41,375	39,406	37,417
27	0,27	100	100	100	43,322	41,375	39,406
28	0,28	100	100	100	45,244	43,322	41,375
29	0,29	100	100	100	47,138	45,244	43,322
30	0,30	100	100	100	49,001	47,138	45,244
31	0,31	100	100	100	50,833	49,001	47,138
32	0,32	100	100	100	52,631	50,833	49,001
33	0,33	100	100	100	54,394	52,631	50,833
34	0,34	100	100	100	56,119	54,394	52,631
35	0,35	100	100	100	57,807	56,119	54,394
36	0,36	100	100	100	59,457	57,807	56,119
37	0,37	100	100	100	61,067	59,457	57,807
38	0,38	100	100	100	62,637	61,067	59,457
39	0,39	100	100	100	64,166	62,637	61,067
40	0,40	100	100	100	65,654	64,166	62,637
41	0,41	100	100	100	67,102	65,654	64,166
42	0,42	100	100	100	68,508	67,102	65,654
43	0,43	100	100	100	69,873	68,508	67,102
44	0,44	100	100	100	71,198	69,873	68,508
45	0,45	100	100	100	72,481	71,198	69,873
46	0,46	100	100	100	73,724	72,481	71,198
47	0,47	100	100	100	74,927	73,724	72,481
48	0,48	100	100	100	76,090	74,927	73,724
49	0,49	100	100	100	77,215	76,090	74,927
50	0,50	100	100	100	78,300	77,215	76,090
51	0,51	100	100	100	79,348	78,300	77,215
52	0,52	100	100	100	80,358	79,348	78,300
53	0,53	100	100	100	81,331	80,358	79,348
54	0,54	100	100	100	82,269	81,331	80,358
55	0,55	100	100	100	83,171	82,269	81,331
56	0,56	100	100	100	84,039	83,171	82,269
57	0,57	100	100	100	84,872	84,039	83,171
58	0,58	100	100	100	85,673	84,872	84,039
59	0,59	100	100	100	86,442	85,673	84,872
60	0,60	100	100	100	87,180	86,442	85,673
61	0,61	100	100	100	87,887	87,180	86,442
62	0,62	100	100	100	88,564	87,887	87,180
63	0,63	100	100	100	89,213	88,564	87,887
64	0,64	100	100	100	89,834	89,213	88,564
65	0,65	100	100	100	90,427	89,834	89,213
66	0,66	100	100	100	90,994	90,427	89,834
67	0,67	100	100	100	91,536	90,994	90,427
68	0,68	100	100	100	92,053	91,536	90,994
69	0,69	100	100	100	92,546	92,053	91,536
70	0,70	100	100	100	93,016	92,546	92,053

Tabla A.3 – Coeficientes finales de BESSEL

Ecuación A1	t_F	0,500
Ecuación A2	f_c	0,629 2
Ecuación A4	B	0,618 000
Ecuación A5	Ω	45,991 292
Ecuación A6	C	0,000 729
Ecuación A7	K	0,905 717
	Δt	0,01

Tabla A.4 – Límites de tiempo de respuesta (Segunda iteración)

$t_{10\%}$	0,091 45
$t_{90\%}$	0,5856
$\Delta t_{90\%} - t_{10\%}$	0,4951

La Tabla A.5 muestra un cálculo de muestra para un evento de humo de aceleración súbita real tomado en 100 Hz. Solo se muestran 100 lecturas (1 s) y valores calculados a fin de reducir la tabla. Los coeficientes Bessel que se muestran en la Tabla A.3 se emplean con la ecuación A.8 para calcular las repuestas de filtro Bessel (Y_i) en las entradas de humo bruto (X_i).

Tabla A.5 – Ejemplo de filtro BESSEL

Tiempo	X_i	X_{i-1}	X_{i-2}	Y_i	Y_{i-1}	Y_{i-2}
0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,01	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,02	0,30	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,03	0,60	0,30	0,00	0,001	0,000	0,000
0,04	0,50	0,60	0,30	0,004	0,001	0,000
0,05	0,40	0,50	0,60	0,007	0,004	0,001
0,06	0,30	0,40	0,50	0,012	0,007	0,004
0,07	0,10	0,30	0,40	0,017	0,012	0,007
0,08	0,00	0,10	0,30	0,021	0,017	0,012
0,09	0,00	0,00	0,10	0,026	0,021	0,017
0,10	0,00	0,00	0,00	0,029	0,026	0,021
0,11	0,00	0,00	0,00	0,033	0,029	0,026
0,12	0,00	0,00	0,00	0,036	0,033	0,029
0,13	0,20	0,00	0,00	0,039	0,036	0,033
0,14	0,40	0,20	0,00	0,042	0,039	0,036
0,15	0,40	0,40	0,20	0,045	0,042	0,039
0,16	0,30	0,40	0,40	0,049	0,045	0,042
0,17	0,30	0,30	0,40	0,054	0,049	0,045
0,18	0,70	0,30	0,30	0,059	0,054	0,049
0,19	0,80	0,70	0,30	0,066	0,059	0,054
0,20	0,70	0,80	0,70	0,073	0,066	0,059
0,21	0,40	0,70	0,80	0,082	0,073	0,066
0,22	0,20	0,40	0,70	0,091	0,082	0,073
0,23	0,20	0,20	0,40	0,100	0,091	0,082
0,24	0,30	0,20	0,20	0,108	0,100	0,091
0,25	0,50	0,30	0,20	0,116	0,108	0,100
0,26	0,40	0,50	0,30	0,124	0,116	0,108
0,27	0,20	0,40	0,50	0,133	0,124	0,116
0,28	0,00	0,20	0,40	0,140	0,133	0,124
0,29	0,40	0,00	0,20	0,147	0,140	0,133
0,30	0,30	0,40	0,00	0,154	0,147	0,140
0,31	0,20	0,30	0,40	0,161	0,154	0,147
0,32	0,20	0,20	0,30	0,167	0,161	0,154
0,33	0,10	0,20	0,20	0,172	0,167	0,161
0,34	0,10	0,10	0,20	0,177	0,172	0,167
0,35	0,30	0,10	0,10	0,182	0,177	0,172
0,36	0,70	0,30	0,10	0,186	0,182	0,177
0,37	1,10	0,70	0,30	0,192	0,186	0,182
0,38	2,60	1,10	0,70	0,200	0,192	0,186
0,39	3,50	2,60	1,10	0,215	0,200	0,192
0,40	7,10	3,50	2,60	0,239	0,215	0,200
0,41	10,20	7,10	3,50	0,281	0,239	0,215
0,42	15,90	10,20	7,10	0,350	0,281	0,239
0,43	21,80	15,90	10,20	0,458	0,350	0,281
0,44	28,10	21,80	15,90	0,619	0,458	0,350

Continúa . . .

Tabla A.5 (Final)

Tiempo	X_i	X_{i-1}	X_{i-2}	Y_i	Y_{i-1}	Y_{i-2}
0,45	34,40	28,10	21,80	0,846	0,619	0,458
0,46	39,90	34,40	28,10	1,149	0,846	0,619
0,47	44,80	39,90	34,40	1,537	1,149	0,846
0,48	50,30	44,80	39,90	2,016	1,537	1,149
0,49	52,70	50,30	44,80	2,590	2,016	1,537
0,50	56,40	52,70	50,30	3,259	2,590	2,016
0,51	58,80	56,40	52,70	4,020	3,259	2,590
0,52	61,50	58,80	56,40	4,873	4,020	3,259
0,53	63,40	61,50	58,80	5,812	4,873	4,020
0,54	64,70	63,40	61,50	6,832	5,812	4,873
0,55	65,00	64,70	63,40	7,928	6,832	5,812
0,56	66,20	65,00	64,70	9,091	7,928	6,832
0,57	66,40	66,20	65,00	10,313	9,091	7,928
0,58	68,30	66,40	66,20	11,589	10,313	9,091
0,59	67,00	68,30	66,40	12,911	11,589	10,313
0,60	66,30	67,00	68,30	14,271	12,911	11,589
0,61	66,40	66,30	67,00	15,659	14,271	12,911
0,62	65,90	66,40	66,30	17,068	15,659	14,271
0,63	66,10	65,90	66,40	18,491	17,068	15,659
0,64	63,50	66,10	65,90	19,921	18,491	17,068
0,65	63,40	63,50	66,10	21,349	19,921	18,491
0,66	61,20	63,40	63,50	22,768	21,349	19,921
0,67	59,90	61,20	63,40	24,170	22,768	21,349
0,68	59,40	59,90	61,20	25,549	24,170	22,768
0,69	58,20	59,40	59,90	26,900	25,549	24,170
0,70	56,60	58,20	59,40	28,218	26,900	25,549
0,71	54,70	56,60	58,20	29,499	28,218	26,900
0,72	53,80	54,70	56,60	30,737	29,499	28,218
0,73	53,40	53,80	54,70	31,930	30,737	29,499
0,74	51,70	53,40	53,80	33,075	31,930	30,737
0,75	50,80	51,70	53,40	34,171	33,075	31,930
0,76	48,80	50,80	51,70	35,214	34,171	33,075
0,77	48,30	48,80	50,80	36,203	35,214	34,171
0,78	45,80	48,30	48,80	37,135	36,203	35,214
0,79	45,30	45,80	48,30	38,009	37,135	36,203
0,80	44,30	45,30	45,80	38,823	38,009	37,135
0,81	42,00	44,30	45,30	39,579	38,823	38,009
0,82	42,20	42,00	44,30	40,274	39,579	38,823
0,83	39,90	42,20	42,00	40,910	40,274	39,579
0,84	39,20	39,90	42,20	41,485	40,910	40,274
0,85	39,10	39,20	39,90	42,002	41,485	40,910
0,86	36,90	39,10	39,20	42,462	42,002	41,485
0,87	36,50	36,90	39,10	42,865	42,462	42,002
0,88	35,20	36,50	36,90	43,211	42,865	42,462
0,89	34,50	35,20	36,50	43,503	43,211	42,865
0,90	34,90	34,50	35,20	43,743	43,503	43,211
0,91	32,70	34,90	34,50	43,934	43,743	43,503
0,92	32,10	32,70	34,90	44,075	43,934	43,743
0,93	31,50	32,10	32,70	44,169	44,075	43,934
0,94	30,50	31,50	32,10	44,216	44,169	44,075
0,95	30,70	30,50	31,50	44,220	44,216	44,169
0,96	30,20	30,70	30,50	44,184	44,220	44,216
0,97	29,30	30,20	30,70	44,110	44,184	44,220
0,98	26,90	29,30	30,20	43,999	44,110	44,184
0,99	25,80	26,90	29,30	43,848	43,999	44,110
1,00	25,30	25,80	26,90	43,660	43,848	43,999

Anexo B (Normativo)**Aplicación de correcciones a los valores de humo medidos****B.1 INTRODUCCIÓN**

Fundamentalmente, todos los opacímetros de humo miden la transmitancia de la luz a través de una pluma de humo ó una muestra de gas que contiene algunas partículas de humo. No obstante, generalmente es deseable cuantificar y reportar las emisiones de humo de escape en unidades de opacidad de humo (N) o densidad de humo (k). Adicionalmente, si se reporta el nivel de humo como opacidad de humo, entonces también es necesario reportar la longitud de trayectoria óptica efectiva asociada, a fin de especificar por completo la concentración de humo del vehículo. Esto debido a que la opacidad de humo medida es una función de la longitud de trayectoria óptica efectiva (EOPL⁷) empleada para realizar la medición. Por ejemplo, un motor que produjo una opacidad del 20 % cuando se ensayó con un tubo de escape de una EOPL (igual al diámetro interno del tubo) de 76 mm habría arrojado medidas de opacidad del 26 %, 31 % y 36 %, respectivamente, al ensayarse con tubos de escape más largos de EOPL (diámetros internos del tubo) de 102 mm, 127 mm y 152 mm. Por consiguiente, a fin de facilitar las comparaciones de los datos de opacidad de humo de diferentes fuentes con relación a los límites de opacidad que pudieran establecerse, se deben reportar valores de opacidad en longitudes de trayectoria óptica efectiva estándar.

Al medir el humo empleando una longitud de trayectoria óptica efectiva que sea diferente a la longitud de trayectoria estándar, se deben convertir los valores de humo medidos a opacidad en la longitud de trayectoria estándar empleando la relación Beer-Lambert adecuada. En forma similar, si se desea reportar los resultados del ensayo en unidades de densidad de humo, se hace necesario emplear la relación Beer-Lambert para convertir los resultados de opacidad medida en densidad de humo.

Finalmente, si las medidas de humo se realizan empleando un medidor que cuente con una fuente luminosa LED roja, se hace necesaria una corrección de longitud de onda para compensar el hecho de que la capacidad del humo diesel de absorber la luz dependa de la longitud de onda de dicha luz.

En este Anexo se describe la forma como se deben corregir los valores de humo medidos en unidades de reporte deseadas empleando las relaciones Beer-Lambert y el modo como se deben realizar las correcciones de longitud de onda de la fuente luminosa.

B.2 DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

B.2.1 Humo diésel: partículas, incluidas las de aerosoles, suspendidas en la corriente de escape de un motor diésel que absorban, reflejen o refracten la luz.

B.2.2 Transmitancia (T): es la fracción de luz expresada en porcentaje (%) que al ser transmitida desde una fuente, a través de una trayectoria oscurecida por humo, llega al receptor del instrumento observador.

$$T = 1 - \frac{\text{opacidad}}{100}$$

⁷

Sigla en inglés "Effective optical path length"

B.2.3 Opacidad (N): es la fracción de la luz expresada en porcentaje (%), que al ser enviada desde una fuente se le impide llegar al receptor del instrumento observador y que se expresa en función de la transmitancia.

$$N = 100 (1 - \text{Transmitancia})$$

B.2.4 Longitud de trayectoria óptica efectiva (L) longitud de trayectoria óptica oscurecida por el humo entre la fuente luminosa del medidor de humo y el detector de luz. Se debe observar que las porciones de la longitud de la trayectoria de la fuente luminosa total al detector que no se han oscurecido por el humo no contribuyen a la longitud de trayectoria óptica efectiva.

B.2.5 Densidad de humo (k) (conocida también como “Coeficiente de extinción de luz” o “Coeficiente de absorción de luz”): es un medio fundamental para cuantificar la capacidad de una corriente de humo o del humo de una muestra para oscurecer la luz. Por convención, la densidad del humo se expresa en metros a la menos uno (m^{-1}). La densidad del humo es una función del número de partículas de humo por unidad de volumen de gas, la distribución por tamaño de las partículas de humo, y las propiedades de absorción y dispersión de las partículas. Sin la presencia de humos azules o blancos, la distribución de tamaño y las propiedades de absorción/dispersión son similares para todas las muestras de gases de escape diésel, y la densidad de humo es principalmente una función de la densidad de las partículas de humo. La densidad de humo o coeficiente de absorción, K, (m^{-1}) de una corriente de humo se define de la siguiente manera, una forma de la ley de Beer- Lambert:

$$K = -(1/L) \ln (1 - N/100)$$

Donde:

L = está expresada en metros, m.

B.2.6 W Longitud de onda de la fuente luminosa del medidor de humo.

B.2.7 SUBÍNDICES

B.2.7.1 m. Se refiere a la condición medida.

B.2.7.2 s - Se refiere a los valores corregidos en una condición estándar.

B.3 RELACIONES BEER-LAMBERT

La ley Beer-Lambert define la relación entre transmitancia, densidad de humo y longitud de trayectoria óptica efectiva, tal como se muestra en la Ecuación B.1.

$$T = e^{-kL} \quad \text{(Ecuación B.1)}$$

A partir de las definiciones de transmitancia y opacidad, la relación entre estos parámetros puede definirse como se muestra en la Ecuación B.2.

$$N (\%) = 100 * (1 - T) \quad \text{(Ecuación B.2)}$$

A partir de las ecuaciones B.1 y B.2 se pueden derivar las siguientes relaciones importantes:

$$N_s = 100 * (1 - ((1 - (N_m/100))^{(L_s/L_m)})) \quad \text{(Ecuación B.3)}$$

$$K = - (1/L_m) * (L_n (1 - (N_m/100))) \quad \text{(Ecuación B.4)}$$

A fin de lograr resultados adecuados al aplicar las ecuaciones B.1 y B.4, se deben expresar las longitudes de trayectoria óptica efectiva (L y L_m) en unidades de metros (m). Se recomienda expresar las longitudes de trayectoria óptica efectiva empleadas en la ecuación B.3 también en metros (m); sin embargo, se puede emplear cualquier unidad de longitud siempre que L_s y L_m se expresen en la misma unidad de medición.

B.4 USO DE LAS RELACIONES BEER-LAMBERT

La conversión de los valores medidos de opacidad a las unidades de reporte apropiadas es un proceso de dos pasos. Puesto que, como se observó en el numeral B1, la unidad de medida básica de todos los medidores de humo es la transmitancia, el primer paso en todos los casos es convertir la transmitancia (T) en opacidad a la longitud de trayectoria óptica efectiva medida (N_m) empleando la ecuación B.2. Puesto que todos los opacímetros realizan esta operación internamente, este paso es obvio para el usuario.

El segundo paso del proceso consiste en convertir la N_m en las unidades de reporte deseadas, en la manera indicada a continuación:

Si se van a reportar los resultados de ensayo en unidades de opacidad, se debe emplear la ecuación B.3 para convertir la opacidad en la longitud de trayectoria óptica efectiva medida en opacidad en la longitud de trayectoria óptica efectiva estándar. (En caso de que las longitudes de trayectoria óptica efectiva medida y estándar sean idénticas, N_s es igual a N_m y no se requiere este paso de conversión secundario).

Si se van a reportar los resultados de ensayo en unidades de densidad de humo, entonces debe aplicarse la ecuación B.4.

B.5 VALORES DE ENTRADA DE LONGITUD DE TRAYECTORIA ÓPTICA EFECTIVA

Con el propósito de aplicar la ecuación B.4 de conversión, se hace necesario utilizar la longitud de trayectoria óptica efectiva medida (L_m). Para emplear la ecuación B.3 se deben entrar valores tanto para L_m como para L_s , longitud de trayectoria óptica efectiva estándar. En este Anexo se explica en detalle cómo se determinan estos valores de entrada.

B.5.1 DETERMINACIÓN DE L_m PARA OPACÍMETROS DE FLUJO PARCIAL

Para estos equipos, L_m es una constante que depende del diseño y la longitud de la celda de medida del instrumento y del sistema de purga de aire. Se recomienda consultar los datos de especificación provistos por el fabricante del medidor para determinar el valor adecuado de L_m .

Generalmente, se hace necesario determinar L_m dentro de +5 mm para obtener resultados de humo corregidos que sean precisos dentro de $\pm 2\%$ de opacidad ó densidad de humo de $\pm 0,2 \text{ m}^{-1}$.

B.5.2 DETERMINACIÓN DE L_s

A fin de garantizar las comparaciones de datos de humo significativos, se recomienda reportar los resultados de opacidad del humo en las longitudes de trayectoria óptica efectiva estándar, L_s , que se muestran en la Tabla B.1. La Tabla B.1 se construyó de tal manera que la longitud de trayectoria óptica efectiva estándar se incrementa con la potencia nominal y se aproxima a los tamaños de tubo trasero de escape comúnmente empleados en aplicaciones de vehículo. En los casos donde no se puede determinar la potencia nominal del motor, el Diámetro Externo (DE) real del tubo de escape proporciona, generalmente, una aproximación aceptable de L_s y se puede emplear en lugar de la Tabla B.1.

Tabla B1 - Longitudes de trayectoria óptica efectiva estándar

Potencia nominal del motor kW	Potencia nominal del motor BHP	Longitud de trayectoria óptica efectiva estándar L_s Mm	longitud de trayectoria óptica efectiva estándar L_s pulgadas
Menos de 37	Menos de 50	38	1,5
37 a menor de 75	50 a menor de 101	51	2
75 a 149	101 a 200	76	3
150 a 224	201 a 300	102	4
225 a menor de 450	301 o menor de 604	127	5
Mayor o igual a 450	Mayor o igual a 604	150	6

Al ensayar vehículos con salidas de escape múltiples, se debe emplear la potencia nominal del motor total con la Tabla B.1, para determinar la longitud de trayectoria óptica efectiva estándar. Cuando se utilice la Tabla B.1, no se debe dividir la potencia nominal del motor por el número de salidas de escape. Si se comete este error, se dará origen a reporte de valores de opacidad de humo erróneamente bajos.

B.6 SECUENCIA DE CORRECCIONES DE BEER-LAMBERT

A fin de lograr el grado de precisión más alto, se aconseja realizar los cálculos de conversión Beer-Lambert descritos en el numeral B.4 sobre cada valor de humo medido instantáneo antes de que tenga lugar cualquier procesamiento de datos adicional. Para realizar los cálculos de esta manera, durante el ensayo de aceleración súbita se requiere una capacidad significativa de procesamiento, puesto que la tasa mínima de procesamiento de datos de humo es de 20 Hz. Además, se requiere la capacidad de entrar valores de L_m y L_s a la unidad de procesamiento de datos.

B.7 CORRECCIONES DE LONGITUD DE ONDA DE LA FUENTE LUMINOSA DEL MEDIDOR DE HUMO

La capacidad del humo diesel de absorber luz depende de la longitud de onda (es decir, el humo diésel no tiene densidad espectral neutral). Por esta razón, los medidores de humo que emplean diferentes fuentes luminosas responderán de manera diferente a la misma muestra de humo, y se requieren correcciones para obtener resultados comparables.

Puesto que la mayoría de medidores de humo en la actualidad emplean un LED verde ó una fuente luminosa incandescente, con una emisividad espectral de pico equivalente, estas condiciones serán estándar al reportar los resultados de ensayo de aceleración súbita. Se deben corregir las mediciones de humo efectuadas con medidores que emplean fuentes de luz LED roja por medio de las siguientes ecuaciones:

$$N_s = 100 * (1 - ((1 - (N_m/100))(w_m/w_s))) \quad (\text{Ecuación B.5})$$

$$K_s = (-1/L) * L_n ((1 - (N_m/100)) (w_m/w_s)) \quad (\text{Ecuación B.6})$$

Donde:

W_s = longitud de onda de una fuente de luz LED verde estándar = 570 nm

W_m = longitud de onda de una fuente de luz LED roja = 660 nm

Opacidad, %					Densidad K 1/m
Diámetro exterior del tubo de escape					
2" 51 mm	3" 76 mm	4" 102 mm	5" 127 mm	6" 152 mm	
33	45	55	63	70	
32	44	54	62	69	7,50
31	43	53	61	68	
30	42	52	60	67	7,00
29	41	51	59	66	
28	40	50	58	65	6,50
27	39	49	57	64	
26	38	48	56	63	6,00
25	37	47	55	62	
24	36	46	54	61	5,50
23	35	45	53	60	
22	34	44	52	59	5,00
21	33	43	51	58	
20	32	42	50	57	4,50
19	31	41	49	56	
18	30	40	48	55	4,00
17	29	39	47	54	
16	28	38	46	53	3,50
15	27	37	45	52	
14	26	36	44	51	3,00
13	25	35	43	50	
12	24	34	42	49	2,50
11	23	33	41	48	
10	22	32	40	46	2,00
9	21	31	39	44	
8	20	30	38	43	1,50
7	19	29	37	42	
6	18	28	36	41	1,00
5	17	27	35	40	
4	16	26	34	39	0,50
3	15	25	33	38	
2	14	24	32	37	
1	13	23	31	36	

Opacidad, %					Densidad K 1/m
Diámetro exterior del tubo de escape					
2" 51 mm	3" 76 mm	4" 102 mm	5" 127 mm	6" 152 mm	
54	69	79			
53	68	78	85		15,00
52	67	77	84	89	14,50
51	66	76	83	88	14,00
50	65	75	82	87	13,50
49	64	74	81	86	13,00
48	63	73	80	85	12,50
47	62	72	79	84	12,00
46	61	71	78	83	11,50
45	60	70	77	82	11,00
44	59	69	76	81	10,50
43	58	68	75	80	10,00
42	57	67	74	79	9,50
41	56	66	73	78	9,00
40	55	65	72	77	8,50
39	54	64	71	76	8,00
38	53	63	70	75	
37	52	62	69	74	
36	51	61	68	73	
35	50	60	67	72	
34	49	59	66	71	
33	48	58	65	70	
32	47	57	64	69	
	46	56	63	68	
	45	55	62	67	
	44	54	61	66	
	43	53	60	65	
	42	52	59	64	
	41	51	58	63	
	40	50	57	62	
	39	49	56	61	
	38	48	55	60	
	37	47	54	59	
	36	46	53	58	
	35	45	52	57	
	34	44	51	56	
	33	43	50	55	
	32	42	49	54	
	31	41	48	53	
	30	40	47	52	
	29	39	46	51	
	28	38	45	50	
	27	37	44	49	
	26	36	43	48	
	25	35	42	47	
	24	34	41	46	
	23	33	40	45	
	22	32	39	44	
	21	31	38	43	
	20	30	37	42	
	19	29	36	41	
	18	28	35	40	
	17	27	34	39	
	16	26	33	38	
	15	25	32	37	
	14	24	31	36	
	13	23	30	35	
	12	22	29	34	
	11	21	28	33	
	10	20	27	32	
	9	19	26	31	
	8	18	25	30	
	7	17	24	29	
	6	16	23	28	
	5	15	22	27	
	4	14	21	26	
	3	13	20	25	
	2	12	19	24	
	1	11	18	23	

Figura B1 – Cuadro de alineación

Se prefiere aplicar las correcciones de longitud de onda, como las correcciones Beer-Lambert, a cada valor de humo medido instantáneo. Sin embargo, si no es posible, y si son aceptables pequeños errores, se pueden aplicar las correcciones de longitud de onda después de obtener valores de humo promedio en la forma descrita en el Anexo A.

Se aconseja aplicar las correcciones de longitud de onda de fuente luminosa que emplean las ecuaciones B.5 y B.6 cuando se emplee el medidor para medir humo diesel, pero no se recomienda emplearlas cuando se esté calibrando el medidor usando un filtro de densidad neutra.

Anexo C (Informativo)

Bibliografía

SAE J 1667:1996 Snap-Acceleration Smoke Test Procedure for Heavy-Duty Diesel Powered Vehicles.

ISO/DIS 8178-10:2001 Reciprocating Internal Combustion Engines. Exhaust Emission Measurement. Part.10 Test Cycles and Test Procedures for Field Measurement of Exhaust Gas Smoke Emissions from Compression Ignition Engines Operating Under Transitory Conditions.

Anexo D (Informativo)

Diagrama de bloques sobre las características generales del software de aplicación

El siguiente diagrama de bloques se incluye a manera ilustrativa, y no modifica ni reemplaza lo establecido en el Capítulo 3 de esta norma.

