

2012-10-31

---

**PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN Y  
CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE FLUJO  
PARCIAL NECESARIOS PARA MEDIR LAS  
EMISIONES DE HUMO GENERADAS POR LAS  
FUENTES MÓVILES ACCIONADAS CON CICLO  
DIÉSEL.  
MÉTODO DE ACELERACIÓN LIBRE**



E: EVALUATION PROCEDURE AND CHARACTERISTICS OF THE PARTIAL FLOW EQUIPMENT, NEEDED TO MEASURE SMOKE EMISSIONS, GENERATED BY MOBILE SOURCES WITH DIESEL CYCLE POWDERED. FREE ACCELERATION METHOD

---

CORRESPONDENCIA:

---

DESCRIPTORES: emisiones de humo; evaluación de equipos - emisiones de humo; características de equipos - emisiones de humo; diesel - emisiones de humo.

---

I.C.S.: 13.040.50

---

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)  
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. (571) 6078888 - Fax (571) 2221435

---

Prohibida su reproducción

Segunda actualización  
Editada 2012-11-09

## 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 (Segunda actualización) fue ratificada por el Consejo Directivo de 2012-10-31.

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 11 Calidad de aire.

AGRALE COLOMBIA  
AIRE LIMPIO  
AKT MOTOS  
ALGASES S.A.S.  
AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE  
ABURRÁ  
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE CENTROS  
DE DIAGNOSTICO AUTOMOTRIZ -ASO  
CDA-  
ASOCIACIÓN NACIONAL DE INDUSTRIALES  
-ANDI-  
AUTECO S.A.S.  
AUTOCOM S.A.  
AUTOGERMANA S.A.  
AUTOMETHIC LTDA.  
AUTOTOOLS LTDA.  
CENTRO DE DIAGNOSTICO AUTOMOTRIZ  
DE LA 50  
CENTRO DE DIAGNOSTICO AUTOMOTRIZ  
CELTA  
CENTRO DE DIAGNOSTICO AUTOMOTRIZ  
DEL ORIENTE COLOMBIANO  
CENTRO DE DIAGNOSTICO AUTOMOTRIZ  
DEL VALLE  
CENTRO DE DIAGNOSTICO AUTOMOTRIZ  
SERVICOCHESES  
CENTRODIESEL

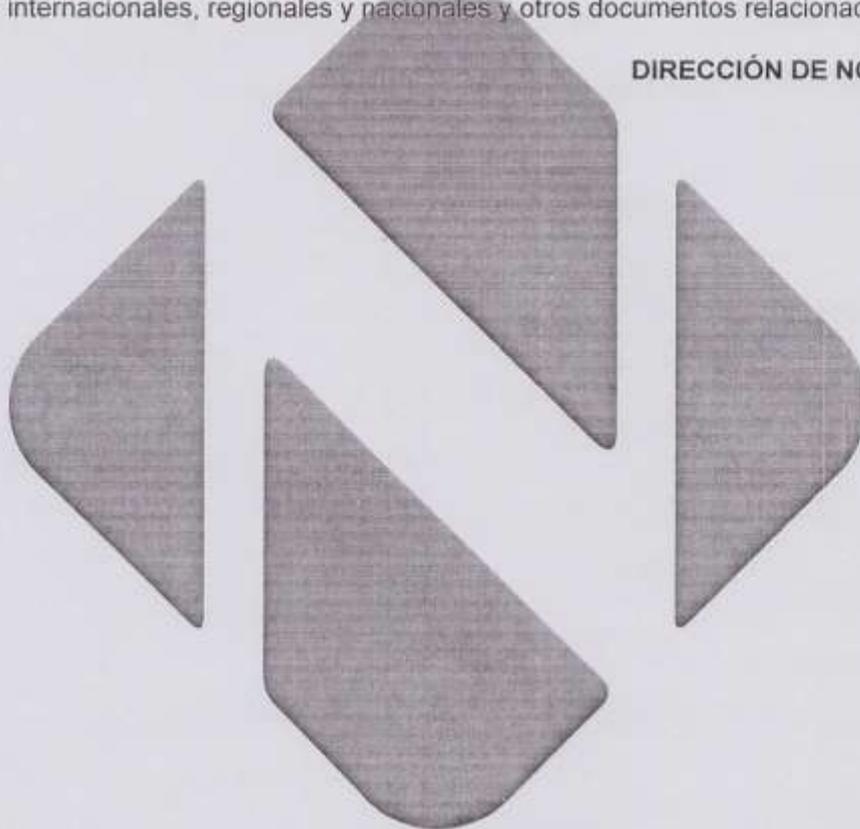
CHENAME COMERCIAL  
CIVETCHI DE COLOMBIA  
COCITACIA AUTOS S.A.  
COMERKOL S.A.  
COMPAÑÍA COLOMBIANA AUTOMOTRIZ-CCA  
CONTROL GOLD  
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL  
DE CUNDINAMARCA -CAR-  
DAIMER CHRYSLER COLOMBIA S.A.  
DIESEL Y TURBOS  
DISTOYOTA LTDA.  
DISTRIBUIDORA NISSAN S.A.  
EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.P.M.  
ENVIRONMENT & ENGINEERING S.A.S.  
FANALCA - HONDA  
FEDERACIÓN NACIONAL DE  
COMERCIANTES - FENALCO BOGOTÁ  
FORD MOTOR DE COLOMBIA SUC.  
FOTON  
GAS NATURAL S.A. E.S.P.  
GENERAL MOTORS, COLMOTORES  
GOLD ELECTRONIC S.A.  
HINO MOTORS MANUFACTURING  
COLOMBIA S.A.  
INCOLMOTOS - YAMAHA  
INDUTESA S.A.  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA,

PARQUES Y FUNERARIAS S.A. -JARDINES  
DEL RECUERDO-  
PRODUCTOS ALIMENTICIOS DORIA S.A.  
SECRETARIA DE TRANSITO Y TRANSPORTE  
DE BOGOTÁ  
SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE  
(REGIONAL BOGOTÁ)  
SHELL COLOMBIA S.A.  
SINGECIEL LTDA.

SNAP-ON EQUIPMENT INTERNATIONAL  
SOCIEDAD DE FABRICACIÓN DE  
AUTOMOTORES S.A.  
SUBARU DE COLOMBIA S.A.  
SUPERINTENDENCIA DE PUERTOS Y  
TRANSPORTES  
SYNTOFARMA S.A.  
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
URIGO LTDA.

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

**DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN**



CONTENIDO

	Página
1. OBJETO .....	1
2. DEFINICIONES.....	1
3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE OPACIDAD.....	5
3.1 PROCEDIMIENTOS PREVIOS .....	5
3.2 MEDICIÓN DE OPACIDAD .....	9
4. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE ENSAYO.....	12
4.1 REQUISITOS GENERALES.....	12
4.2 REQUISITOS GENERALES PARA EL EQUIPO DE MEDICIÓN DE HUMO .....	13
4.3 MANTENIMIENTO Y COMPARACIÓN Y AJUSTE DEL OPACÍMETRO.....	17
5. ESPECIFICACIONES DEL SOFTWARE.....	17
5.1 SISTEMA OPERATIVO .....	17
5.2 SECUENCIAS FUNCIONALES MÍNIMAS .....	17
5.3 ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE COMPUTACIONAL .....	18
5.4 CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD PROPORCIONADAS POR EL SOFTWARE DE APLICACIÓN .....	18
6. ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE COMPUTACIONAL .....	19
7. UTILIZACIÓN DEL EQUIPO .....	20
8. REPORTE Y ALMACENAMIENTO DE RESULTADOS .....	20



**PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN Y CARACTERÍSTICAS  
DE LOS EQUIPOS DE FLUJO PARCIAL NECESARIOS PARA MEDIR  
LAS EMISIONES DE HUMO GENERADAS POR LAS FUENTES MÓVILES  
ACCIONADAS CON CICLO DIÉSEL.  
MÉTODO DE ACELERACIÓN LIBRE**

**1. OBJETO**

Esta norma tiene como objeto establecer la metodología para estimar indirectamente la emisión de material particulado en el humo de escape de los vehículos que operan con ciclo Diésel, mediante las propiedades de extinción de luz que esta emisión presenta. La metodología es desarrollada en condiciones de aceleración libre, cuyo resultado es comparado con lo establecido en la reglamentación ambiental vigente.

Esta metodología es también conocida como *Snap acceleration* o aceleración súbita por su traducción del Inglés.

**2. DEFINICIONES**

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

**2.1 Ajuste inicial.** Procedimiento automático que realiza el opacímetro después de ser realizados los procedimientos de purga y limpieza. En este, el equipo asigna los valores mínimo y máximo en la escala, de forma automática y/o manual. Definidos los puntos extremos de la escala se realiza una redefinición de la escala.

**2.2 Comparación y ajuste.** Procedimiento de comparación y ajuste realizado bajo condiciones específicas que permite relacionar el resultado entregado por el opacímetro con las características de extinción de luz del humo que ingresa. El equipo debe someterse a las modificaciones necesarias para que el resultado entregado corresponda con los valores de los filtros de referencia disponibles, dentro de una tolerancia específica.

**2.3 Densidad del humo (K) (conocida también como "Coeficiente de extinción de luz" o "Coeficiente de absorción de luz").** Forma fundamental de 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, a partir de la ley de Beer- Lambert:

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

en donde

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

**2.4 Error máximo permitido.** Valor extremo del error permitido para el opacímetro

**2.5 Falla súbita del motor.** Evento de anomalía inesperado en el desempeño del motor y/o sus accesorios, durante la ejecución de la prueba.

**2.6 Filtros de densidad neutra.** Materiales de referencia, generalmente cristales de tipo absorción, que presentan una respuesta constante de extinción de luz dentro de un intervalo definido de longitudes de onda. Dichos filtros se emplean para verificar la linealidad del opacímetro y como elementos de comparación para procesos de comparación y ajuste. Para este último fin, se requiere que los filtros puedan ser considerados como elementos de referencia, con trazabilidad a un patrón nacional o internacional.

**2.7 Fuente móvil accionada por motor Diésel.** Fuente de emisiones que por su uso o propósito está sujeta a desplazamientos y opera siguiendo el ciclo Diésel. Puede operar a dos o cuatro tiempos.

**2.8 Hardware.** Equipo físico con el que cuenta el opacímetro, incluyendo estructura, elementos de cómputo, sondas, sensores, mecanismos, sistemas eléctricos y electrónicos, entre otros.

**2.9 Humo.** Es la suspensión de material particulado en los gases de combustión.

**2.10 Inspector.** Persona capacitada para realizar la prueba de opacidad

**2.11 Ley de Beer-Lambert.** Expresión matemática que relaciona la opacidad de una columna de humo, con la longitud de trayectoria óptica efectiva y el coeficiente de extinción de luz específico del humo.

$$T = e^{-kL}$$

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

en donde

- $T$  = es la transmitancia
- $N$  = opacidad
- $L$  = longitud de trayectoria óptica efectiva

En esta relación matemática la opacidad  $N$  se interpreta como el porcentaje de luz que la columna de humo con longitud  $L$ , es capaz de obstruir, cuando el humo presenta un coeficiente de extinción de luz  $k$ .

**2.12 Linealidad del opacímetro.** Medida de la desviación máxima absoluta de los valores medidos por el medidor de humo con relación a los valores de referencia.

**2.13 Longitud de trayectoria óptica efectiva (L).** Longitud del haz de luz entre el emisor y el detector que es interceptado por la columna de humo. También denominada LTOE por sus siglas.

**2.14 Material Particulado (MP).** Emisión conformada por partículas sólidas y líquidas de carácter orgánico e inorgánico que permanecen suspendidas en los productos gaseosos de escape y en el aire. Químicamente, el MP es una mezcla de alta complejidad. Incluye carbono del combustible que no es oxidado en el proceso de combustión, en forma tanto elemental como orgánica. También incluye sulfatos o ácido sulfúrico provenientes del azufre del combustible. Además, se encuentran nitratos, sales de amonio y metales. Se encuentra asociada a combustión incompleta y mezclas con baja proporción de aire.

**2.15 Método de extinción de luz.** Técnica que implica la medición de la cantidad de luz que no logra atravesar un material. Para fines específicos de esta norma, una columna de humo.

**2.16 Opacidad (N).** Fracción de luz expresada en porcentaje (%) que, al ser enviada desde una fuente, a través de una trayectoria obstruida por humo, no llega al receptor de instrumento de medida.

$$N = \text{luz obstruida} / \text{luz enviada}$$

$$N = 100(1-T)$$

**2.17 Opacímetro.** Equipo diseñado para medir la opacidad de una corriente de humo o muestra parcial de esta, mediante el principio de extinción de luz. Para fines de esta norma, se hace referencia específicamente a los equipos que operan bajo el principio de flujo parcial, o de muestreo.

**2.18 Opacímetro de flujo parcial.** Medidor de humo que toma continuamente una muestra 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.

**2.19 Procedimientos de purga y limpieza.** Son los procedimientos automáticos o manuales que se realizan o realiza el equipo antes de iniciar una prueba de opacidad, con el fin de evacuar el humo remanente dentro de su cámara de medición. Este tipo de procedimientos debe ser realizado según lo especificado por el fabricante del equipo de medición.

**2.20 Propiedades ópticas del Material Particulado.** Son las propiedades que exhibe el material particulado en su interacción con la luz. Dentro de estas se tienen: absorción, refracción y reflexión. Estas propiedades dependen de la geometría, rugosidad y composición de material particulado suspendido en los productos de escape gaseosos. Como consecuencia de estas propiedades, la intensidad de luz que atraviesa una columna de humo con material particulado se ve disminuida.

**2.21 Prueba abortada.** Prueba que, debido a factores externos a la prueba misma, no puede llegar a su fin. Para fines de control vehicular establecido por las autoridades competentes, no genera numeración consecutiva para la emisión del correspondiente certificado de emisión.

**2.22 Prueba de opacidad.** Prueba de evaluación en la cual se registra el valor de opacidad del humo emitido por un vehículo sometido a una o más *pruebas unitarias de aceleración libre*, para ser comparado con los límites normativos vigentes.

**2.23 Prueba unitaria de aceleración libre.** Es la secuencia de aceleraciones necesarias para determinar el resultado representativo de opacidad para el vehículo en evaluación.

**2.24 Sensor de temperatura.** Elemento empleado con el objeto de estimar la temperatura de operación del vehículo en evaluación. Para tal fin, puede medir directamente la temperatura del aceite del depósito del motor o emplear otra técnica disponible

**2.25 Sensor de velocidad de rotación.** Sensor empleado con el objeto de determinar la velocidad de rotación del motor, comúnmente medida en revoluciones por minuto (r/min).

**2.26 Sistema de control de velocidad del motor.** Sistema encargado de controlar la velocidad máxima y mínima de rotación del motor. Es de naturaleza mecánica o electrónica, según la tecnología con la que cuente el motor. Los valores máximos y mínimos de velocidad de rotación del motor son parámetros establecidos por el fabricante.

**2.27 Software de aplicación.** Programa específico encargado de realizar las rutinas automáticas, controlar los tiempos de medición, procesamiento de la señal, conversiones matemáticas, validación y reporte de resultados entre otros.

**2.28 Sonda de toma de muestra.** Elemento que es introducido en el tubo de escape del vehículo en evaluación, con el objeto de tomar una muestra de los productos de escape para ser ingresados a la cámara de medición del opacímetro.

**2.29 Transmitancia (T).** Es la fracción de luz, que al ser transmitida desde una fuente a través de una trayectoria obstruida por humo, llega al receptor del instrumento de medida.

$$T = \text{luz transmitida} / \text{luz enviada}$$

**2.30 Temperatura mínima de operación.** Temperatura de operación considerada como mínima para efectuar la prueba de opacidad, sin restricciones. Se establece en 50 °C, al ser estimada por medio de la medición de la temperatura del aceite de lubricación o cualquier método adecuado y disponible.

**2.31 Temperatura óptima de operación.** Temperatura de operación del motor a la cual se obtiene su mejor desempeño, establecida por el fabricante o ensamblador.

**2.32 Velocidad<sup>1</sup> máxima de rotación (gobernada).** Velocidad máxima de rotación que puede alcanzar el motor antes de que se produzca la reducción o corte del suministro de combustible. Es la velocidad máxima permisible para evitar daños por sobre-revoluciones del motor. Es un parámetro especificado por el fabricante del motor.

**2.33 Velocidad<sup>1</sup> mínima de rotación (ralenti).** Velocidad mínima de rotación del motor, necesaria para mantener en operación y sin carga el motor. Corresponde a la posición "neuro" para transmisión manual y "parqueo" para transmisión automática, sin accionar el acelerador. Es un parámetro especificado por el fabricante del motor.

**2.34 Verificación de linealidad.** Es el procedimiento en el cual se realiza la verificación de la linealidad del opacímetro. Esta práctica es rutinaria y se debe efectuar con la frecuencia que recomiende el fabricante del equipo. Se realiza utilizando los filtros de verificación con los que cuenta cada equipo de medición.

**2.35 Vehículo rechazado.** Vehículo cuya prueba llega a su fin y presenta número consecutivo. El rechazo puede estar asociado al incumplimiento de los requisitos necesarios para el vehículo en evaluación, o por incumplimiento de los límites normativos de opacidad vigentes.

<sup>1</sup> El término correcto es revoluciones o velocidad angular.

### 3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE OPACIDAD

#### 3.1 PROCEDIMIENTOS PREVIOS

##### 3.1.1 Condiciones ambientales

Al comienzo de la prueba, se deben cumplir las siguientes condiciones ambientales para la realización de la prueba:

- a) Temperatura ambiente entre 5 °C y 55 °C.
- b) Humedad relativa no mayor a 90 %.

En caso de no cumplirse estas condiciones no se debe realizar la prueba, dada su influencia en el resultado de la medición.

- c) En caso de ser realizada en un recinto de pruebas, este debe contar con buena ventilación, evitándose la acumulación de gases de escape, que puede afectar el resultado de la prueba y la salud de los inspectores.

Se deben registrar las variables y reportarlas a la autoridad ambiental, (véase la Tabla 3)

NOTA Cuando se presenten varios equipos de medición en un mismo lugar, la toma de variables puede ser compartida.

##### 3.1.2 Preparación del equipo de medición

**3.1.2.1** 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 requerida 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 reportar el resultado de la prueba a las condiciones de medida del tubo de escape estándar u otra Longitud de Trayectoria Óptica Efectiva Estándar definido por la Autoridad Ambiental Competente.

**3.1.2.2** El equipo debe realizar los siguientes procedimientos sin los cuales no debe permitir la realización de la prueba de opacidad.

**3.1.2.2.1** Indicar en pantalla que la sonda debe estar fuera del tubo de escape, o dar garantía de que esto se cumple antes de ser realizadas las rutinas de purga, limpieza y calentamiento.

**3.1.2.2.2** El equipo debe realizar las rutinas de calentamiento especificadas por el fabricante de forma automática. No debe permitir la realización de mediciones hasta la culminación de dichas rutinas.

**3.1.2.2.3** El equipo debe realizar las rutinas de purga y limpieza necesarias, de forma automática o manual. No debe permitir la realización de mediciones hasta no terminar estos procedimientos.

**3.1.2.2.4** El equipo debe verificar el valor mínimo (0 %) y máximo (100 %) en la escala, comparándolos con valores de referencia propios, los cuales son determinados en las rutinas de ajuste inicial (véase el numeral 3.1.2.2.5).

En caso de presentarse desviaciones superiores a  $\pm 1$  % en la escala de opacidad para alguno de estos dos puntos, el software de aplicación no debe permitir la realización de la prueba de opacidad. Ante esta situación, deben realizarse nuevamente los procedimientos de purga y limpieza, y luego las rutinas de ajuste inicial (véase el numeral 3.1.2.2.5), antes de una nueva verificación de valores mínimo y máximo.

**3.1.2.2.5** Las rutinas de ajuste inicial se ejecutan después de garantizada la realización de los procedimientos de purga y limpieza (véase el numeral 3.1.2.2.3). En estas rutinas automáticas son ajustados los valores mínimo y máximo, y se realiza una redefinición de la escala en el software de aplicación:

- a) Ajuste del valor mínimo en la escala (0 %): el equipo debe ajustar su valor mínimo en la escala, 0 %, con una tolerancia de  $\pm 1$  % de opacidad, ante la ausencia de cualquier obstrucción entre el emisor luminoso y el receptor del equipo. Esta condición es garantizada con los procedimientos de purga y limpieza previos.
- b) Ajuste del valor máximo en la escala (100 %): el equipo debe ajustar su valor máximo en la escala, 100 %, con una tolerancia de  $\pm 1$  % de opacidad, ante la obstrucción total al paso de luz entre el emisor luminoso y el receptor del equipo.
- c) Redefinición de la escala: este procedimiento implica que el software de aplicación, después de tener determinados los valores mínimo y máximo de la escala, debe definir una línea recta entre estos puntos, dentro de la cual se encuentren cien (100) divisiones, cada una correspondiente a 1 % de opacidad. Esta redefinición de la escala es necesaria para que el ajuste relativo del 0 % y el 100 % de opacidad no generen desviaciones en los resultados entregados.

**3.1.2.2.6** El software de aplicación debe solicitar el ingreso de los datos de registro del vehículo en evaluación. La información mínima debe ser la siguiente: vehículos matriculados, información establecida en el numeral 8, vehículos no matriculados, VIN (Vehicle Identification Number por sus siglas en inglés) o serial.

### **3.1.3 Inspección previa y preparación inicial del vehículo**

Deben ser verificados los siguientes aspectos:

**3.1.3.1** Si el vehículo posee transmisión manual, ésta debe estar en posición neutro y el pedal de embrague debe estar libre, durante toda la prueba de opacidad.

NOTA Para algunos modelos de vehículos puede ser necesario activar y desactivar el embrague durante la preparación del vehículo con el fin de no alterar las revoluciones a las cuales se debe ejecutar la prueba de aceleración súbita.

**3.1.3.2** Si el vehículo posee transmisión automática, esta debe estar en posición de parqueo. Si la transmisión no presenta esta opción, debe ubicarse en la posición de neutro, durante toda la prueba de opacidad.

**3.1.3.3** Las ruedas del vehículo deben estar bloqueadas o el vehículo debe estar inmobilizado para evitar que se ponga en movimiento durante la prueba, poniendo en peligro a los inspectores.

**3.1.3.4 Las luces del vehículo deben estar encendidas.**

NOTA En caso de presentarse interferencia o inestabilidad en la lectura de velocidad de giro del motor, causada por las luces encendidas, se puede realizar la prueba con las luces apagadas.

**3.1.3.5 El sistema de aire acondicionado debe estar apagado.**

**3.1.3.6 Si el vehículo posee freno de motor o de escape, estos deben desactivarse.**

**3.1.3.7 Todo sistema de precalentamiento del aire de admisión debe estar apagado.**

**3.1.3.8 Se debe verificar que no se presente ninguna de las siguientes condiciones anormales:**

- Existencia de fugas en el tubo, uniones del múltiple y silenciador del sistema de escape del vehículo.
- Salidas adicionales en el sistema de escape diferentes a las de diseño original del vehículo.
- Ausencia de tapones de aceite o fugas en el mismo.
- Ausencia de tapones de combustible o fugas en el mismo.
- Instalación de accesorios o deformaciones en el tubo de escape que no permitan la introducción del acople.
- Incorrecta operación del sistema de refrigeración, cuya verificación se hará por medio de inspección.

NOTA 1 Esta inspección puede consistir en verificación de fugas, verificación del estado del ventilador del sistema, vibraciones o posibles contactos por deflexión de los alabes del ventilador a altas revoluciones o elementos con sujeción inadecuada, entre otros.

- Ausencia o incorrecta instalación del filtro de aire, y
- Activación de dispositivos instalados en el motor o en el vehículo que alteren las características normales de velocidad de giro y que tengan como efecto la modificación de los resultados de la prueba de opacidad o que impidan su ejecución adecuada. Si no pueden ser desactivados antes de la siguiente prueba, el vehículo es rechazado por operación inadecuada.

NOTA 2 Las anteriores inspecciones no son secuenciales.

NOTA 3 Los orificios de drenaje propios del diseño original que se presentan en algunos tubos de escape no se deben considerar como fugas y por lo tanto no generan el rechazo del vehículo.

En caso de presentarse alguna de estas condiciones, el inspector ingresará la respectiva observación al software de aplicación para que se genere automáticamente el informe de rechazo para el vehículo en prueba.

**3.1.3.9 El Opacímetro debe registrar la temperatura de operación del motor con el fin de establecer la correcta operación del mismo. Esta temperatura debe ser estimada por medio de la medición del aceite de lubricación u otros métodos disponibles. En esta inspección se pueden presentar dos circunstancias:**

- En caso de que la temperatura registrada por el equipo sea superior o igual a 50 °C, se realiza la prueba. No obstante, es responsabilidad del inspector garantizar que se alcance la temperatura óptima de operación justo antes de realizar la prueba.
- En caso de que la temperatura registrada por el equipo sea inferior a 50 °C, la prueba puede realizarse, bajo las siguientes consideraciones. Se registra la temperatura inicial y final de la prueba unitaria de aceleración. Si se presenta una diferencia igual o superior a 10 °C entre estas temperaturas, la prueba unitaria es abortada. Se realiza una prueba unitaria más. Si se presenta este fenómeno nuevamente, se rechaza el vehículo por operación incorrecta.

NOTA 1 En cualquier caso antes de realizar el registro de temperatura se recomienda operar el motor a revoluciones medias por un tiempo prudencial, dependiendo de la temperatura inicial medida y el modelo del motor, hasta que se determine que la temperatura es estable. Esta acción conducirá a: alcanzar la temperatura normal de operación, obtener un resultado de opacidad representativa del motor en prueba y evitar condiciones de aborto por variaciones de temperatura, en especial cuando no es posible el registro de temperatura.

**3.1.3.10** El software de aplicación debe solicitar la realización de una aceleración suave, con el fin de determinar la correcta operación de los sistemas de control de velocidad de giro del motor. En caso de evidenciarse la incorrecta operación de este sistema o su ausencia, se emitirá concepto de rechazo, debido a que presenta deficientes condiciones de operación.

**3.1.3.11** El software de aplicación debe registrar los valores de la velocidad mínima (ralentí) y máxima (gobernación).

**3.1.3.12** En caso de que los valores registrados se encuentren fuera de los intervalos establecidos por el fabricante del vehículo (ficha técnica o manual de operación), se rechaza el vehículo, por presentar malas condiciones de operación. En caso que no se cuente con ninguna información, se debe seguir el siguiente procedimiento:

**3.1.3.12.1** 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 condiciones normales del motor o del vehículo.

**3.1.3.12.2** 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 sistema de inyección de combustible limita la velocidad máxima del motor. Si hay algún indicio de que la capacidad limitadora del sistema de inyección de combustible 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 rechazar el vehículo.

**3.1.3.13** El software de aplicación debe solicitar la realización de una aceleración súbita, en la cual el acelerador es accionado a fondo en un tiempo igual o inferior a 1 s. Si el vehículo no alcanza la velocidad de gobernación registrada previamente con una variabilidad máxima de  $\pm 100$  r/min en menos de 5 s, se repite la aceleración dos veces más. Si en ninguna de estas aceleraciones se alcanza la velocidad de gobernación en el tiempo indicado, se rechaza el vehículo, debido a presentar condiciones deficientes de operación.

#### **3.1.4 Introducción de sonda de muestreo**

Cumplidos los requisitos descritos en el numeral 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3, el equipo mostrará en pantalla un mensaje indicando al inspector que realiza la prueba que puede introducir la sonda dentro del tubo de escape.

Una vez ingresada la sonda de muestreo, deben garantizarse las siguientes condiciones:

**3.1.4.1** La punta o cabezal de la sonda de muestreo debe ubicarse garantizando una posición contra corriente, es decir paralela y en dirección opuesta al flujo de los gases de escape, sin ser conectada al opacímetro. Verifique que se presente flujo de gas a través de la sonda, con el motor encendido, y continuar con el procedimiento.

**3.1.4.2** En caso de múltiples salidas de escape, se realiza la medición únicamente en una de ellas, con base en los siguientes criterios:

- Efectuando las aceleraciones necesarias a velocidad gobernada, si no existe diferencia apreciable entre el nivel de opacidad en cada uno de los escapes; se debe medir el humo en aquel que permita instalar más fácilmente el opacímetro. Esta determinación se debe tomar por inspección visual.
- Si existe una diferencia apreciable entre el nivel de humo proveniente de cada una de las salidas del escape, se debe ingresar la sonda del opacímetro y efectuar la prueba de opacidad sobre la salida de escape que presente el mayor nivel de opacidad (por inspección visual).

## **3.2 MEDICIÓN DE OPACIDAD**

### **3.2.1 Prueba unitaria de aceleración**

Una prueba unitaria de aceleración es la secuencia de cuatro (4) aceleraciones súbitas, acotadas por las velocidades mínima y máxima de acuerdo con las registradas anteriormente. En esta prueba unitaria de aceleración, las cuatro (4) aceleraciones son registradas, descartando la primera y empleando las tres (3) restantes para el cálculo del resultado final de opacidad.

El inspector del vehículo debe desarrollar la siguiente secuencia asistida por el opacímetro:

- 1) Oprimir completamente el acelerador en un tiempo menor o igual a 1 s, lo cual se verifica visualmente por el inspector del equipo o auxiliar encargado. Sostener el acelerador totalmente oprimido hasta alcanzar la velocidad de gobernación.  
  
El opacímetro indicará el punto de inicio de la aceleración y verificará que las revoluciones de gobernación se alcancen en menos de 5 s a partir del accionamiento del acelerador. En caso de no satisfacerse este tiempo, el opacímetro abortará la prueba unitaria de aceleración.
- 2) Alcanzada la velocidad de gobernación y verificada por el opacímetro, debe mantenerse entre 2 s y 4 s. Esta secuencia es asistida por el opacímetro, el cual detectará el punto en que es alcanzada la velocidad de gobernación y contabilizará la permanencia en esta.
- 3) Garantizado el tiempo de sostenimiento a la velocidad de gobernación, el inspector debe liberar el acelerador para que el motor regrese a la velocidad de ralenti. El opacímetro indicará en qué punto es liberado el acelerador.
- 4) Una vez liberado el acelerador debe transcurrir entre 15 s y 20 s antes de iniciar la siguiente aceleración súbita. El opacímetro debe contabilizar este tiempo e indicar en qué punto es iniciada la siguiente aceleración súbita.

Esta secuencia puede observarse con claridad en el diagrama de la Figura 1.

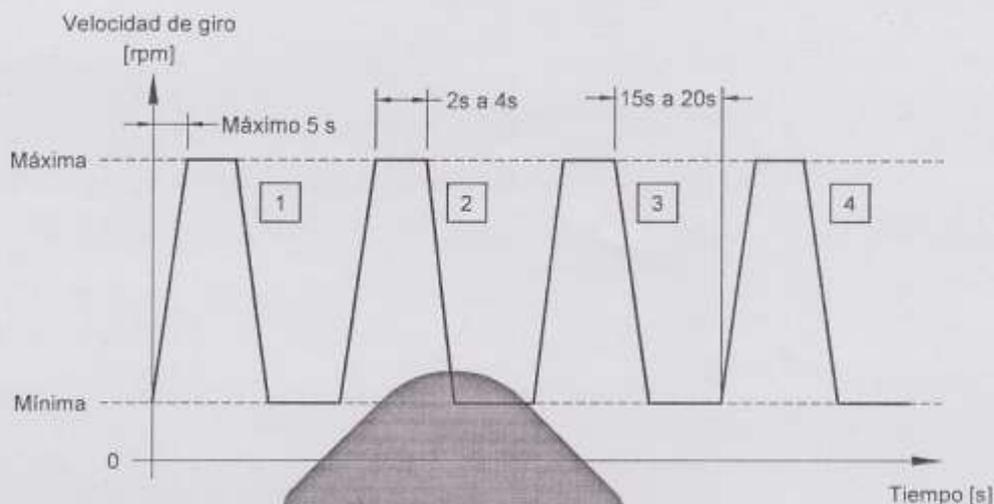


Figura 1. Prueba unitaria de aceleración

El opacímetro controlará el desarrollo de la prueba, registrando las velocidades durante cada ciclo de aceleración, comparando estos valores con los registrados en la preparación del vehículo de acuerdo con el numeral 3.1.3.11. Se permitirá una variabilidad máxima de  $\pm 100$  r/min. Así mismo, para cada una de las cuatro (4) aceleraciones se debe controlar la tasa de aceleración, de acuerdo con lo estipulado en el numeral 3.1.3.13. En caso de presentarse un incumplimiento de estos requisitos se abortará la prueba unitaria de aceleración.

Si durante la ejecución de la prueba se evidencia una falla técnica en el motor y/o sus accesorios, se debe dar por terminada la prueba por parte del inspector, e ingresar la condición de rechazo por falla súbita del vehículo.

### 3.2.2 Prueba de opacidad

Una prueba de opacidad consta de la inspección y verificación de requisitos del numeral 3.1 y la aplicación de un máximo de tres (3) pruebas unitarias de aceleración.

En caso de no ser satisfechos los requisitos de validación o de ejecución de la prueba al cabo de tres (3) pruebas unitarias de aceleración, y descartando errores asociados al opacímetro y a los inspectores, se emitirá concepto de rechazo al vehículo.

### 3.2.3 Registro de datos

El opacímetro registrará, de manera continua, toda la prueba unitaria de aceleración, desde el punto inicial (0) hasta el punto final de la aceleración cuatro (4). No obstante, en caso de no ser posible este registro continuo por ningún método disponible, los intervalos sin registro están comprendidos entre el segundo 13 y el 15 después de ser liberado el acelerador, para cada una de las cuatro aceleraciones. Se cuenta con 2 s, suficientes para el procesamiento de los datos antes de iniciar el nuevo registro.

Esta secuencia de registro se observa en el diagrama de la Figura 2.

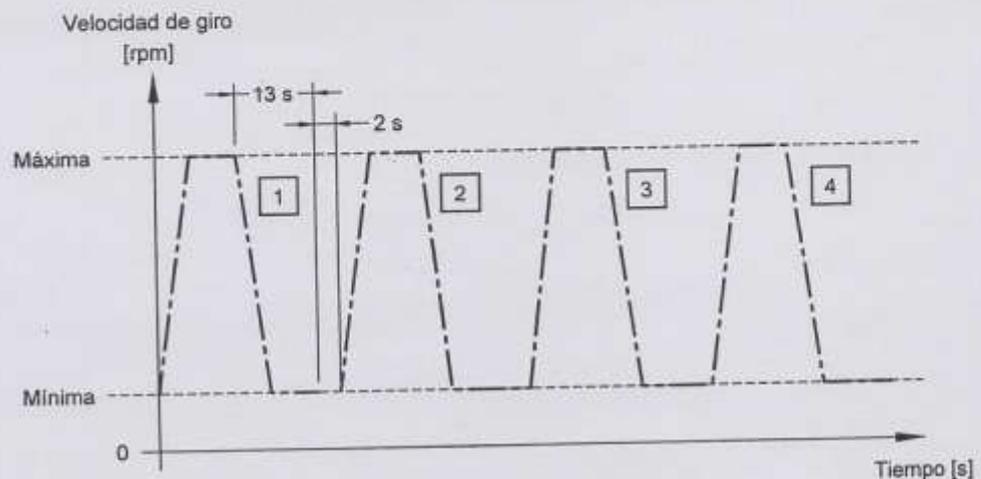


Figura 2. Secuencia de registro

### 3.2.4 Criterios de validación de la prueba de opacidad

Al ser finalizada una prueba unitaria de aceleración, el opacímetro debe validar automáticamente los resultados por medio de los siguientes criterios, previa aplicación de las correcciones de los Anexos A y B de la presente norma:

- a) La desviación del cero no debe exceder el  $\pm 2\%$  de opacidad reportado a la Longitud de trayectoria óptica efectiva del equipo (LTOE), o un valor de  $0.15 \text{ m}^{-1}$  en densidad de humo. Para esto es necesario que la sonda del equipo sea retirada del tubo de escape. En caso de que el equipo cuente con controladores de entrada del humo, este procedimiento se puede realizar automáticamente.
- b) La diferencia aritmética entre el valor mayor y menor de opacidad de las tres (3) aceleraciones empleadas para calcular el valor final, no debe:
  - Ser mayor a 10 % de opacidad si el reporte de valor de humo máximo se hace a una LTOE estándar de 430 mm;
  - Ser mayor a 5 % de opacidad si el reporte de valor de humo máximo se hace a una LTOE estándar de 200 mm o menor;
  - Ser mayor a  $0.5 \text{ m}^{-1}$  si el reporte de valor de humo máximo se hace en densidad de humo.

NOTA La LTOE estándar es la definida por la autoridad ambiental.

Una vez satisfechos los criterios descritos se considerará como válido el resultado final.

### 3.2.5 Pruebas de opacidad no válidas

En caso de no satisfacerse al menos uno de los criterios de validación expuestos en el numeral 3.2.4 se abortará la prueba unitaria de aceleración.

Además, pueden presentarse las siguientes circunstancias:

- Norma Técnica Colombiana NTC 4291 (Segunda actualización)
- a) En caso de presentarse incumplimiento del criterio a) del numeral 3.2.4, en tres (3) pruebas unitarias de aceleración consecutivas, la prueba de opacidad debe ser abortada y repetida cuando se hayan resuelto las posibles anomalías del opacímetro.
  - b) En caso de incumplimiento del criterio b) del numeral 3.2.4, en tres (3) pruebas unitarias de aceleración consecutivas, se emitirá el concepto de rechazo, debido al mal funcionamiento del vehículo.
  - c) En caso de no cumplirse el criterio a) del numeral 3.2.4, es necesario realizar la verificación de los valores mínimo y máximo de la escala siguiendo el procedimiento establecido en el numeral 3.1.2.2.4, antes de ser realizada la siguiente prueba unitaria de aceleración. Si se presentan desviaciones fuera de las establecidas, es necesario realizar los procedimientos de purga y limpieza (véase el numeral 3.1.2.2.3), seguidos de las rutinas de ajuste inicial (véase el numeral 3.1.2.2.5).

### **3.2.6 Cálculo y reporte de resultado final de la prueba de opacidad**

Una vez cumplidos los criterios del numeral 3.2.4, se deben considerar los resultados como válidos y se realizará el cálculo y reporte del resultado final de la prueba de opacidad.

El resultado final es el promedio aritmético de los valores de las tres (3) últimas aceleraciones de la prueba unitaria. Estos valores son determinados por medio de la aplicación de los procedimientos descritos en los Anexos A y B.

El software de aplicación del opacímetro debe comparar el resultado final de la prueba de opacidad con lo establecido en la reglamentación ambiental vigente, y de acuerdo con dicha comparación, debe emitir el certificado de aprobación o rechazo del vehículo en los términos y características establecidas por la autoridad competente.

## **4. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE ENSAYO**

Esta sección establece especificaciones para el equipo de ensayo requerido y sus periféricos, empleados en el ensayo de aceleración libre.

### **4.1 REQUISITOS GENERALES**

Para realizar la prueba de opacidad se requiere el uso de un opacímetro que debe tener las siguientes unidades funcionales:

- a) Un opacímetro de flujo parcial, que cumpla todos los requisitos expuestos en esta norma.
- b) Una unidad de procesamiento de datos capaz de realizar las funciones descritas en los Anexos A y B, que además de controlar la ejecución de la prueba, almacene los resultados en medio magnético e imprima los resultados de la prueba.
- c) Dispositivos de impresión, registro y transmisión de los datos requeridos por la autoridad ambiental competente,

Las unidades funcionales pueden integrarse en un solo componente o suministrarse como un sistema de componentes conectados entre sí.

## 4.2 REQUISITOS GENERALES PARA EL EQUIPO DE MEDICIÓN DE HUMO

### 4.2.1 Unidad de medición

El opacímetro entregará los resultados en unidades de opacidad, en la escala de 0 a 100, referida a una LTOE estándar o densidad de humo, que establezca la autoridad ambiental competente. El equipo debe realizar el cálculo automático para entregar los resultados con base en la LTOE estándar o densidad de humo, según se describe en el Anexo B.

### 4.2.2 Linealidad

Los puntos de verificación deben ser: máximo de la escala (100 %), mínimo de la escala (0 %) y dos valores intermedios. La separación mínima de estos puntos debe ser de 15 % de opacidad, con el fin de verificar el comportamiento general de la escala, sin excluir ninguna sección dentro de la misma. Si se supera el error máximo, debe ser corregido de forma inmediata. El error máximo permitido para el opacímetro es de  $\pm 2$  unidades de opacidad para los dos valores intermedios y  $\pm 1$  unidad para los valores extremos de la escala (0 y 100). En caso contrario, el software de aplicación del equipo no debe permitir la realización de pruebas de opacidad.

### 4.2.3 Desviación del cero

El equipo debe presentar una desviación del cero inferior a  $\pm 1$  % de opacidad cada hora. Es indispensable que el equipo realice automáticamente la verificación de este aspecto.

Así mismo, el software de control del equipo debe revisar la desviación del cero al finalizar cada prueba unitaria de aceleración, como parte de los criterios de validación expuestos en el numeral 3.2.4 a).

### 4.2.4 Tiempo de respuesta general

#### 4.2.4.1 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 humo 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).

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

en donde

- $t$  = tiempo de respuesta total de instrumento
- $t_p$  = tiempo de respuesta física
- $t_e$  = tiempo de respuesta eléctrica
- $t_f$  = tiempo de respuesta del filtro

#### 4.2.4.2 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 humo 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:

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

en 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.

#### 4.2.4.3 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.

#### 4.2.4.4 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 humo.

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

#### 4.2.4.5 Determinación del valor de humo pico

Se debe emplear el algoritmo en el Anexo A para determinar los niveles máximos de opacidad.

#### 4.2.5 Procesamiento de resultados

Ya que el tiempo general del instrumento es inferior al tiempo de respuesta específico de cada equipo, debido a su tecnología y manufactura, es necesaria la implementación de un filtro de señal, configurado para generar el retraso necesario. El filtro de señal implementado debe ser pasabajos de segundo orden.

#### 4.2.6 Sensor, fuente y detector

##### 4.2.6.1 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.

##### 4.2.6.1 Detector de luz

El detector de luz debe ser una fotocelda o un fotodiodo (con un filtro óptico, si es necesario). En el caso de una fuente luminosa incandescente, el detector debe presentar una respuesta espectral de pico en el intervalo 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.

##### 4.2.6.3 Paralelismo del haz luminoso

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

##### 4.2.6.4 Sistema auxiliar

Cualquier sistema adicional al sistema óptico, como por ejemplo aquellos que se emplean para proteger la fuente luminosa y el detector del contacto directo con los gases de escape, como la purga de humo. Debe diseñarse para minimizar cualquier efecto desconocido en la LTOE. Para los opacímetros especificados en esta norma, el fabricante debe dar cuenta de cualquier efecto de los sistemas auxiliares, al especificar la LTOE del opacímetro.

##### 4.2.6.5 Tasa de muestreo y digitalización de datos

La tasa de muestreo y digitalización de las unidades de procesamiento por parte de la unidad de procesamiento de datos debe ser de al menos 20 Hz.

#### 4.2.7 Sonda de muestreo de gases de escape

##### 4.2.7.1 Sonda

La sonda de muestreo de los gases de escape debe tener la longitud, el material y las características especificadas por el fabricante. No son permitidas modificaciones y/o alteraciones de las características de fábrica.

##### 4.2.7.2 Punta de sonda

El cabezal de muestreo o punta de sonda debe estar diseñado para tomar la muestra en contracorriente y de forma paralela al flujo de gases de escape. Además, debe garantizar una

separación mínima de 5mm entre la punta de la sonda de muestreo y la pared del tubo de escape. Sólo son permitidas las puntas de la sonda de muestreo especificadas por el fabricante, excluyéndose así cabezales con alteraciones de estas características de fábrica.

#### 4.2.8 Sensores periféricos

##### 4.2.8.1 Sensor de temperatura

El opacímetro debe contar con un sensor adecuado para la estimación de la temperatura de operación del motor. El sensor debe estar acoplado al software de aplicación, con el fin de realizar las notificaciones especificadas en el numeral 3.1.3.9. El error máximo permitido para este sensor es de  $\pm 2$  °C en un rango mínimo de medición de 0 a 100° C.

##### 4.2.8.2 Sensor de velocidad de giro

El opacímetro debe contar con un sensor de velocidad de giro acoplado al software de aplicación, con el fin de realizar las inspecciones iniciales (véase el numeral 3.1.3.) y el control sobre la prueba unitaria de aceleración (véase el numeral 3.2.1.). El error máximo permitido para este sensor es de 2 %, para una velocidad de giro medida en revoluciones por minuto (r/min).

##### 4.2.8.3 Sensor de temperatura ambiente

Se debe contar con un sensor para la medición de la temperatura ambiente. El sensor debe estar acoplado al software de aplicación, con el fin de realizar las notificaciones y restricciones especificadas en el numeral 3.1.1. El error máximo permitido para este sensor es de  $\pm 2$  °C.

##### 4.2.8.4 Sensor de humedad relativa

Se debe contar con un sensor para la medición de la humedad relativa. El sensor debe estar acoplado al software de aplicación, con el fin de realizar las notificaciones y restricciones especificadas en el numeral 3.1.1. El error máximo permitido para este sensor es de  $\pm 3$  %.

NOTA El sensor de temperatura especificado en el numeral 4.2.8.3 y el de humedad relativa especificada en el numeral 4.2.8.4, podrán ser integrados en un solo dispositivo o en forma separada.

#### 4.2.9 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 o de  $\pm 0,04$  m<sup>-1</sup> de densidad de humo. Se debe revisar el valor mencionado del filtro por lo menos cada año empleando una referencia trazable a un patrón nacional o internacional.

En caso de no contarse con materiales de referencia trazables, el valor de opacidad de los filtros empleados para verificación de linealidad y procedimientos de comparación y ajuste, debe sustentarse con certificados emitidos por un laboratorio o entidad de metrología acreditada. Estos certificados deben especificar como mínimo: el número de serie del filtro, el valor nominal, el error del instrumento, el método de medición, la fecha de expedición y el plazo de caducidad (en caso de existir).

Estos filtros, por sus características constructivas, son propensos a desgaste y a adquirir suciedad, por lo cual deben estar sujetos a buenas prácticas de uso y limpieza, así como a verificaciones periódicas de su valor nominal. La frecuencia de verificación debe estar definida

por el usuario y sustentada en las recomendaciones del fabricante, dependiendo del uso del instrumento.

#### **4.3 MANTENIMIENTO, COMPARACIÓN Y AJUSTE DEL OPACÍMETRO**

El mantenimiento al opacímetro se debe realizar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Los procedimientos de comparación, ajuste y corrección deben ser realizados con material de referencia trazable a un patrón nacional o internacional. En caso de no contarse con este material, se realizará con los filtros de densidad neutra especificados en el numeral 4.2.9.

Los equipos deben identificar cualquier error de linealidad o ajuste en los procedimientos de verificación de linealidad en los siguientes casos:

- al iniciar una jornada de trabajo
- al realizar la verificación de escala mínima y máxima al inicio de una prueba unitaria de aceleración, y
- al realizar la verificación de la desviación del cero al término de una prueba unitaria de aceleración.

En caso de presentarse desviaciones superiores a lo estipulado en por lo menos alguno de estos procedimientos, el equipo debe imposibilitar la realización de pruebas hasta ser solucionadas las anomalías. Si éstas no son resueltas mediante las rutinas de limpieza, purga y similares, el equipo debe someterse a las rutinas correctivas y de mantenimiento necesarias.

Es obligatorio tener los manuales de operación y mantenimiento del opacímetro en el sitio de medición, disponibles para uso de los inspectores y consulta de las autoridades.

### **5. ESPECIFICACIONES DEL SOFTWARE**

#### **5.1 SISTEMA OPERATIVO**

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

**5.1.2** La forma de encriptación debe ser definida por las autoridades competentes.

#### **5.2 SECUENCIAS FUNCIONALES MÍNIMAS**

El software de aplicación debe garantizar el desarrollo automático y secuencial de las funciones relacionadas con: la preparación y ejecución de la prueba de opacidad, el cumplimiento de los requisitos funcionales y estructurales del opacímetro para efectuar una adecuada toma y análisis de la muestra, el almacenamiento, la transferencia de la información y la impresión de los resultados de la prueba.

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

- a) Acceso del inspector mediante una clave.
- b) Ingreso de información básica, 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 establecimiento u organización deben aparecer automáticamente en la pantalla, ya que esta información debe ser registrada al momento de instalar el software de aplicación en el opacímetro.

- c) Ejecución de las secuencias relacionadas con la preparación del equipo de medición, preparación del vehículo y procedimiento de medición, definidas en los numerales 3.1 y 3.2 de la presente norma, respectivamente.
- d) Ejecución de los procedimientos del opacímetro, en relación con la realización del cero automático, las necesidades de comparación y ajuste, requisitos sobre el tiempo de calentamiento, bloqueos automáticos, notas informativas, entre otros.

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 inspector, y bloqueando las demás funciones cuando sea necesario y hasta tanto no se hayan realizado los procedimientos o funciones indicadas, de acuerdo con lo establecido en la presente norma.

### 5.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SOFTWARE DE APLICACIÓN

El software de aplicación debe:

**5.3.1** Poseer la capacidad de producir resultados de configuración múltiple en formato de archivo plano encriptado, para ser entregado a la autoridad ambiental competente en modo directo, vía módem o a través de Internet.

**5.3.2** Mostrar en pantalla el número asignado al establecimiento u organización, el número de Resolución otorgado por el Ministerio de Transporte o autoridad competente de acuerdo a su uso previsto, fecha, hora y resultado de la última verificación de linealidad, el serial y marca del opacímetro, la cantidad de pruebas realizadas (aprobadas, rechazadas y abortadas), fecha y hora actuales, versión del programa y nombre del usuario que está utilizando el sistema.

**5.3.3** Identificar y validar el opacímetro al que está conectado, y además solicitar las secuencias de verificación de linealidad en caso de haber sido reemplazado.

**5.3.4** 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 incluir 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:

- a) Impedir la visualización de los resultados de la prueba, hasta tanto estos no hayan sido encriptados, impresos, y grabados en el disco duro.

**NOTA** En caso de comercializadores importadores representantes de marca, fabricantes y ensambladoras objeto de esta norma, se pueden visualizar los valores de opacidad durante la realización de la prueba, sin embargo, toda la información del procedimiento debe quedar registrada.

- b) Restringir el acceso a la aplicación y a su operación, sólo a los usuarios autorizados, a través de la asignación de contraseñas. 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, solo debe ser permitido para el administrador del sistema, quien debe ser definido por la organización. No se debe permitir la modificación de la base de datos.
- c) Permitir el acceso al opacímetro y a su operación únicamente a los inspectores autorizados, mediante de la asignación de contraseñas.
- d) Impedir la realización de las pruebas cuando el equipo no haya alcanzado sus condiciones requeridas de calentamiento y estabilidad, temperatura de operación y, en general, todos aquellos requisitos de la presente norma, hasta tanto los mismos no estén dentro de los parámetros fijados.
- e) Advertir al inspector a través del aviso en pantalla y no permitir el funcionamiento del opacímetro, es decir, mantener automáticamente bloqueado el equipo, hasta tanto no se verifique la capacidad de recibir y almacenar información en la base de datos.

**NOTA** Se recomienda para efectos de establecer procedimientos de seguridad de la información consultar las guías establecidas en la norma NTC-ISO 27002 Tecnología de la información. Técnicas de seguridad. Código de práctica para la gestión de la seguridad de la información

- f) 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.
- g) A petición de la autoridad ambiental, activar un bloqueo automático en la secuencia de prueba, cuando se haya intentado alterar o violar los programas o archivos del software de aplicación.
- h) Comprobar la presencia y la debida conexión y comunicación con el computador de al menos una impresora.
- i) Tomar un registro completo (fecha, hora y demás información que se haya digitado) cada vez que una prueba haya sido abortada.
- j) Para efectos de lo establecido en los anteriores ítems, 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.

## **6. ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE COMPUTACIONAL**

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

Así mismo, se debe contar con los dispositivos necesarios para registrar, almacenar y mantener la información de manera segura, 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 opacidad de gases de escape, cuando haya sido aprobado para este fin por la autoridad competente, y debe ser de utilización exclusiva para esta labor.

## 8. REPORTE Y ALMACENAMIENTO DE RESULTADOS

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

**Tabla 1. Datos del centro de diagnóstico automotor, autoridad ambiental, laboratorio ambiental y ensamblador o concesionario**

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Número del establecimiento u organización	21	AU	
Nombre del establecimiento u organización	80	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)		
AAAA/MM/DD	Año mes día		

NOTA Los anteriores datos pueden ser aplicables dependiendo de la entidad que realiza la prueba.

**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 software de aplicación	20	AU	
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 y hora de inicio de la prueba	16	AU	AAAA/MM/DD HH:MM
Fecha y hora de finalización de la prueba	16	AU	AAAA/MM/DD, HH:MM
Fecha y hora de aborto de la prueba	16	AU	AAAA/MM/DD, HH:MM
Inspector que realiza la prueba	9	AU	Cédula de ciudadanía
Temperatura ambiente	2	AU	Unidades en °C
Humedad relativa	2	AU	Unidades en %
Causa del aborto de la prueba	1	E o AU	Código por listado de posibles causas. Estas causas son: Fallas del equipo de medición (E) Falla súbita de fluido eléctrico (E) Bloqueo forzado del equipo (E) EJEMPLO, no se cumplen condiciones ambientales. Ejecución incorrecta de la prueba (AU) Falla por desviación del cero, según numeral 3.2.4 de la presente norma. (AU)
AU	Automático (llenado automáticamente por el programa)		
E	Escogencia		
AAAA/MM/DD	Año mes día		
HH:MM	Hora-minutos		

Se debe utilizar la NTC 3711:1995, Reglas de redondeo para valores numéricos.

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 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 Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE o autoridad competente
E	Escogencia (A partir de listados propios del programa)		
D	Digitar (Para ser registrados manualmente, o importado de una base de datos)		

Tabla 5. Datos del vehículo

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Marca	3	E	Según códigos listado definido por autoridad competente
Línea	3	E	Según códigos listado definido por autoridad competente
Año modelo	4	E ó D	
Placa	6	D	
Cilindraje en cm <sup>3</sup>	5	D	
Clase de vehículo	2	E	Según códigos definidos por la autoridad competente.
Servicio	2	E	Según códigos definidos por la autoridad competente.
Combustible	1	D	Según códigos definidos por la autoridad competente.
Número de motor	15	D	
Numero VIN o serie	17	D	
Número Licencia de tránsito (tarjeta de propiedad)	16	D	
Modificaciones al motor	2	E	
Kilometraje	6	D	
Potencia del motor (valor necesario solo para reporte de resultados en porcentaje de opacidad)	3	D	
E Escogencia (A partir de listados propios del programa) D Digital (Para ser registrados manualmente, o importado de una base de datos) A Automático (asignado por el sistema)			

Para vehículos sin matricular no aplican la placa, el servicio ni la licencia de tránsito.

Tabla 6. Resultados de las pruebas

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Comprobación de funcionamiento del sistema de inyección de combustible	1	E	
r/min gobernada medida	4	AU	
temperatura de aceite del motor	3	AU	
r/min en ralenti	4	AU	
resultados opacidad en ciclo preliminar	4	AU	
r/min en ciclo preliminar	4	AU	
resultados opacidad en primer ciclo	4	AU	
r/min en primer ciclo	4	AU	
resultados opacidad en segundo ciclo	4	AU	
r/min en segundo ciclo	4	AU	
resultados opacidad en tercer ciclo	4	AU	
r/min en tercer ciclo	4	AU	
Resultados opacidad final del ensayo (promedio de los tres ciclos finales de prueba)	4	AU	
Longitud de trayectoria óptica efectiva para cálculo de opacidad.	3	AU	Unidades en metros
Temperatura final de aceite del motor	3	AU	

Continúa

Tabla 6. (Final)

Descripción	Longitud BYTES	Tipo de llenado	Observaciones
Inspección previa (una vez revisado el numeral 3.1.3 de la presente norma)			
- Fugas tubo de escape	1	E	
- Fugas en el silenciador	1	E	
- tapa llenado combustible	1	E	
- Presencia tapa aceite motor	1	E	
- permite instalación sistema de muestreo	1	E	
- Salidas adicionales a las del diseño	1	E	
- Presencia filtro de aire	1	E	
- Falla sistema de refrigeración	1	E	
- Revoluciones inestables o fuera de rango.	1	E	
Causas de rechazo (cuando este evento sucede)	2	E o AU	<p>Código por listado de posibles causas, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Durante la medición no se alcanza la velocidad gobernada antes de 5 segundos; (AU)</li> <li>-Indicación de mal funcionamiento del motor (E)</li> <li>-Incumplimiento de niveles máximos permitidos por la autoridad competente. (AU)</li> <li>-Existencia de fugas en el tubo, uniones del múltiple y silenciador del sistema de escape del vehículo. (E)</li> <li>-Salidas adicionales en el sistema de escape diferentes a las de diseño original del vehículo. (E)</li> <li>-Ausencia de tapones de aceite o fugas en el mismo (E)</li> <li>-Ausencia de tapones de combustible o fugas en el mismo. (E)</li> <li>-Instalación de accesorios o deformaciones en el tubo de escape que no permitan la introducción del acople. (E)</li> <li>-Incorrecta operación del sistema de refrigeración, cuya verificación se hará por medio de inspección. (E)</li> <li>-Ausencia o incorrecta instalación del filtro de aire. (E)</li> <li>-Activación de dispositivos instalados en el motor o en el vehículo que alteren las características normales de velocidad de giro y que tengan como efecto la modificación de los resultados de la prueba de opacidad o que impidan su ejecución adecuada. Si no pueden ser desactivados antes de la siguiente prueba, el vehículo es rechazado por operación inadecuada. (E)</li> <li>-La diferencia aritmética entre el valor mayor y menor de opacidad de las tres (3) aceleraciones, especificados en el numeral 3.2.4. (AU)</li> <li>- Falla súbita del motor y /o sus accesorios. (E)</li> </ul> <p>(Además de las contempladas en la presente norma)</p>
AU	Automático (llenado automáticamente por el programa)		
E	Escogencia		

**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.
- $\Delta t$  = tiempo entre dos valores de opacidad almacenados (periodo 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 debe 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 debe 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.

$$t_{Fd} = \sqrt{0.500^2 - (t_p^2 + t_e^2)} \quad \text{Ecuación A.1}$$

#### 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.

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

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

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

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

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

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

$\Delta t$  = tiempo entre dos valores de capacidad 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.

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

en 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

$$|(t_r - (t_{rd}))| > [0,01 \cdot (t_{rd})]$$

entonces se debe repetir el proceso iterativo con un nuevo valor de ( $f_c$ ). Las variables ( $t_r$ ) y ( $f_c$ ) son aproximadamente proporcionales entre sí, de modo que se debe seleccionar el nuevo ( $f_c$ ) con base en la diferencia entre ( $t_r$ ) y ( $t_{rd}$ ) 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 ( $t_{rd}$ ). 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 ( $Y_{max}$ ) 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) Periodo 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 A.1 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.

$$t_{fd} = 0,499 5 = \sqrt{0,500^2 - (0,020^2 + 0,010^2)} \quad \text{Ecuación A.11}$$

Al insertar los valores correctos de  $\Delta t$  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 A.1 Coeficientes de Bessel iniciales

Ecuación A.1	$t_f$	0,500
Ecuación A.2	$f_c$	0,523 3
Ecuación A.4	B	0,518
Ecuación A.5	$\Omega$	50 655 506 3
Ecuación A.6	C	0,000 603 96
Ecuación A.7	K	0,914 270 370
	$\Delta t$	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 0,5444 s empleando un valor de  $f_c$  de 0,6283. La diferencia entre este valor y el valor deseado de 0,50 es 0,0444 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 0,5444 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 0,0049. 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
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

Continúa.

Tabla A.2 (Final)

Índice	Tiempo	$X_i$	$X_{i-1}$	$X_{i-2}$	$Y_i$	$Y_{i-1}$	$Y_{i-2}$
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	$\Omega$	45,991 292
Ecuación A6	C	0,000 729
Ecuación A7	K	0,905 717
	$\Delta t$	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 <sub>i</sub>	X <sub>i-1</sub>	X <sub>i-2</sub>	Y <sub>i</sub>	Y <sub>i-1</sub>	Y <sub>i-2</sub>
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 empleada para realizar la medición.

Por ejemplo, al realizar una medición del humo de un motor dado, con un medidor de 100 mm de Longitud de Trayectoria Óptica Efectiva, se detectó una transmitancia de 0,85, se reporto (habría reportado una opacidad de 15 % ó una densidad de humo de 0,001625 K, (o m<sup>-1</sup>)). Sin embargo, dado que las mediciones de humo expresadas en opacidad pueden ser reportadas a diferentes Longitudes de Trayectoria Óptica Efectiva Estándar es necesario indicar a cuál de ellas será referida. Así, para nuestro ejemplo si hubiese sido tomado la muestra de humo de tubos de escape de 76, 102, 127 o 152 mm se podrían reportar opacidades de 11,6, 15,3, 18,6 y 21,9 % respectivamente si se utilizase el diámetro de tubo de escape como Longitud de Trayectoria Óptica Efectiva Estándar, o se podría reportar 38,6 % ó 50,3 % de opacidad si se reportase a Longitudes de Trayectoria Óptica Efectiva Estándar acordadas de 300 y 430 mm respectivamente.

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.

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.

**B.2. SUBÍNDICES**

m Se refiere a la condición medida.

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:

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

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

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  $L_i$  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 B.1, 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,  $N_i$  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  $\pm 5$  mm para obtener resultados de humo corregidos que sean precisos dentro de  $\pm 2\%$  de opacidad ó densidad de humo de  $\pm 0,2 \text{ m}^{-1}$ .

A manera informativa se presenta la siguiente tabla, la cual muestra los valores de opacidad asociadas a diferentes Longitudes de Trayectoria Óptica Efectiva Estandar correspondientes a densidades de humo  $K$  ( $\text{m}^{-1}$ ) dadas.

Opacidad, %					Densidad K 1/m	Opacidad, %					Densidad K 1/m
Diámetro exterior del tubo de escape						Diámetro exterior del tubo de escape					
2" 51 mm	3" 76 mm	4" 102 mm	5" 127 mm	6" 152 mm		2" 51 mm	3" 76 mm	4" 102 mm	5" 127 mm	6" 152 mm	
33	45	55	63	70		54	69	79			
32	44	54	62	69	7,50				85		15,00
31	43	53	61	68		53	68	78	85		
30	42	52	60	67	7,00	52	67	77	84	89	14,50
29	41	51	59	66		51	66	76	83	88	14,00
28	40	49	57	64	6,50	50	65	75	82	87	13,50
27	39	48	56	63		49	64	74	81	86	13,00
26	38	47	55	62	6,00	48	63	73	80	85	12,50
25	37	46	54	61		47	62	72	79	84	12,00
24	36	45	53	60	5,50	46	61	71	78	83	11,50
23	35	44	52	59		45	60	70	77	82	11,00
22	34	43	51	58	5,00	44	59	69	76	81	10,50
21	33	42	49	57		43	58	68	75	80	10,00
20	32	41	48	56	4,50	42	57	67	74	79	9,50
19	31	40	47	55		41	56	66	73	78	9,00
18	30	39	46	54	4,00	40	55	65	72	77	8,50
17	29	38	45	53		39	54	64	71	76	8,00
16	28	37	44	52	3,50	38	53	63	70	75	
15	27	36	43	51		37	52	62	69	74	
14	26	35	42	50	3,00	36	51	61	68	73	
13	25	34	41	49		35	50	60	67	72	
12	24	33	40	48	2,50	34	49	59	66	71	
11	23	32	38	46		33	48	58	65	70	
10	22	31	36	44	2,00	32	47	57	64	69	
9	21	30	34	42		31	46	56	63	68	
8	20	29	32	40	1,50	30	45	55	62	67	
7	19	28	30	38		29	44	54	61	66	
6	18	27	28	36	1,00	28	43	53	60	65	
5	17	26	26	34		27	42	52	59	64	
4	16	25	24	32	0,50	26	41	51	58	63	
3	15	24	22	30		25	40	50	57	62	
2	14	23	20	28		24	39	49	56	61	
1	13	22	18	26		23	38	48	55	60	
	12	21	16	24		22	37	47	54	59	
	11	20	14	22		21	36	46	53	58	
	10	19	12	20		20	35	45	52	57	
	9	18	10	18		19	34	44	51	56	
	8	17	8	16		18	33	43	50	55	
	7	16	6	14		17	32	42	49	54	
	6	15	4	12		16	31	41	48	53	
	5	14	2	10		15	30	40	47	52	
	4	13		8		14	29	39	46	51	
	3	12		6		13	28	38	45	50	
	2	11		4		12	27	37	44	49	
	1	10		2		11	26	36	43	48	
		9		1		10	25	35	42	47	
		8				9	24	34	41	46	
		7				8	23	33	40	45	
		6				7	22	32	39	44	
		5				6	21	31	38	43	
		4				5	20	30	37	42	
		3				4	19	29	36	41	
		2				3	18	28	35	40	
		1				2	17	27	34	39	
						1	16	26	33	38	

### 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.3 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  $L_t$  a la unidad de procesamiento de datos.

**ANEXO C**  
(Informativo)

**BIBLIOGRAFÍA**

SAE J1667:1996, Snap-Acceleration Smoke Test Procedure for Heavy-Duty Diesel Powered Vehicles.

ISO 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.

ISO 11614:1999 (First Edition), Reciprocating Internal Combustion Compression-Ignition Engines. Apparatus for Measurement of the Opacity and for Determination of the Light absorption Coefficient of Exhaust Gas.