



International  
Civil Aviation  
Organization

Organisation  
de l'aviation civile  
internationale

Organización  
de Aviación Civil  
Internacional

Международная  
организация  
гражданской  
авиации

منظمة الطيران  
المدني الدولي

国际民用  
航空组织

Tel.: +1 514-954-8219 ext. 6726

Ref.: AN 1/17.14-19/43

19 de julio de 2019

**Asunto:** Propuestas de enmienda del Anexo 16, Volumen II, relativas a las normas y métodos recomendados de protección del medio ambiente — Emisiones de los motores de las aeronaves

**Tramitación:** Los comentarios sobre las propuestas deben llegar a Montreal para el 19 de octubre de 2019

Señor/Señora:

1. Tengo el honor de dirigirme a usted para comunicarle que la Comisión de Aeronavegación, en la quinta sesión de su 211° período de sesiones, celebrada el 2 de mayo de 2019, examinó las propuestas que se prepararon en la undécima reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP/11) para enmendar las normas y métodos recomendados (SARPS) del Anexo 16 — *Protección del medio ambiente, Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves* en lo que respecta a la protección del medio ambiente, y que figuran en el Adjunto A.

2. Las propuestas de enmienda del Anexo 16, Volumen II, que se presentan en el Adjunto A incluyen:

- a) una actualización de la fecha de aplicación para los tipos de motores nuevos que no afectará a la actual norma de NO<sub>x</sub> aplicable a los motores en producción ni a las actuales normas de índice de humo (SN), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y materia particulada no volátil (nvPM) en masa aplicables a la producción (Propuesta A);
- b) correcciones a las especificaciones y condiciones relativas al gasto como resultado de la aplicación de las condiciones de temperatura y presión normalizadas (STP) para el equipo de medición y de las especificaciones relativas al funcionamiento del sistema de muestreo (Propuesta B);
- c) uso de un lenguaje más genérico en las exenciones otorgadas a los motores en producción con posterioridad a las fechas de aplicación de las normas de índice de humo, NO<sub>x</sub>, HC y CO<sub>2</sub>, así como emisiones de nvPM en masa y en número; aclaración de las referencias a la “autoridad competente”, introducción de la definición de “Estado de diseño”, y actualización del texto sobre exenciones (Propuesta C);
- d) introducción del nuevo texto de las normas sobre emisiones de nvPM en masa y en número resultante de la CAEP/11; descripción de los límites para la nvPM en masa y en número que se aplicarían a los nuevos tipos de motores a partir del 1 de enero de 2023,

S19-1549

acompañados de una norma de nvPM en masa y en número para los motores en producción con fecha de aplicación del 1 de enero de 2023 (Propuesta D);

- e) introducción de cambios consiguientes en todo el Volumen II del Anexo 16 para guardar la uniformidad con la nueva norma de nvPM en masa y en número, que incluyen: definición de los procedimientos para la medición y el cálculo de los niveles de emisión de nvPm en masa y en número, definición de los procedimientos de evaluación de nvPM para inventario y modelización, actualización del procedimiento de cumplimiento aplicable a las emisiones de materia particulada, introducción de las técnicas de instrumentación y medición de las emisiones de nvPM, actualización de las correcciones por pérdidas por termoforesis y dilución en el sistema de muestreo de la nvPM, definición de las fracciones de penetración de los componentes individuales del sistema de medición y muestreo de la nvPM, reemplazo de unidades para la notificación del contenido de azufre del combustible, y la introducción del 1 de enero de 2023 como fecha de aplicación final de la norma sobre el índice de humo (SN) para motores con empuje nominal superior a 26,7 kN (Propuesta E); y
- f) corrección general de errores técnicos y tipográficos, incluida la introducción de la Nota sobre el certificado de tipo y revisiones a la humedad de referencia (Propuesta F).

3. Para facilitarle el examen de las propuestas de enmienda, se incluye una justificación para cada propuesta en los recuadros de texto que figuran inmediatamente a continuación de las propuestas que se presentan en adjunto.

4. Le ruego envíe los comentarios que desee formular sobre las propuestas de enmienda en formato Word a [icaohq@icao.int](mailto:icaohq@icao.int) a más tardar el 19 de octubre de 2019. La Comisión de Aeronavegación me ha pedido que indique expresamente que tal vez ni la Comisión ni el Consejo puedan considerar los comentarios que se reciban después de la fecha mencionada. En este sentido, le agradecería me comunicara antes de esa fecha si prevé alguna demora en la transmisión de su respuesta.

5. A título informativo, le comunico que la aplicación de las enmiendas propuestas del Anexo 16, Volumen II, está prevista para el 1 de enero de 2021.

6. La labor ulterior de la Comisión de Aeronavegación y del Consejo se facilitará en gran medida si usted nos comunica concretamente si acepta o no las propuestas.

7. Cabe señalar que, en el examen de sus comentarios en la Comisión de Aeronavegación y en el Consejo, las respuestas se clasifican normalmente como “acuerdo, con o sin comentarios”, “desacuerdo, con o sin comentarios” o “no se indica la postura”, respectivamente. Si en su respuesta utiliza usted las expresiones “no hay objeción” o “sin comentarios”, se interpretarán como “acuerdo sin comentarios” y “no se indica la postura”, respectivamente. Para facilitar una clasificación adecuada de su respuesta, en el Adjunto B se ha incluido un formulario que puede llenar y remitir con sus comentarios, de haberlos, sobre las propuestas del Adjunto A.

Le ruego acepte el testimonio de mi mayor consideración y aprecio.

Fang Liu  
Secretaria General

**Adjuntos:**

- A — Propuesta de enmienda del Anexo 16, Volumen II
- B — Formulario de respuesta



**PROPUESTA DE ENMIENDA DE LAS  
NORMAS Y MÉTODOS  
RECOMENDADOS INTERNACIONALES**

**PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**

**ANEXO 16**

**AL CONVENIO SOBRE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL**

**VOLUMEN II**

**EMISIONES DE LOS MOTORES DE LAS AERONAVES**

<p><b>PROPUESTA INICIAL A DISPOSICIONES SOBRE LA FECHA DE APLICACIÓN PARA MOTORES NUEVOS</b></p>
--

**PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES**

...

**CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN  
PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES  
EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

...

**2.3 Emisiones gaseosas**

...

**2.3.2 Niveles reglamentarios**

...

e) para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación del primer modelo individual es el 1 de enero de 2014 o después de esa fecha y para los que se haya presentado una solicitud de certificado de tipo antes del 1 de enero de 2023:

1) para los motores con una relación de presión de 30 o menos:

i) para motores con un empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 7,88 + 1,4080\pi_{oo}$$

ii) para motores con un empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 40,052 + 1,5681\pi_{oo} - 0,3615F_{oo} - 0,0018\pi_{oo}F_{oo}$$

2) para motores con relación de presión de más de 30 pero menos de 104,7:

i) para motores con empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = -9,88 + 2,0\pi_{oo}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 41,9435 + 1,505\pi_{oo} - 0,5823F_{oo} + 0,005562\pi_{oo}F_{oo}$$

3) para motores con relación de presión de 104,7 o más:

$$D_p/F_{oo} = 32 + 1,6\pi_{oo}$$

f) para los motores de un tipo o modelo para los que se haya presentado una solicitud de certificado de tipo el 1 de enero de 2023 o después de esa fecha:

1) para motores con relación de presión de 30 o menos:

i) para motores con empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 7,88 + 1,4080\pi_{oo}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 40,052 + 1,5681\pi_{oo} - 0,3615F_{oo} - 0,0018\pi_{oo}F_{oo}$$

2) para motores con relación de presión de más de 30 pero menos de 104,7:

i) para motores con empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = -9,88 + 2,0\pi_{oo}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 41,9435 + 1,505\pi_{oo} - 0,5823F_{oo} + 0,005562\pi_{oo}F_{oo}$$

3) para motores con relación de presión de 104,7 o más:

$$D_p/F_{oo} = 32 + 1,6\pi_{oo}$$

*Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación ~~respecto a las emisiones~~ de los motores de las aeronaves ~~respecto a las emisiones~~, figura orientación sobre la definición y utilización de procedimientos equivalentes.*

## 2.4 Información requerida

...

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>La propuesta de enmienda modifica la disposición del Anexo 16, Volumen II, respecto de la fecha de aplicación para tipos de motores nuevos.</p> <p>Las primeras normas de la OACI sobre las emisiones de los motores (véase Anexo 16, Volumen II, 1ª edición - 1981) se aplicaban a todos los motores fabricados a partir de una fecha determinada. No se planteaba el problema de la aplicabilidad de las normas, ya que afectaba únicamente a las normas aplicables a “tipos nuevos”. Con la segunda edición del Volumen II del Anexo 16, en 1993, además de fijarse un cese de producción para la norma de NOx existente, se adoptó una nueva norma de NOx aplicable a los nuevos tipos de motores. Sin embargo, en ese momento, no existía el concepto de certificación de tipo de motor en la reglamentación de la OACI, ya que los motores sólo se consideraban partes de la aeronave (certificados en el Anexo 8). Por eso, no había modo de asociar las fechas de aplicación de las normas para “tipos de motores nuevos” con el proceso de certificación de tipo de motor. Por eso se introdujo la frase “para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación del primer modelo individual es el 1 de enero de 2014 o después de esa fecha”. El enfoque actual para la aplicabilidad de la norma de las emisiones de los motores del Volumen II del Anexo 16 (que se basa en la fecha de fabricación del primer modelo de producción individual) es producto de que la certificación de tipo para los motores no existía cuando se elaboró la primera norma para un “tipo de motor nuevo”. Esto no era un problema para la aeronavegabilidad y la certificación de ruido porque lo que se certifica es la aeronave. En una enmienda reciente del Anexo 8 (Enmienda 105A), se introdujo oficialmente el concepto de certificación de tipo de los motores en la reglamentación de la OACI, con lo que se hizo posible que la aplicabilidad de las normas futuras esté oficialmente vinculada con el proceso de certificación de tipo.</p> <p>Actualmente, sólo para las emisiones de NOx existe una norma relacionada con los tipos de motores nuevos. No obstante, el cambio propuesto no tendrá incidencia en la actual norma de NOx para los motores en producción, ya que tanto la fecha de solicitud del certificado de tipo como la fecha de fabricación del primer modelo son posteriores a la fecha de aplicación de la actual norma de NOx (Parte III, 2.3.2 (e) – después del 1 de enero de 2014).</p> <p>Este cambio tampoco tendrá impacto alguno en las normas existentes para índice de humo (SN), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) ni en la actual norma sobre materia particulada no volátil (nvPM) en masa, ya que estas normas se aplican a toda la producción a partir de una fecha determinada (Parte III, 2.2.1 – SN – a partir del 1 de enero de 1983; Parte III, 2.3.1 – HC, CO – a partir del 1 de enero de 1986; Parte III, 4.2.1 – nvPM en masa – a partir del 1 de enero de 2020) y no específicamente a tipos de motores nuevos (como las normas de NOx).</p>
---------------------------------------	--

**PROPUESTA INICIAL B**  
**ESPECIFICACIONES Y CONDICIONES DEL GASTO**

## APÉNDICE 2. EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE HUMO

...

### 2. MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DE HUMO

#### 2.1 Sonda para recoger las muestras de las emisiones de humo

La sonda de muestreo deberá satisfacer los siguientes requisitos:

- a) El material de la sonda que está en contacto con la muestra de las emisiones de escape será de acero inoxidable o cualquier otro material no reactivo.
- b) Si se emplea una sonda de muestreo con orificios de muestreo múltiples;
  - 1) todos los orificios tendrán el mismo diámetro; y
  - 2) La sonda de muestreo tendrá una forma tal que, por lo menos, el 80% de la caída de presión a través del conjunto de la sonda se registre en los orificios.
- c) El número mínimo de lugares muestreados será de 12.

...

#### 2.3 Dispositivos para analizar el humo

*Nota.— El método aquí descrito se basa en la medición de la reducción de la reflectancia de un filtro manchado por determinada masa de flujo del escape de muestra.*

La disposición de los diversos componentes que integran el dispositivo para conseguir las muestras necesarias del filtro manchado, tendrá las características indicadas en forma esquemática en la Figura A2-1. Podrá instalarse una derivación optativa sobre el medidor de volumen para facilitar la lectura. Los principales elementos del sistema deberán satisfacer los requisitos siguientes:

...

- e) *bomba de vacío*: esta bomba, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de  $-75\text{kPa}$  en relación con la presión atmosférica; al gasto máximo, el régimen no deberá ser inferior a  $2826\text{ L/min}$ , a la temperatura y presión normales normalizadas;

...

- i) *pérdidas*: el subsistema deberá satisfacer la prueba siguiente:
  - 1) colocar un filtro limpio en el portafiltro;
  - 2) cerrar la válvula A y abrir por completo las válvulas B, C y D;
  - 3) accionar la bomba de vacío durante 1 minuto, hasta lograr el equilibrio necesario;

- 4) seguir accionando la bomba y medir el gasto con el contador, durante cinco minutos. Dicho **volumen** **gasto** no deberá exceder de **51 L/min** (con referencia a la temperatura y presión **normales normalizadas**). En el caso de que no se consiga esto, el dispositivo no deberá utilizarse.

...

## 2.5 Procedimientos aplicables a la medición del humo

...

### 2.5.2 Verificaciones de las pérdidas y la limpieza

No se hará ninguna medición antes de que se hayan calentado y estabilizado los conductos de transferencia de la muestra y las válvulas correspondientes. Antes de proceder a una serie de ensayos, se verificará el sistema de la siguiente manera, para cerciorarse de que no hay pérdidas y de que está limpio:

a) *verificación de las pérdidas*: apartar la sonda y cerrar el extremo del conducto de muestreo; proceder a la verificación de la pérdida, según se indica en 2.3 h), con la diferencia de que la válvula A debe quedar abierta y en posición de “derivación”, la válvula D debe quedar cerrada y el límite de pérdida es de **20,4 L/min** a la temperatura y presión normalizadas. Colocar de nuevo la sonda en su lugar y abrir el conducto de interconexión;

...

## APÉNDICE 3. INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS EMISIONES GASEOSAS

...

### 5. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

...

#### 5.1 Dispositivo para medir las muestras

##### 5.1.1 Sonda de muestreo

La sonda de muestreo deberá satisfacer los siguientes requisitos:

- a) El material de la sonda que está en contacto con la muestra de las emisiones de escape será de acero inoxidable o cualquier otro material no reactivo.
- b) Si se emplea una sonda **de muestreo** con orificios de muestreo múltiples;
  - 1) todos los orificios tendrán el mismo diámetro; y
  - 2) ~~La~~ sonda **de muestreo** tendrá una forma tal que; por lo menos; el 80% de la caída de presión; a través del conjunto de la sonda se registre en los orificios.
- c) El número mínimo de lugares muestreados será de 12.

...

## 6. PROCEDIMIENTO A SEGUIR AL HACER EL ENSAYO GENERAL

...

### 6.3 Utilización

6.3.1 No se hará ninguna medición hasta que no se hayan calentado y estabilizado todos los instrumentos y los conductos de transferencia de la muestra y hasta que no se hayan efectuado las verificaciones siguientes:

- a) verificación de las pérdidas: antes de efectuar una serie de ensayos, se verificará que el sistema no tenga pérdidas. Para hacerlo, aislar la sonda y los analizadores, conectar y accionar una bomba de vacío ~~de actuación equivalente a la que se utilizó para el sistema de medición de humo~~ a fin de comprobar que las pérdidas del gasto del sistema sean inferiores a 0,4 L/min, a la temperatura y presión ~~normales~~ normalizadas. La bomba de vacío, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de  $-75\text{kPa}$  en relación con la presión atmosférica; al gasto máximo, el régimen no deberá ser inferior a 26 L/min a la temperatura y presión normalizadas.
- b) verificación de la limpieza: aislar el sistema de muestreo de gases de la sonda y conectar el extremo del conducto de muestra a una fuente de gas cero. Calentar el sistema hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento que se necesita para hacer las mediciones de hidrocarburos. Activar la bomba de flujo de la muestra y ajustar el flujo al que se utilizó durante el ensayo de las emisiones del motor. Registrar la lectura del analizador de hidrocarburos. La lectura no excederá de 1% del nivel de emisiones del motor en marcha lenta o 1 ppm (ambos expresados en el equivalente de metano), de estos valores el mayor.

...

## ADJUNTO E DEL APÉNDICE 7 PROCEDIMIENTOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL SISTEMA

### 1. VERIFICACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA PARTE DE RECOLECCIÓN Y EL CONDUCTO DE GAS

#### 1.1 Procedimiento de verificación de pérdidas

Antes de una serie de pruebas de un motor, se deben verificar la ~~p~~Parte de recolección y el GL para detectar pérdidas mediante el procedimiento siguiente:

- a) Aislar el GL de la parte de medición de  $\text{nvPM}$  mediante la válvula de aislamiento 1, la válvula de control de presión P1 y, si procede, la válvula de cierre opcional.
- b) Aislar la sonda y los analizadores.
- c) Conectar y accionar una bomba de vacío para verificar ~~el gasto de las pérdidas del~~ el gasto de las pérdidas ~~del~~ las pérdidas.
- d) La bomba de vacío, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de  $-75\text{ kPa}$  respecto de la presión atmosférica; el gasto máximo no deberá ser inferior a ~~28~~26 L/min a la temperatura y presión ~~normales~~ normalizadas.

...

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>En el Volumen II del Anexo 16, se utiliza el término “normal” para las condiciones de temperatura y presión, y el término “normalizada”, en los Apéndices 2, 3 y 7 del mismo Volumen II para la especificación de la producción de vacío en función del gasto y para la medición del gasto para la verificación de pérdidas. Con la enmienda propuesta, se unifica la terminología para utilizar condiciones de temperatura y presión normalizadas (STP) para las especificaciones relativas al gasto del equipo de medición y del sistema de muestreo.</p> <p>Debido a los cambios propuestos a la STP, se hicieron las correcciones correspondientes del rendimiento requerido de la bomba de vacío a gasto máximo que implicaron reducirlo de 28 L/min a 26 L/min. Las enmiendas propuestas en 2.3 i) 1) y 2.5.2 a) por las que se cambia volumen por gasto (1 L/min y 0.4 L/min, respectivamente) no se ajustaron en función de la STP puesto que dichos ajustes se consideran menores e innecesarios.</p>
---------------------------------------	---

### PROPUESTA INICIAL C

#### EXENCIONES APLICABLES A MOTORES EN PRODUCCIÓN Y NUEVAS DISPOSICIONES GENÉRICAS SOBRE EXENCIONES

## PARTE I. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

### CAPÍTULO 1. DEFINICIONES

...

***Empuje nominal.*** A los efectos de las emisiones de los motores, significa el empuje de despegue máximo aprobado por la autoridad encargada de la certificación que ha de aplicarse en condiciones normales de operación y en condiciones estáticas al nivel del mar, a la atmósfera tipo internacional (ISA), y sin utilizar inyección de agua. El empuje se expresa en kilonewtons.

***Estado de diseño.*** Estado que tiene jurisdicción sobre la entidad responsable del diseño de tipo.

***Fase de aproximación.*** Fase de utilización definida por el tiempo durante el cual el motor funciona en la modalidad de aproximación.

...

## PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES

### CAPÍTULO 1. ADMINISTRACIÓN

...

1.3 Todo documento que atestigüe la certificación respecto a las emisiones de cada motor contendrá, por lo menos, los datos siguientes, aplicables al tipo de motor de que se trate:

- a) la designación oficial de la autoridad encargada de la certificación;
- b) la designación del tipo y modelo de la fabricación;
- c) la declaración de toda modificación adicional incorporada con el fin de complementar las formalidades aplicables a la certificación respecto a las emisiones;
- d) el empuje nominal;
- e) la relación de presión de referencia;
- f) una declaración de cumplimiento de los requisitos atinentes al índice de humo;
- g) una declaración de cumplimiento de los requisitos atinentes a los contaminantes gaseosos; y
- h) una declaración de cumplimiento de los requisitos atinentes a la materia particulada.

1.4 Los Estados contratantes reconocerán como válido todo certificado respecto a las emisiones otorgado por la autoridad encargada de la certificación de otro Estado contratante, siempre que las formalidades, a base de las cuales se haya otorgado el certificado, sean, por lo menos, tan rigurosas como las previstas en el Volumen II de este Anexo.

1.5 Los Estados contratantes reconocerán como válidas las exenciones de motores ~~respecto del requisito de interrupción de la producción de motores~~ que otorgue la autoridad encargada de la certificación competente de otro Estado contratante ~~que tenga jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción del motor, siempre y cuando las exenciones se concedan de conformidad con el proceso y los criterios definidos en el Manual técnico ambiental (Doc 9501), Volumen II —Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves~~ se haya seguido un proceso aceptable.

*Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II —Procedimientos para la certificación de los motores de aeronaves respecto a las emisiones, se proporciona orientación relativa a los procesos y criterios aceptables para el otorgamiento de exenciones.*

1.6 Salvo indicación distinta en este volumen del Anexo, la fecha que han de utilizar los Estados contratantes para determinar la aplicabilidad de las normas de este Anexo será la fecha en que se presentó al Estado de diseño la solicitud de certificado de tipo para motores de un tipo o modelo, o la fecha de solicitud conforme a un procedimiento equivalente prescrito por la autoridad de certificación del Estado de diseño.

1.7 La solicitud de certificado de tipo para motores de un tipo o modelo tendrá efecto durante el período especificado en la designación de los reglamentos de aeronavegabilidad apropiados para el motor de un tipo o modelo, excepto en casos especiales en los que la autoridad de certificación acepte una prolongación de ese período. Cuando se sobrepase el período de efectividad y se apruebe una prolongación, la fecha que se ha de utilizar para determinar la aplicabilidad de las normas de este Anexo

será la fecha de expedición del certificado de tipo o de aprobación de la modificación del diseño de tipo, o la fecha de expedición de la aprobación conforme a un procedimiento equivalente prescrito por el Estado de diseño, menos el período de efectividad.

## **CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

### **2.1 Generalidades**

#### 2.1.1 Campo de aplicación

2.1.1.1 Lo previsto en el presente capítulo se aplicará a todos los motores turbo reactores y turbofán, como se especifica en 2.2 y 2.3, proyectados para propulsar aeronaves exclusivamente a velocidades subsónicas, salvo cuando la autoridad encargada de la certificación ~~exima~~ la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores otorgue exenciones para:

- a) determinados tipos de motores y las versiones derivadas de éstos respecto a los cuales se haya expedido el eCertificado de ~~prototipo~~ Tipo, o se haya cumplido con algún otro procedimiento prescrito equivalente, antes del 1 de enero de 1965; y
- b) un número limitado de motores durante un período de tiempo determinado después de las fechas de aplicación especificadas en 2.2 y 2.3 para la fabricación del motor individual.

2.1.1.2 En tales casos, la autoridad de certificación ~~exima~~ la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores expedirá el documento de exención, se marcará “EXENTO NUEVO” o “EXENTO DE REPUESTO” en las placas de identificación de los motores y el otorgamiento de la exención se anotará en el registro permanente del motor. La autoridad de certificación o la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores tendrá en cuenta el número de motores exentos que se producirán y su impacto en el medio ambiente. Las exenciones se notificarán por medio de un número de serie del motor y se proporcionarán por conducto de un registro público oficial.

**Recomendación.**— *Al otorgar estas exenciones, la autoridad de certificación o la autoridad competente responsable de la entidad de producción de los motores debería considerar la conveniencia de imponer un plazo límite para la fabricación de esos motores.*

~~2.1.1.3 Las disposiciones de este capítulo se aplicarán también a los motores diseñados para aplicaciones en las que de otro modo se habrían utilizado motores turbo reactores y turbofán.~~

*Nota.*— ~~Al considerar las exenciones, la autoridad encargada de la certificación debería tener debidamente en cuenta el número probable de unidades de esos motores que se fabricarán y su repercusión en el medio ambiente. En caso de que se conceda la exención, la autoridad encargada de la certificación debería considerar la conveniencia de imponer un plazo límite en cuanto a la fabricación de esos motores para instalarlos en aeronaves nuevas. En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves respecto a las emisiones, figura orientación adicional sobre la expedición de exenciones.~~

2.1.1.3 Las disposiciones de este capítulo se aplicarán igualmente a los motores destinados para usos que de otro modo se reservarían a los motores turborreactores y turbofán y que estén diseñados como sistemas propulsores integrados certificados con empuje nominal.

*Nota.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación de los motores de aeronaves respecto a las emisiones, contiene orientación.*

...

## CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 4.1 Generalidades

#### 4.1.1 Aplicabilidad

4.1.1.1 Las disposiciones del presente capítulo serán aplicables a todos los motores de aeronave, como se especifica en más detalle en 4.2, diseñados para propulsión solo a velocidades subsónicas, ~~para los que se presente una solicitud de certificado de tipo a la autoridad encargada de la certificación.~~

4.1.1.2 Se aplicarán las disposiciones específicas para las categorías de motores pertinentes detalladas en la sección 4.2, excepto cuando la autoridad encargada de la certificación o la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores otorgue exenciones a un número limitado de motores por un período específico más allá de las fechas de aplicación fijadas en 4.2 para la fabricación del motor individual.

4.1.1.3 En tales casos, la autoridad encargada de la certificación o la autoridad competente con jurisdicción sobre la entidad responsable de la producción de los motores expedirá el documento de exención, se marcará “EXENTO” en las placas de identificación de los motores y el otorgamiento de la exención se anotará en el registro permanente del motor. La autoridad encargada de la certificación o la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores tendrá en cuenta el número de motores exentos que han de producirse y su impacto en el medio ambiente. Las exenciones se notificarán por número de serie del motor y se darán a publicidad mediante un registro público oficial.

**Recomendación.—** *Al otorgar estas exenciones, la autoridad encargada de la certificación o las autoridades competentes responsables de la entidad de producción de los motores deberían considerar la conveniencia de imponer un plazo límite para la fabricación de esos motores.*

*Nota.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves, contiene más orientación sobre el otorgamiento de exenciones.*

...

<p><i>Origen:</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>La enmienda propuesta tiene por objetivo introducir un lenguaje genérico para las exenciones otorgadas a la producción de motores luego de las fechas de aplicación de las normas de índice de humo y emisiones de NO<sub>x</sub>, HC y CO, y nvPM en masa y en número.</p> <p>El texto existente relativo a las exenciones, en la Parte III, Capítulo 2, 2.1, se refiere específicamente a la fecha límite de fabricación de motores correspondiente a la norma de NO<sub>x</sub> establecida en la CAEP/6 y no puede utilizarse con un propósito más general. Lo mismo sucede con el párrafo 1.5 del Anexo 16, Volumen II, Parte III Capítulo 1, y las orientaciones conexas contenidas en el Doc 9501, <i>Manual técnico ambiental (ETM)</i>, Volumen II.</p> <p>Como la exención se da en el nivel de la entidad de producción, debería ser otorgada por la autoridad responsable de la entidad de producción. En algunos Estados miembros de la OACI, la autoridad de certificación otorga exenciones relativas a la producción. Por eso, se propone añadir la referencia a la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores.</p> <p>También se añade la definición de “Estado de diseño” porque el término se utiliza en la Parte III, Capítulo 1, párrafo 1.6.</p> <p>Asimismo, la propuesta de enmienda apunta a mantener una identificación genérica de la condición de “EXENTO”. La norma 2.1.1.2 del Anexo 16, Volumen II, Parte III, Capítulo 2, requiere actualmente que se marque “EXENTO NUEVO” o “EXENTO DE REPUESTO” en las placas de identificación de los motores. Estos términos se originan en la distinción que se hace en el proceso de exención entre motores de repuesto y motores que se colocarán en una aeronave nueva en el caso de las exenciones del requisito de cese de producción para cumplir con las normas sobre NO<sub>x</sub> de la CAEP/6. Esta distinción sólo existe en el ETM actual, Volumen II.</p> <p>La Nota en 2.1.1 se modificó para que la primera oración se transforme en un requisito y se añada al párrafo 2.1.1.2. La segunda oración de la Nota se transforma en una recomendación. La propuesta consiste en que la Nota haga referencia únicamente a las orientaciones que figuran en el ETM, Volumen II.</p>
--------------------------------------	--

**PROPUESTA INICIAL D**  
**NORMAS SOBRE MASA Y NÚMERO DE EMISIONES DE nvPM DE LOS MOTORES**  
**PROPUESTAS POR CAEP/11**

...

## **CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA**

...

### 4.1.2 Emisiones de que se trata

La finalidad de esta sección es controlar las emisiones de masa de materia particulada no volátil (nvPM<sub>mass</sub>).

...

### 4.1.3 Unidades de medida

4.1.3.1 La concentración en masa de nvPM (nvPM<sub>mass</sub>) se medirá y notificará expresada en microgramos  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

4.1.3.2 La masa de nvPM emitida durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones de referencia, definido en 4.1.4.2 (LTO<sub>mass</sub>), se medirá y notificará en miligramos.

4.1.3.3 El número de nvPM emitidas durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones, definido en 4.1.4.2 (LTO<sub>num</sub>), se medirá y notificará en número de partículas.

...

## **4.2 Emisiones de materia particulada no volátil**

### 4.2.1 Aplicabilidad

4.2.1.1. Las disposiciones que se detallan en 4.2.2 y 4.2.3 se aplicarán a todos los motores turbofán y turboreactores de un tipo o modelo, y sus versiones derivadas, que tengan un empuje nominal mayor que 26,7 kN y una fecha de fabricación (de cada motor) igual o posterior al 1 de enero de 2020.

4.2.1.2 Las disposiciones de este capítulo se aplicarán igualmente a los motores destinados para usos que de otro modo se reservarían a los motores turboreactores y turbofán y que estén diseñados como sistemas propulsores integrados y certificados con empuje nominal.

### 4.2.2 Niveles reglamentarios

#### 4.2.2.1 Concentración máxima en masa de nvPM

Para los motores cuya fecha individual de fabricación sea el 1 de enero de 2020 o posterior, la concentración máxima en masa de nvPM<sub>mass</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] obtenida de mediciones a suficientes reglajes del empuje, de modo que el máximo de emisiones se determine y calcule conforme a los procedimientos del Apéndice 7 y se convierta a un nivel característico mediante los procedimientos del Apéndice 6 o procedimientos equivalentes acordados por la autoridad encargada de la certificación, no podrá superar el nivel reglamentario calculado según la fórmula siguiente:

$$\text{Límite reglamentario de la concentración en masa de nvPM}_{\text{mass}} = 10^{(3 + 2,9 F_{00}^{-0,274})}$$

*Nota.— Puesto que existe correlación entre la concentración en masa de nvPM y el índice de humo, el nivel reglamentario definido en 4.2.2.1 se derivó del nivel reglamentario de índice de humo. En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación de los motores de las aeronaves respecto a las emisiones, figura información adicional.*

#### 4.2.2.2 Masa y número de nvPM emitidas durante el ciclo de referencia LTO

Los niveles en masa y número de emisiones de nvPM medidos y calculados siguiendo los procedimientos del Apéndice 7 y convertidos a los niveles característicos siguiendo los procedimientos del Apéndice 6 o los procedimientos equivalentes dispuestos por la autoridad encargada de la certificación no superarán los niveles reglamentarios que se determinen por aplicación de las siguientes fórmulas:

##### a) $LTO_{mass}$ :

- 1) Para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación individual sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior:

- i) para motores con empuje nominal máximo superior a 200kN:

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 347,5$$

- ii) para motores con empuje nominal máximo superior a 26,7 kN pero no superior a 200kN.

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 4646,9 - 21,497F_{oo}$$

- 2) Para los motores de un tipo o modelo para los que se haya presentado la solicitud del certificado de tipo el 1 de enero de 2023 o en fecha posterior:

- i) para motores con empuje nominal máximo superior a 150kN:

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 214,0$$

- ii) para motores con empuje nominal superior a 26,7 kN pero no superior a 150kN:

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 1251,1 - 6,914F_{oo}$$

##### b) $LTO_{num}$ :

- 1) Para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación individual sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior:

- i) para motores con empuje nominal máximo superior a 200kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 4,170 \times 10^{15}$$

- ii) para motores con empuje nominal máximo superior a 26,7 kN pero no superior a 200kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 2,669 \times 10^{16} - 1,126 \times 10^{14}F_{oo}$$

- 2) Para los motores de un tipo o modelo para los que se haya presentado la solicitud del certificado de tipo el 1 de enero de 2023 o en fecha posterior:

i) para motores con empuje nominal máximo superior a 150kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 2,780 \times 10^{15}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo superior a 26,7 kN pero no superior a 150kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 1,490 \times 10^{16} - 8,080 \times 10^{13} F_{oo}$$

#### 4.2.3 Requisito de notificación

El fabricante deberá notificar los siguientes valores de emisiones de nvPM medidas y calculadas conforme a los procedimientos del Apéndice 7 o procedimientos equivalentes dispuestos por la autoridad encargada de la certificación:

- a) ~~nivel característico de la concentración máxima de nvPM<sub>mass</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );~~
- b) ~~flujo de combustible (kg/s) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;~~
- e) ~~EI<sub>mass</sub> (mg/kg de combustible) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;~~
- d) ~~EI<sub>num</sub> (partículas/kg de combustible) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;~~
- ea) EI<sub>mass</sub> máximo (~~mg~~ miligramos/kg de combustible); y
- fb) EI<sub>num</sub> máximo (partículas/kg de combustible).

### 4.3 Información requerida

*Nota.— La información requerida se divide en ~~dos~~ tres grupos, a saber: 1) información general para conocer las características del motor, el combustible utilizado y el método de análisis de los datos; y 2) los datos obtenidos de las pruebas del motor; y 3) la información deducida.*

#### 4.3.1 Información general

Se proporcionará la información siguiente con respecto a cada tipo de motor de cuyas emisiones se solicite la certificación:

- a) designación del motor;
- b) empuje nominal (kN);
- c) relación de presión de referencia;
- d) referencia de la especificación del combustible;
- e) relación hidrógeno/carbono del combustible;
- f) métodos de obtención de los datos; y

~~g) método para hacer correcciones en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección del sistema de muestreo; y~~

hg) método de análisis de los datos.

#### 4.3.2 Información sobre las pruebas

4.3.2.1 Se proporcionará la información siguiente respecto a cada uno de los motores que se sometan a prueba para fines de certificación ~~Se proporcionará la información siguiente para cada prueba:~~

- a) calor neto de la combustión del combustible (MJ/kg);
- b) contenido de hidrógeno del combustible (% de masa);
- c) contenido total de aromáticos del combustible (% de volumen);
- d) contenido de naftalinas en el combustible (% de volumen); y
- e) contenido de azufre en el combustible (% de ppm por masa).

4.3.2.2 Para cada motor sometido a prueba para fines de certificación se proporcionará la información siguiente, medida y calculada según los procedimientos del Apéndice 7 o los procedimientos equivalentes que disponga la autoridad encargada de la certificación:

- a) flujo de combustible (kg/s) con cada reglaje de empuje del ciclo LTO;
- b)  $EI_{mass}$  (miligramos/kg de combustible) con cada reglaje de empuje del ciclo LTO;
- c)  $EI_{num}$  (partículas/kg de combustible) con cada reglaje de empuje del ciclo LTO.

#### 4.3.3 Información deducida

4.3.3.1 Se proporcionará la información deducida siguiente respecto de cada motor sometido a prueba para fines de certificación:

- a) la tasa de emisión, es decir,  $EI_{mass} \times$  flujo de combustible, (miligramos/s) en masa de nvPM;
- b) la tasa de emisión, es decir,  $EI_{num} \times$  flujo de combustible, (partículas/s) en número de nvPM;
- c) la emisión bruta total en masa de nvPM medida a lo largo del ciclo LTO (miligramos);
- d) la emisión bruta total en número de nvPM a lo largo del ciclo LTO (partículas);
- e) los valores de  $LTO_{mass} / F_{oo}$  (miligramos/kN);
- f) los valores de  $LTO_{num} / F_{oo}$  (partículas/kN); y
- g) la concentración máxima de nvPM como masa (microgramos/m<sup>3</sup>).

4.3.3.2 Se proporcionarán los niveles característicos de concentración máxima de nvPM como masa,  $LTO_{mass}/F_{oo}$  y  $LTO_{num}/F_{oo}$  de cada tipo de motor cuyas emisiones se busque certificar.

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>Los motores de aeronave que consumen combustibles a base de hidrocarburos producen emisiones gaseosas y de materia particulada (PM) como subproductos de la combustión. En el escape del motor, las emisiones de materia particulada consisten principalmente en emisiones de hollín ultrafino o de carbono negro. Al conjunto de dichas partículas se le denomina PM “no volátil” (nvPM). La nvPM está presente en el escape del motor a altas temperaturas. Las partículas no volátiles de los motores de turbinas de gas suelen ser más pequeñas que las de los motores diesel tradicionales. Su diámetro medio geométrico oscila entre los 15 y los 60 nanómetros (nm) (0,06 micrómetros; <math>10\text{nm} = 1/100\ 000</math> de un milímetro). Son partículas ultrafinas invisibles al ojo humano.</p> <p>Durante la reunión CAEP/11, se recomendaron nuevas normas de nvPM en masa y en número para motores de aeronaves. Incluyen límites para la nvPM en masa y en número, que se aplicarían a los tipos de motores nuevos a partir del 1 de enero de 2023, con menos rigurosidad para los motores con empuje nominal inferior a 150kN. Estos SARPs para tipos nuevos se complementan con una norma de nvPm en masa y en número aplicable a los motores en producción con fecha de aplicación del 1 de enero de 2023.</p> <p>El acuerdo sobre una nueva norma sobre nvPM en masa y en número se acompaña de un acuerdo para un examen temprano de los niveles reglamentarios. El CAEP convino en que ese examen deberá incluir la recopilación y análisis de datos de emisiones de nvPM en masa y en número certificados y similares a medida que estén disponibles para todos los motores en producción durante el período 2019-2022. El CAEP convino además en examinar los márgenes de las normas acordadas por la CAEP/11 sobre nvPM en masa y en número para tipos nuevos y evaluar posibles avances tecnológicos para reducir las emisiones de nvPM. Se acordó que la CAEP/12 considerará la necesidad de actualizar las normas de emisiones de nvPM de los motores. Si se llega a un acuerdo en la CAEP/12, se llevará adelante un proceso de fijación de normas durante la CAEP/13 para considerar SARPS revisadas sobre la nvPM en masa y en número.</p> <p>Si bien estuvieron de acuerdo con los SARPS de nvPM en masa y en número, dos Estados miembros del CAEP expresaron reservas con respecto a la fecha de aplicación (de 2023), que consideraron precoz, ya que implicaría esfuerzos significativos para actualizar oportunamente los marcos reglamentarios de los Estados.</p>
---------------------------------------	---

**PROPUESTA INICIAL E**  
**CONCORDANCIA DEL ANEXO 16, VOLUMEN II, CON LA NORMA SOBRE NVPM**

...

**PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES**  
**CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN**  
**PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES**  
**EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

...

**2.2 Humo**

2.2.1 Campo de aplicación

Las disposiciones de 2.2.2 se aplicarán

- a) a los motores fabricados a partir del 1 de enero de 1983, pero antes del 1 de enero de 2023; y
- b) a los motores con un empuje nominal máximo igual o inferior a 26,7kN cuya fecha de fabricación sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior.

2.2.2 Índice de humo reglamentario

El índice de humo en cualquiera de los reglajes del empuje de las cuatro modalidades de utilización LTO, cuando se mida y calcule conforme a los procedimientos del Apéndice 2, o un procedimiento equivalente acordado por la autoridad encargada de la certificación, y se convierta a un nivel característico mediante los procedimientos del Apéndice 6, no podrá superar el nivel calculado a base de la fórmula siguiente:

$$\text{Índice de humo reglamentario} = 83,6 (F_{oo})^{-0,274}$$

o un valor de 50, el que sea menor

*Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves figura orientación sobre la definición y utilización de procedimientos equivalentes.*

...

## CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 4.1 Generalidades

#### 4.1.4 Condiciones de referencia

...

##### 4.1.4.2 Ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones

El motor se ensayará a un número suficiente de reglajes del empuje, a fin de determinar las características de las emisiones de nvPM del motor, de modo que puedan determinarse los índices de emisión en masa ( $EI_{mass}$ ) y los índices de emisión en número ( $EI_{num}$ ) de nvPM a los siguientes porcentajes específicos del empuje nominal: los reglajes de empuje del ciclo LTO de referencia y a empujes que produzcan la concentración máxima de nvPM<sub>mass</sub> en masa, un  $EI_{mass}$  máximo y un  $EI_{num}$  máximo según lo disponga la autoridad encargada de la certificación.

En el cálculo y notificación de las emisiones de nvPM, el ciclo LTO de referencia se representará con el siguiente reglaje de empuje y tiempo para cada una de las modalidades de utilización indicadas:

Modalidad de utilización LTO	Reglaje del empuje por cien $F_{oo}$	Tiempo en la modalidad (en minutos)
Despegue	100% $F_{oo}$	0,7
Ascenso	85% $F_{oo}$	2,2
Aproximación	30% $F_{oo}$	4,0
Rodaje/marcha lenta en tierra	7% $F_{oo}$	26,0

##### 4.1.4.3 Especificaciones en cuanto al combustible

El combustible empleado durante las pruebas debe cumplir las especificaciones del Apéndice 4.

#### 4.1.5 Condiciones de las pruebas

4.1.5.1 Las pruebas se realizarán con el motor en banco de pruebas.

4.1.5.2 El motor será representativo de la configuración certificada (véase el Apéndice 6); no se simularán las purgas ni las cargas producidas por los accesorios que no sean necesarios para el funcionamiento básico del motor.

4.1.5.3 Cuando las condiciones de las pruebas difieran de las condiciones atmosféricas de referencia previstas en 4.1.4.1, se corregirán  $EI_{mass}$  y  $EI_{num}$  respecto de la temperatura en la boca de entrada de la cámara de combustión del motor en las condiciones atmosféricas de referencia conforme a los procedimientos indicados en el Apéndice 7.

4.1.5.4 Se corregirán la concentración máxima de nvPM<sub>mass</sub> en masa por los efectos de la dilución y las pérdidas termoforéticas en la Parte de recolección del sistema de muestreo conforme a los procedimientos del Apéndice 7. Los valores de  $EI_{mass}$  y  $EI_{num}$  se corregirán por los efectos en función de las pérdidas por termoforesis de la parte Parte de recolección del sistema de muestreo y la composición del combustible conforme a los procedimientos indicados en el Apéndice 7.

...

## PARTE IV. EVALUACIÓN DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL PARA FINES DE INVENTARIO Y MODELIZACIÓN

*Nota 1.— La finalidad de esta parte es formular ~~recomendaciones~~ normas y métodos recomendados relativos a la manera de calcular los factores de corrección de la masa y número de nvPM correspondientes a las pérdidas de nvPM del sistema distintas de las pérdidas por termoforesis de la ~~parte~~ Parte de recolección. El sistema de muestreo y medición de nvPM, la ~~parte~~ Parte de recolección y el cálculo de las pérdidas por termoforesis se describen en el Apéndice 7.*

*Nota 2.— Los factores de corrección de pérdidas de masa y número de nvPM del sistema permiten estimar la concentración en masa y número de nvPM en el escape del motor de la aeronave a partir de la concentración en masa y número de nvPM obtenida mediante los procedimientos descritos en el Apéndice 7.*

Para los motores de un tipo o modelo que deba cumplir las disposiciones de la Parte III, Capítulo 4, y cuya fecha de fabricación individual sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior, se notificarán a la autoridad encargada de la certificación de conformidad con los procedimientos del Apéndice 8, o los procedimientos equivalentes que disponga la citada autoridad, los factores de corrección por pérdidas de nvPM en masa y número del sistema ( $k_{SL\_mass}$  y  $k_{SL\_num}$ ), y los valores de  $EI_{mass}$  and  $EI_{num}$  corregidos por el efecto de las pérdidas del sistema.

~~— **Recomendación 1.** — Para los fines de inventario y modelización, los fabricantes de motores de turbinas de aeronaves deberían determinar los factores de corrección de la masa y el número de nvPM del sistema ( $k_{SL\_mass}$  y  $k_{SL\_num}$ ) con la metodología descrita en el Apéndice 8 y deberían notificar esos factores a la autoridad competente.~~

~~**Recomendación 2.** — Para los fines de inventario y modelización, se deberían corregir las ~~concentraciones~~ emisiones en masa y número de nvPM en masa y nvPM en número obtenidas con los procedimientos del Apéndice 7 en función de las pérdidas del sistema mediante la metodología descrita en el Apéndice 8.~~

...

## APÉNDICE 4. ESPECIFICACIÓN DEL COMBUSTIBLE QUE HA DE UTILIZARSE EN LAS PRUEBAS DE LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DE TURBINA

El combustible deberá ajustarse a las especificaciones de este apéndice , a menos que la autoridad encargada de la certificación haya acordado una desviación respecto a las mismas y cualquier corrección necesaria. No contendrá aditivos con el propósito de suprimir el humo (como los compuestos organometálicos).

<i>Propiedad</i>	<i>Gama permisible de valores</i>
Densidad, kg/m <sup>3</sup> a 15°C	780 – 820
Temperatura de destilación, °C	
10% del punto de ebullición	155 – 201
Punto final de ebullición	235 – 285
Calor neto de combustión, MJ/kg	42,86 – 43,50
Aromáticos, % de volumen	15 – 23
Naftalinas, % de volumen	0,0 – 3,0
Punto de humo, mm	20 – 28
Hidrógeno, % de masa	13,4 – 14,3
Azufre, % de ppm por masa	menos de 0,3000%
Viscosidad cinemática a –20°C, mm <sup>2</sup> /s	2,5 – 6,5

...

## APÉNDICE 6. PROCEDIMIENTO PARA CERTIFICAR EL CUMPLIMIENTO CON RESPECTO A EMISIONES GASEOSAS, HUMO Y EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 1. GENERALIDADES

...

### 2. PROCEDIMIENTO PARA CERTIFICAR EL CUMPLIMIENTO

#### 2.1 Emisiones gaseosas e índice de humo

La autoridad encargada de la certificación concederá un certificado de cumplimiento si la media de los valores medidos y corregidos (respecto del motor normal de referencia y de las condiciones atmosféricas de referencia) para todos los motores probados no sobrepasa el nivel reglamentario cuando se convierta al nivel característico empleando el factor apropiado que se determina mediante el número de motores probados (*i*) como se indica en la Tabla A6-1.

*Nota.— El nivel característico del índice de humo o de las emisiones gaseosas equivale a la media de los valores de todos los motores probados, que sólo para las emisiones gaseosas se corrige en forma apropiada con respecto al motor normal de referencia y a las condiciones atmosféricas de referencia, dividida por el coeficiente correspondiente al número de motores probados, según se indica en la Tabla A6-1.*

**Tabla A6-1. Coeficientes para determinar los niveles característicos**

Número de motores probados ( <i>i</i> )	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SN	Concentración de la masa de nvPM	Masa de nvPM del LTO	Número de nvPM del LTO
1	0,814 7	0,649 3	0,862 7	0,776 9	0,776 9	0,719 4	0,719 4
2	0,877 7	0,768 5	0,909 4	0,852 7	0,852 7	0,814 8	0,814 8
3	0,924 6	0,857 2	0,944 1	0,909 1	0,909 1	0,885 8	0,885 8
4	0,934 7	0,876 4	0,951 6	0,921 3	0,921 3	0,901 1	0,901 1
5	0,941 6	0,889 4	0,956 7	0,929 6	0,929 6	0,911 6	0,911 6
6	0,946 7	0,899 0	0,960 5	0,935 8	0,935 8	0,919 3	0,919 3
7	0,950 6	0,906 5	0,963 4	0,940 5	0,940 5	0,925 2	0,925 2
8	0,953 8	0,912 6	0,965 8	0,944 4	0,944 4	0,930 1	0,930 1
9	0,956 5	0,917 6	0,967 7	0,947 6	0,947 6	0,934 1	0,934 1
10	0,958 7	0,921 8	0,969 4	0,950 2	0,950 2	0,937 5	0,937 5
Más de 10	$1 - \frac{0,130\ 59}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,247\ 24}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,096\ 78}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,157\ 36}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,157\ 36}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,197\ 78}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,197\ 78}{\sqrt{i}}$

## 2.2 Emisiones de materia particulada

2.2.1 La autoridad encargada de la certificación concederá un certificado de cumplimiento si la media de los valores de la concentración máxima de la masa de nvPM medida y corregida respecto a pérdidas termofóricas en el colector la Parte de recolección del sistema de muestreo para todos los motores probados no sobrepasa el nivel reglamentario cuando se convierta al nivel característico empleando el factor apropiado que se determina mediante el número de motores probados (*i*), como se indica en la Tabla A6-1.

*Nota.— El nivel característico de la concentración máxima de la masa de nvPM es la media de los valores máximos de todos los motores probados, debidamente corregidos respecto a las pérdidas termofóricas en el colector la Parte de recolección del sistema de muestreo, divididos por el coeficiente correspondiente al número de motores probados, como se indica en la Tabla A6-1.*

2.2.2 La autoridad encargada de la certificación otorgará el certificado de cumplimiento si la media de los valores de las emisiones de nvPM en masa y la media de los valores de nvPM en número medidos y corregidos por los efectos de las pérdidas termofóricas en la Parte de recolección del sistema de muestreo y por los efectos de la composición del combustible que arrojen todos los motores sometidos a prueba, convertidos al nivel característico por aplicación del factor correspondiente determinado para el número de motores sometidos a prueba (*i*), como se muestra en la Tabla A6-1, no superan el valor reglamentario.

*Nota.— El nivel característico de las emisiones de nvPM en masa y nvPM en número es la media de los valores de todos los motores sometidos a prueba con la corrección correspondiente por las pérdidas termofóricas en la Parte de recolección del sistema de muestreo y por los efectos de la composición del combustible, dividida por el coeficiente correspondiente al número de motores sometidos a prueba, como se muestra en la Tabla A6-1.*

### 2.3 Nivel característico

Los coeficientes que se necesitan para determinar los niveles característicos de las emisiones de los motores figuran en la Tabla A6-1.

### 3. PROCEDIMIENTO EN CASO DE RECHAZO

*Nota.— Cuando la prueba para la certificación fracasa, esto no significa necesariamente que el tipo de motor no responda a las exigencias, sino quizás que el grado de confianza que merece a la autoridad encargada de la certificación no es suficientemente elevado, es decir, es inferior al 90%. Por consiguiente, debería permitirse al fabricante presentar pruebas adicionales de cumplimiento en cuanto al tipo de motor en cuestión.*

...

## APÉNDICE 7. INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL

### 1. INTRODUCCIÓN

...

#### 2. Definiciones, siglas y símbolos

...

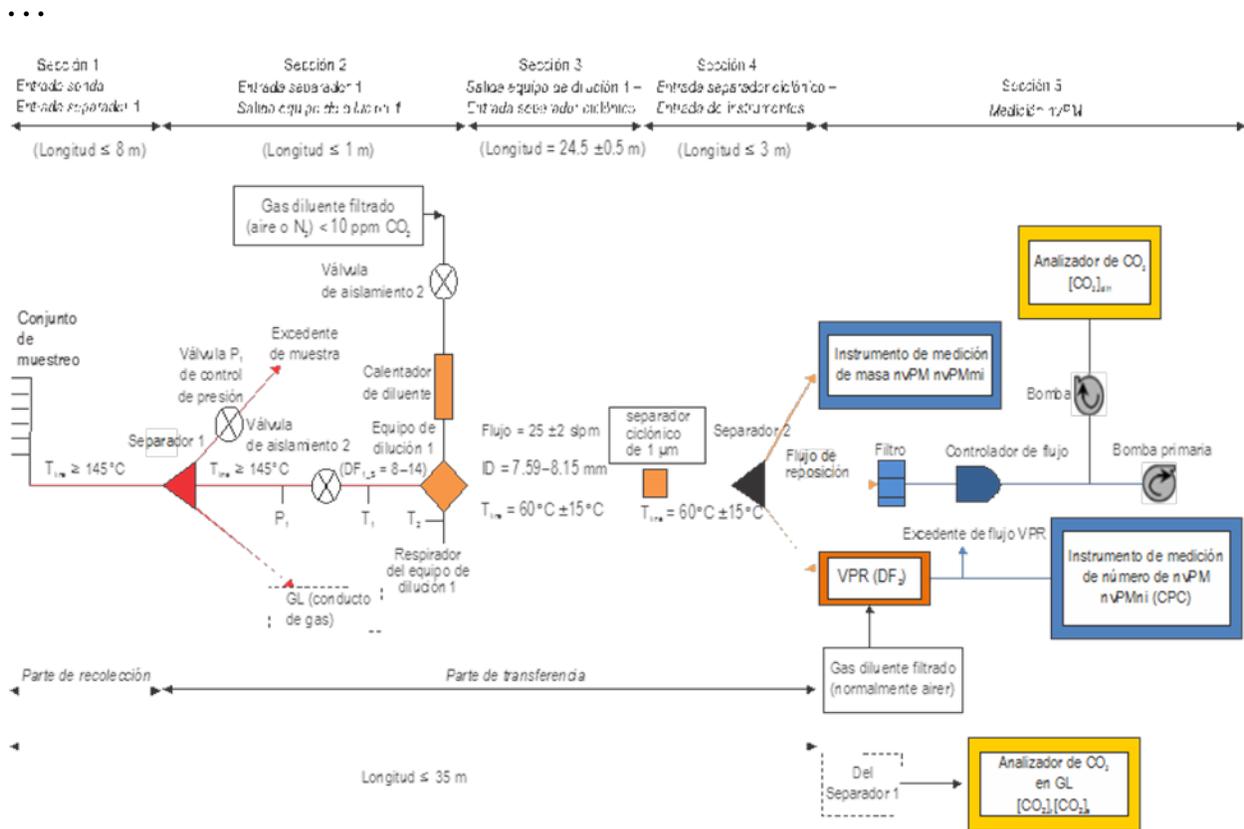
#### 2.3 Símbolos

...

$EI_{mass}$	Índice de emisión en masa de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y la composición del combustible, en mg/kg de combustible
$EI_{num}$	Índice de emisión en número de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y la composición del combustible, en número/kg de combustible
F	Empuje en la modalidad de utilización de que se trate
H	Contenido de hidrógeno del combustible (porcentaje de masa)
[HC]	Concentración media de hidrocarburos en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda, expresada como carbono
$\eta_{VPR}(D_m)$	Coefficiente de penetración de partículas del VPR para partículas de $D_m$
$K_{fuel\_M}$	Factor de corrección por composición del combustible del índice de emisiones de nvPM en masa
$K_{fuel\_N}$	Factor de corrección por composición del combustible del índice de emisiones de nvPM en número
$k_{thermo}$	Factor de corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la parteParte de recolección
...	

## 4. DISPOSICIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN DE nvPM

### 4.1 Sistema de muestreo y medición de nvPM



**Figura A-7.1** Esquema general de un sistema de muestreo y medición de nvPM

...

### 4.2 Parte de recolección

4.2.1 La sección 1 consta de la sonda o el tubo de muestreo y el conducto de conexión. Deberá cumplir los siguientes requisitos:

- El material de la sonda de muestreo será de acero inoxidable o cualquier otro material no reactivo a altas temperaturas.
- Si se emplea una sonda con orificios de muestreo múltiples:
  - todos los orificios tendrán el mismo diámetro; y
  - La sonda tendrá una forma tal que, por lo menos, el 80% de la caída de presión a través del conjunto de la sonda se registre en los orificios.
- El número mínimo de lugares muestreados será de 12.

...

## 6. CÁLCULOS

### 6.1 Ecuaciones de la concentración en masa de nvPM y los índices de emisión de nvPM en masa y número

...

#### 6.1.1 Concentración en masa de nvPM

La concentración en masa de nvPM ( $nvPM_{mass}$ ) representa la masa de partículas por volumen unitario de muestra del escape del motor corregida en función del factor de dilución ( $DF_1$ ) y las pérdidas por termoforesis de partículas de la parte de recolección. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$nvPM_{mass} = DF_1 \times nvPM_{mass\_STP} \times k_{thermo}$$

#### 6.1.2 Índices de emisión de nvPM en masa y número

Los índices de emisión de nvPM en masa y número ( $EI_{mass}$  y  $EI_{num}$ ) representan la masa (en miligramos) y el número de partículas por masa de combustible quemado (en kilogramos) corregidos en función de los factores de dilución respectivos, y las pérdidas de partículas por termoforesis de partículas de en la parte de recolección y sus respectivos factores de corrección por composición del combustible. Se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$EI_{mass} = \frac{22,4 \times nvPM_{mass\_STP} \times 10^{-3}}{\left( [CO_2]_{dil1} + \frac{1}{DF_1} ([CO] - [CO_2]_b + [HC]) \right) (M_C + \alpha M_H)} \times k_{thermo} \times k_{fuel\_M}$$

$$EI_{num} = \frac{22,4 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP} \times 10^6}{\left( [CO_2]_{dil1} + \frac{1}{DF_1} ([CO] - [CO_2]_b + [HC]) \right) (M_C + \alpha M_H)} \times k_{thermo} \times k_{fuel\_N}$$

Se calculará  $[CO_2]$ ,  $[CO]$  y  $[HC]$  como se indica en el Adjunto E del Apéndice 3.

...

### 6.2 Factores de corrección para las emisiones de nvPM

#### 6.2.1 Corrección de las pérdidas por termoforesis de nvPM en la parte de recolección

...

### 6.2.2 Corrección por los efectos de la composición del combustible

La corrección por los efectos de la composición del combustible se determinará con las siguientes ecuaciones:

$$k_{fuel\_M} = \exp \left\{ \left( 1,08 \frac{F}{F_{00}} - 1,31 \right) (13,8 - H) \right\}$$

$$k_{fuel\_N} = \exp \left\{ \left( 0,99 \frac{F}{F_{00}} - 1,05 \right) (13,8 - H) \right\}$$

...

## ADJUNTO A DEL APÉNDICE 7. REQUISITOS Y RECOMENDACIONES PARA EL SISTEMA DE MUESTREO DE nvPM

...

### 4.2 Separador 2

El separador 2 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) El cuerpo del separador 2 será de acero inoxidable
- b) Se deberá calentar el separador 2 a  $60^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ .
- c) El separador 2 dividirá la muestra en tres conductos para enviar la muestra de nvPM diluida al:
  - 1) NvPMmi;
  - 2) VPR; y
  - 3) flujo de reposición.
- d) Los ángulos de división respecto del flujo entrante serán lo más agudos que resulte viable, pero no deberán exceder los  $35^{\circ}$ .
- e) Todos los conductos de flujo de nvPM serán lo más directos y cortos posible.

...

## ADJUNTO E DEL APÉNDICE 7 PROCEDIMIENTOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL SISTEMA

...

### 2. VERIFICACIÓN DE LA LIMPIEZA EN LA PARTE DE RECOLECCIÓN Y EL CONDUCTO DE GAS

Esta verificación únicamente se efectúa si se usa el método completo de cálculo de EI gaseosas de nvPM.

#### 2.1 Procedimiento de verificación de la limpieza

Se debe verificar la limpieza de la ~~parte~~Parte de recolección y el GL mediante el procedimiento siguiente:

- a) aislar el GL de la parte de medición de nvPM mediante la válvula de aislamiento 1 y la válvula de control de presión  $P_1$ ;
- b) aislar el GL de la sonda y conectar ese extremo del conducto de muestreo a una fuente de gas cero;
- c) calentar el sistema hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento que se necesita para hacer las mediciones de HC;
- d) activar la bomba de flujo de la muestra y ajustar el flujo al que se utilizó durante el ensayo de las emisiones del motor;
- e) registrar la lectura del analizador de HC

#### 2.2 Requisito de verificación de la limpieza

2.2.1 La medición de HC no deberá exceder el 1% del nivel de emisión del motor en la modalidad de marcha lenta o 1 ppm (ambos expresados como C), el valor que sea más elevado.

2.2.2 **Recomendación.**— *Se recomienda vigilar la calidad del aire en la entrada al comenzar y finalizar una prueba de motor y, como mínimo, una vez por hora durante la prueba. Si se registran niveles considerables de HC, estos niveles deberían tenerse en cuenta.*

...

## APÉNDICE 8. PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR LAS CORRECCIONES POR PÉRDIDAS DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL EN EL SISTEMA

*Nota 1.— Los procedimientos que se especifican en el presente apéndice tratan sobre la determinación de factores de corrección por pérdidas de materia particulada no volátil (nvPM) en el sistema de muestreo y medición de dicha materia, excluidas las pérdidas por termoforesis de la ~~parte~~ Parte de recolección que figuran en la notificación de datos del Apéndice 7.*

*Nota 2.— La implantación del sistema de muestreo y medición de nvPM requiere un conducto de medición largo, de hasta 35 m, e incluye varios componentes del sistema de muestreo y medición, lo que puede generar una pérdida considerable de partículas, del orden del 50% de la masa de nvPM y de 90% del número de nvPM. Las pérdidas de partículas dependen del tamaño y, por ende, de la condición de funcionamiento del motor, la tecnología de la cámara de combustión y, posiblemente, otros factores. El procedimiento que se especifica en este apéndice permite estimar las pérdidas de partículas.*

~~———— Nota 3.— Los factores de corrección de pérdidas del sistema se calculan sobre la base de las siguientes hipótesis: la nvPM del plano de salida del escape del motor tiene una distribución logarítmica normal, un valor constante de densidad efectiva de nvPM, un valor fijo de desviación estándar geométrica, que limita la concentración en masa de nvPM al límite de detección, un punto de corte de tamaño mínimo de partículas de 0,01  $\mu\text{m}$  y ausencia de coagulación.~~

*Nota 43.— El método propuesto en el presente apéndice emplea datos y mediciones especificados en el Apéndice 7 y ~~sus adjuntos~~ los adjuntos del Apéndice 7. Los símbolos y definiciones que no aparecen en este apéndice figuran en el Apéndice 7 y ~~sus adjuntos~~ adjuntos.*

### 1. GENERALIDADES

1.1 Dentro del sistema de muestreo y medición de nvPM, se pierden partículas en las paredes del sistema de muestreo debido a mecanismos de deposición. Se experimentan pérdidas que dependen del tamaño y otras que no. Las pérdidas por termoforesis, independientes del tamaño, que se producen en la ~~parte~~ Parte de recolección, están especificadas en 6.2.1 del Apéndice 7.

1.2 Se denomina pérdida del sistema a la pérdida total de partículas del sistema de muestreo y medición de nvPM que no incluyen las pérdidas por termoforesis de la ~~parte~~ Parte de recolección.

1.3 Se debe tener en cuenta la distribución por tamaño de nvPM porque los mecanismos de pérdida de partículas dependen del tamaño de las partículas. Estas pérdidas que dependen del tamaño de las partículas se cuantifican en términos de fracción de partículas de un tamaño dado que penetran el sistema de muestreo y medición.

## 2. DEFINICIONES, SIGLAS Y SÍMBOLOS

### 2.1 Definiciones

En el presente apéndice, las expresiones y los símbolos que figuran a continuación tendrán los significados que se indican:

***Coefficiente de penetración.*** La proporción de concentración de partículas corriente abajo y corriente arriba de un elemento del sistema de muestreo.

***Concentración en masa de partículas.*** La masa de las partículas por volumen unitario de muestra.

***Concentración en número de partículas.*** El número de partículas por volumen unitario de muestra.

***Diámetro aerodinámico de una partícula.*** El diámetro de una esfera equivalente de densidad unitaria ( $1\text{g/cm}^3$ ) con la misma velocidad terminal de decantación que la partícula en cuestión, también denominado “diámetro aerodinámico-~~elástico~~”.

***Diámetro de movilidad eléctrica de una partícula.*** Diámetro de una esfera que se mueve exactamente con la misma movilidad en un campo eléctrico que la partícula en cuestión.

***Distribución de los tamaños de partícula.*** Una lista de valores o función matemática que representa la concentración en número de partículas en función del tamaño.

***Índice de emisión en masa de partículas.*** La masa de partículas emitidas por unidad de masa de combustible utilizada.

***Índice de emisión en número de partículas.*** El número de partículas emitidas por unidad de masa de combustible utilizada.

***Laboratorio competente.*** Laboratorio de pruebas y calibración que establece, aplica y mantiene un sistema de calidad apropiado para el alcance de sus actividades, en cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025:2005 de la Organización Internacional de Normalización, con sus enmiendas ocasionales, o norma equivalente y cuyo programa de calibración de equipos está diseñado y se utiliza para garantizar que las calibraciones y mediciones efectuadas por el laboratorio sean trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). No se requiere que el laboratorio esté formalmente acreditado respecto de la norma ISO/IEC 17025:2005.

***Materia particulada no volátil (nvPM).*** Partículas emitidas que existen en el plano de salida de la tobera de escape del motor de las turbinas de gas y que no se volatilizan cuando se las calienta a una temperatura de  $350^{\circ}\text{C}$ .

***Pérdida de partículas.*** Las partículas que se pierden durante el transporte a través de un componente del sistema de muestreo o a causa del funcionamiento del instrumental. Esta La pérdida en el sistema de muestreo y medición se debe a diversos mecanismos de deposición, algunos de los cuales dependen del tamaño de la partícula.

***Separador ciclónico.*** Separa, mediante rotación y fuerza gravitatoria, partículas de mayor tamaño que el diámetro aerodinámico indicado. El punto de corte del diámetro aerodinámico especificado está asociado al porcentaje de partículas ~~de un tamaño concreto~~ que atraviesa el separador ciclónico.

## 2.2 Siglas

CPC	Contador de partículas de condensación
EENEP	Plano de salida de la tobera de escape del motor
nvPMmi	Instrumento de medición de masa de materia particulada no volátil
nvPMni	Instrumento de índice de materia particulada no volátil
nvPM	Materia particulada no volátil (véase la definición)
slpm	Litros normalizados por minuto (litros por minuto en STP)
STP	Condición del instrumento a temperatura (0°C) y presión (101,325 kPa) normalizadas
VPR	Eliminador de partículas volátiles

## 2.3 Símbolos

$C_c$	$1 + \frac{2\lambda}{D_m} \times (1,165 + 0,483 \times e^{-\frac{0,997D_m}{2\lambda}})$ , factor adimensional Cunningham de corrección de deslizamiento
$D$	$\frac{k_B \times (273.15 + T_i) \times C_c}{3 \times \pi \times \mu \times D_m} \times 10^7$ , coeficiente de difusión de partículas, $\text{cm}^2/\text{s}$
$DF_1$	factor de dilución de la primera etapa
$DF_2$	factor de dilución de la segunda etapa (VPR) según calibración
$D_m$	diámetro de la partícula <del>movilidad eléctrica</del> de nvPM, se refiere al diámetro de movilidad eléctrica, excepto respecto al separador ciclónico, cuyo diámetro de partícula es el diámetro aerodinámico, $\text{nm}$
$D_{mg}$	diámetro <del>medio</del> geométrico medio de distribución por tamaño de la nvPM, $\text{nm}$
$\delta$	suma del cuadrado de las diferencias relativas entre concentraciones en masa y número de nvPM medidas y calculadas con corrección en función de la dilución
$EI_{mass}$	índice de emisión en masa de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y por composición del combustible, en $\text{mg}/\text{kg}$ de combustible
$EI_{num}$	índice de emisión en número de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y por composición del combustible, en número/ $\text{kg}$ de combustible
$\epsilon$	criterio de convergencia ( $1 \times 10^{-9}$ )
$f_{ign}(D_m)$	función de distribución logarítmica normal con parámetros de desviación geométrica estándar, $\sigma_g$ , y diámetro medio geométrico, $D_{mg}$

$f_N(D_m)$	función de distribución logarítmica normal del número de partículas del <del>plano de salida de la tobera de escape del motor EENEP</del>
$ID_i$	diámetro interno del ier segmento del conducto de muestreo, mm
$k_B$	$1,3806 \times 10^{-16}$ , constante de Boltzmann, $(g \cdot cm^2)/(s^2 \cdot K)$
$k_{SL\_mass}$	factor de corrección de <del><math>E_{I_{mass}}</math> <math>E_{I_{mass}}</math> en función de las por</del> pérdidas del sistema sin la corrección <del>de las por</del> pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección, $\mu g/m^3$
$k_{SL\_num}$	factor de corrección de <del><math>E_{I_{num}}</math> <math>E_{I_{num}}</math> en función de las por</del> pérdidas del sistema sin la corrección <del>de las por</del> pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección, <del>número/cm<sup>3</sup></del>
$k_{thermo}$	factor de corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la <del>p</del> Parte de recolección, especificado en 6.2.1 del Apéndice 7.
$\lambda$	$67,3 \times 10^{-3} \times \left( \frac{273,15 + T_i}{296,15} \right) \times \left( \frac{101,325}{P_i} \right) \times \left( \frac{406,55}{T_i + 383,55} \right)$ , recorrido libre medio del gas portador, <del><math>\mu mm</math></del>
$\mu$	Viscosidad del gas portador, $g/cm \cdot s$
<del><math>nvPM_{mass\_EST}</math></del>	<del>concentración en masa, medición estimada por el instrumento de la muestra sin diluir (es decir, corregida en función de la dilución), <math>\mu g/m^3</math></del>
<del><math>nvPM_{num\_EST}</math></del>	<del>concentración en número, medición estimada por el instrumento de la muestra sin diluir (es decir, corregida en función de la dilución), número/cm<sup>3</sup></del>
<del><math>nvPM_{mass\_EP}</math></del>	<del>concentración en masa de <math>nvPM</math> del plano de salida de la tobera de escape del motor, especificada en la sección 4 del presente apéndice, sin corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección.</del>
$nvPM_{num\_EP}$	concentración en número de $nvPM$ del plano de salida de la tobera de escape del motor; especificada en la sección 4 del presente apéndice, sin corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la <del>p</del> Parte de recolección.
$nvPM_{mass\_STP}$	concentración en masa de $nvPM$ diluido en el instrumento en condición STP, $\mu g/m^3$
$nvPM_{num\_STP}$	concentración en número de $nvPM$ diluido en el instrumento en condición STP, número/cm <sup>3</sup>
$\eta_{mass}(D_m)$	<del>e</del> coeficiente de penetración total del sistema de muestreo y medición correspondiente al $nvPM_{mi}$ sin pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección al tamaño $D_m$ de movilidad eléctrica de las partículas
$\eta_{num}(D_m)$	<del>e</del> coeficiente de penetración total del sistema de muestreo y medición correspondiente al $nvPM_{ni}$ sin pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección al tamaño $D_m$ de movilidad eléctrica de las partículas
$\eta_i(D_m)$	coeficiente de penetración del <del>i<sup>erésimo</sup></del> componente del sistema de muestreo y medición para un tamaño de movilidad eléctrica de partícula $D_m$

$\eta_{bi}(D_m)$	coeficiente de penetración de la curva del conducto de muestreo del $i^{\text{ésimo}}$ componente del sistema de muestreo y medición para un tamaño de movilidad eléctrica de partícula $D_m$
$P^i$	Presión del gas portador en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento de la línea de muestreo, kPa
$\rho$	hipótesis de densidad efectiva de nvPM, g/cm <sup>3</sup>
$\sigma_g$	hipótesis de desviación geométrica estándar de distribución logarítmica normal
$Q_i$	flujo del gas portador en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, slpm
$Re$	$\frac{2 \times \rho_{\text{gas}} \times Q_i}{3 \times \pi \times \mu \times ID_i}$ , número de Reynolds del gas portador
$R_{MN}(D_m)$	Razón calculada entre la concentración estimada de nvPM en masa y la concentración estimada de nvPM en número
$T_i$	temperatura del gas portador en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, °C-

### ~~3. FACTORES DE CORRECCIÓN PARA LOS EI EN MASA Y NÚMERO DE nvPM~~

~~3.1 **Recomendación.**—El factor de corrección de  $EI_{\text{masa}}$  en función de las pérdidas del sistema es la proporción entre la concentración estimada en masa en el plano de salida de la tobera de escape del motor sin corrección en función de pérdidas por termoforesis de la parte de recolección y concentración en masa medida, y se debe calcular del siguiente modo:~~

$$k_{SL_{\text{masa}}} = \frac{nvPM_{\text{masa}_{EP}}}{DF_1 \times nvPM_{\text{masa}_{STP}}}$$

~~3.2 **Recomendación.**—El factor de corrección de  $EI_{\text{número}}$  en función de las pérdidas del sistema es la proporción entre la concentración en número en el plano de salida de la tobera de escape del motor sin corrección en función de pérdidas por termoforesis de la parte de recolección y concentración en número medida, y se debe calcular del siguiente modo:~~

$$k_{SL_{\text{número}}} = \frac{nvPM_{\text{número}_{EP}}}{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{\text{número}_{STP}}}$$

### ~~4. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA CONCENTRACIÓN EN MASA Y NÚMERO EN EL PLANO DE SALIDA DE LA TOBERA DE ESCAPE DEL MOTOR CORREGIDA EN FUNCIÓN DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA~~

~~4.1 **Recomendación.**—Se deberían determinar la masa ( $nvPM_{\text{masa}_{EP}}$ ) y el número ( $nvPM_{\text{número}_{EP}}$ ) en el plano de salida de la tobera de escape del motor conforme al siguiente procedimiento:~~

~~a) Para una  $nvPM_{\text{número}_{STP}}$  medida, comenzar con un valor inicial de  $nvPM_{\text{número}_{EP}} = 3 \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{\text{número}_{STP}}$~~

~~b) Se debe utilizar como hipótesis un valor inicial de 0,02 $\mu$ m para el diámetro medio geométrico,  $D_{mg}$ , de la distribución logarítmica normal del tamaño de partículas.~~

- e) Comenzando con hipótesis de valores iniciales de  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  a partir de a) y b) estimar la concentración en masa ( $nvPM_{mass\_EST}$ ) y número ( $nvPM_{num\_EST}$ ) de  $nvPM$  con las siguientes ecuaciones:

$$nvPM_{mass\_EST} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \eta_{mass}(D_m) \times \frac{\rho \pi D_m^3}{6} \times nvPM_{num\_EP} \times f_{tgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

$$nvPM_{num\_EST} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \eta_{num}(D_m) \times nvPM_{num\_EP} \times f_{tgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

donde

$$f_{tgn}(D_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_g)} \times e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right)^2}$$

$\Delta \ln(D_m) = \frac{1}{n} \times \frac{1}{\log_{10}(e)}$  es el ancho de una barra o clase de tamaño sobre la base del logaritmo natural;  $e$  es el número de Euler y  $n$  es la cantidad de barras de tamaño de partículas por década.

- d) Determinar la diferencia,  $\delta$ , entre  $nvPM_{num\_STP}$ ,  $nvPM_{mass\_STP}$  y las estimaciones de concentración en número de  $nvPM$  ( $nvPM_{num\_EST}$ ) y concentración en masa de  $nvPM$  ( $nvPM_{mass\_EST}$ ) a partir de los valores iniciales del plano de salida de la tobera de escape del motor mediante la ecuación:

$$\delta = \left( \frac{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP} - nvPM_{num\_EST}}{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP}} \right)^2 + \left( \frac{DF_1 \times nvPM_{mass\_STP} - nvPM_{mass\_EST}}{DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}} \right)^2$$

- e) Repetir los pasos c) a d) haciendo variar  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  hasta que  $\delta$  se reduzca a menos de  $1 \times 10^{-9}$ .

- f) Una vez que  $\delta$  se redujo a menos de  $1 \times 10^{-9}$ ; los valores finales de  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  son aquellos asociados con ese valor minimizado de  $\delta$ .

- g) Utilizando  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  del paso f), se debería determinar  $nvPM_{mass\_EP}$  empleando la siguiente expresión:

$$nvPM_{mass\_EP} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \frac{\rho \pi D_m^3}{6} \times nvPM_{num\_EP} \times f_{tgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

**4.2 Recomendación.** Se deberían usar en este cálculo un total de 80 tamaños discretos en el rango de tamaño de partículas de  $0,003 \mu m$  a  $1 \mu m$ . En este caso, el número de barras de tamaño por década,  $n$ , es 32 (véase la definición de  $\Delta \ln(D_m)$  ya mencionada). Las sumas, en las ecuaciones anteriores, comienzan en  $0,01 \mu m$ .

**4.3 Recomendación.** La densidad efectiva de  $nvPM$  debería ser una constante equivalente a  $1 \text{ g/cm}^3$  en todos los tamaños de partículas.

4.4. **Recomendación.** La desviación estándar geométrica de la distribución logarítmica normal del número de partículas debería ser equivalente a 1,8.

Nota 1. El diagrama de flujo de la Figura A8-1 describe en imágenes este procedimiento.

Nota 2. Si  $nvPM_{mass\_STP}$  es menor a  $1 \mu g/m^3$ , se debería usar un valor mínimo de  $\mu g/m^3$  para que el procedimiento converja.

Nota 3. El procedimiento que se describe en la sección 3 se puede solucionar mediante programas de soporte lógico disponibles en el mercado.

Nota 4. Las unidades  $D_m$  están expresadas en  $\mu m$  lo cual difiere de los valores tabulados del Apéndice 7.

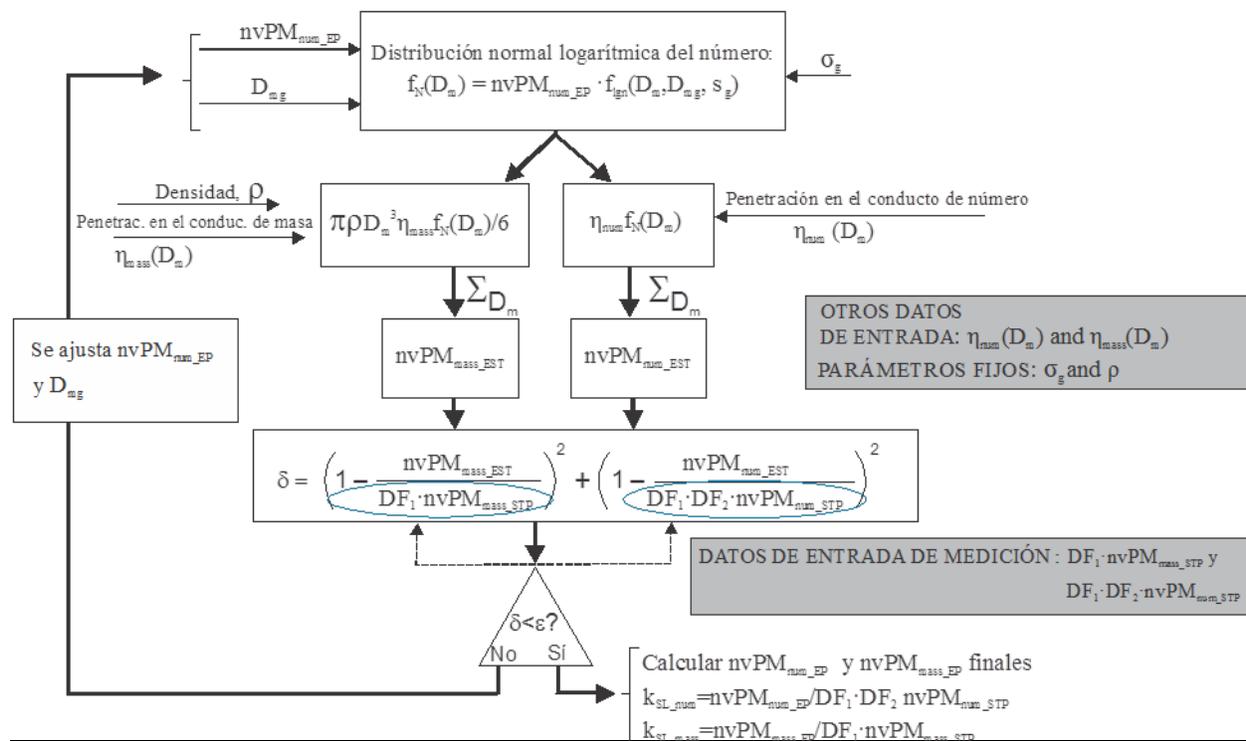


Figura A8-1. Método iterativo de cálculo de la masa y número de nvPM corregido en función de pérdidas distintas de la pérdida por termoforesis en la parte de recolección

### 5. COEFICIENTES TOTALES DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA

Nota 1. Los coeficientes de penetración de partículas difieren entre la medición de concentración en masa de nvPM y la medición de concentración en número de nvPM debido a la diferencia de los conductos de muestreo después del separador 2.

Nota 2. Es posible que varíen los coeficientes de penetración entre distintos puntos de medición de la condición del motor debido a la variación de la distribución de los tamaños de partícula.

Nota 3. Cuando se calculen funciones continuas para estimar los coeficientes de penetración o el rendimiento de conteo del CPC, se debe procurar que estos valores no sean inferiores a cero.

**Tabla A8-1. Coeficientes de penetración requeridos de los componentes del sistema de muestreo y medición de nvPM**

<i>Símbolo del parámetro</i>	<i>Descripción</i>
$\eta_1(D_m)$	Sección 1—Entrada de la sonda al separador 1
$\eta_{b1}(D_m)$	Sección 1—Entrada de la sonda al separador 1 respecto de las curvas
$\eta_2(D_m)$	Sección 2—Separador 1 a entrada del equipo de dilución 1
$\eta_{b2}(D_m)$	Sección 2—Separador 1 a entrada del equipo de dilución 1 respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{dil}(D_m)$	Sección 2—Equipo de dilución 1
$\eta_3(D_m)$	Sección 3—Salida del equipo de dilución 1 a entrada del separador ciclónico
$\eta_{b3}(D_m)$	Sección 3—Salida del equipo de dilución 1 a entrada del separador ciclónico respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{eye}(D_m)$	Separador ciclónico
$\eta_4(D_m)$	Sección 4—Salida del separador ciclónico a separador 2
$\eta_{b4}(D_m)$	Sección 4—Salida del separador ciclónico a separador 2 respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_5(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a nvPMmi
$\eta_{b5}(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a nvPMmi respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{th-m}$	Sección 5—Debido a pérdidas por termoforesis en la entrada del nvPMmi
$\eta_6(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a VPR
$\eta_{b6}(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a VPR respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{VPR}(D_m)$	Sección 5—VPR
$\eta_{CPC}(D_m)$	Sección 5—rendimiento de conteo del nvPMmi (CPC)
$\eta_{th-n}$	Sección 5—Debido a pérdidas por termoforesis en la entrada del nvPMmi

### 5.1 Coeficiente de penetración del sistema correspondiente a la masa de nvPM

**Recomendación.**—El coeficiente total de penetración correspondiente a la masa de nvPM, para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ , se debería calcular combinando coeficientes de penetración del sistema:

$$\eta_{mass}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \eta_{eye} \times \eta_4 \times \eta_{b4} \times \eta_5 \times \eta_{b5} \times \eta_{th-m}$$

—donde  $\eta$  con subíndices se refiere a los coeficientes de penetración de componentes individuales del sistema de muestreo y medición de nvPM definido en la Tabla A8-1. En la sección 6 de este apéndice se definen procedimientos para calcular los coeficientes de penetración de cada componente.

—Nota.—En función de la geometría precisa del sistema de muestreo de nvPM, puede haber más componentes descritos de manera individual del sistema de muestreo y medición de nvPM que los que se describen en la Tabla A8-1.

## 5.2—Coeficiente de penetración del sistema correspondiente al número de nvPM

——— **Recomendación.** — El coeficiente total de penetración correspondiente al número de nvPM, para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ , se debería calcular combinando coeficientes de penetración del sistema:

$$\eta_{\text{num}}(D_m) = \eta_{\pm} \times \eta_{D\pm} \times \eta_z \times \eta_{Dz} \times \eta_s \times \eta_{Dz} \times \eta_{eye} \times \eta_4 \times \eta_{D4} \times \eta_6 \times \eta_{D6} \times \eta_{VPR} \times \eta_{CPC} \times \eta_{CH\text{-}E}$$

donde  $\eta$  con subíndices se refiere a los coeficientes de penetración de componentes individuales del sistema de muestreo y medición de nvPM definido en la Tabla A8-1. En la sección 6 de este apéndice se definen procedimientos para calcular los coeficientes de penetración de cada componente.

——— **Nota.** — En función de la geometría precisa del sistema de muestreo de nvPM, puede haber más componentes descritos de manera individual del sistema de muestreo y medición de nvPM que los que se describen en la Tabla A8-1.

## 6. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE PENETRACIÓN DE COMPONENTES INDIVIDUALES DEL SISTEMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN DE nvPM

### 6.1—Datos necesarios

——— Para calcular el rendimiento de transporte de partículas dentro de un rango de tamaños se necesitan las características del flujo, el conducto de transporte y las condiciones ambiente. Esos parámetros, definidos para cada sección del conducto, se enumeran en la Tabla A8-2.

**Tabla A8-2. Parámetros de entrada**

<i>Símbolo del parámetro</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
$T_i$	Temperatura del gas portador en la entrada del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo, excepto la parte de recolección. Se supone igual a la temperatura de la pared de cada sección del conducto de transporte y constante a lo largo del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	$^{\circ}\text{C}$
$P_i$	Presión del gas portador en el $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo, que se supone que es constante a lo largo de la $i^{\text{a}}$ sección y equivalente a 101,325 kPa	kPa
$Q_i$	Gasto del flujo del gas portador a lo largo del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	slpm
$ID_{ii}$	Diámetro interno del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	mm
$L_i$	Longitud del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	M
$\theta_{ii}$	Ángulo total de las curvas del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	grados
$\eta_{VPR(15)}, \eta_{VPR(30)}, \eta_{VPR(50)}, \eta_{VPR(100)}$	Coefficientes de penetración del VPR a cuatro diámetros de partículas	adimensional
$\eta_{CPC(10)}, \eta_{CPC(15)}$	Rendimiento de conteo del CPC a dos diámetros de partículas	adimensional

## 6.2 Coeficientes de penetración por difusión

6.2.1 La difusión de partículas en la superficie de las paredes de la tubería del sistema de muestreo implica la pérdida de partículas que ingresan en un segmento del conducto de muestreo o de un componente. Los coeficientes de penetración,  $\eta_i(D_m)$ , por pérdidas por difusión en secciones hasta las entradas de los instrumentos,  $\eta_i(D_m)$ ,  $i=1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  se calculan mediante la expresión:

$$\eta_i(D_m) = e^{\frac{-0,6 \times \pi \times ID_{ti} \times L_i \times V_{diff}}{Q_i}}$$

donde

$L_i$  = longitud del  $i^{\text{er}}$  segmento del conducto de muestreo, m

$V_{diff} = 1,18 \times Re^{0,875} \times Sc^{0,333} \times \frac{D}{ID_{ti}}$ , velocidad de deposición, cm/s

$Sc = \frac{\mu}{\rho_{gas} D} \times 10^3$ , número de Schmidt del gas portador

$m_{gas} = 29,0$  kg/mol, masa molecular del gas portador

$P_i$  = presión del gas portador, kPa (según hipótesis es de 101,325 kPa).

6.2.2. **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de  $0,003 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  por pérdidas por difusión en cada sección pertinente del conducto.

## 6.3 Termoforesis

**Recomendación.** Se debería utilizar una penetración constante por termoforesis en la entrada del instrumento,  $\eta_{th-m}(D_m) = 1$  para el nvPM<sub>m</sub> y se debería usar  $\eta_{th-n}(D_m) = 1$  para el nvPM<sub>n</sub> respecto de todos los tamaños de partículas.

## 6.4 Pérdida de partículas en curvas

6.4.1 **Recomendación.** Se distingue el coeficiente de penetración debido a pérdidas en las curvas  $\eta_{bt}(D_m)$ ,  $i=1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  para el flujo turbulento,  $Re$  mayor a 5000, y el flujo laminar,  $Re$  menor o igual a 5000, donde  $Re$  corresponde al número de Reynolds. Para el flujo laminar cuando  $Re$  es menor o igual a 5000, se debería calcular la penetración debida a las curvas en los conductos de transporte como

$$\eta_{bt} = 1 - 0,01745 \times Stk \times \theta_{bt}$$

Para el flujo turbulento cuando  $Re$  es mayor a 5000, se debería calcular la penetración debida a las curvas en los conductos de transporte como:

$$\eta_{bt} = e^{-0,04927 \times Stk \times \theta_{bt}}$$

donde

$$Stk = \frac{Q_i \times C_e \times \rho \times D_m^2 \times 10^{-3}}{27 \times \pi \times \mu \times D_{st}^3}, \text{ el número de Stokes, que es adimensional}$$

$\theta_{bi}$  = Ángulo total de las curvas del  $i^{\text{er}}$  segmento del conducto de muestreo, grados

——— 6.4.2 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  por pérdidas en curvas en cada sección pertinente del sistema de muestreo y medición.

## 6.5 Función de penetración del separador ciclónico

——— 6.5.1 **Recomendación.** Se debería estimar la función de penetración del separador ciclónico mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{eye}(D_m) = 1 - \int_{x>0}^{D_m} \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu_{eye})^2}{2\sigma_{eye}^2}}}{x \sigma_{eye} \sqrt{2\pi}} dx$$

donde

$$\mu_{eye} = \ln(D_{50}), \text{ y}$$

$$\sigma_{eye} = \ln(D_{10}/D_{90})^{0.5}$$

——— 6.5.2 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  en relación con la función de penetración del separador ciclónico. El separador ciclónico en el sistema de muestreo y análisis de nvPM tiene las siguientes especificaciones:

- a) Punto de corte:  $D_{50} = 1,0 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  y
- b) Eficacia:  $(D_{10}/D_{90})^{0.5}$  menor o igual a 1,25.

——— Nota 1. Los programas de hoja de cálculo modernos tienen incorporada la distribución logarítmica normal acumulativa en su biblioteca de funciones que se puede emplear para generar la función de penetración del separador ciclónico.

——— Nota 2. En la mayoría de las aplicaciones de motores de turbinas de gas, el valor de  $D_m$  será inferior a 0,3  $\mu\text{m}$ . En esos casos, la función de penetración del separador ciclónico será efectivamente igual a 1,0.

## 6.6 Función de penetración del VPR

——— Nota. Se puede utilizar una función continuamente diferenciable brindada por el laboratorio de calibración, que tiene resultados de bondad del ajuste ( $R^2$  mayor a 0,95) para los cuatro puntos de penetración de la calibración del VPR (Tabla A8-3) en lugar de la función determinada a partir del procedimiento de cálculo que se describe a continuación. Las pérdidas de partículas en el VPR se deben tanto

a la difusión como a la termoforesis. El factor de termoforesis,  $\eta_{VPRth}$ , es una constante. El factor de difusión,  $\eta_{VPRd}$ , está determinado a partir de pérdidas normalizadas de partículas debido a la difusión en flujo laminar.

6.6.1 **Recomendación.** Se debería estimar la función de penetración total del VPR mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{VPR} = \eta_{VPRth} \times \begin{cases} 1 - 5.5 \times \psi^{\frac{2}{3}} + 3.77 \times \psi & \psi < 0.007 \\ 0.819 \times e^{-11.5\psi} + 0.0975 \times e^{-70.1\psi} + 0.0325 \times e^{-179\psi} & \psi > 0.007 \end{cases}$$

donde

$$\psi = \frac{6 \times D \times L_{VPR}}{Q_{VPR}}, \text{ parámetro de deposición}$$

$L_{VPR}$  = longitud efectiva del VPR, m

$Q_{VPR}$  = flujo del gas portador en el VPR, slpm

$T_{VPR}$  = temperatura del VPR, °C

$\eta_{VPRth}$  = pérdida por termoforesis del VPR

6.2.2 **Recomendación.** Se debería ajustar la función de penetración del VPR ( $\eta_{VPR}$ ) a los cuatro puntos de penetración medidos haciendo variar la longitud efectiva del VPR ( $L_{VPR}$ ) y el factor de pérdida por termoforesis ( $\eta_{VPRth}$ ). El valor  $R^2$  debería ser mayor a 0,95 para garantizar un buen ajuste a las penetraciones medidas.

6.6.3 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  en relación con la función continua del VPR.

**Tabla A8-3. Coeficientes mínimos permitidos de penetración del VPR a cuatro diámetros de partículas**

Diámetro de movilidad eléctrica de una partícula, $D_m$	0,015 $\mu\text{m}$	0,03 $\mu\text{m}$	0,05 $\mu\text{m}$	0,1 $\mu\text{m}$
Coefficiente mínimo de penetración, $\eta_{VPR}(D_m)$	0,30	0,55	0,65	0,70

### 6.7 Coeficiente de penetración del equipo de dilución 1

6.7.1 **Recomendación.** Se debería utilizar una penetración constante del equipo de dilución 1,  $\eta_{dil}(D_m) = 1$  para todos los tamaños de partículas.

6.7.2 **Recomendación.** Se deberían emplear coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) dentro del rango de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  para la función de penetración del equipo de dilución.

### 6.8 Rendimiento de conteo del CPC

6.8.1 **Recomendación.** Se debería determinar una función continua para el rendimiento de conteo del CPC mediante los dos rendimientos de conteo del CPC especificados con dos parámetros de la función sigmoide mediante la expresión:

$$\eta_{CPC} = 1 - e^{-\ln(2) \cdot \frac{D_m - D_0}{D_{50} - D_0}}$$

donde

$$D_0 = \frac{\alpha_{10} D_{15} - \alpha_{15} D_{10}}{\alpha_{10} - \alpha_{15}}$$

$$D_{50} = \frac{(\alpha_{15} + 1) D_{10} + (\alpha_{10} + 1) D_{15}}{\alpha_{15} - \alpha_{10}}$$

$$\alpha_i = \frac{\ln(1 - \eta_{CPC,i})}{\ln(2)}, i = 0,01 \mu\text{m} \text{ o } 0,015 \mu\text{m}$$

$$D_{10} = 0,01 \mu\text{m},$$

$$D_{15} = 0,015 \mu\text{m},$$

$$\eta_{CPC,10} = \text{rendimiento de conteo a } 0,01 \mu\text{m},$$

$$\eta_{CPC,15} = \text{rendimiento de conteo a } 0,015 \mu\text{m}.$$

6.8.2 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) dentro del rango de  $0,003 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  en relación con la función de continua del CPC.

## 3. DATOS NECESARIOS

### 3.1 Emisiones de nvPM

Para calcular los factores de corrección por pérdidas en el sistema, se necesitan las concentraciones siguientes especificadas en el Apéndice 7:

- Concentración de nvPM en masa:  $\text{nvPM}_{\text{mass\_STP}}$ ;
- Concentración de nvPM en número:  $\text{nvPM}_{\text{num\_STP}}$ .

### 3.2 Otra información

Para ejecutar el procedimiento de cálculo se necesita la información adicional indicada en el Adjunto D del Apéndice 7.

## 4. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN POR PÉRDIDAS DE nvPM EN EL SISTEMA

### 4.1 Descripción

*Nota.- El diagrama de la Figura A8-1 da una visión de conjunto de la metodología para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema.*

4.1.1 Los factores de corrección por pérdidas del sistema se estimarán partiendo de los siguientes supuestos: que la nvPM del EENEP está representada por un valor constante de densidad efectiva de la nvPM, una distribución logarítmica, un valor fijo de desviación geométrica estándar, sin coagulación, limitando las concentraciones de nvPM en masa y número como se describe en la sección dedicada a las limitaciones del método de cálculo, y un tamaño mínimo de partícula por sumatoria de 10 nm.

4.1.1.1 En la metodología de corrección por pérdidas del sistema se usará una densidad efectiva de partículas de  $1 \text{ g/cm}^3$ .

4.1.1.2 En la metodología de corrección por pérdidas del sistema se usará una distribución logarítmica unimodal con desviación geométrica estándar de 1,8.

4.1.1.3 La metodología de corrección por pérdidas del sistema no considera la reducción de la concentración de nvPM en número por coagulación.

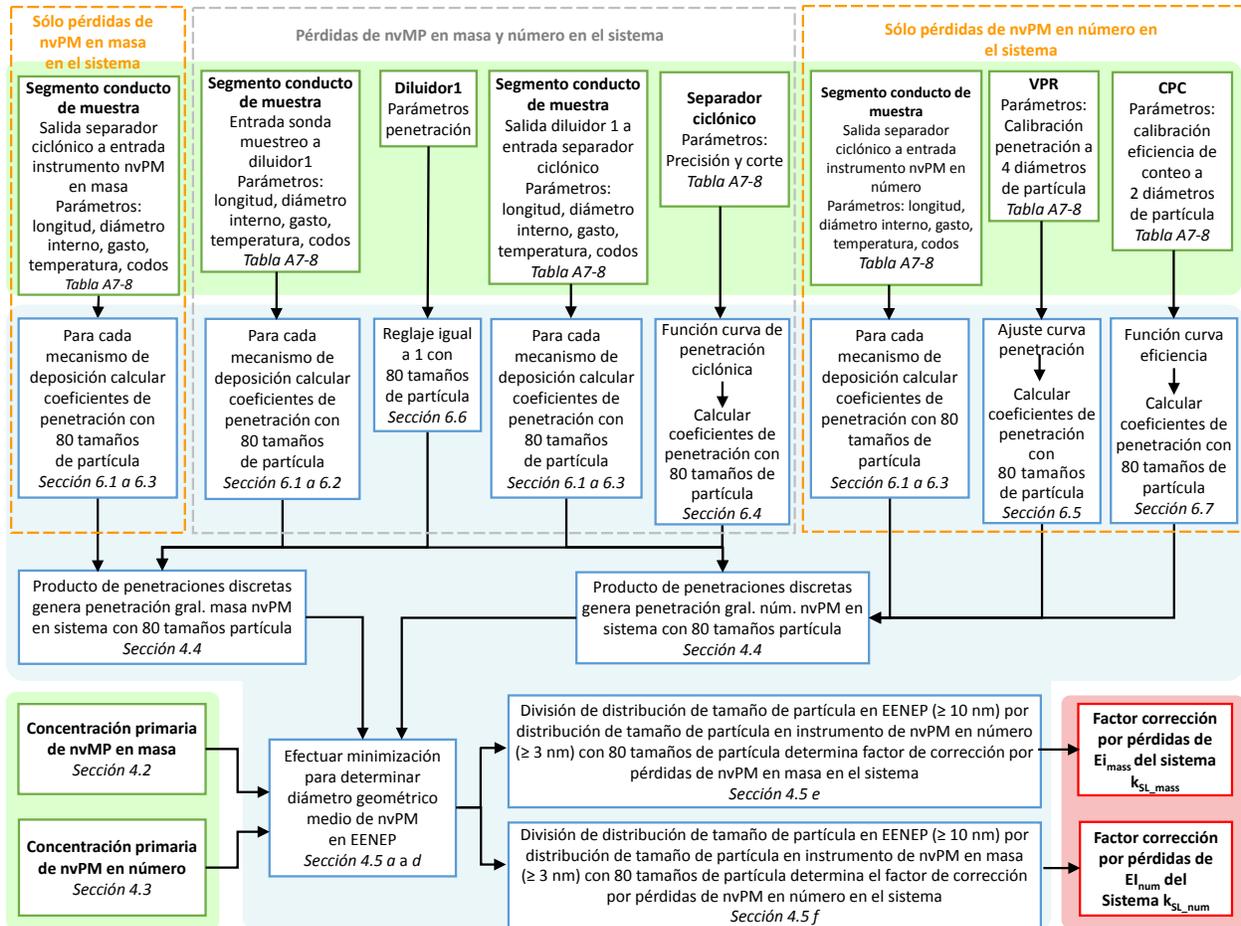
4.1.1.4 Si la concentración de nvPM en número en el EENEP que se calcula aplicando:

$$k_{\text{SL\_num}} \times k_{\text{thermo}} \times DF_1 \times DF_2 \times \text{nvPM}_{\text{num\_STP}}$$

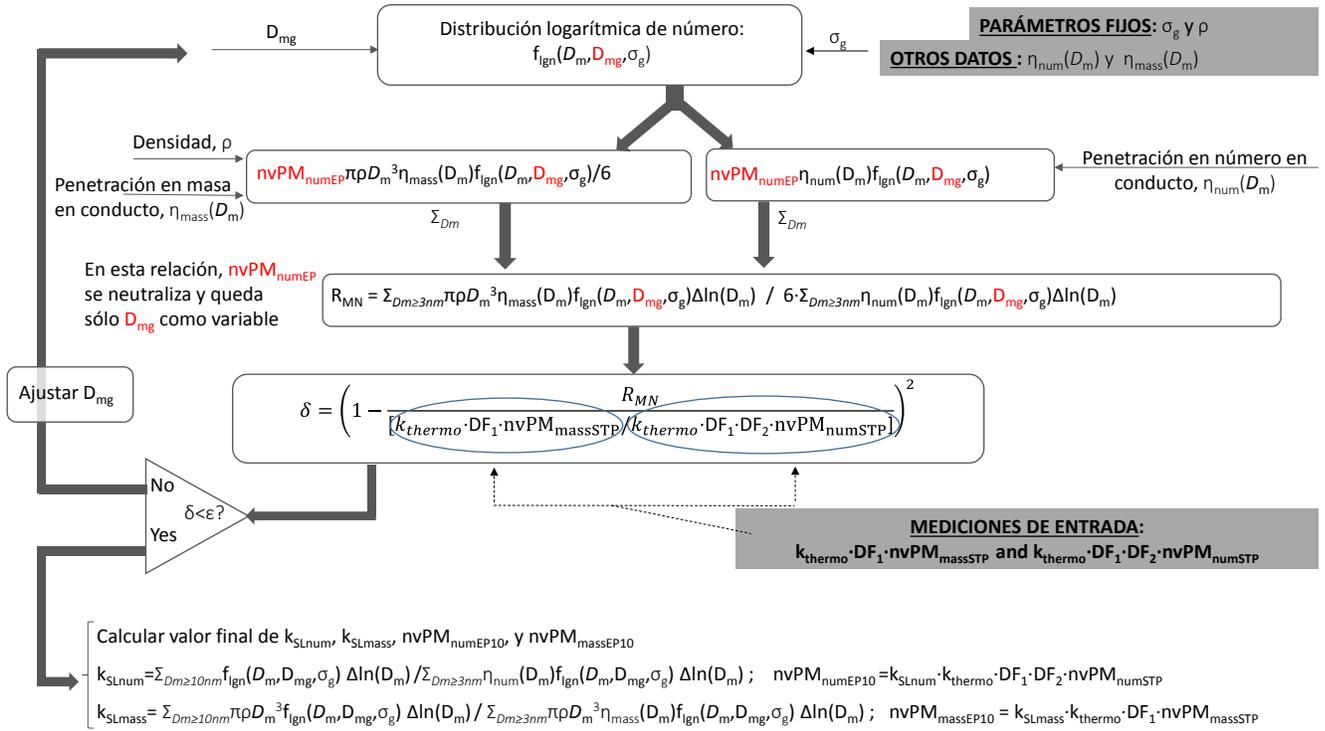
excede de  $10^8$  partículas/cm<sup>3</sup>, es posible que se produzca coagulación y esta circunstancia se notificará a la autoridad encargada de la certificación.

*Nota 1.— La metodología de corrección por pérdidas del sistema no considera derivas de penetración. Esto no se considera de importancia para los sistemas de medición de nvPM que se ajustan al Apéndice 7.*

*Nota 2.— El procedimiento iterativo de cálculo se ilustra en la Figura A8-2.*



**Figura A8-1. Ilustración por diagrama de bloques de la metodología de corrección por pérdidas del sistema. Los bloques verdes son los parámetros de entrada del modelo y los azules los cálculos. Los bloques con contorno rojo ilustran los factores de corrección por pérdidas del sistema calculados.**



**Figura A8-2: Diagrama del procedimiento iterativo de cálculo para determinar los factores de corrección por pérdidas del sistema**

## 4.2 Concentración primaria de nvPM en masa

La concentración primaria de nvPM en masa ( $nvPM_{mass}$ ) se calcula con la ecuación siguiente, que se define en el Apéndice 7:

$$nvPM_{mass} = k_{thermo} \times DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}$$

## 4.3 Concentración primaria de nvPM en número

La concentración primaria de nvPM en número ( $nvPM_{num}$ ) representa el número de partículas por unidad de volumen de muestra de escape del motor corregido por el factor de dilución de la primera etapa ( $DF_1$ ) y el factor de dilución de la segunda etapa ( $DF_2$ ) y la pérdida termoforética de partículas en la Parte de recolección. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$nvPM_{num} = k_{thermo} \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP}$$

#### 4.4 Funciones de la penetración de nvPM

4.4.1 El coeficiente de penetración del sistema de muestreo es producto de las funciones individuales de la penetración y la eficiencia de conteo, y se calculará siguiendo los procedimientos que se describen en la Sección 6. En la Tabla A8-1 se dan las funciones de la penetración y la eficiencia de conteo de nvPM que se requieren.

4.4.2 La penetración del sistema de muestreo correspondiente al nvPM<sub>mi</sub> con una partícula de diámetro  $D_m$  es:

$$\eta_{\text{mass}}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \dots \times \eta_{\text{dil}} \times \eta_{\text{cyc}}$$

4.4.3 La penetración del sistema de muestreo correspondiente al nvPM<sub>ni</sub> con una partícula de diámetro  $D_m$  es:

$$\eta_{\text{num}}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \dots \times \eta_{\text{dil}} \times \eta_{\text{cyc}} \times \eta_{\text{VPR}} \times \eta_{\text{CPC}}$$

4.4.4 La penetración termoforética del sistema de muestreo de nvPM en masa y número sin importar el tamaño de las partículas es:

$$\eta_{\text{thermo}} = \eta_{\text{th1}} \times \eta_{\text{th2}} \times \eta_{\text{th3}} \times \dots$$

*Nota.— La pérdida termoforética en la Parte de recolección,  $k_{\text{thermo}}$ , se especifica en el Apéndice 7, 6.2.1, y no se incluye en este cálculo.*

**Tabla A8-1. Coeficientes de penetración requeridos de los componentes del sistema de muestreo y medición de nvPM**

Símbolo	Descripción de las funciones de transporte de partículas del sistema de muestreo y medición de nvPM
$\eta_i(D_m)$	Coefficiente de penetración por difusión del $i^{\text{ésimo}}$ segmento del sistema de muestreo
$\eta_{bi}(\Theta_i)$	Coefficiente de penetración por curvas en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del sistema de muestreo
$\eta_{\text{th}i}$	Coefficiente de penetración por termoforesis en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del sistema de muestreo
$\eta_{\text{dil}}(D_m)$	Coefficiente de penetración del diluidor 1
$\eta_{\text{cyc}}(D_m)$	Coefficiente de penetración del separador ciclónico
$\eta_{\text{VPR}}(D_m)$	Coefficiente de penetración del VPR
$\eta_{\text{CPC}}(D_m)$	Eficiencia de conteo del CPC

#### 4.5 Cálculo de los factores de corrección por pérdidas del sistema

Los factores de corrección por pérdidas del sistema correspondientes a la masa de nvPM ( $k_{SL\_mass}$ ) y el número de nvPM ( $k_{SL\_num}$ ) se calcularán siguiendo un procedimiento iterativo:

- a) Estimar un valor inicial del diámetro geométrico medio con la ecuación:

$$D_{mg} = \sqrt[3]{\frac{6 \times DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}}{\pi \times \rho \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP}}} \times 10^3$$

*Nota.*— Al usar las unidades definidas para los datos de entrada, el diámetro de partícula calculado quedará expresado en nm.

- b) Con el valor de  $D_{mg}$  determinado en el paso a), calcular la relación estimada entre masa de nvPM y número de nvPM,  $R_{MN}(D_{mg})$ , con la siguiente ecuación:

$$R_{MN}(D_{mg}) = \frac{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{mass}(D_m) \times \frac{\pi D_m^3}{6} \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{num}(D_m) \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}$$

donde las funciones exponenciales derivan de la función de distribución logarítmica,

$$f_{lgn}(D_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_g)} \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2}$$

$\Delta \ln(D_m) = \frac{1}{n} \times \frac{1}{\log_{10}(e)}$ , es la amplitud de un intervalo de tamaño en el logaritmo natural en base e; e es el número de Euler, y n es el número de intervalos de tamaño de partícula por década.

- c) Determinar la diferencia relativa elevada al cuadrado,  $\delta$ , entre la relación masa/número de nvMP medida y estimada con:

$$\delta = \left\{ 1 - \frac{R_{MN}(D_{mg}) \times 10^{-9}}{[(k_{thermo} \times DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}) / (k_{thermo} \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP})]} \right\}^2$$

- d) Repetir los pasos b) y c) hasta que  $\delta$  se reduzca a menos de  $1 \times 10^{-9}$ . El valor  $D_{mg}$  correspondiente a tal valor minimizado de  $\delta$  se utilizará entonces para calcular los factores de corrección por pérdidas del sistema.

- e) Calcular el factor de corrección por pérdidas de nvPM en masa del sistema con la ecuación:

$$k_{SL\_mass} = \frac{\sum_{D_m > 10nm}^{1000nm} D_m^3 \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{mass}(D_m) \times D_m^3 \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}$$

Si se multiplica  $EI_{mass}$  por  $k_{SL}$ , se obtiene el índice de emisión de nvPM corregido por pérdidas del sistema.

f) Calcular el factor de corrección por pérdidas de nvPM en número del sistema con la ecuación:

$$k_{SL\_num} = \frac{\sum_{D_m > 10nm}^{1000nm} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{num}(D_m) \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}$$

Si se multiplica  $EI_{mass}$  por  $k_{SL}$ , se obtiene el índice de emisión de nvPM corregido por pérdidas del sistema.

g) Se usarán en este cálculo un mínimo de 80 tamaños discretos dentro del rango de tamaños de partícula de 3 nm a 1000 nm o un número mínimo de intervalos que puedan producir resultados equivalentes, según lo disponga la autoridad encargada de la certificación.

*Nota 1.— Para 80 tamaños discretos, el número de intervalos de tamaño por década, n, es 32 [véase la definición de  $\Delta \ln(D_m)$  más arriba].*

*Nota 2.— Las sumatorias para calcular los factores de corrección por pérdidas del sistema comienzan en 10 nm en el numerador y 3 nm en el denominador.*

*Nota 3.— El procedimiento de cálculo puede ejecutarse usando programas de computación disponibles en el comercio.*

## 5. NOTIFICACIÓN Y LIMITACIONES

*Nota 1.— Se ha demostrado que el método de cálculo de los factores de corrección por pérdidas del sistema que se describe en el Apéndice 8, sección 4, arroja resultados aceptables con una amplia gama de concentraciones de nvPM en masa y número observadas en las emisiones de nvPM de los motores de turbina de las aeronaves. Sin embargo, se han detectado concentraciones en masa y número de nvPM que proporcionan datos de entrada para el análisis con una fidelidad que puede ser insuficiente para que el método de cálculo arroje resultados de calidad.*

*Nota 2.— Cualquier variación respecto de los supuestos en los que se basa el método de cálculo según lo establecido en la sección 4.1.1 de este apéndice puede derivar en una variación de los factores de corrección por pérdidas del sistema. De manera similar, cualquier variación en los datos usados en el cálculo arrojará variaciones en los factores de corrección por pérdidas del sistema. Las variaciones en los datos podrían ser consecuencia de las distribuciones de tamaño de partícula, el sistema de muestreo o los instrumentos. Igualmente, los artefactos de muestreo y medición pueden invalidar el factor de corrección por pérdidas del sistema, por ejemplo, por desprendimiento de las paredes si las concentraciones son bajas. Las limitaciones del método obedecen a variaciones en los datos de entrada más que al método de cálculo en sí.*

### 5.1 Gamas de concentración en masa aplicables

*Nota.— Cuando las concentraciones de nvPM en masa en estado puro (no corregidas por dilución) en el nvPMmi son inferiores a  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se requiere prudencia al usar el método para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema por la posibilidad de incertidumbre en la determinación de la concentración de nvPM en masa a valores tan bajos.*

5.1.1 Si las concentraciones en masa en estado puro en el nvPMmi son inferiores a  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el solicitante confirmará que el  $D_{\text{mg}}$  en el EENEP está dentro de la gama aplicable que se define en 5.3.

5.1.2 **Recomendación.**— *En aquellos casos en que los cálculos de este Apéndice u otros métodos equivalentes no arrojen valores razonables como se indica en 5.3 (por ejemplo, cuando la metodología de cálculo de pérdidas del sistema genera diámetros geométricos medios inferiores a 7 nm o superiores a 100 nm), o ante la falta de convergencia de la metodología de cálculo de las pérdidas del sistema, deberían usarse otros medios alternativos para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema para las modalidades de utilización en el LTO, con la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.*

*Nota.*— *No hay actualmente limitaciones conocidas provocadas por altas concentraciones de nvPM en masa, siempre que se verifique que las lecturas de las concentraciones de nvPM en masa se mantienen dentro de la gama del nvPMmi que se utilice.*

## 5.2 Gamas de concentración en número aplicables

5.2.1 Si se determina que la concentración medida de nvPM en número en el nvPMni, tras la corrección por dilución (tanto DF1 como DF2) y pérdida termoforética en la Parte de recolección, es inferior o igual a la concentración medida en número de nvPM ambiente<sup>1</sup>, el solicitante confirmará que el  $D_{\text{mg}}$  del EENEP está dentro de la gama aplicable que se define en 5.3.

5.2.2 **Recomendación.**— *En aquellos casos en que los cálculos de este apéndice u otros métodos equivalentes no arrojen valores razonables como se indica en 5.3 (por ejemplo, cuando la metodología de cálculo de pérdidas del sistema genera diámetros geométricos medios inferiores a 7 nm o superiores a 100 nm), o ante la falta de convergencia de la metodología de cálculo de las pérdidas del sistema, deberían usarse otros medios alternativos para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema para las modalidades de utilización en el LTO, con la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.*

*Nota.*— *Para el nvPMni, no hay actualmente limitaciones conocidas provocadas por bajas concentraciones en número de nvPM. Los fabricantes del CPC informan que el LOD del CPC es de aproximadamente 1 partícula/ $\text{cm}^3$ . Las mediciones de altas concentraciones en número se ven limitadas por el requisito de que el CPC se mantenga en modo de conteo unitario. Si las concentraciones en número de nvPM en el EENEP exceden  $10^8$  partículas/ $\text{cm}^3$ , es posible que se esté en presencia de una coagulación de las partículas. El método de cálculo de pérdidas en el sistema no considera la coagulación.*

## 5.3 Diámetros geométricos medios predichos aplicables

*Nota.*— *Se prevé que el diámetro geométrico medio de nvPM en el EENEP proveniente de las turbinas de gas de aeronave se ubique entre 7 y 100 nm.*

5.3.1 Si el método de cálculo de pérdidas del sistema predice un diámetro geométrico medio en el EENEP inferior a 7 nm o superior a 100 nm, y/o un diámetro geométrico medio en el EENEP con el que no se cumpla el criterio de convergencia ( $\delta$  es superior a  $1 \times 10^{-9}$ ), los resultados de  $k_{\text{SL\_mass}}$  y  $k_{\text{SL\_num}}$  se examinarán con la autoridad encargada de la certificación.

<sup>1</sup> Véase el Adjunto E del Apéndice 7.

**5.3.2 Recomendación.**— *En aquellos casos en que los cálculos de este apéndice u otros métodos equivalentes no arrojen valores razonables (por ejemplo, cuando la metodología de cálculo de pérdidas del sistema genera diámetros geométricos medios inferiores a 7 nm o superiores a 100 nm), o ante la falta de convergencia de la metodología de cálculo de las pérdidas del sistema, deberían usarse otros medios alternativos para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema para las modalidades de utilización en el LTO, con la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.*

*Nota.*— *Un diámetro geométrico medio calculado en el EENEP que sea <20 nm provocará que se subestimen los factores de pérdida en el sistema en razón del valor de corte mínimo de la suma de tamaños de partícula. La subestimación puede ser apreciable en el caso de  $k_{SL\_num}$  si el  $D_{mg}$  en el EENEP es  $\leq 10$  nm.*

## **6. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE PENETRACIÓN DE COMPONENTES INDIVIDUALES DEL SISTEMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN DE nvPM**

Para estimar la eficiencia de transporte de nvPM con una gama de tamaños de partícula, se calcularán los coeficientes de penetración de cada componente del sistema de muestreo y medición de nvPM en un mínimo de 80 tamaños discretos de partícula u otro número mínimo de tamaños discretos de partícula que produzca un resultado equivalente, con el acuerdo de la autoridad encargada de la certificación en la gama de 3 nm a 1000 nm.

*Nota 1.*— *Cuando se calculen funciones continuas para estimar los coeficientes de penetración, las funciones no han de ser inferiores a cero.*

*Nota 2.*— *Los parámetros del sistema de muestreo y medición de nvPM que se requieren para ejecutar los cálculos de los coeficientes de penetración de este apéndice figuran en el Adjunto D del Apéndice 7.*

### **6.1 Coeficientes de penetración por difusión en los segmentos**

Los valores de la penetración,  $\eta_i(D_m)$ , por pérdidas por difusión en los segmentos del sistema de muestreo al tamaño  $D_m$  de movilidad eléctrica de las partículas se calculan con la expresión:

$$\eta_i(D_m) = e^{\frac{-\pi \times ID_{ti} \times L_i \times V_{d,diff}}{Q_i}}$$

donde:

$L_i$	longitud del $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, m
$V_{d,diff}$	$0,0118 \times Re^{\frac{7}{8}} \times Sc^{\frac{1}{3}} \times D / ID_{ti}$ , la velocidad de deposición, cm/s
$Sc$	$\frac{\mu}{\rho_{gas} D} \times 10^3$ , el número de Schmidt del gas portador
$ID_{ti}$	diámetro interno del $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, mm
$Q_i$	gasto del gas portador por el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, lspm

## 6.2 Coeficientes de penetración en las curvas de los segmentos

Los coeficientes de penetración en curvas se diferencian entre el flujo turbulento, donde  $Re$  es superior a 5 000, y el flujo laminar, donde  $Re$  es inferior o igual a 5 000, siendo  $Re$  el número de Reynolds. Para el flujo laminar (incluido el régimen de transición), la penetración por curvas en los conductos de transporte de la muestra en cada segmento a un tamaño de movilidad eléctrica de partícula  $D_m$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\eta_{bi}(D_m) = 1 - 0,01745 \times Stk \times \theta_{bi}$$

Para el flujo turbulento, la penetración por curvas en los conductos de transporte de la muestra se calculará así:

$$\eta_{bi}(D_m) = e^{-0,004927 \times Stk \times \theta_{bi}}$$

donde

$$Stk = \frac{Q_i \times C_c \times \rho \times D_m^2 \times 10^{-3}}{27 \times \pi \times \mu \times ID_{ti}^3}, \text{ el número adimensional de Stokes}$$

$\theta_{bi}$  ángulo total de curvas en el  $i^{\text{ésimo}}$  segmento del conducto de muestreo, grados

## 6.3 Pérdidas termofóreticas en los segmentos

Los gradientes térmicos que se producen cuando las temperaturas de las paredes del conducto de muestreo son inferiores a las temperaturas de los gases provocan deposición adicional de partículas, o pérdidas termofóreticas, sobre las superficies del conducto de muestreo. Las pérdidas termofóreticas, excepto las que se producen en la Parte de recolección, se calculan con:

$$\eta_{thi} = \left[ \frac{T_{linei} + 273,15}{T_{gasi} + 273,15} \right]^{Pr \times K_{th}} \times \left[ 1 + \left( \frac{T_{gasi} + 273,15}{T_{linei} + 273,15} - 1 \right) \times e^{-\frac{\pi \times ID_i \times h_{gas} \times L_i}{\rho_{gas} \times Q_i \times C_p}} \right]^{Pr \times K_{th}}$$

donde

$T_{gasi}$	temperatura de los gases de la muestra en °C
$T_{linei}$	temperatura de las paredes del conducto en °C
$h_{gas}$	coeficiente de transferencia de calor por convección del gas portador [W/(m <sup>2</sup> K)]
$C_p$	calor específico del gas portador a presión constante [J/(kg K)]
$Pr$	número de Prandtl

$$K_{th} = \frac{2 \times C_s \times C_c}{1 + 3 \times C_m \times K_n} \left[ 2 + \frac{1}{\left( \frac{k_{gas}}{k_p} \right) + C_t \times K_n} \right]^{-1}, \text{ el coeficiente termofóretico}$$

$C_s$	1,17, coeficiente de deslizamiento
$C_m$	1,14, cantidad de movimiento de hollín
$C_t$	2,18, coeficiente térmico
$k_{gas}$	conductividad térmica del gas portador (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$K_n$	$2\lambda/D_m$ , número de Knudsen
$k_p$	0.2 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> , conductividad térmica de la partícula

*Nota.*— Las pérdidas termoforéticas en la Parte de recolección y el VPR se consideran en la forma establecida en el Apéndice 7, 6.2.1 y 1.5 de este adjunto. Los sistemas conformes a las especificaciones del Apéndice 7 usan instrumentos y segmentos que actualmente no necesitan corregirse por pérdidas termoforéticas, y consecuentemente  $\eta_{th}$  en la práctica equivaldrá a 1,0.

#### 6.4 Función de penetración en el separador ciclónico

La función de penetración del separador ciclónico se estimará con la siguiente expresión:

$$\eta_{cyc}(D_m) = 1 - \int_{x>0}^{D_m} \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu_{cyc})^2}{2\sigma_{cyc}^2}}}{x\sigma_{cyc}\sqrt{2\pi}} dx$$

donde

$$\begin{aligned} \mu_{cyc} & \ln(D_{50}), \text{ y} \\ \sigma_{cyc} & \ln(D_{16}/D_{84})^{0,5} \end{aligned}$$

*Nota 1.*— Los programas de hoja de cálculo modernos tienen entre sus funciones la distribución logarítmica acumulativa, que pueden servir para generar la función de penetración del separador ciclónico.

*Nota 2.*— En la mayoría de los usos del motor de turbina de gas,  $D_m$  será inferior a 300 nm. En tales casos, la función de penetración del separador ciclónico será en la práctica equivalente a 1,0.

#### 6.5 Función de penetración en el VPR

*Nota.*— Podría usarse una función continuamente diferenciable facilitada por el laboratorio de calibración que tenga bondad de ajuste ( $R^2$  superior a 0,95) para los cuatro puntos de penetración de calibración en el VPR en reemplazo de la función determinada siguiendo el procedimiento de cálculo que sigue.

Las pérdidas de partículas en el VPR se producen tanto por difusión como por termoforesis. El factor termoforético,  $\eta_{VPRth}$ , es una constante. El factor de difusión,  $\eta_{VPRdi}$ , va determinado por las pérdidas estándar de partículas debidas a la difusión en flujo laminar. La función de penetración total en el VPR se estimará usando la expresión:

$$\eta_{VPR} = \eta_{VPRth} \times \begin{cases} 1 - 5,5 \times \psi^{\frac{2}{3}} + 3,77 \times \psi & \psi < 0,007 \\ 0,819 \times e^{-11,5\psi} + 0,0975 \times e^{-70,1\psi} + 0,0325 \times e^{-179\psi} & \psi > 0,007 \end{cases}$$

donde

$$\begin{aligned} \psi & \frac{D \times L_{VPR} \times 100}{Q_{VPR}}, \text{ parámetro de deposición} \\ L_{VPR} & \text{ longitud efectiva del VPR, m} \\ Q_{VPR} & \text{ flujo del gas portador en el VPR, lspm} \\ T_{VPR} & \text{ temperatura del VPR, } ^\circ\text{C} \\ \eta_{VPRth} & \text{ pérdida termoforética en el VPR} \end{aligned}$$

La función de penetración en el VPR ( $\eta_{VPR}$ ) se ajustará a los cuatro puntos de penetración medidos variando la longitud efectiva del VPR ( $L_{VPR}$ ) y el factor de pérdida termoforética ( $\eta_{VPRth}$ ). El ajuste se calculará minimizando  $\delta_{VPR}$ , la diferencia cuadrática relativa entre la penetración medida en el VPR,  $\eta_{VPRmeas}$ , y la función de penetración calculada.

$$\delta_{VPR} = \sqrt{\sum_{D_m} \left( \frac{\eta_{VPRmeas}(D_m) - \eta_{VPR}(D_m)}{\eta_{VPRmeas}(D_m)} \right)^2}$$

Se ha demostrado que un valor  $\delta_{VPR}$  inferior a 0,08 asegura un buen ajuste a las penetraciones medidas.

### 6.6 Función de penetración en el diluidor 1

Se usará una penetración constante del diluidor 1,  $\eta_{dil}(D_m) = 1$ , con todos los tamaños de partícula.

### 6.7 Eficiencia de conteo del CPC

Se determinará una función continua de eficiencia de conteo del CPC tomando los dos valores de eficiencia de conteo del CPC especificados con una función sigmoide de dos parámetros usando la expresión:

$$\eta_{CPC} = 1 - e^{-\ln(2) \times \left[ \frac{D_m - D_0}{D_{50} - D_0} \right]}$$

donde

$$D_0 = \frac{\alpha_{10} D_{15} - \alpha_{15} D_{10}}{\alpha_{10} - \alpha_{15}}$$

$$D_{50} = \frac{(\alpha_{15} + 1) D_{10} - (\alpha_{10} + 1) D_{15}}{\alpha_{15} - \alpha_{10}}$$

$$\alpha_i = \frac{\ln(1 - \eta_{CPC,i})}{\ln(2)}, i = 10 \text{ nm o } 15 \text{ nm}$$

$D_{10}$  10 nm,

$D_{15}$  15 nm,

$\eta_{CPC,10}$  eficiencia de conteo a 10 nm, y

$\eta_{CPC,15}$  eficiencia de conteo a 15 nm.

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>Con la propuesta de enmienda, se introducen los cambios consiguientes necesarios en todo el Volumen II del Anexo 16 para reflejar las normas propuestas de nvPM en masa y en número, para guardar la coherencia y para respaldar la norma de nvPM. La enmienda propuesta incluye las siguientes actualizaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• los procedimientos para la medición y el cálculo de niveles de emisión de nvPM en masa y en número y su conversión a los valores característicos;</li> <li>• la evaluación de la nvPM para inventario y modelización, como antes se había hecho para las emisiones gaseosas;</li> <li>• actualización de procedimientos de cumplimiento aplicables a emisiones de materia particulada para que sean coherentes con las nuevas normas de nvPM en masa y en número;</li> <li>• técnicas de instrumentación y medición de emisiones de nvPM para que sean coherentes con otros factores de emisión;</li> <li>• actualizaciones sobre las correcciones para pérdidas por dilución y termoforesis en la Parte de recolección del sistema de muestreo con el fin de ajustar adecuadamente los valores de nvPM en masa y en número medidos para cubrir las incertidumbres asociadas con los procedimientos de medición;</li> <li>• determinación de los coeficientes de penetración de los componentes individuales del sistema de muestreo y medición de la nvPM para calcular la eficiencia de emisión de la nvPM para partículas de varios tamaños;</li> <li>• como algunos combustibles tienen un contenido de azufre muy bajo del orden de las 5 – 10 ppm por masa (0,0005 – 0,001% de la masa), el contenido podría indicarse como cero si las unidades corresponden a un porcentaje (%) de la masa, como se requiere actualmente en el Volumen II del Anexo 16. Por esa razón, se decidió reemplazar la unidad por el contenido de azufre, indicando ppm por masa.</li> </ul> <p>Además, en la enmienda propuesta se recomienda fijar el 1 de enero de 2023 como fecha de aplicación final para la norma del índice de humo (SN) para motores de empuje nominal superior a 26,7 kN. Dado que la concentración de nvPM en masa se correlaciona con la visibilidad del penacho y, consiguientemente, con el SN, y que el límite de nvPM acordado por la CAEP/10 (como se indica actualmente en el Volumen II del Anexo 16) indica la limitación de la visibilidad prevista en la norma de SN, se puede poner fin a la aplicabilidad para la norma de SN.</p>
---------------------------------------	---

**PROPUESTA INICIAL F**  
**CUESTIONES TÉCNICAS GENERALES, DE NOMENCLATURA Y TIPOGRAFÍA**

...

## **PARTE I. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS**

### **CAPÍTULO 1. DEFINICIONES**

Las expresiones que siguen, utilizadas en el Volumen II de este Anexo, tienen los significados que se indican a continuación:

**Certificado de tipo.** Documento expedido por un Estado contratante para definir el diseño de un tipo de aeronave, motor o hélice y certificar que dicho diseño satisface los requisitos pertinentes de aeronavegabilidad del Estado.

*Nota 1.— En algunos Estados contratantes puede expedirse un documento equivalente al certificado de tipo para un tipo de motor o hélice.*

*Nota 2.— En algunos Estados contratantes el certificado de tipo también puede certificar que el diseño cumple los requisitos de emisiones de motores de aeronaves apropiados para ese Estado.*

**Empuje nominal.** A los efectos de las emisiones de los motores, significa el empuje de despegue máximo aprobado por la autoridad encargada de la certificación que ha de aplicarse en condiciones normales de operación y en condiciones estáticas al nivel del mar, a la atmósfera tipo internacional (ISA), y sin utilizar inyección de agua. El empuje se expresa en kilonewtons.

...

## **PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES**

...

### **CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

#### 2.1 Generalidades

...

##### 2.1.4 Condiciones de referencia

###### 2.1.4.1 *Condiciones atmosféricas*

Las condiciones atmosféricas de referencia para la performance del motor se basarán en la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar, pero la humedad ~~absoluta~~ de referencia será de 0,00634 kg de agua/kg de aire seco.

...

## CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 4.1 Generalidades

...

#### 4.1.4 Condiciones de referencia

##### 4.1.4.1 *Condiciones atmosféricas*

Las condiciones atmosféricas de referencia para el motor normal de referencia serán en atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar con la excepción de que el valor de referencia de la humedad ~~absoluta~~ será de 0,00634 kg de agua/kg aire seco.

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>Todas las enmiendas propuestas son correcciones de errores técnicos menores en el Volumen II del Anexo 16 o para mantener la uniformidad.</p>
---------------------------------------	--

-----

**FORMULARIO DE RESPUESTA  
PARA LLENAR Y DEVOLVER A LA OACI  
JUNTO CON LOS COMENTARIOS QUE PUEDA TENER  
SOBRE LAS ENMIENDAS PROPUESTAS**

A la: Secretaria General  
Organización de Aviación Civil Internacional  
999 Robert Bourassa Boulevard  
Montréal, Quebec  
Canadá, H3C 5H7

(Estado) \_\_\_\_\_

Marque (✓) en el recuadro correspondiente a la opción elegida para cada enmienda. Si elige las opciones “acuerdo con comentarios” o “desacuerdo con comentarios”, **proporcione sus comentarios en hojas independientes.**

	<i>Acuerdo sin comentarios</i>	<i>Acuerdo con comentarios*</i>	<i>Desacuerdo sin comentarios</i>	<i>Desacuerdo con comentarios</i>	<i>No se indica la postura</i>
Enmienda del Anexo 16 — <i>Protección del medio ambiente</i> , Volumen II — <i>Emisiones de los motores de las aeronaves</i> (véase el Adjunto A)					

\* “Acuerdo con comentarios” indica que su Estado u organización está de acuerdo con la intención y el objetivo general de la propuesta de enmienda; en los comentarios propiamente dichos podría incluir, de ser necesario, sus reservas respecto a algunas partes de la propuesta, presentar una contrapropuesta al respecto, o elegir ambas opciones.

Firma \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Tel.: +1 514-954-8219 ext. 6726

Ref.: AN 1/17.14-19/43

19 de julio de 2019

**Asunto:** Propuestas de enmienda del Anexo 16, Volumen II, relativas a las normas y métodos recomendados de protección del medio ambiente — Emisiones de los motores de las aeronaves

**Tramitación:** Los comentarios sobre las propuestas deben llegar a Montreal para el 11 de octubre de 2019

Señor/Señora:

1. Tengo el honor de dirigirme a usted para comunicarle que la Comisión de Aeronavegación, en la quinta sesión de su 211º período de sesiones, celebrada el 2 de mayo de 2019, examinó las propuestas que se prepararon en la undécima reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP/11) para enmendar las normas y métodos recomendados (SARPS) del Anexo 16 — *Protección del medio ambiente, Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves* en lo que respecta a la protección del medio ambiente, y que figuran en el Adjunto A.

2. Las propuestas de enmienda del Anexo 16, Volumen II, que se presentan en el Adjunto A incluyen:

- a) una actualización de la fecha de aplicación para los tipos de motores nuevos que no afectará a la actual norma de NOx aplicable a los motores en producción ni a las actuales normas de índice de humo (SN), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y materia particulada no volátil (nvPM) en masa aplicables a la producción (Propuesta A);
- b) correcciones a las especificaciones y condiciones relativas al gasto como resultado de la aplicación de las condiciones de temperatura y presión normalizadas (STP) para el equipo de medición y de las especificaciones relativas al funcionamiento del sistema de muestreo (Propuesta B);
- c) uso de un lenguaje más genérico en las exenciones otorgadas a los motores en producción con posterioridad a las fechas de aplicación de las normas de índice de humo, NOx, HC y CO<sub>2</sub>, así como emisiones de nvPM en masa y en número; aclaración de las referencias a la “autoridad competente”, introducción de la definición de “Estado de diseño”, y actualización del texto sobre exenciones (Propuesta C);
- d) introducción del nuevo texto de las normas sobre emisiones de nvPM en masa y en número resultante de la CAEP/11; descripción de los límites para la nvPM en masa y en número que se aplicarían a los nuevos tipos de motores a partir del 1 de enero de 2023,

**PROPUESTA DE ENMIENDA DEL ANEXO 16, VOLUMEN II**

**NOTAS SOBRE LA PRESENTACIÓN DE LA ENMIENDA**

El texto de la enmienda se presenta de modo que el texto que ha de suprimirse aparece tachado y el texto nuevo se destaca con sombreado, como se ilustra a continuación:

1. ~~el texto que ha de suprimirse aparece tachado~~ texto que ha de suprimirse
2. el nuevo texto que ha de insertarse se destaca con sombreado nuevo texto que ha de insertarse
3. ~~el texto que ha de suprimirse aparece tachado~~ y a continuación aparece el nuevo texto que se destaca con sombreado nuevo texto que ha de sustituir al actual

**PROPUESTA DE ENMIENDA DE LAS  
NORMAS Y MÉTODOS  
RECOMENDADOS INTERNACIONALES**

**PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**

**ANEXO 16**

**AL CONVENIO SOBRE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL**

**VOLUMEN II**

**EMISIONES DE LOS MOTORES DE LAS AERONAVES**

<p><b>PROPUESTA INICIAL A DISPOSICIONES SOBRE LA FECHA DE APLICACIÓN PARA MOTORES NUEVOS</b></p>
--

**PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES**

...

**CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN  
PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES  
EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

...

**2.3 Emisiones gaseosas**

...

**2.3.2 Niveles reglamentarios**

...

e) para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación del primer modelo individual es el 1 de enero de 2014 o después de esa fecha y para los que se haya presentado una solicitud de certificado de tipo antes del 1 de enero de 2023:

1) para los motores con una relación de presión de 30 o menos:

i) para motores con un empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 7,88 + 1,4080\pi_{oo}$$

ii) para motores con un empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 40,052 + 1,5681\pi_{oo} - 0,3615F_{oo} - 0,0018\pi_{oo}F_{oo}$$

2) para motores con relación de presión de más de 30 pero menos de 104,7:

i) para motores con empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = -9,88 + 2,0\pi_{oo}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 41,9435 + 1,505\pi_{oo} - 0,5823F_{oo} + 0,005562\pi_{oo}F_{oo}$$

3) para motores con relación de presión de 104,7 o más:

$$D_p/F_{oo} = 32 + 1,6\pi_{oo}$$

f) para los motores de un tipo o modelo para los que se haya presentado una solicitud de certificado de tipo el 1 de enero de 2023 o después de esa fecha:

1) para motores con relación de presión de 30 o menos:

i) para motores con empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 7,88 + 1,4080\pi_{oo}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 40,052 + 1,5681\pi_{oo} - 0,3615F_{oo} - 0,0018\pi_{oo}F_{oo}$$

2) para motores con relación de presión de más de 30 pero menos de 104,7:

i) para motores con empuje nominal máximo de más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = -9,88 + 2,0\pi_{oo}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo de más de 26,7 kN pero no más de 89,0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 41,9435 + 1,505\pi_{oo} - 0,5823F_{oo} + 0,005562\pi_{oo}F_{oo}$$

3) para motores con relación de presión de 104,7 o más:

$$D_p/F_{oo} = 32 + 1,6\pi_{oo}$$

*Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación ~~respecto a las emisiones~~ de los motores de las aeronaves ~~respecto a las emisiones~~, figura orientación sobre la definición y utilización de procedimientos equivalentes.*

## 2.4 Información requerida

...

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>La propuesta de enmienda modifica la disposición del Anexo 16, Volumen II, respecto de la fecha de aplicación para tipos de motores nuevos.</p> <p>Las primeras normas de la OACI sobre las emisiones de los motores (véase Anexo 16, Volumen II, 1ª edición - 1981) se aplicaban a todos los motores fabricados a partir de una fecha determinada. No se planteaba el problema de la aplicabilidad de las normas, ya que afectaba únicamente a las normas aplicables a “tipos nuevos”. Con la segunda edición del Volumen II del Anexo 16, en 1993, además de fijarse un cese de producción para la norma de NOx existente, se adoptó una nueva norma de NOx aplicable a los nuevos tipos de motores. Sin embargo, en ese momento, no existía el concepto de certificación de tipo de motor en la reglamentación de la OACI, ya que los motores sólo se consideraban partes de la aeronave (certificados en el Anexo 8). Por eso, no había modo de asociar las fechas de aplicación de las normas para “tipos de motores nuevos” con el proceso de certificación de tipo de motor. Por eso se introdujo la frase “para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación del primer modelo individual es el 1 de enero de 2014 o después de esa fecha”. El enfoque actual para la aplicabilidad de la norma de las emisiones de los motores del Volumen II del Anexo 16 (que se basa en la fecha de fabricación del primer modelo de producción individual) es producto de que la certificación de tipo para los motores no existía cuando se elaboró la primera norma para un “tipo de motor nuevo”. Esto no era un problema para la aeronavegabilidad y la certificación de ruido porque lo que se certifica es la aeronave. En una enmienda reciente del Anexo 8 (Enmienda 105A), se introdujo oficialmente el concepto de certificación de tipo de los motores en la reglamentación de la OACI, con lo que se hizo posible que la aplicabilidad de las normas futuras esté oficialmente vinculada con el proceso de certificación de tipo.</p> <p>Actualmente, sólo para las emisiones de NOx existe una norma relacionada con los tipos de motores nuevos. No obstante, el cambio propuesto no tendrá incidencia en la actual norma de NOx para los motores en producción, ya que tanto la fecha de solicitud del certificado de tipo como la fecha de fabricación del primer modelo son posteriores a la fecha de aplicación de la actual norma de NOx (Parte III, 2.3.2 (e) – después del 1 de enero de 2014).</p> <p>Este cambio tampoco tendrá impacto alguno en las normas existentes para índice de humo (SN), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) ni en la actual norma sobre materia particulada no volátil (nvPM) en masa, ya que estas normas se aplican a toda la producción a partir de una fecha determinada (Parte III, 2.2.1 – SN – a partir del 1 de enero de 1983; Parte III, 2.3.1 – HC, CO – a partir del 1 de enero de 1986; Parte III, 4.2.1 – nvPM en masa – a partir del 1 de enero de 2020) y no específicamente a tipos de motores nuevos (como las normas de NOx).</p>
---------------------------------------	--

**PROPUESTA INICIAL B**  
**ESPECIFICACIONES Y CONDICIONES DEL GASTO**

## APÉNDICE 2. EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE HUMO

...

### 2. MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DE HUMO

#### 2.1 Sonda para recoger las muestras de las emisiones de humo

La sonda de muestreo deberá satisfacer los siguientes requisitos:

- a) El material de la sonda que está en contacto con la muestra de las emisiones de escape será de acero inoxidable o cualquier otro material no reactivo.
- b) Si se emplea una sonda de muestreo con orificios de muestreo múltiples;
  - 1) todos los orificios tendrán el mismo diámetro; y
  - 2) La sonda de muestreo tendrá una forma tal que, por lo menos, el 80% de la caída de presión a través del conjunto de la sonda se registre en los orificios.
- c) El número mínimo de lugares muestreados será de 12.

...

#### 2.3 Dispositivos para analizar el humo

*Nota.— El método aquí descrito se basa en la medición de la reducción de la reflectancia de un filtro manchado por determinada masa de flujo del escape de muestra.*

La disposición de los diversos componentes que integran el dispositivo para conseguir las muestras necesarias del filtro manchado, tendrá las características indicadas en forma esquemática en la Figura A2-1. Podrá instalarse una derivación optativa sobre el medidor de volumen para facilitar la lectura. Los principales elementos del sistema deberán satisfacer los requisitos siguientes:

...

- e) *bomba de vacío*: esta bomba, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de  $-75\text{kPa}$  en relación con la presión atmosférica; al gasto máximo, el régimen no deberá ser inferior a  $2826\text{ L/min}$ , a la temperatura y presión normales normalizadas;

...

- i) *pérdidas*: el subsistema deberá satisfacer la prueba siguiente:
  - 1) colocar un filtro limpio en el portafiltro;
  - 2) cerrar la válvula A y abrir por completo las válvulas B, C y D;
  - 3) accionar la bomba de vacío durante 1 minuto, hasta lograr el equilibrio necesario;

- 4) seguir accionando la bomba y medir el gasto con el contador, durante cinco minutos. Dicho **volumen** **gasto** no deberá exceder de **51 L/min** (con referencia a la temperatura y presión **normales normalizadas**). En el caso de que no se consiga esto, el dispositivo no deberá utilizarse.

...

## 2.5 Procedimientos aplicables a la medición del humo

...

### 2.5.2 Verificaciones de las pérdidas y la limpieza

No se hará ninguna medición antes de que se hayan calentado y estabilizado los conductos de transferencia de la muestra y las válvulas correspondientes. Antes de proceder a una serie de ensayos, se verificará el sistema de la siguiente manera, para cerciorarse de que no hay pérdidas y de que está limpio:

a) *verificación de las pérdidas*: apartar la sonda y cerrar el extremo del conducto de muestreo; proceder a la verificación de la pérdida, según se indica en 2.3 h), con la diferencia de que la válvula A debe quedar abierta y en posición de “derivación”, la válvula D debe quedar cerrada y el límite de pérdida es de **20,4 L/min** a la temperatura y presión normalizadas. Colocar de nuevo la sonda en su lugar y abrir el conducto de interconexión;

...

## APÉNDICE 3. INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS EMISIONES GASEOSAS

...

### 5. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

...

#### 5.1 Dispositivo para medir las muestras

##### 5.1.1 Sonda de muestreo

La sonda de muestreo deberá satisfacer los siguientes requisitos:

- a) El material de la sonda que está en contacto con la muestra de las emisiones de escape será de acero inoxidable o cualquier otro material no reactivo.
- b) Si se emplea una sonda **de muestreo** con orificios de muestreo múltiples;
  - 1) todos los orificios tendrán el mismo diámetro; y
  - 2) ~~La~~ sonda **de muestreo** tendrá una forma tal que; por lo menos; el 80% de la caída de presión; a través del conjunto de la sonda se registre en los orificios.
- c) El número mínimo de lugares muestreados será de 12.

...

## 6. PROCEDIMIENTO A SEGUIR AL HACER EL ENSAYO GENERAL

...

### 6.3 Utilización

6.3.1 No se hará ninguna medición hasta que no se hayan calentado y estabilizado todos los instrumentos y los conductos de transferencia de la muestra y hasta que no se hayan efectuado las verificaciones siguientes:

- a) verificación de las pérdidas: antes de efectuar una serie de ensayos, se verificará que el sistema no tenga pérdidas. Para hacerlo, aislar la sonda y los analizadores, conectar y accionar una bomba de vacío ~~de actuación equivalente a la que se utilizó para el sistema de medición de humo~~ a fin de comprobar que las pérdidas del gasto del sistema sean inferiores a 0,4 L/min, a la temperatura y presión ~~normales~~ normalizadas. La bomba de vacío, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de  $-75\text{kPa}$  en relación con la presión atmosférica; al gasto máximo, el régimen no deberá ser inferior a 26 L/min a la temperatura y presión normalizadas.
- b) verificación de la limpieza: aislar el sistema de muestreo de gases de la sonda y conectar el extremo del conducto de muestra a una fuente de gas cero. Calentar el sistema hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento que se necesita para hacer las mediciones de hidrocarburos. Activar la bomba de flujo de la muestra y ajustar el flujo al que se utilizó durante el ensayo de las emisiones del motor. Registrar la lectura del analizador de hidrocarburos. La lectura no excederá de 1% del nivel de emisiones del motor en marcha lenta o 1 ppm (ambos expresados en el equivalente de metano), de estos valores el mayor.

...

## ADJUNTO E DEL APÉNDICE 7 PROCEDIMIENTOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL SISTEMA

### 1. VERIFICACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA PARTE DE RECOLECCIÓN Y EL CONDUCTO DE GAS

#### 1.1 Procedimiento de verificación de pérdidas

Antes de una serie de pruebas de un motor, se deben verificar la ~~p~~Parte de recolección y el GL para detectar pérdidas mediante el procedimiento siguiente:

- a) Aislar el GL de la parte de medición de  $\text{nvPM}$  mediante la válvula de aislamiento 1, la válvula de control de presión P1 y, si procede, la válvula de cierre opcional.
- b) Aislar la sonda y los analizadores.
- c) Conectar y accionar una bomba de vacío para verificar el gasto de las pérdidas ~~del gasto~~.
- d) La bomba de vacío, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de  $-75\text{ kPa}$  respecto de la presión atmosférica; el gasto máximo no deberá ser inferior a ~~28~~26 L/min a la temperatura y presión ~~normales~~ normalizadas.

...

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>En el Volumen II del Anexo 16, se utiliza el término “normal” para las condiciones de temperatura y presión, y el término “normalizada”, en los Apéndices 2, 3 y 7 del mismo Volumen II para la especificación de la producción de vacío en función del gasto y para la medición del gasto para la verificación de pérdidas. Con la enmienda propuesta, se unifica la terminología para utilizar condiciones de temperatura y presión normalizadas (STP) para las especificaciones relativas al gasto del equipo de medición y del sistema de muestreo.</p> <p>Debido a los cambios propuestos a la STP, se hicieron las correcciones correspondientes del rendimiento requerido de la bomba de vacío a gasto máximo que implicaron reducirlo de 28 L/min a 26 L/min. Las enmiendas propuestas en 2.3 i) 1) y 2.5.2 a) por las que se cambia volumen por gasto (1 L/min y 0.4 L/min, respectivamente) no se ajustaron en función de la STP puesto que dichos ajustes se consideran menores e innecesarios.</p>
---------------------------------------	---

### PROPUESTA INICIAL C

#### EXENCIONES APLICABLES A MOTORES EN PRODUCCIÓN Y NUEVAS DISPOSICIONES GENÉRICAS SOBRE EXENCIONES

## PARTE I. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

### CAPÍTULO 1. DEFINICIONES

...

***Empuje nominal.*** A los efectos de las emisiones de los motores, significa el empuje de despegue máximo aprobado por la autoridad encargada de la certificación que ha de aplicarse en condiciones normales de operación y en condiciones estáticas al nivel del mar, a la atmósfera tipo internacional (ISA), y sin utilizar inyección de agua. El empuje se expresa en kilonewtons.

***Estado de diseño.*** Estado que tiene jurisdicción sobre la entidad responsable del diseño de tipo.

***Fase de aproximación.*** Fase de utilización definida por el tiempo durante el cual el motor funciona en la modalidad de aproximación.

...

## PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES

### CAPÍTULO 1. ADMINISTRACIÓN

...

1.3 Todo documento que atestigüe la certificación respecto a las emisiones de cada motor contendrá, por lo menos, los datos siguientes, aplicables al tipo de motor de que se trate:

- a) la designación oficial de la autoridad encargada de la certificación;
- b) la designación del tipo y modelo de la fabricación;
- c) la declaración de toda modificación adicional incorporada con el fin de complementar las formalidades aplicables a la certificación respecto a las emisiones;
- d) el empuje nominal;
- e) la relación de presión de referencia;
- f) una declaración de cumplimiento de los requisitos atinentes al índice de humo;
- g) una declaración de cumplimiento de los requisitos atinentes a los contaminantes gaseosos; y
- h) una declaración de cumplimiento de los requisitos atinentes a la materia particulada.

1.4 Los Estados contratantes reconocerán como válido todo certificado respecto a las emisiones otorgado por la autoridad encargada de la certificación de otro Estado contratante, siempre que las formalidades, a base de las cuales se haya otorgado el certificado, sean, por lo menos, tan rigurosas como las previstas en el Volumen II de este Anexo.

1.5 Los Estados contratantes reconocerán como válidas las exenciones de motores ~~respecto del requisito de interrupción de la producción de motores~~ que otorgue la autoridad encargada de la certificación competente de otro Estado contratante ~~que tenga jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción del motor, siempre y cuando las exenciones se concedan de conformidad con el proceso y los criterios definidos en el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II —Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves~~ se haya seguido un proceso aceptable.

*Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II —Procedimientos para la certificación de los motores de aeronaves respecto a las emisiones, se proporciona orientación relativa a los procesos y criterios aceptables para el otorgamiento de exenciones.*

1.6 Salvo indicación distinta en este volumen del Anexo, la fecha que han de utilizar los Estados contratantes para determinar la aplicabilidad de las normas de este Anexo será la fecha en que se presentó al Estado de diseño la solicitud de certificado de tipo para motores de un tipo o modelo, o la fecha de solicitud conforme a un procedimiento equivalente prescrito por la autoridad de certificación del Estado de diseño.

1.7 La solicitud de certificado de tipo para motores de un tipo o modelo tendrá efecto durante el período especificado en la designación de los reglamentos de aeronavegabilidad apropiados para el motor de un tipo o modelo, excepto en casos especiales en los que la autoridad de certificación acepte una prolongación de ese período. Cuando se sobrepase el período de efectividad y se apruebe una prolongación, la fecha que se ha de utilizar para determinar la aplicabilidad de las normas de este Anexo

será la fecha de expedición del certificado de tipo o de aprobación de la modificación del diseño de tipo, o la fecha de expedición de la aprobación conforme a un procedimiento equivalente prescrito por el Estado de diseño, menos el período de efectividad.

## CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS

### 2.1 Generalidades

#### 2.1.1 Campo de aplicación

2.1.1.1 Lo previsto en el presente capítulo se aplicará a todos los motores turbo reactores y turbofán, como se especifica en 2.2 y 2.3, proyectados para propulsar aeronaves exclusivamente a velocidades subsónicas, salvo cuando la autoridad encargada de la certificación ~~exima~~ la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores otorgue exenciones para:

- a) determinados tipos de motores y las versiones derivadas de éstos respecto a los cuales se haya expedido el eCertificado de ~~prototipo~~ Tipo, o se haya cumplido con algún otro procedimiento prescrito equivalente, antes del 1 de enero de 1965; y
- b) un número limitado de motores durante un período de tiempo determinado después de las fechas de aplicación especificadas en 2.2 y 2.3 para la fabricación del motor individual.

2.1.1.2 En tales casos, la autoridad de certificación ~~exima~~ la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores expedirá el documento de exención, se marcará “EXENTO NUEVO” o “EXENTO DE REPUESTO” en las placas de identificación de los motores y el otorgamiento de la exención se anotará en el registro permanente del motor. La autoridad de certificación o la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores tendrá en cuenta el número de motores exentos que se producirán y su impacto en el medio ambiente. Las exenciones se notificarán por medio de un número de serie del motor y se proporcionarán por conducto de un registro público oficial.

**Recomendación.**— *Al otorgar estas exenciones, la autoridad de certificación o la autoridad competente responsable de la entidad de producción de los motores debería considerar la conveniencia de imponer un plazo límite para la fabricación de esos motores.*

~~2.1.1.3 Las disposiciones de este capítulo se aplicarán también a los motores diseñados para aplicaciones en las que de otro modo se habrían utilizado motores turbo reactores y turbofán.~~

*Nota.*— ~~Al considerar las exenciones, la autoridad encargada de la certificación debería tener debidamente en cuenta el número probable de unidades de esos motores que se fabricarán y su repercusión en el medio ambiente. En caso de que se conceda la exención, la autoridad encargada de la certificación debería considerar la conveniencia de imponer un plazo límite en cuanto a la fabricación de esos motores para instalarlos en aeronaves nuevas. En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves respecto a las emisiones, figura orientación adicional sobre la expedición de exenciones.~~

2.1.1.3 Las disposiciones de este capítulo se aplicarán igualmente a los motores destinados para usos que de otro modo se reservarían a los motores turborreactores y turbofán y que estén diseñados como sistemas propulsores integrados certificados con empuje nominal.

*Nota.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación de los motores de aeronaves respecto a las emisiones, contiene orientación.*

...

## CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 4.1 Generalidades

#### 4.1.1 Aplicabilidad

4.1.1.1 Las disposiciones del presente capítulo serán aplicables a todos los motores de aeronave, como se especifica en más detalle en 4.2, diseñados para propulsión solo a velocidades subsónicas, ~~para los que se presente una solicitud de certificado de tipo a la autoridad encargada de la certificación.~~

4.1.1.2 Se aplicarán las disposiciones específicas para las categorías de motores pertinentes detalladas en la sección 4.2, excepto cuando la autoridad encargada de la certificación o la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores otorgue exenciones a un número limitado de motores por un período específico más allá de las fechas de aplicación fijadas en 4.2 para la fabricación del motor individual.

4.1.1.3 En tales casos, la autoridad encargada de la certificación o la autoridad competente con jurisdicción sobre la entidad responsable de la producción de los motores expedirá el documento de exención, se marcará “EXENTO” en las placas de identificación de los motores y el otorgamiento de la exención se anotará en el registro permanente del motor. La autoridad encargada de la certificación o la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores tendrá en cuenta el número de motores exentos que han de producirse y su impacto en el medio ambiente. Las exenciones se notificarán por número de serie del motor y se darán a publicidad mediante un registro público oficial.

**Recomendación.—** *Al otorgar estas exenciones, la autoridad encargada de la certificación o las autoridades competentes responsables de la entidad de producción de los motores deberían considerar la conveniencia de imponer un plazo límite para la fabricación de esos motores.*

*Nota.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves, contiene más orientación sobre el otorgamiento de exenciones.*

...

<p><i>Origen:</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>La enmienda propuesta tiene por objetivo introducir un lenguaje genérico para las exenciones otorgadas a la producción de motores luego de las fechas de aplicación de las normas de índice de humo y emisiones de NO<sub>x</sub>, HC y CO, y nvPM en masa y en número.</p> <p>El texto existente relativo a las exenciones, en la Parte III, Capítulo 2, 2.1, se refiere específicamente a la fecha límite de fabricación de motores correspondiente a la norma de NO<sub>x</sub> establecida en la CAEP/6 y no puede utilizarse con un propósito más general. Lo mismo sucede con el párrafo 1.5 del Anexo 16, Volumen II, Parte III Capítulo 1, y las orientaciones conexas contenidas en el Doc 9501, <i>Manual técnico ambiental (ETM)</i>, Volumen II.</p> <p>Como la exención se da en el nivel de la entidad de producción, debería ser otorgada por la autoridad responsable de la entidad de producción. En algunos Estados miembros de la OACI, la autoridad de certificación otorga exenciones relativas a la producción. Por eso, se propone añadir la referencia a la autoridad competente con jurisdicción respecto de la entidad responsable de la producción de los motores.</p> <p>También se añade la definición de “Estado de diseño” porque el término se utiliza en la Parte III, Capítulo 1, párrafo 1.6.</p> <p>Asimismo, la propuesta de enmienda apunta a mantener una identificación genérica de la condición de “EXENTO”. La norma 2.1.1.2 del Anexo 16, Volumen II, Parte III, Capítulo 2, requiere actualmente que se marque “EXENTO NUEVO” o “EXENTO DE REPUESTO” en las placas de identificación de los motores. Estos términos se originan en la distinción que se hace en el proceso de exención entre motores de repuesto y motores que se colocarán en una aeronave nueva en el caso de las exenciones del requisito de cese de producción para cumplir con las normas sobre NO<sub>x</sub> de la CAEP/6. Esta distinción sólo existe en el ETM actual, Volumen II.</p> <p>La Nota en 2.1.1 se modificó para que la primera oración se transforme en un requisito y se añada al párrafo 2.1.1.2. La segunda oración de la Nota se transforma en una recomendación. La propuesta consiste en que la Nota haga referencia únicamente a las orientaciones que figuran en el ETM, Volumen II.</p>
--------------------------------------	--

**PROPUESTA INICIAL D**  
**NORMAS SOBRE MASA Y NÚMERO DE EMISIONES DE nvPM DE LOS MOTORES**  
**PROPUESTAS POR CAEP/11**

...

## **CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA**

...

### 4.1.2 Emisiones de que se trata

La finalidad de esta sección es controlar las emisiones de masa de materia particulada no volátil (nvPM<sub>mass</sub>).

...

### 4.1.3 Unidades de medida

4.1.3.1 La concentración en masa de nvPM (nvPM<sub>mass</sub>) se medirá y notificará expresada en microgramos  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

4.1.3.2 La masa de nvPM emitida durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones de referencia, definido en 4.1.4.2 (LTO<sub>mass</sub>), se medirá y notificará en miligramos.

4.1.3.3 El número de nvPM emitidas durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones, definido en 4.1.4.2 (LTO<sub>num</sub>), se medirá y notificará en número de partículas.

...

## **4.2 Emisiones de materia particulada no volátil**

### 4.2.1 Aplicabilidad

4.2.1.1. Las disposiciones que se detallan en 4.2.2 y 4.2.3 se aplicarán a todos los motores turbofán y turboreactores de un tipo o modelo, y sus versiones derivadas, que tengan un empuje nominal mayor que 26,7 kN y una fecha de fabricación (de cada motor) igual o posterior al 1 de enero de 2020.

4.2.1.2 Las disposiciones de este capítulo se aplicarán igualmente a los motores destinados para usos que de otro modo se reservarían a los motores turboreactores y turbofán y que estén diseñados como sistemas propulsores integrados y certificados con empuje nominal.

### 4.2.2 Niveles reglamentarios

#### 4.2.2.1 Concentración máxima en masa de nvPM

Para los motores cuya fecha individual de fabricación sea el 1 de enero de 2020 o posterior, la concentración máxima en masa de nvPM<sub>mass</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] obtenida de mediciones a suficientes reglajes del empuje, de modo que el máximo de emisiones se determine y calcule conforme a los procedimientos del Apéndice 7 y se convierta a un nivel característico mediante los procedimientos del Apéndice 6 o procedimientos equivalentes acordados por la autoridad encargada de la certificación, no podrá superar el nivel reglamentario calculado según la fórmula siguiente:

$$\text{Límite reglamentario de la concentración en masa de nvPM}_{\text{mass}} = 10^{(3 + 2,9 F_{00}^{-0,274})}$$

*Nota.— Puesto que existe correlación entre la concentración en masa de nvPM y el índice de humo, el nivel reglamentario definido en 4.2.2.1 se derivó del nivel reglamentario de índice de humo. En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación de los motores de las aeronaves respecto a las emisiones, figura información adicional.*

#### 4.2.2.2 Masa y número de nvPM emitidas durante el ciclo de referencia LTO

Los niveles en masa y número de emisiones de nvPM medidos y calculados siguiendo los procedimientos del Apéndice 7 y convertidos a los niveles característicos siguiendo los procedimientos del Apéndice 6 o los procedimientos equivalentes dispuestos por la autoridad encargada de la certificación no superarán los niveles reglamentarios que se determinen por aplicación de las siguientes fórmulas:

##### a) $LTO_{mass}$ :

- 1) Para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación individual sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior:

- i) para motores con empuje nominal máximo superior a 200kN:

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 347,5$$

- ii) para motores con empuje nominal máximo superior a 26,7 kN pero no superior a 200kN.

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 4646,9 - 21,497F_{oo}$$

- 2) Para los motores de un tipo o modelo para los que se haya presentado la solicitud del certificado de tipo el 1 de enero de 2023 o en fecha posterior:

- i) para motores con empuje nominal máximo superior a 150kN:

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 214,0$$

- ii) para motores con empuje nominal superior a 26,7 kN pero no superior a 150kN:

$$LTO_{mass}/F_{oo} = 1251,1 - 6,914F_{oo}$$

##### b) $LTO_{num}$ :

- 1) Para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación individual sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior:

- i) para motores con empuje nominal máximo superior a 200kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 4,170 \times 10^{15}$$

- ii) para motores con empuje nominal máximo superior a 26,7 kN pero no superior a 200kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 2,669 \times 10^{16} - 1,126 \times 10^{14}F_{oo}$$

- 2) Para los motores de un tipo o modelo para los que se haya presentado la solicitud del certificado de tipo el 1 de enero de 2023 o en fecha posterior:

i) para motores con empuje nominal máximo superior a 150kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 2,780 \times 10^{15}$$

ii) para motores con empuje nominal máximo superior a 26,7 kN pero no superior a 150kN:

$$LTO_{num}/F_{oo} = 1,490 \times 10^{16} - 8,080 \times 10^{13} F_{oo}$$

#### 4.2.3 Requisito de notificación

El fabricante deberá notificar los siguientes valores de emisiones de nvPM medidas y calculadas conforme a los procedimientos del Apéndice 7 o procedimientos equivalentes dispuestos por la autoridad encargada de la certificación:

- a) ~~nivel característico de la concentración máxima de nvPM<sub>mass</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );~~
- b) ~~flujo de combustible (kg/s) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;~~
- e) ~~EI<sub>mass</sub> (mg/kg de combustible) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;~~
- d) ~~EI<sub>num</sub> (partículas/kg de combustible) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;~~
- ea) EI<sub>mass</sub> máximo (~~mg~~ miligramos/kg de combustible); y
- fb) EI<sub>num</sub> máximo (partículas/kg de combustible).

### 4.3 Información requerida

*Nota.— La información requerida se divide en ~~dos~~ tres grupos, a saber: 1) información general para conocer las características del motor, el combustible utilizado y el método de análisis de los datos; y 2) los datos obtenidos de las pruebas del motor; y 3) la información deducida.*

#### 4.3.1 Información general

Se proporcionará la información siguiente con respecto a cada tipo de motor de cuyas emisiones se solicite la certificación:

- a) designación del motor;
- b) empuje nominal (kN);
- c) relación de presión de referencia;
- d) referencia de la especificación del combustible;
- e) relación hidrógeno/carbono del combustible;
- f) métodos de obtención de los datos; y

~~g) método para hacer correcciones en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección del sistema de muestreo; y~~

hg) método de análisis de los datos.

#### 4.3.2 Información sobre las pruebas

4.3.2.1 Se proporcionará la información siguiente respecto a cada uno de los motores que se sometan a prueba para fines de certificación ~~Se proporcionará la información siguiente para cada prueba:~~

- a) calor neto de la combustión del combustible (MJ/kg);
- b) contenido de hidrógeno del combustible (% de masa);
- c) contenido total de aromáticos del combustible (% de volumen);
- d) contenido de naftalinas en el combustible (% de volumen); y
- e) contenido de azufre en el combustible (% de ppm por masa).

4.3.2.2 Para cada motor sometido a prueba para fines de certificación se proporcionará la información siguiente, medida y calculada según los procedimientos del Apéndice 7 o los procedimientos equivalentes que disponga la autoridad encargada de la certificación:

- a) flujo de combustible (kg/s) con cada reglaje de empuje del ciclo LTO;
- b)  $EI_{mass}$  (miligramos/kg de combustible) con cada reglaje de empuje del ciclo LTO;
- c)  $EI_{num}$  (partículas/kg de combustible) con cada reglaje de empuje del ciclo LTO.

#### 4.3.3 Información deducida

4.3.3.1 Se proporcionará la información deducida siguiente respecto de cada motor sometido a prueba para fines de certificación:

- a) la tasa de emisión, es decir,  $EI_{mass} \times$  flujo de combustible, (miligramos/s) en masa de nvPM;
- b) la tasa de emisión, es decir,  $EI_{num} \times$  flujo de combustible, (partículas/s) en número de nvPM;
- c) la emisión bruta total en masa de nvPM medida a lo largo del ciclo LTO (miligramos);
- d) la emisión bruta total en número de nvPM a lo largo del ciclo LTO (partículas);
- e) los valores de  $LTO_{mass} / F_{oo}$  (miligramos/kN);
- f) los valores de  $LTO_{num} / F_{oo}$  (partículas/kN); y
- g) la concentración máxima de nvPM como masa (microgramos/m<sup>3</sup>).

4.3.3.2 Se proporcionarán los niveles característicos de concentración máxima de nvPM como masa,  $LTO_{mass}/F_{oo}$  y  $LTO_{num}/F_{oo}$  de cada tipo de motor cuyas emisiones se busque certificar.

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>Los motores de aeronave que consumen combustibles a base de hidrocarburos producen emisiones gaseosas y de materia particulada (PM) como subproductos de la combustión. En el escape del motor, las emisiones de materia particulada consisten principalmente en emisiones de hollín ultrafino o de carbono negro. Al conjunto de dichas partículas se le denomina PM “no volátil” (nvPM). La nvPM está presente en el escape del motor a altas temperaturas. Las partículas no volátiles de los motores de turbinas de gas suelen ser más pequeñas que las de los motores diesel tradicionales. Su diámetro medio geométrico oscila entre los 15 y los 60 nanómetros (nm) (0,06 micrómetros; <math>10\text{nm} = 1/100\ 000</math> de un milímetro). Son partículas ultrafinas invisibles al ojo humano.</p> <p>Durante la reunión CAEP/11, se recomendaron nuevas normas de nvPM en masa y en número para motores de aeronaves. Incluyen límites para la nvPM en masa y en número, que se aplicarían a los tipos de motores nuevos a partir del 1 de enero de 2023, con menos rigurosidad para los motores con empuje nominal inferior a 150kN. Estos SARPs para tipos nuevos se complementan con una norma de nvPm en masa y en número aplicable a los motores en producción con fecha de aplicación del 1 de enero de 2023.</p> <p>El acuerdo sobre una nueva norma sobre nvPM en masa y en número se acompaña de un acuerdo para un examen temprano de los niveles reglamentarios. El CAEP convino en que ese examen deberá incluir la recopilación y análisis de datos de emisiones de nvPM en masa y en número certificados y similares a medida que estén disponibles para todos los motores en producción durante el período 2019-2022. El CAEP convino además en examinar los márgenes de las normas acordadas por la CAEP/11 sobre nvPM en masa y en número para tipos nuevos y evaluar posibles avances tecnológicos para reducir las emisiones de nvPM. Se acordó que la CAEP/12 considerará la necesidad de actualizar las normas de emisiones de nvPM de los motores. Si se llega a un acuerdo en la CAEP/12, se llevará adelante un proceso de fijación de normas durante la CAEP/13 para considerar SARPS revisadas sobre la nvPM en masa y en número.</p> <p>Si bien estuvieron de acuerdo con los SARPS de nvPM en masa y en número, dos Estados miembros del CAEP expresaron reservas con respecto a la fecha de aplicación (de 2023), que consideraron precoz, ya que implicaría esfuerzos significativos para actualizar oportunamente los marcos reglamentarios de los Estados.</p>
---------------------------------------	---

**PROPUESTA INICIAL E**  
**CONCORDANCIA DEL ANEXO 16, VOLUMEN II, CON LA NORMA SOBRE NVPM**

...

**PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES**  
**CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN**  
**PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES**  
**EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

...

**2.2 Humo**

2.2.1 Campo de aplicación

Las disposiciones de 2.2.2 se aplicarán

- a) a los motores fabricados a partir del 1 de enero de 1983, pero antes del 1 de enero de 2023; y
- b) a los motores con un empuje nominal máximo igual o inferior a 26,7kN cuya fecha de fabricación sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior.

2.2.2 Índice de humo reglamentario

El índice de humo en cualquiera de los reglajes del empuje de las cuatro modalidades de utilización LTO, cuando se mida y calcule conforme a los procedimientos del Apéndice 2, o un procedimiento equivalente acordado por la autoridad encargada de la certificación, y se convierta a un nivel característico mediante los procedimientos del Apéndice 6, no podrá superar el nivel calculado a base de la fórmula siguiente:

$$\text{Índice de humo reglamentario} = 83,6 (F_{oo})^{-0,274}$$

o un valor de 50, el que sea menor

*Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves figura orientación sobre la definición y utilización de procedimientos equivalentes.*

...

## CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 4.1 Generalidades

#### 4.1.4 Condiciones de referencia

...

##### 4.1.4.2 Ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones

El motor se ensayará a un número suficiente de reglajes del empuje, a fin de determinar las características de las emisiones de nvPM del motor, de modo que puedan determinarse los índices de emisión en masa ( $EI_{mass}$ ) y los índices de emisión en número ( $EI_{num}$ ) de nvPM a los siguientes porcentajes específicos del empuje nominal: los reglajes de empuje del ciclo LTO de referencia y a empujes que produzcan la concentración máxima de nvPM<sub>mass</sub> en masa, un  $EI_{mass}$  máximo y un  $EI_{num}$  máximo según lo disponga la autoridad encargada de la certificación.

En el cálculo y notificación de las emisiones de nvPM, el ciclo LTO de referencia se representará con el siguiente reglaje de empuje y tiempo para cada una de las modalidades de utilización indicadas:

Modalidad de utilización LTO	Reglaje del empuje por cien $F_{oo}$	Tiempo en la modalidad (en minutos)
Despegue	100% $F_{oo}$	0,7
Ascenso	85% $F_{oo}$	2,2
Aproximación	30% $F_{oo}$	4,0
Rodaje/marcha lenta en tierra	7% $F_{oo}$	26,0

##### 4.1.4.3 Especificaciones en cuanto al combustible

El combustible empleado durante las pruebas debe cumplir las especificaciones del Apéndice 4.

#### 4.1.5 Condiciones de las pruebas

4.1.5.1 Las pruebas se realizarán con el motor en banco de pruebas.

4.1.5.2 El motor será representativo de la configuración certificada (véase el Apéndice 6); no se simularán las purgas ni las cargas producidas por los accesorios que no sean necesarios para el funcionamiento básico del motor.

4.1.5.3 Cuando las condiciones de las pruebas difieran de las condiciones atmosféricas de referencia previstas en 4.1.4.1, se corregirán  $EI_{mass}$  y  $EI_{num}$  respecto de la temperatura en la boca de entrada de la cámara de combustión del motor en las condiciones atmosféricas de referencia conforme a los procedimientos indicados en el Apéndice 7.

4.1.5.4 Se corregirán la concentración máxima de nvPM<sub>mass</sub> en masa por los efectos de la dilución y las pérdidas termoforéticas en la Parte de recolección del sistema de muestreo conforme a los procedimientos del Apéndice 7. Los valores de  $EI_{mass}$  y  $EI_{num}$  se corregirán por los efectos en función de las pérdidas por termoforesis de la parte Parte de recolección del sistema de muestreo y la composición del combustible conforme a los procedimientos indicados en el Apéndice 7.

...

## PARTE IV. EVALUACIÓN DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL PARA FINES DE INVENTARIO Y MODELIZACIÓN

*Nota 1.— La finalidad de esta parte es formular ~~recomendaciones~~ normas y métodos recomendados relativos a la manera de calcular los factores de corrección de la masa y número de nvPM correspondientes a las pérdidas de nvPM del sistema distintas de las pérdidas por termoforesis de la ~~parte~~ Parte de recolección. El sistema de muestreo y medición de nvPM, la ~~parte~~ Parte de recolección y el cálculo de las pérdidas por termoforesis se describen en el Apéndice 7.*

*Nota 2.— Los factores de corrección de pérdidas de masa y número de nvPM del sistema permiten estimar la concentración en masa y número de nvPM en el escape del motor de la aeronave a partir de la concentración en masa y número de nvPM obtenida mediante los procedimientos descritos en el Apéndice 7.*

Para los motores de un tipo o modelo que deba cumplir las disposiciones de la Parte III, Capítulo 4, y cuya fecha de fabricación individual sea el 1 de enero de 2023 o fecha posterior, se notificarán a la autoridad encargada de la certificación de conformidad con los procedimientos del Apéndice 8, o los procedimientos equivalentes que disponga la citada autoridad, los factores de corrección por pérdidas de nvPM en masa y número del sistema ( $k_{SL\_mass}$  y  $k_{SL\_num}$ ), y los valores de  $EI_{mass}$  and  $EI_{num}$  corregidos por el efecto de las pérdidas del sistema.

~~— **Recomendación 1.**— Para los fines de inventario y modelización, los fabricantes de motores de turbinas de aeronaves deberían determinar los factores de corrección de la masa y el número de nvPM del sistema ( $k_{SL\_mass}$  y  $k_{SL\_num}$ ) con la metodología descrita en el Apéndice 8 y deberían notificar esos factores a la autoridad competente.~~

~~**Recomendación 2.**— Para los fines de inventario y modelización, se deberían corregir las ~~concentraciones~~ emisiones en masa y número de nvPM en masa y nvPM en número obtenidas con los procedimientos del Apéndice 7 en función de las pérdidas del sistema mediante la metodología descrita en el Apéndice 8.~~

...

## APÉNDICE 4. ESPECIFICACIÓN DEL COMBUSTIBLE QUE HA DE UTILIZARSE EN LAS PRUEBAS DE LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DE TURBINA

El combustible deberá ajustarse a las especificaciones de este apéndice , a menos que la autoridad encargada de la certificación haya acordado una desviación respecto a las mismas y cualquier corrección necesaria. No contendrá aditivos con el propósito de suprimir el humo (como los compuestos organometálicos).

<i>Propiedad</i>	<i>Gama permisible de valores</i>
Densidad, kg/m <sup>3</sup> a 15°C	780 – 820
Temperatura de destilación, °C	
10% del punto de ebullición	155 – 201
Punto final de ebullición	235 – 285
Calor neto de combustión, MJ/kg	42,86 – 43,50
Aromáticos, % de volumen	15 – 23
Naftalinas, % de volumen	0,0 – 3,0
Punto de humo, mm	20 – 28
Hidrógeno, % de masa	13,4 – 14,3
Azufre, % de ppm por masa	menos de 0,3000%
Viscosidad cinemática a –20°C, mm <sup>2</sup> /s	2,5 – 6,5

...

## APÉNDICE 6. PROCEDIMIENTO PARA CERTIFICAR EL CUMPLIMIENTO CON RESPECTO A EMISIONES GASEOSAS, HUMO Y EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 1. GENERALIDADES

...

### 2. PROCEDIMIENTO PARA CERTIFICAR EL CUMPLIMIENTO

#### 2.1 Emisiones gaseosas e índice de humo

La autoridad encargada de la certificación concederá un certificado de cumplimiento si la media de los valores medidos y corregidos (respecto del motor normal de referencia y de las condiciones atmosféricas de referencia) para todos los motores probados no sobrepasa el nivel reglamentario cuando se convierta al nivel característico empleando el factor apropiado que se determina mediante el número de motores probados (*i*) como se indica en la Tabla A6-1.

*Nota.— El nivel característico del índice de humo o de las emisiones gaseosas equivale a la media de los valores de todos los motores probados, que sólo para las emisiones gaseosas se corrige en forma apropiada con respecto al motor normal de referencia y a las condiciones atmosféricas de referencia, dividida por el coeficiente correspondiente al número de motores probados, según se indica en la Tabla A6-1.*

Tabla A6-1. Coeficientes para determinar los niveles característicos

Número de motores probados ( <i>i</i> )	CO	HC	NOx	SN	Concentración de la masa de nvPM	Masa de nvPM del LTO	Número de nvPM del LTO
1	0,814 7	0,649 3	0,862 7	0,776 9	0,776 9	0,719 4	0,719 4
2	0,877 7	0,768 5	0,909 4	0,852 7	0,852 7	0,814 8	0,814 8
3	0,924 6	0,857 2	0,944 1	0,909 1	0,909 1	0,885 8	0,885 8
4	0,934 7	0,876 4	0,951 6	0,921 3	0,921 3	0,901 1	0,901 1
5	0,941 6	0,889 4	0,956 7	0,929 6	0,929 6	0,911 6	0,911 6
6	0,946 7	0,899 0	0,960 5	0,935 8	0,935 8	0,919 3	0,919 3
7	0,950 6	0,906 5	0,963 4	0,940 5	0,940 5	0,925 2	0,925 2
8	0,953 8	0,912 6	0,965 8	0,944 4	0,944 4	0,930 1	0,930 1
9	0,956 5	0,917 6	0,967 7	0,947 6	0,947 6	0,934 1	0,934 1
10	0,958 7	0,921 8	0,969 4	0,950 2	0,950 2	0,937 5	0,937 5
Más de 10	$1 - \frac{0,130 59}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,247 24}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,096 78}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,157 36}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,157 36}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,197 78}{\sqrt{i}}$	$1 - \frac{0,197 78}{\sqrt{i}}$

## 2.2 Emisiones de materia particulada

2.2.1 La autoridad encargada de la certificación concederá un certificado de cumplimiento si la media de los valores de la concentración máxima de la masa de nvPM medida y corregida respecto a pérdidas termofóricas en el colector la Parte de recolección del sistema de muestreo para todos los motores probados no sobrepasa el nivel reglamentario cuando se convierta al nivel característico empleando el factor apropiado que se determina mediante el número de motores probados (*i*), como se indica en la Tabla A6-1.

*Nota.*— El nivel característico de la concentración máxima de la masa de nvPM es la media de los valores máximos de todos los motores probados, debidamente corregidos respecto a las pérdidas termofóricas en el colector la Parte de recolección del sistema de muestreo, divididos por el coeficiente correspondiente al número de motores probados, como se indica en la Tabla A6-1.

2.2.2 La autoridad encargada de la certificación otorgará el certificado de cumplimiento si la media de los valores de las emisiones de nvPM en masa y la media de los valores de nvPM en número medidos y corregidos por los efectos de las pérdidas termofóricas en la Parte de recolección del sistema de muestreo y por los efectos de la composición del combustible que arrojen todos los motores sometidos a prueba, convertidos al nivel característico por aplicación del factor correspondiente determinado para el número de motores sometidos a prueba (*i*), como se muestra en la Tabla A6-1, no superan el valor reglamentario.

*Nota.*— El nivel característico de las emisiones de nvPM en masa y nvPM en número es la media de los valores de todos los motores sometidos a prueba con la corrección correspondiente por las pérdidas termofóricas en la Parte de recolección del sistema de muestreo y por los efectos de la composición del combustible, dividida por el coeficiente correspondiente al número de motores sometidos a prueba, como se muestra en la Tabla A6-1.

### 2.3 Nivel característico

Los coeficientes que se necesitan para determinar los niveles característicos de las emisiones de los motores figuran en la Tabla A6-1.

### 3. PROCEDIMIENTO EN CASO DE RECHAZO

*Nota.— Cuando la prueba para la certificación fracasa, esto no significa necesariamente que el tipo de motor no responda a las exigencias, sino quizás que el grado de confianza que merece a la autoridad encargada de la certificación no es suficientemente elevado, es decir, es inferior al 90%. Por consiguiente, debería permitirse al fabricante presentar pruebas adicionales de cumplimiento en cuanto al tipo de motor en cuestión.*

...

## APÉNDICE 7. INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL

### 1. INTRODUCCIÓN

...

#### 2. Definiciones, siglas y símbolos

...

#### 2.3 Símbolos

...

$EI_{mass}$	Índice de emisión en masa de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y la composición del combustible, en mg/kg de combustible
$EI_{num}$	Índice de emisión en número de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y la composición del combustible, en número/kg de combustible
F	Empuje en la modalidad de utilización de que se trate
H	Contenido de hidrógeno del combustible (porcentaje de masa)
[HC]	Concentración media de hidrocarburos en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda, expresada como carbono
$\eta_{VPR}(D_m)$	Coefficiente de penetración de partículas del VPR para partículas de $D_m$
$K_{fuel\_M}$	Factor de corrección por composición del combustible del índice de emisiones de nvPM en masa
$K_{fuel\_N}$	Factor de corrección por composición del combustible del índice de emisiones de nvPM en número
$k_{thermo}$	Factor de corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la parteParte de recolección
...	



## 6. CÁLCULOS

### 6.1 Ecuaciones de la concentración en masa de nvPM y los índices de emisión de nvPM en masa y número

...

#### 6.1.1 Concentración en masa de nvPM

La concentración en masa de nvPM ( $nvPM_{mass}$ ) representa la masa de partículas por volumen unitario de muestra del escape del motor corregida en función del factor de dilución ( $DF_1$ ) y las pérdidas por termoforesis de partículas de la parte de recolección. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$nvPM_{mass} = DF_1 \times nvPM_{mass\_STP} \times k_{thermo}$$

#### 6.1.2 Índices de emisión de nvPM en masa y número

Los índices de emisión de nvPM en masa y número ( $EI_{mass}$  y  $EI_{num}$ ) representan la masa (en miligramos) y el número de partículas por masa de combustible quemado (en kilogramos) corregidos en función de los factores de dilución respectivos, y las pérdidas de partículas por termoforesis de partículas de en la parte de recolección y sus respectivos factores de corrección por composición del combustible. Se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$EI_{mass} = \frac{22,4 \times nvPM_{mass\_STP} \times 10^{-3}}{\left( [CO_2]_{dil1} + \frac{1}{DF_1} ([CO] - [CO_2]_b + [HC]) \right) (M_C + \alpha M_H)} \times k_{thermo} \times k_{fuel\_M}$$

$$EI_{num} = \frac{22,4 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP} \times 10^6}{\left( [CO_2]_{dil1} + \frac{1}{DF_1} ([CO] - [CO_2]_b + [HC]) \right) (M_C + \alpha M_H)} \times k_{thermo} \times k_{fuel\_N}$$

Se calculará  $[CO_2]$ ,  $[CO]$  y  $[HC]$  como se indica en el Adjunto E del Apéndice 3.

...

### 6.2 Factores de corrección para las emisiones de nvPM

#### 6.2.1 Corrección de las pérdidas por termoforesis de nvPM en la parte de recolección

...

### 6.2.2 Corrección por los efectos de la composición del combustible

La corrección por los efectos de la composición del combustible se determinará con las siguientes ecuaciones:

$$k_{fuel\_M} = \exp \left\{ \left( 1,08 \frac{F}{F_{00}} - 1,31 \right) (13,8 - H) \right\}$$

$$k_{fuel\_N} = \exp \left\{ \left( 0,99 \frac{F}{F_{00}} - 1,05 \right) (13,8 - H) \right\}$$

...

## ADJUNTO A DEL APÉNDICE 7. REQUISITOS Y RECOMENDACIONES PARA EL SISTEMA DE MUESTREO DE nvPM

...

### 4.2 Separador 2

El separador 2 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) El cuerpo del separador 2 será de acero inoxidable
- b) Se deberá calentar el separador 2 a  $60^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ .
- c) El separador 2 dividirá la muestra en tres conductos para enviar la muestra de nvPM diluida al:
  - 1) NvPMmi;
  - 2) VPR; y
  - 3) flujo de reposición.
- d) Los ángulos de división respecto del flujo entrante serán lo más agudos que resulte viable, pero no deberán exceder los  $35^{\circ}$ .
- e) Todos los conductos de flujo de nvPM serán lo más directos y cortos posible.

...

## ADJUNTO E DEL APÉNDICE 7 PROCEDIMIENTOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL SISTEMA

...

### 2. VERIFICACIÓN DE LA LIMPIEZA EN LA PARTE DE RECOLECCIÓN Y EL CONDUCTO DE GAS

Esta verificación únicamente se efectúa si se usa el método completo de cálculo de EI gaseosas de nvPM.

#### 2.1 Procedimiento de verificación de la limpieza

Se debe verificar la limpieza de la ~~parte~~Parte de recolección y el GL mediante el procedimiento siguiente:

- a) aislar el GL de la parte de medición de nvPM mediante la válvula de aislamiento 1 y la válvula de control de presión  $P_1$ ;
- b) aislar el GL de la sonda y conectar ese extremo del conducto de muestreo a una fuente de gas cero;
- c) calentar el sistema hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento que se necesita para hacer las mediciones de HC;
- d) activar la bomba de flujo de la muestra y ajustar el flujo al que se utilizó durante el ensayo de las emisiones del motor;
- e) registrar la lectura del analizador de HC

#### 2.2 Requisito de verificación de la limpieza

2.2.1 La medición de HC no deberá exceder el 1% del nivel de emisión del motor en la modalidad de marcha lenta o 1 ppm (ambos expresados como C), el valor que sea más elevado.

2.2.2 **Recomendación.**— *Se recomienda vigilar la calidad del aire en la entrada al comenzar y finalizar una prueba de motor y, como mínimo, una vez por hora durante la prueba. Si se registran niveles considerables de HC, estos niveles deberían tenerse en cuenta.*

...

## APÉNDICE 8. PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR LAS CORRECCIONES POR PÉRDIDAS DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL EN EL SISTEMA

*Nota 1.— Los procedimientos que se especifican en el presente apéndice tratan sobre la determinación de factores de corrección por pérdidas de materia particulada no volátil (nvPM) en el sistema de muestreo y medición de dicha materia, excluidas las pérdidas por termoforesis de la ~~parte~~ Parte de recolección que figuran en la notificación de datos del Apéndice 7.*

*Nota 2.— La implantación del sistema de muestreo y medición de nvPM requiere un conducto de medición largo, de hasta 35 m, e incluye varios componentes del sistema de muestreo y medición, lo que puede generar una pérdida considerable de partículas, del orden del 50% de la masa de nvPM y de 90% del número de nvPM. Las pérdidas de partículas dependen del tamaño y, por ende, de la condición de funcionamiento del motor, la tecnología de la cámara de combustión y, posiblemente, otros factores. El procedimiento que se especifica en este apéndice permite estimar las pérdidas de partículas.*

~~———— Nota 3.— Los factores de corrección de pérdidas del sistema se calculan sobre la base de las siguientes hipótesis: la nvPM del plano de salida del escape del motor tiene una distribución logarítmica normal, un valor constante de densidad efectiva de nvPM, un valor fijo de desviación estándar geométrica, que limita la concentración en masa de nvPM al límite de detección, un punto de corte de tamaño mínimo de partículas de 0,01  $\mu\text{m}$  y ausencia de coagulación.~~

*Nota 43.— El método propuesto en el presente apéndice emplea datos y mediciones especificados en el Apéndice 7 y ~~sus adjuntos~~ los adjuntos del Apéndice 7. Los símbolos y definiciones que no aparecen en este apéndice figuran en el Apéndice 7 y ~~sus adjuntos~~ adjuntos.*

### 1. GENERALIDADES

1.1 Dentro del sistema de muestreo y medición de nvPM, se pierden partículas en las paredes del sistema de muestreo debido a mecanismos de deposición. Se experimentan pérdidas que dependen del tamaño y otras que no. Las pérdidas por termoforesis, independientes del tamaño, que se producen en la ~~parte~~ Parte de recolección, están especificadas en 6.2.1 del Apéndice 7.

1.2 Se denomina pérdida del sistema a la pérdida total de partículas del sistema de muestreo y medición de nvPM que no incluyen las pérdidas por termoforesis de la ~~parte~~ Parte de recolección.

1.3 Se debe tener en cuenta la distribución por tamaño de nvPM porque los mecanismos de pérdida de partículas dependen del tamaño de las partículas. Estas pérdidas que dependen del tamaño de las partículas se cuantifican en términos de fracción de partículas de un tamaño dado que penetran el sistema de muestreo y medición.

## 2. DEFINICIONES, SIGLAS Y SÍMBOLOS

### 2.1 Definiciones

En el presente apéndice, las expresiones y los símbolos que figuran a continuación tendrán los significados que se indican:

***Coefficiente de penetración.*** La proporción de concentración de partículas corriente abajo y corriente arriba de un elemento del sistema de muestreo.

***Concentración en masa de partículas.*** La masa de las partículas por volumen unitario de muestra.

***Concentración en número de partículas.*** El número de partículas por volumen unitario de muestra.

***Diámetro aerodinámico de una partícula.*** El diámetro de una esfera equivalente de densidad unitaria ( $1\text{g/cm}^3$ ) con la misma velocidad terminal de decantación que la partícula en cuestión, también denominado “diámetro aerodinámico-~~elástico~~”.

***Diámetro de movilidad eléctrica de una partícula.*** Diámetro de una esfera que se mueve exactamente con la misma movilidad en un campo eléctrico que la partícula en cuestión.

***Distribución de los tamaños de partícula.*** Una lista de valores o función matemática que representa la concentración en número de partículas en función del tamaño.

***Índice de emisión en masa de partículas.*** La masa de partículas emitidas por unidad de masa de combustible utilizada.

***Índice de emisión en número de partículas.*** El número de partículas emitidas por unidad de masa de combustible utilizada.

***Laboratorio competente.*** Laboratorio de pruebas y calibración que establece, aplica y mantiene un sistema de calidad apropiado para el alcance de sus actividades, en cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025:2005 de la Organización Internacional de Normalización, con sus enmiendas ocasionales, o norma equivalente y cuyo programa de calibración de equipos está diseñado y se utiliza para garantizar que las calibraciones y mediciones efectuadas por el laboratorio sean trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). No se requiere que el laboratorio esté formalmente acreditado respecto de la norma ISO/IEC 17025:2005.

***Materia particulada no volátil (nvPM).*** Partículas emitidas que existen en el plano de salida de la tobera de escape del motor de las turbinas de gas y que no se volatilizan cuando se las calienta a una temperatura de  $350^\circ\text{C}$ .

***Pérdida de partículas.*** Las partículas que se pierden durante el transporte a través de un componente del sistema de muestreo o a causa del funcionamiento del instrumental. Esta La pérdida en el sistema de muestreo y medición se debe a diversos mecanismos de deposición, algunos de los cuales dependen del tamaño de la partícula.

***Separador ciclónico.*** Separa, mediante rotación y fuerza gravitatoria, partículas de mayor tamaño que el diámetro aerodinámico indicado. El punto de corte del diámetro aerodinámico especificado está asociado al porcentaje de partículas ~~de un tamaño concreto~~ que atraviesa el separador ciclónico.

## 2.2 Siglas

CPC	Contador de partículas de condensación
EENEP	Plano de salida de la tobera de escape del motor
nvPMmi	Instrumento de medición de masa de materia particulada no volátil
nvPMni	Instrumento de índice de materia particulada no volátil
nvPM	Materia particulada no volátil (véase la definición)
slpm	Litros normalizados por minuto (litros por minuto en STP)
STP	Condición del instrumento a temperatura (0°C) y presión (101,325 kPa) normalizadas
VPR	Eliminador de partículas volátiles

## 2.3 Símbolos

$C_c$	$1 + \frac{2\lambda}{D_m} \times (1,165 + 0,483 \times e^{-\frac{0,997D_m}{2\lambda}})$ , factor adimensional Cunningham de corrección de deslizamiento
$D$	$\frac{k_B \times (273,15 + T_i) \times C_c}{3 \times \pi \times \mu \times D_m} \times 10^7$ , coeficiente de difusión de partículas, $\text{cm}^2/\text{s}$
$DF_1$	factor de dilución de la primera etapa
$DF_2$	factor de dilución de la segunda etapa (VPR) según calibración
$D_m$	diámetro de la partícula <del>movilidad eléctrica</del> de nvPM, se refiere al diámetro de movilidad eléctrica, excepto respecto al separador ciclónico, cuyo diámetro de partícula es el diámetro aerodinámico, $\text{nm}$
$D_{mg}$	diámetro <del>medio</del> geométrico medio de distribución por tamaño de la nvPM, $\text{nm}$
$\delta$	suma del cuadrado de las diferencias relativas entre concentraciones en masa y número de nvPM medidas y calculadas con corrección en función de la dilución
$EI_{mass}$	índice de emisión en masa de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y por composición del combustible, en $\text{mg}/\text{kg}$ de combustible
$EI_{num}$	índice de emisión en número de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis y por composición del combustible, en número/ $\text{kg}$ de combustible
$\epsilon$	criterio de convergencia ( $1 \times 10^{-9}$ )
$f_{ign}(D_m)$	función de distribución logarítmica normal con parámetros de desviación geométrica estándar, $\sigma_g$ , y diámetro medio geométrico, $D_{mg}$

$f_N(D_m)$	función de distribución logarítmica normal del número de partículas del <del>plano de salida de la tobera de escape del motor EENEP</del>
$ID_i$	diámetro interno del ier segmento del conducto de muestreo, mm
$k_B$	$1,3806 \times 10^{-16}$ , constante de Boltzmann, $(g \cdot cm^2)/(s^2 \cdot K)$
$k_{SL\_mass}$	factor de corrección de <del><math>E_{I_{mass}}</math> <math>E_{I_{mass}}</math> en función de las por</del> pérdidas del sistema sin la corrección <del>de las por</del> pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección, $\mu g/m^3$
$k_{SL\_num}$	factor de corrección de <del><math>E_{I_{num}}</math> <math>E_{I_{num}}</math> en función de las por</del> pérdidas del sistema sin la corrección <del>de las por</del> pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección, número/ $cm^3$
$k_{thermo}$	factor de corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la <del>p</del> Parte de recolección, especificado en 6.2.1 del Apéndice 7.
$\lambda$	$67,3 \times 10^{-3} \times \left( \frac{273,15 + T_i}{296,15} \right) \times \left( \frac{101,325}{P_i} \right) \times \left( \frac{406,55}{T_i + 383,55} \right)$ , recorrido libre medio del gas portador, <del><math>\mu mm</math></del>
$\mu$	Viscosidad del gas portador, $g/cm \cdot s$
<del><math>nvPM_{mass\_EST}</math></del>	<del>concentración en masa, medición estimada por el instrumento de la muestra sin diluir (es decir, corregida en función de la dilución), <math>\mu g/m^3</math></del>
<del><math>nvPM_{num\_EST}</math></del>	<del>concentración en número, medición estimada por el instrumento de la muestra sin diluir (es decir, corregida en función de la dilución), número/<math>cm^3</math></del>
<del><math>nvPM_{mass\_EP}</math></del>	<del>concentración en masa de <math>nvPM</math> del plano de salida de la tobera de escape del motor, especificada en la sección 4 del presente apéndice, sin corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección.</del>
<del><math>nvPM_{num\_EP}</math></del>	<del>concentración en número de <math>nvPM</math> del plano de salida de la tobera de escape del motor, especificada en la sección 4 del presente apéndice, sin corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la <del>p</del> Parte de recolección.</del>
$nvPM_{mass\_STP}$	concentración en masa de $nvPM$ diluido en el instrumento en condición STP, $\mu g/m^3$
$nvPM_{num\_STP}$	concentración en número de $nvPM$ diluido en el instrumento en condición STP, número/ $cm^3$
$\eta_{mass}(D_m)$	<del>e</del> coeficiente de penetración total del sistema de muestreo y medición correspondiente al $nvPM_{mi}$ sin pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección al tamaño $D_m$ de movilidad eléctrica de las partículas
$\eta_{num}(D_m)$	<del>e</del> coeficiente de penetración total del sistema de muestreo y medición correspondiente al $nvPM_{ni}$ sin pérdidas por termoforesis de la <del>parte</del> Parte de recolección al tamaño $D_m$ de movilidad eléctrica de las partículas
$\eta_i(D_m)$	coeficiente de penetración del <del>i</del> <sup>erésimo</sup> componente del sistema de muestreo y medición para un tamaño de movilidad eléctrica de partícula $D_m$

$\eta_{bi}(D_m)$	coeficiente de penetración de la curva del conducto de muestreo del $i^{\text{erésimo}}$ componente del sistema de muestreo y medición para un tamaño de movilidad eléctrica de partícula $D_m$
$P^i$	Presión del gas portador en el $i^{\text{erésimo}}$ segmento de la línea de muestreo, kPa
$\rho$	hipótesis de densidad efectiva de nvPM, g/cm <sup>3</sup>
$\sigma_g$	hipótesis de desviación geométrica estándar de distribución logarítmica normal
$Q_i$	flujo del gas portador en el $i^{\text{erésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, slpm
$Re$	$\frac{2 \times \rho_{\text{gas}} \times Q_i}{3 \times \pi \times \mu \times ID_i^2}$ , número de Reynolds del gas portador
$R_{MN}(D_m)$	Razón calculada entre la concentración estimada de nvPM en masa y la concentración estimada de nvPM en número
$T_i$	temperatura del gas portador en el $i^{\text{erésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, °C-

### ~~3. FACTORES DE CORRECCIÓN PARA LOS EI EN MASA Y NÚMERO DE nvPM~~

~~3.1 **Recomendación.**—El factor de corrección de  $EI_{\text{masa}}$  en función de las pérdidas del sistema es la proporción entre la concentración estimada en masa en el plano de salida de la tobera de escape del motor sin corrección en función de pérdidas por termoforesis de la parte de recolección y concentración en masa medida, y se debe calcular del siguiente modo:~~

$$k_{SL_{\text{masa}}} = \frac{nvPM_{\text{masa}_{EP}}}{DF_1 \times nvPM_{\text{masa}_{STP}}}$$

~~3.2 **Recomendación.**—El factor de corrección de  $EI_{\text{número}}$  en función de las pérdidas del sistema es la proporción entre la concentración en número en el plano de salida de la tobera de escape del motor sin corrección en función de pérdidas por termoforesis de la parte de recolección y concentración en número medida, y se debe calcular del siguiente modo:~~

$$k_{SL_{\text{número}}} = \frac{nvPM_{\text{número}_{EP}}}{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{\text{número}_{STP}}}$$

### ~~4. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA CONCENTRACIÓN EN MASA Y NÚMERO EN EL PLANO DE SALIDA DE LA TOBERA DE ESCAPE DEL MOTOR CORREGIDA EN FUNCIÓN DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA~~

~~4.1 **Recomendación.**—Se deberían determinar la masa ( $nvPM_{\text{masa}_{EP}}$ ) y el número ( $nvPM_{\text{número}_{EP}}$ ) en el plano de salida de la tobera de escape del motor conforme al siguiente procedimiento:~~

~~a) Para una  $nvPM_{\text{número}_{STP}}$  medida, comenzar con un valor inicial de  $nvPM_{\text{número}_{EP}} = 3 \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{\text{número}_{STP}}$~~

~~b) Se debe utilizar como hipótesis un valor inicial de 0,02 $\mu$ m para el diámetro medio geométrico,  $D_{mg}$ , de la distribución logarítmica normal del tamaño de partículas.~~

- e) Comenzando con hipótesis de valores iniciales de  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  a partir de a) y b) estimar la concentración en masa ( $nvPM_{mass\_EST}$ ) y número ( $nvPM_{num\_EST}$ ) de  $nvPM$  con las siguientes ecuaciones:

$$nvPM_{mass\_EST} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \eta_{mass}(D_m) \times \frac{\rho \pi D_m^3}{6} \times nvPM_{num\_EP} \times f_{tgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

$$nvPM_{num\_EST} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \eta_{num}(D_m) \times nvPM_{num\_EP} \times f_{tgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

donde

$$f_{tgn}(D_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_g)} \times e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right)^2}$$

$\Delta \ln(D_m) = \frac{1}{n} \times \frac{1}{\log_{10}(e)}$  es el ancho de una barra o clase de tamaño sobre la base del logaritmo natural;  $e$  es el número de Euler y  $n$  es la cantidad de barras de tamaño de partículas por década.

- d) Determinar la diferencia,  $\delta$ , entre  $nvPM_{num\_STP}$ ,  $nvPM_{mass\_STP}$  y las estimaciones de concentración en número de  $nvPM$  ( $nvPM_{num\_EST}$ ) y concentración en masa de  $nvPM$  ( $nvPM_{mass\_EST}$ ) a partir de los valores iniciales del plano de salida de la tobera de escape del motor mediante la ecuación:

$$\delta = \left( \frac{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP} - nvPM_{num\_EST}}{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP}} \right)^2 + \left( \frac{DF_1 \times nvPM_{mass\_STP} - nvPM_{mass\_EST}}{DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}} \right)^2$$

- e) Repetir los pasos c) a d) haciendo variar  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  hasta que  $\delta$  se reduzca a menos de  $1 \times 10^{-9}$ .

- f) Una vez que  $\delta$  se redujo a menos de  $1 \times 10^{-9}$ ; los valores finales de  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  son aquellos asociados con ese valor minimizado de  $\delta$ .

- g) Utilizando  $nvPM_{num\_EP}$  y  $D_{mg}$  del paso f), se debería determinar  $nvPM_{mass\_EP}$  empleando la siguiente expresión:

$$nvPM_{mass\_EP} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \frac{\rho \pi D_m^3}{6} \times nvPM_{num\_EP} \times f_{tgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

**4.2 Recomendación.** Se deberían usar en este cálculo un total de 80 tamaños discretos en el rango de tamaño de partículas de  $0,003 \mu m$  a  $1 \mu m$ . En este caso, el número de barras de tamaño por década,  $n$ , es 32 (véase la definición de  $\Delta \ln(D_m)$  ya mencionada). Las sumas, en las ecuaciones anteriores, comienzan en  $0,01 \mu m$ .

**4.3 Recomendación.** La densidad efectiva de  $nvPM$  debería ser una constante equivalente a  $1 \text{ g/cm}^3$  en todos los tamaños de partículas.

4.4. **Recomendación.** La desviación estándar geométrica de la distribución logarítmica normal del número de partículas debería ser equivalente a 1,8.

Nota 1. El diagrama de flujo de la Figura A8-1 describe en imágenes este procedimiento.

Nota 2. Si  $nvPM_{mass\_STP}$  es menor a  $1 \mu g/m^3$ , se debería usar un valor mínimo de  $\mu g/m^3$  para que el procedimiento converja.

Nota 3. El procedimiento que se describe en la sección 3 se puede solucionar mediante programas de soporte lógico disponibles en el mercado.

Nota 4. Las unidades  $D_m$  están expresadas en  $\mu m$  lo cual difiere de los valores tabulados del Apéndice 7.

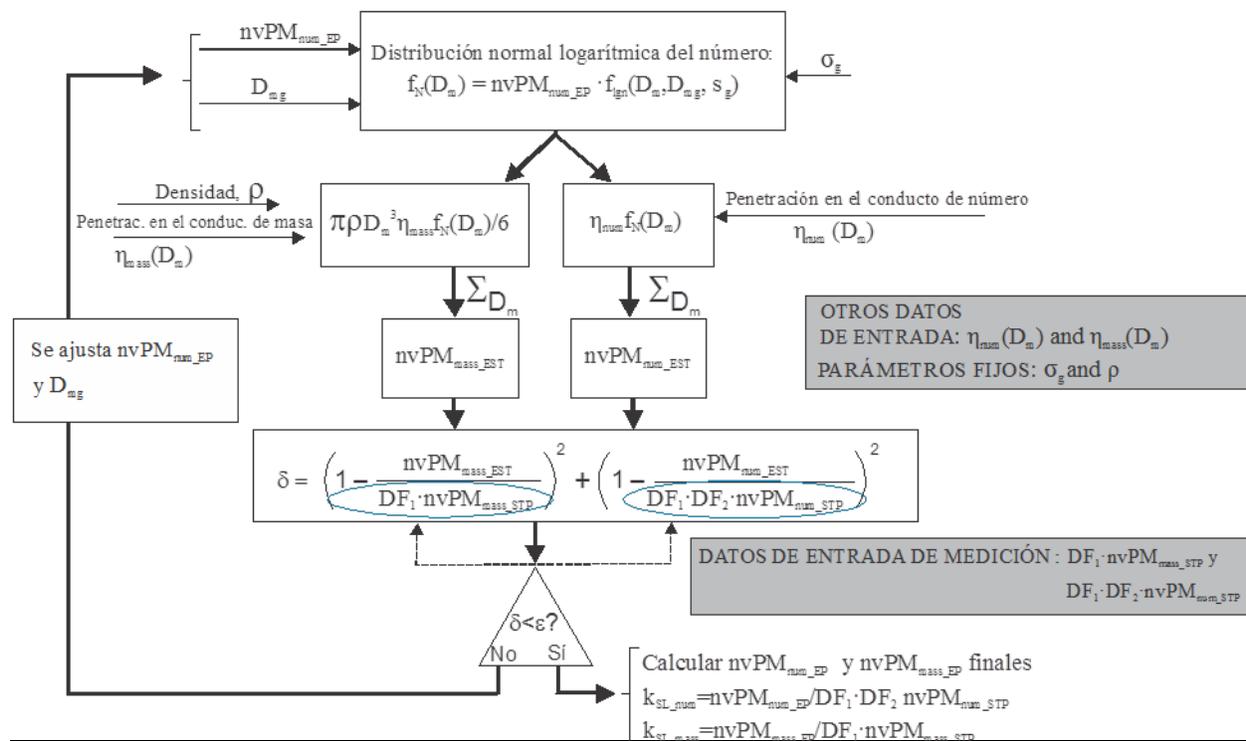


Figura A8-1. Método iterativo de cálculo de la masa y número de nvPM corregido en función de pérdidas distintas de la pérdida por termoforesis en la parte de recolección

### 5. COEFICIENTES TOTALES DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA

Nota 1. Los coeficientes de penetración de partículas difieren entre la medición de concentración en masa de nvPM y la medición de concentración en número de nvPM debido a la diferencia de los conductos de muestreo después del separador 2.

Nota 2. Es posible que varíen los coeficientes de penetración entre distintos puntos de medición de la condición del motor debido a la variación de la distribución de los tamaños de partícula.

Nota 3. Cuando se calculen funciones continuas para estimar los coeficientes de penetración o el rendimiento de conteo del CPC, se debe procurar que estos valores no sean inferiores a cero.

**Tabla A8-1. Coeficientes de penetración requeridos de los componentes del sistema de muestreo y medición de nvPM**

<i>Símbolo del parámetro</i>	<i>Descripción</i>
$\eta_1(D_m)$	Sección 1—Entrada de la sonda al separador 1
$\eta_{b1}(D_m)$	Sección 1—Entrada de la sonda al separador 1 respecto de las curvas
$\eta_2(D_m)$	Sección 2—Separador 1 a entrada del equipo de dilución 1
$\eta_{b2}(D_m)$	Sección 2—Separador 1 a entrada del equipo de dilución 1 respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{dil}(D_m)$	Sección 2—Equipo de dilución 1
$\eta_3(D_m)$	Sección 3—Salida del equipo de dilución 1 a entrada del separador ciclónico
$\eta_{b3}(D_m)$	Sección 3—Salida del equipo de dilución 1 a entrada del separador ciclónico respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{eye}(D_m)$	Separador ciclónico
$\eta_4(D_m)$	Sección 4—Salida del separador ciclónico a separador 2
$\eta_{b4}(D_m)$	Sección 4—Salida del separador ciclónico a separador 2 respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_5(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a nvPMmi
$\eta_{b5}(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a nvPMmi respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{th-m}$	Sección 5—Debido a pérdidas por termoforesis en la entrada del nvPMmi
$\eta_6(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a VPR
$\eta_{b6}(D_m)$	Sección 4—Separador 2 a VPR respecto de las curvas del conducto de muestreo
$\eta_{VPR}(D_m)$	Sección 5—VPR
$\eta_{CPC}(D_m)$	Sección 5—rendimiento de conteo del nvPMmi (CPC)
$\eta_{th-n}$	Sección 5—Debido a pérdidas por termoforesis en la entrada del nvPMmi

### 5.1 Coeficiente de penetración del sistema correspondiente a la masa de nvPM

**Recomendación.**—El coeficiente total de penetración correspondiente a la masa de nvPM, para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ , se debería calcular combinando coeficientes de penetración del sistema:

$$\eta_{mass}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \eta_{eye} \times \eta_4 \times \eta_{b4} \times \eta_5 \times \eta_{b5} \times \eta_{th-m}$$

—donde  $\eta$  con subíndices se refiere a los coeficientes de penetración de componentes individuales del sistema de muestreo y medición de nvPM definido en la Tabla A8-1. En la sección 6 de este apéndice se definen procedimientos para calcular los coeficientes de penetración de cada componente.

—Nota.—En función de la geometría precisa del sistema de muestreo de nvPM, puede haber más componentes descritos de manera individual del sistema de muestreo y medición de nvPM que los que se describen en la Tabla A8-1.

## 5.2—Coeficiente de penetración del sistema correspondiente al número de nvPM

——— **Recomendación.** — El coeficiente total de penetración correspondiente al número de nvPM, para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ , se debería calcular combinando coeficientes de penetración del sistema:

$$\eta_{\text{num}}(D_m) = \eta_{\pm} \times \eta_{D\pm} \times \eta_z \times \eta_{Dz} \times \eta_s \times \eta_{Ds} \times \eta_{eye} \times \eta_4 \times \eta_{D4} \times \eta_6 \times \eta_{D6} \times \eta_{VPR} \times \eta_{CPC} \times \eta_{CH\text{-}H}$$

donde  $\eta$  con subíndices se refiere a los coeficientes de penetración de componentes individuales del sistema de muestreo y medición de nvPM definido en la Tabla A8-1. En la sección 6 de este apéndice se definen procedimientos para calcular los coeficientes de penetración de cada componente.

——— **Nota.** — En función de la geometría precisa del sistema de muestreo de nvPM, puede haber más componentes descritos de manera individual del sistema de muestreo y medición de nvPM que los que se describen en la Tabla A8-1.

## 6. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE PENETRACIÓN DE COMPONENTES INDIVIDUALES DEL SISTEMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN DE nvPM

### 6.1—Datos necesarios

——— Para calcular el rendimiento de transporte de partículas dentro de un rango de tamaños se necesitan las características del flujo, el conducto de transporte y las condiciones ambiente. Esos parámetros, definidos para cada sección del conducto, se enumeran en la Tabla A8-2.

**Tabla A8-2. Parámetros de entrada**

Símbolo del parámetro	Descripción	Unidades
$T_i$	Temperatura del gas portador en la entrada del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo, excepto la parte de recolección. Se supone igual a la temperatura de la pared de cada sección del conducto de transporte y constante a lo largo del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	$^{\circ}\text{C}$
$P_i$	Presión del gas portador en el $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo, que se supone que es constante a lo largo de la $i^{\text{a}}$ sección y equivalente a 101,325 kPa	kPa
$Q_i$	Gasto del flujo del gas portador a lo largo del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	slpm
$ID_{ii}$	Diámetro interno del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	mm
$L_i$	Longitud del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	M
$\theta_{ii}$	Ángulo total de las curvas del $i^{\text{ef}}$ -segmento del conducto de muestreo	grados
$\eta_{VPR(15)}, \eta_{VPR(30)}, \eta_{VPR(50)}, \eta_{VPR(100)}$	Coefficientes de penetración del VPR a cuatro diámetros de partículas	adimensional
$\eta_{CPC(10)}, \eta_{CPC(15)}$	Rendimiento de conteo del CPC a dos diámetros de partículas	adimensional

## 6.2 Coeficientes de penetración por difusión

6.2.1 La difusión de partículas en la superficie de las paredes de la tubería del sistema de muestreo implica la pérdida de partículas que ingresan en un segmento del conducto de muestreo o de un componente. Los coeficientes de penetración,  $\eta_i(D_m)$ , por pérdidas por difusión en secciones hasta las entradas de los instrumentos,  $\eta_i(D_m)$ ,  $i=1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  se calculan mediante la expresión:

$$\eta_i(D_m) = e^{\frac{-0,6 \times \pi \times ID_{ti} \times L_i \times V_{diff}}{Q_i}}$$

donde

$L_i$  = longitud del  $i^{\text{er}}$  segmento del conducto de muestreo, m

$V_{diff} = 1,18 \times Re^{0,875} \times Sc^{0,333} \times \frac{D}{ID_{ti}}$ , velocidad de deposición, cm/s

$Sc = \frac{\mu}{\rho_{gas} D} \times 10^3$ , número de Schmidt del gas portador

$m_{gas} = 29,0$  kg/mol, masa molecular del gas portador

$P_i$  = presión del gas portador, kPa (según hipótesis es de 101,325 kPa).

6.2.2. **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de  $0,003 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  por pérdidas por difusión en cada sección pertinente del conducto.

## 6.3 Termoforesis

**Recomendación.** Se debería utilizar una penetración constante por termoforesis en la entrada del instrumento,  $\eta_{th-m}(D_m) = 1$  para el nvPM<sub>m</sub> y se debería usar  $\eta_{th-n}(D_m) = 1$  para el nvPM<sub>n</sub> respecto de todos los tamaños de partículas.

## 6.4 Pérdida de partículas en curvas

6.4.1 **Recomendación.** Se distingue el coeficiente de penetración debido a pérdidas en las curvas  $\eta_{bt}(D_m)$ ,  $i=1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  para el flujo turbulento,  $Re$  mayor a 5000, y el flujo laminar,  $Re$  menor o igual a 5000, donde  $Re$  corresponde al número de Reynolds. Para el flujo laminar cuando  $Re$  es menor o igual a 5000, se debería calcular la penetración debida a las curvas en los conductos de transporte como

$$\eta_{bt} = 1 - 0,01745 \times Stk \times \theta_{bt}$$

Para el flujo turbulento cuando  $Re$  es mayor a 5000, se debería calcular la penetración debida a las curvas en los conductos de transporte como:

$$\eta_{bt} = e^{-0,04927 \times Stk \times \theta_{bt}}$$

donde

$$Stk = \frac{Q_i \times C_e \times \rho \times D_m^2 \times 10^{-3}}{27 \times \pi \times \mu \times 10^3 D_{st}^2}, \text{ el número de Stokes, que es adimensional}$$

$\theta_{bi}$  = Ángulo total de las curvas del  $i^{\text{er}}$  segmento del conducto de muestreo, grados

——— 6.4.2 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  por pérdidas en curvas en cada sección pertinente del sistema de muestreo y medición.

## 6.5 Función de penetración del separador ciclónico

——— 6.5.1 **Recomendación.** Se debería estimar la función de penetración del separador ciclónico mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{eye}(D_m) = 1 - \int_{x>0}^{D_m} \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu_{eye})^2}{2\sigma_{eye}^2}}}{x \sigma_{eye} \sqrt{2\pi}} dx$$

donde

$$\mu_{eye} = \ln(D_{50}), \text{ y}$$

$$\sigma_{eye} = \ln(D_{10}/D_{90})^{0.5}$$

——— 6.5.2 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  en relación con la función de penetración del separador ciclónico. El separador ciclónico en el sistema de muestreo y análisis de nvPM tiene las siguientes especificaciones:

- a) Punto de corte:  $D_{50} = 1,0 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  y
- b) Eficacia:  $(D_{10}/D_{90})^{0.5}$  menor o igual a 1,25.

——— Nota 1. Los programas de hoja de cálculo modernos tienen incorporada la distribución logarítmica normal acumulativa en su biblioteca de funciones que se puede emplear para generar la función de penetración del separador ciclónico.

——— Nota 2. En la mayoría de las aplicaciones de motores de turbinas de gas, el valor de  $D_m$  será inferior a 0,3  $\mu\text{m}$ . En esos casos, la función de penetración del separador ciclónico será efectivamente igual a 1,0.

## 6.6 Función de penetración del VPR

——— Nota. Se puede utilizar una función continuamente diferenciable brindada por el laboratorio de calibración, que tiene resultados de bondad del ajuste ( $R^2$  mayor a 0,95) para los cuatro puntos de penetración de la calibración del VPR (Tabla A8-3) en lugar de la función determinada a partir del procedimiento de cálculo que se describe a continuación. Las pérdidas de partículas en el VPR se deben tanto

a la difusión como a la termoforesis. El factor de termoforesis,  $\eta_{VPRth}$ , es una constante. El factor de difusión,  $\eta_{VPRd}$ , está determinado a partir de pérdidas normalizadas de partículas debido a la difusión en flujo laminar.

6.6.1 **Recomendación.** Se debería estimar la función de penetración total del VPR mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{VPR} = \eta_{VPRth} \times \begin{cases} 1 - 5.5 \times \psi^{\frac{2}{3}} + 3.77 \times \psi & \psi < 0.007 \\ 0.819 \times e^{-11.5\psi} + 0.0975 \times e^{-70.1\psi} + 0.0325 \times e^{-179\psi} & \psi > 0.007 \end{cases}$$

donde

$$\psi = \frac{6 \times D \times L_{VPR}}{Q_{VPR}}, \text{ parámetro de deposición}$$

$L_{VPR}$  = longitud efectiva del VPR, m

$Q_{VPR}$  = flujo del gas portador en el VPR, slpm

$T_{VPR}$  = temperatura del VPR, °C

$\eta_{VPRth}$  = pérdida por termoforesis del VPR

6.2.2 **Recomendación.** Se debería ajustar la función de penetración del VPR ( $\eta_{VPR}$ ) a los cuatro puntos de penetración medidos haciendo variar la longitud efectiva del VPR ( $L_{VPR}$ ) y el factor de pérdida por termoforesis ( $\eta_{VPRth}$ ). El valor  $R^2$  debería ser mayor a 0,95 para garantizar un buen ajuste a las penetraciones medidas.

6.6.3 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  en relación con la función continua del VPR.

**Tabla A8-3. Coeficientes mínimos permitidos de penetración del VPR a cuatro diámetros de partículas**

Diámetro de movilidad eléctrica de una partícula, $D_m$	0,015 $\mu\text{m}$	0,03 $\mu\text{m}$	0,05 $\mu\text{m}$	0,1 $\mu\text{m}$
Coefficiente mínimo de penetración, $\eta_{VPR}(D_m)$	0,30	0,55	0,65	0,70

### 6.7 Coeficiente de penetración del equipo de dilución 1

6.7.1 **Recomendación.** Se debería utilizar una penetración constante del equipo de dilución 1,  $\eta_{dil}(D_m) = 1$  para todos los tamaños de partículas.

6.7.2 **Recomendación.** Se deberían emplear coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) dentro del rango de 0,003  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  para la función de penetración del equipo de dilución.

### 6.8 Rendimiento de conteo del CPC

6.8.1 **Recomendación.** Se debería determinar una función continua para el rendimiento de conteo del CPC mediante los dos rendimientos de conteo del CPC especificados con dos parámetros de la función sigmoide mediante la expresión:

$$\eta_{CPC} = 1 - e^{-\ln(2) \cdot \frac{D_m - D_0}{D_{50} - D_0}}$$

donde

$$D_0 = \frac{\alpha_{10} D_{15} - \alpha_{15} D_{10}}{\alpha_{10} - \alpha_{15}}$$

$$D_{50} = \frac{(\alpha_{15} + 1) D_{10} + (\alpha_{10} + 1) D_{15}}{\alpha_{15} - \alpha_{10}}$$

$$\alpha_i = \frac{\ln(1 - \eta_{CPC,i})}{\ln(2)}, i = 0,01 \mu\text{m} \text{ o } 0,015 \mu\text{m}$$

$$D_{10} = 0,01 \mu\text{m},$$

$$D_{15} = 0,015 \mu\text{m},$$

$$\eta_{CPC,10} = \text{rendimiento de conteo a } 0,01 \mu\text{m},$$

$$\eta_{CPC,15} = \text{rendimiento de conteo a } 0,015 \mu\text{m}.$$

6.8.2 **Recomendación.** Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos ( $D_m$ ) dentro del rango de  $0,003 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  en relación con la función de continua del CPC.

## 3. DATOS NECESARIOS

### 3.1 Emisiones de nvPM

Para calcular los factores de corrección por pérdidas en el sistema, se necesitan las concentraciones siguientes especificadas en el Apéndice 7:

a) Concentración de nvPM en masa:  $\text{nvPM}_{\text{mass\_STP}}$ ;

b) Concentración de nvPM en número:  $\text{nvPM}_{\text{num\_STP}}$ .

### 3.2 Otra información

Para ejecutar el procedimiento de cálculo se necesita la información adicional indicada en el Adjunto D del Apéndice 7.

## 4. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN POR PÉRDIDAS DE nvPM EN EL SISTEMA

### 4.1 Descripción

*Nota.- El diagrama de la Figura A8-1 da una visión de conjunto de la metodología para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema.*

4.1.1 Los factores de corrección por pérdidas del sistema se estimarán partiendo de los siguientes supuestos: que la nvPM del EENEP está representada por un valor constante de densidad efectiva de la nvPM, una distribución logarítmica, un valor fijo de desviación geométrica estándar, sin coagulación, limitando las concentraciones de nvPM en masa y número como se describe en la sección dedicada a las limitaciones del método de cálculo, y un tamaño mínimo de partícula por sumatoria de 10 nm.

4.1.1.1 En la metodología de corrección por pérdidas del sistema se usará una densidad efectiva de partículas de  $1 \text{ g/cm}^3$ .

4.1.1.2 En la metodología de corrección por pérdidas del sistema se usará una distribución logarítmica unimodal con desviación geométrica estándar de 1,8.

4.1.1.3 La metodología de corrección por pérdidas del sistema no considera la reducción de la concentración de nvPM en número por coagulación.

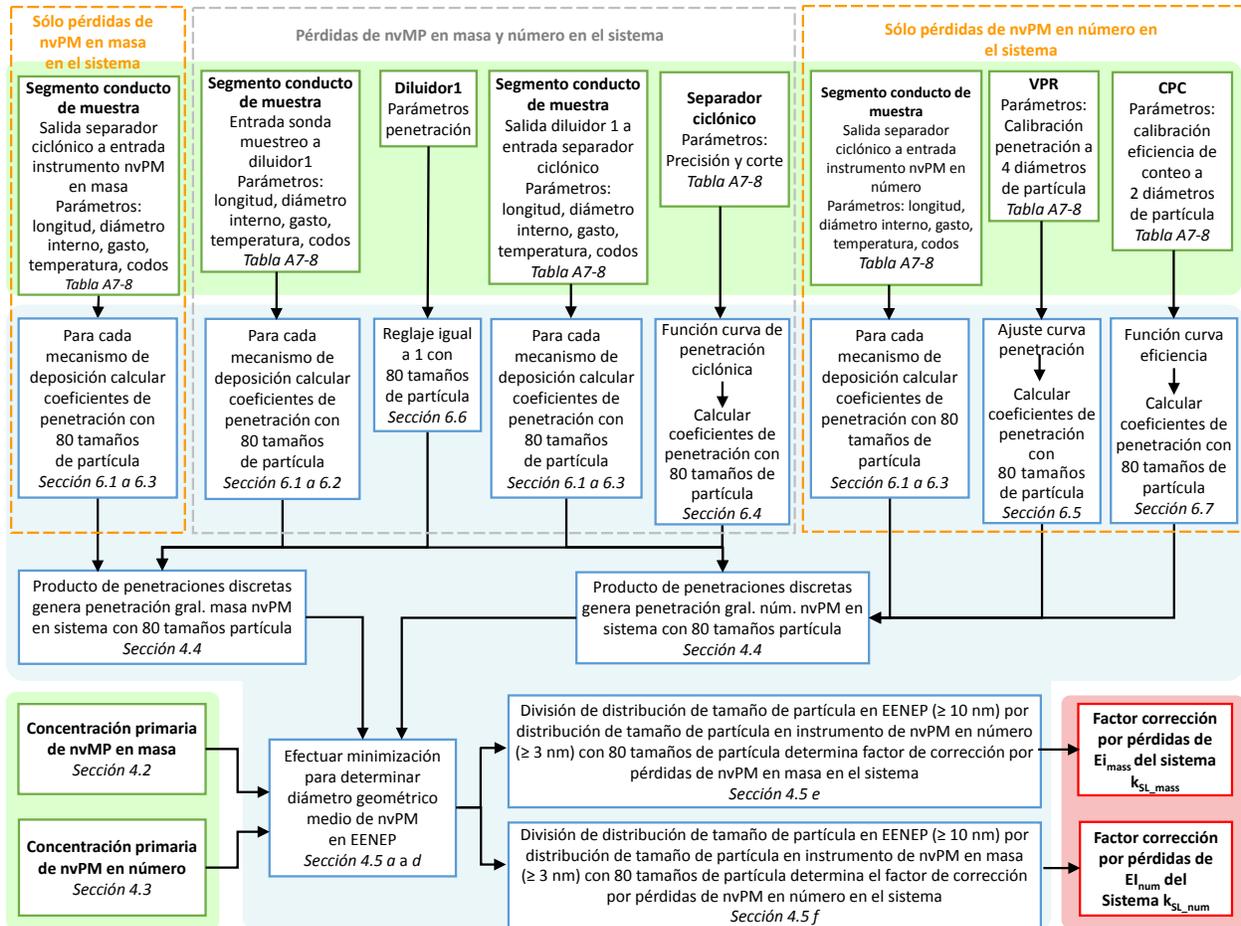
4.1.1.4 Si la concentración de nvPM en número en el EENEP que se calcula aplicando:

$$k_{\text{SL\_num}} \times k_{\text{thermo}} \times \text{DF}_1 \times \text{DF}_2 \times \text{nvPM}_{\text{num\_STP}}$$

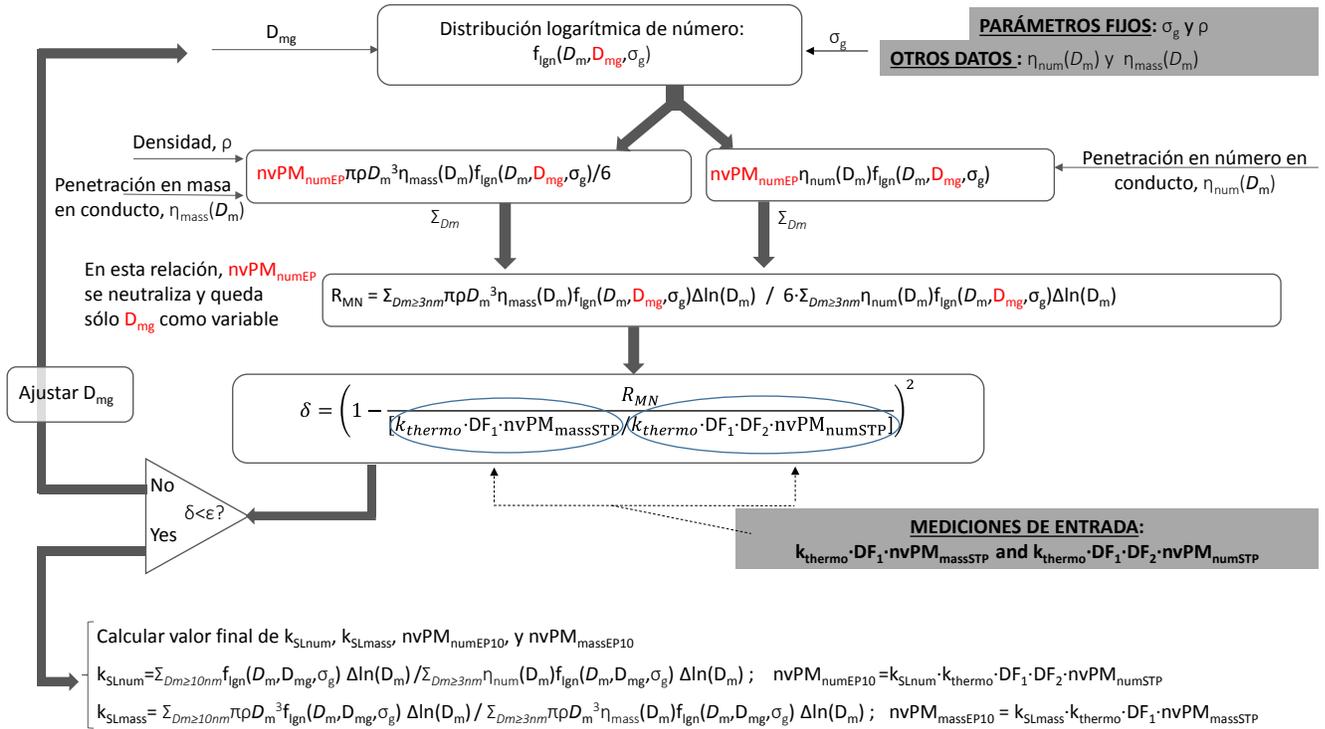
excede de  $10^8$  partículas/cm<sup>3</sup>, es posible que se produzca coagulación y esta circunstancia se notificará a la autoridad encargada de la certificación.

*Nota 1.— La metodología de corrección por pérdidas del sistema no considera derivas de penetración. Esto no se considera de importancia para los sistemas de medición de nvPM que se ajustan al Apéndice 7.*

*Nota 2.— El procedimiento iterativo de cálculo se ilustra en la Figura A8-2.*



**Figura A8-1. Ilustración por diagrama de bloques de la metodología de corrección por pérdidas del sistema. Los bloques verdes son los parámetros de entrada del modelo y los azules los cálculos. Los bloques con contorno rojo ilustran los factores de corrección por pérdidas del sistema calculados.**



**Figura A8-2: Diagrama del procedimiento iterativo de cálculo para determinar los factores de corrección por pérdidas del sistema**

## 4.2 Concentración primaria de nvPM en masa

La concentración primaria de nvPM en masa ( $nvPM_{mass}$ ) se calcula con la ecuación siguiente, que se define en el Apéndice 7:

$$nvPM_{mass} = k_{thermo} \times DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}$$

## 4.3 Concentración primaria de nvPM en número

La concentración primaria de nvPM en número ( $nvPM_{num}$ ) representa el número de partículas por unidad de volumen de muestra de escape del motor corregido por el factor de dilución de la primera etapa ( $DF_1$ ) y el factor de dilución de la segunda etapa ( $DF_2$ ) y la pérdida termoforética de partículas en la Parte de recolección. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$nvPM_{num} = k_{thermo} \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP}$$

#### 4.4 Funciones de la penetración de nvPM

4.4.1 El coeficiente de penetración del sistema de muestreo es producto de las funciones individuales de la penetración y la eficiencia de conteo, y se calculará siguiendo los procedimientos que se describen en la Sección 6. En la Tabla A8-1 se dan las funciones de la penetración y la eficiencia de conteo de nvPM que se requieren.

4.4.2 La penetración del sistema de muestreo correspondiente al nvPM<sub>mi</sub> con una partícula de diámetro  $D_m$  es:

$$\eta_{\text{mass}}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \dots \times \eta_{\text{dil}} \times \eta_{\text{cyc}}$$

4.4.3 La penetración del sistema de muestreo correspondiente al nvPM<sub>ni</sub> con una partícula de diámetro  $D_m$  es:

$$\eta_{\text{num}}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \dots \times \eta_{\text{dil}} \times \eta_{\text{cyc}} \times \eta_{\text{VPR}} \times \eta_{\text{CPC}}$$

4.4.4 La penetración termoforética del sistema de muestreo de nvPM en masa y número sin importar el tamaño de las partículas es:

$$\eta_{\text{thermo}} = \eta_{\text{th1}} \times \eta_{\text{th2}} \times \eta_{\text{th3}} \times \dots$$

*Nota.— La pérdida termoforética en la Parte de recolección,  $k_{\text{thermo}}$ , se especifica en el Apéndice 7, 6.2.1, y no se incluye en este cálculo.*

**Tabla A8-1. Coeficientes de penetración requeridos de los componentes del sistema de muestreo y medición de nvPM**

Símbolo	Descripción de las funciones de transporte de partículas del sistema de muestreo y medición de nvPM
$\eta_i(D_m)$	Coefficiente de penetración por difusión del $i^{\text{ésimo}}$ segmento del sistema de muestreo
$\eta_{bi}(\Theta_i)$	Coefficiente de penetración por curvas en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del sistema de muestreo
$\eta_{\text{th}i}$	Coefficiente de penetración por termoforesis en el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del sistema de muestreo
$\eta_{\text{dil}}(D_m)$	Coefficiente de penetración del diluidor 1
$\eta_{\text{cyc}}(D_m)$	Coefficiente de penetración del separador ciclónico
$\eta_{\text{VPR}}(D_m)$	Coefficiente de penetración del VPR
$\eta_{\text{CPC}}(D_m)$	Eficiencia de conteo del CPC

#### 4.5 Cálculo de los factores de corrección por pérdidas del sistema

Los factores de corrección por pérdidas del sistema correspondientes a la masa de nvPM ( $k_{SL\_mass}$ ) y el número de nvPM ( $k_{SL\_num}$ ) se calcularán siguiendo un procedimiento iterativo:

- a) Estimar un valor inicial del diámetro geométrico medio con la ecuación:

$$D_{mg} = \sqrt[3]{\frac{6 \times DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}}{\pi \times \rho \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP}}} \times 10^3$$

*Nota.*— Al usar las unidades definidas para los datos de entrada, el diámetro de partícula calculado quedará expresado en nm.

- b) Con el valor de  $D_{mg}$  determinado en el paso a), calcular la relación estimada entre masa de nvPM y número de nvPM,  $R_{MN}(D_{mg})$ , con la siguiente ecuación:

$$R_{MN}(D_{mg}) = \frac{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{mass}(D_m) \times \frac{\pi D_m^3}{6} \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{num}(D_m) \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}$$

donde las funciones exponenciales derivan de la función de distribución logarítmica,

$$f_{lgn}(D_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_g)} \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2}$$

$\Delta \ln(D_m) = \frac{1}{n} \times \frac{1}{\log_{10}(e)}$ , es la amplitud de un intervalo de tamaño en el logaritmo natural en base e; e es el número de Euler, y n es el número de intervalos de tamaño de partícula por década.

- c) Determinar la diferencia relativa elevada al cuadrado,  $\delta$ , entre la relación masa/número de nvPM medida y estimada con:

$$\delta = \left\{ 1 - \frac{R_{MN}(D_{mg}) \times 10^{-9}}{[(k_{thermo} \times DF_1 \times nvPM_{mass\_STP}) / (k_{thermo} \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num\_STP})]} \right\}^2$$

- d) Repetir los pasos b) y c) hasta que  $\delta$  se reduzca a menos de  $1 \times 10^{-9}$ . El valor  $D_{mg}$  correspondiente a tal valor minimizado de  $\delta$  se utilizará entonces para calcular los factores de corrección por pérdidas del sistema.

- e) Calcular el factor de corrección por pérdidas de nvPM en masa del sistema con la ecuación:

$$k_{SL\_mass} = \frac{\sum_{D_m > 10nm}^{1000nm} D_m^3 \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{mass}(D_m) \times D_m^3 \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}$$

Si se multiplica  $EI_{mass}$  por  $k_{SL}$ , se obtiene el índice de emisión de nvPM corregido por pérdidas del sistema.

f) Calcular el factor de corrección por pérdidas de nvPM en número del sistema con la ecuación:

$$k_{SL\_num} = \frac{\sum_{D_m > 10nm}^{1000nm} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}{\sum_{D_m > 3nm}^{1000nm} \eta_{num}(D_m) \times e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(D_m) - \ln(D_{mg})}{\ln(\sigma_g)} \right\}^2} \times \Delta \ln(D_m)}$$

Si se multiplica  $EI_{mass}$  por  $k_{SL}$ , se obtiene el índice de emisión de nvPM corregido por pérdidas del sistema.

g) Se usarán en este cálculo un mínimo de 80 tamaños discretos dentro del rango de tamaños de partícula de 3 nm a 1000 nm o un número mínimo de intervalos que puedan producir resultados equivalentes, según lo disponga la autoridad encargada de la certificación.

*Nota 1.— Para 80 tamaños discretos, el número de intervalos de tamaño por década, n, es 32 [véase la definición de  $\Delta \ln(D_m)$  más arriba].*

*Nota 2.— Las sumatorias para calcular los factores de corrección por pérdidas del sistema comienzan en 10 nm en el numerador y 3 nm en el denominador.*

*Nota 3.— El procedimiento de cálculo puede ejecutarse usando programas de computación disponibles en el comercio.*

## 5. NOTIFICACIÓN Y LIMITACIONES

*Nota 1.— Se ha demostrado que el método de cálculo de los factores de corrección por pérdidas del sistema que se describe en el Apéndice 8, sección 4, arroja resultados aceptables con una amplia gama de concentraciones de nvPM en masa y número observadas en las emisiones de nvPM de los motores de turbina de las aeronaves. Sin embargo, se han detectado concentraciones en masa y número de nvPM que proporcionan datos de entrada para el análisis con una fidelidad que puede ser insuficiente para que el método de cálculo arroje resultados de calidad.*

*Nota 2.— Cualquier variación respecto de los supuestos en los que se basa el método de cálculo según lo establecido en la sección 4.1.1 de este apéndice puede derivar en una variación de los factores de corrección por pérdidas del sistema. De manera similar, cualquier variación en los datos usados en el cálculo arrojará variaciones en los factores de corrección por pérdidas del sistema. Las variaciones en los datos podrían ser consecuencia de las distribuciones de tamaño de partícula, el sistema de muestreo o los instrumentos. Igualmente, los artefactos de muestreo y medición pueden invalidar el factor de corrección por pérdidas del sistema, por ejemplo, por desprendimiento de las paredes si las concentraciones son bajas. Las limitaciones del método obedecen a variaciones en los datos de entrada más que al método de cálculo en sí.*

### 5.1 Gamas de concentración en masa aplicables

*Nota.— Cuando las concentraciones de nvPM en masa en estado puro (no corregidas por dilución) en el nvPMmi son inferiores a  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se requiere prudencia al usar el método para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema por la posibilidad de incertidumbre en la determinación de la concentración de nvPM en masa a valores tan bajos.*

5.1.1 Si las concentraciones en masa en estado puro en el nvPMmi son inferiores a  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el solicitante confirmará que el  $D_{\text{mg}}$  en el EENEP está dentro de la gama aplicable que se define en 5.3.

5.1.2 **Recomendación.**— *En aquellos casos en que los cálculos de este Apéndice u otros métodos equivalentes no arrojen valores razonables como se indica en 5.3 (por ejemplo, cuando la metodología de cálculo de pérdidas del sistema genera diámetros geométricos medios inferiores a 7 nm o superiores a 100 nm), o ante la falta de convergencia de la metodología de cálculo de las pérdidas del sistema, deberían usarse otros medios alternativos para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema para las modalidades de utilización en el LTO, con la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.*

*Nota.*— *No hay actualmente limitaciones conocidas provocadas por altas concentraciones de nvPM en masa, siempre que se verifique que las lecturas de las concentraciones de nvPM en masa se mantienen dentro de la gama del nvPMmi que se utilice.*

## 5.2 Gamas de concentración en número aplicables

5.2.1 Si se determina que la concentración medida de nvPM en número en el nvPMni, tras la corrección por dilución (tanto DF1 como DF2) y pérdida termoforética en la Parte de recolección, es inferior o igual a la concentración medida en número de nvPM ambiente<sup>1</sup>, el solicitante confirmará que el  $D_{\text{mg}}$  del EENEP está dentro de la gama aplicable que se define en 5.3.

5.2.2 **Recomendación.**— *En aquellos casos en que los cálculos de este apéndice u otros métodos equivalentes no arrojen valores razonables como se indica en 5.3 (por ejemplo, cuando la metodología de cálculo de pérdidas del sistema genera diámetros geométricos medios inferiores a 7 nm o superiores a 100 nm), o ante la falta de convergencia de la metodología de cálculo de las pérdidas del sistema, deberían usarse otros medios alternativos para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema para las modalidades de utilización en el LTO, con la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.*

*Nota.*— *Para el nvPMni, no hay actualmente limitaciones conocidas provocadas por bajas concentraciones en número de nvPM. Los fabricantes del CPC informan que el LOD del CPC es de aproximadamente 1 partícula/ $\text{cm}^3$ . Las mediciones de altas concentraciones en número se ven limitadas por el requisito de que el CPC se mantenga en modo de conteo unitario. Si las concentraciones en número de nvPM en el EENEP exceden  $10^8$  partículas/ $\text{cm}^3$ , es posible que se esté en presencia de una coagulación de las partículas. El método de cálculo de pérdidas en el sistema no considera la coagulación.*

## 5.3 Diámetros geométricos medios predichos aplicables

*Nota.*— *Se prevé que el diámetro geométrico medio de nvPM en el EENEP proveniente de las turbinas de gas de aeronave se ubique entre 7 y 100 nm.*

5.3.1 Si el método de cálculo de pérdidas del sistema predice un diámetro geométrico medio en el EENEP inferior a 7 nm o superior a 100 nm, y/o un diámetro geométrico medio en el EENEP con el que no se cumpla el criterio de convergencia ( $\delta$  es superior a  $1 \times 10^{-9}$ ), los resultados de  $k_{\text{SL\_mass}}$  y  $k_{\text{SL\_num}}$  se examinarán con la autoridad encargada de la certificación.

<sup>1</sup> Véase el Adjunto E del Apéndice 7.

**5.3.2 Recomendación.**— *En aquellos casos en que los cálculos de este apéndice u otros métodos equivalentes no arrojen valores razonables (por ejemplo, cuando la metodología de cálculo de pérdidas del sistema genera diámetros geométricos medios inferiores a 7 nm o superiores a 100 nm), o ante la falta de convergencia de la metodología de cálculo de las pérdidas del sistema, deberían usarse otros medios alternativos para estimar los factores de corrección por pérdidas del sistema para las modalidades de utilización en el LTO, con la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.*

*Nota.*— *Un diámetro geométrico medio calculado en el EENEP que sea <20 nm provocará que se subestimen los factores de pérdida en el sistema en razón del valor de corte mínimo de la suma de tamaños de partícula. La subestimación puede ser apreciable en el caso de  $k_{SL\_num}$  si el  $D_{mg}$  en el EENEP es  $\leq 10$  nm.*

## **6. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE PENETRACIÓN DE COMPONENTES INDIVIDUALES DEL SISTEMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN DE nvPM**

Para estimar la eficiencia de transporte de nvPM con una gama de tamaños de partícula, se calcularán los coeficientes de penetración de cada componente del sistema de muestreo y medición de nvPM en un mínimo de 80 tamaños discretos de partícula u otro número mínimo de tamaños discretos de partícula que produzca un resultado equivalente, con el acuerdo de la autoridad encargada de la certificación en la gama de 3 nm a 1000 nm.

*Nota 1.*— *Cuando se calculen funciones continuas para estimar los coeficientes de penetración, las funciones no han de ser inferiores a cero.*

*Nota 2.*— *Los parámetros del sistema de muestreo y medición de nvPM que se requieren para ejecutar los cálculos de los coeficientes de penetración de este apéndice figuran en el Adjunto D del Apéndice 7.*

### **6.1 Coeficientes de penetración por difusión en los segmentos**

Los valores de la penetración,  $\eta_i(D_m)$ , por pérdidas por difusión en los segmentos del sistema de muestreo al tamaño  $D_m$  de movilidad eléctrica de las partículas se calculan con la expresión:

$$\eta_i(D_m) = e^{\frac{-\pi \times ID_{ti} \times L_i \times V_{d,diff}}{Q_i}}$$

donde:

$L_i$	longitud del $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, m
$V_{d,diff}$	$0,0118 \times Re^{\frac{7}{8}} \times Sc^{\frac{1}{3}} \times D / ID_{ti}$ , la velocidad de deposición, cm/s
$Sc$	$\frac{\mu}{\rho_{gas} D} \times 10^3$ , el número de Schmidt del gas portador
$ID_{ti}$	diámetro interno del $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, mm
$Q_i$	gasto del gas portador por el $i^{\text{ésimo}}$ segmento del conducto de muestreo, lspm

## 6.2 Coeficientes de penetración en las curvas de los segmentos

Los coeficientes de penetración en curvas se diferencian entre el flujo turbulento, donde  $Re$  es superior a 5 000, y el flujo laminar, donde  $Re$  es inferior o igual a 5 000, siendo  $Re$  el número de Reynolds. Para el flujo laminar (incluido el régimen de transición), la penetración por curvas en los conductos de transporte de la muestra en cada segmento a un tamaño de movilidad eléctrica de partícula  $D_m$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\eta_{bi}(D_m) = 1 - 0,01745 \times Stk \times \theta_{bi}$$

Para el flujo turbulento, la penetración por curvas en los conductos de transporte de la muestra se calculará así:

$$\eta_{bi}(D_m) = e^{-0,004927 \times Stk \times \theta_{bi}}$$

donde

$$Stk = \frac{Q_i \times C_c \times \rho \times D_m^2 \times 10^{-3}}{27 \times \pi \times \mu \times ID_{ti}^3}, \text{ el número adimensional de Stokes}$$

$\theta_{bi}$  ángulo total de curvas en el  $i^{\text{ésimo}}$  segmento del conducto de muestreo, grados

## 6.3 Pérdidas termofóreticas en los segmentos

Los gradientes térmicos que se producen cuando las temperaturas de las paredes del conducto de muestreo son inferiores a las temperaturas de los gases provocan deposición adicional de partículas, o pérdidas termofóreticas, sobre las superficies del conducto de muestreo. Las pérdidas termofóreticas, excepto las que se producen en la Parte de recolección, se calculan con:

$$\eta_{thi} = \left[ \frac{T_{linei} + 273,15}{T_{gasi} + 273,15} \right]^{Pr \times K_{th}} \times \left[ 1 + \left( \frac{T_{gasi} + 273,15}{T_{linei} + 273,15} - 1 \right) \times e^{-\frac{\pi \times ID_i \times h_{gas} \times L_i}{\rho_{gas} \times Q_i \times C_p}} \right]^{Pr \times K_{th}}$$

donde

$T_{gasi}$	temperatura de los gases de la muestra en °C
$T_{linei}$	temperatura de las paredes del conducto en °C
$h_{gas}$	coeficiente de transferencia de calor por convección del gas portador [W/(m <sup>2</sup> K)]
$C_p$	calor específico del gas portador a presión constante [J/(kg K)]
$Pr$	número de Prandtl

$$K_{th} = \frac{2 \times C_s \times C_c}{1 + 3 \times C_m \times K_n} \left[ 2 + \frac{1}{\left( \frac{k_{gas}}{k_p} \right) + C_t \times K_n} \right]^{-1}, \text{ el coeficiente termofóretico}$$

$C_s$	1,17, coeficiente de deslizamiento
$C_m$	1,14, cantidad de movimiento de hollín
$C_t$	2,18, coeficiente térmico
$k_{gas}$	conductividad térmica del gas portador (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$K_n$	$2\lambda/D_m$ , número de Knudsen
$k_p$	0.2 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> , conductividad térmica de la partícula

*Nota.*— Las pérdidas termoforéticas en la Parte de recolección y el VPR se consideran en la forma establecida en el Apéndice 7, 6.2.1 y 1.5 de este adjunto. Los sistemas conformes a las especificaciones del Apéndice 7 usan instrumentos y segmentos que actualmente no necesitan corregirse por pérdidas termoforéticas, y consecuentemente  $\eta_{th}$  en la práctica equivaldrá a 1,0.

#### 6.4 Función de penetración en el separador ciclónico

La función de penetración del separador ciclónico se estimará con la siguiente expresión:

$$\eta_{cyc}(D_m) = 1 - \int_{x>0}^{D_m} \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu_{cyc})^2}{2\sigma_{cyc}^2}}}{x\sigma_{cyc}\sqrt{2\pi}} dx$$

donde

$$\begin{aligned} \mu_{cyc} & \ln(D_{50}), \text{ y} \\ \sigma_{cyc} & \ln(D_{16}/D_{84})^{0,5} \end{aligned}$$

*Nota 1.*— Los programas de hoja de cálculo modernos tienen entre sus funciones la distribución logarítmica acumulativa, que pueden servir para generar la función de penetración del separador ciclónico.

*Nota 2.*— En la mayoría de los usos del motor de turbina de gas,  $D_m$  será inferior a 300 nm. En tales casos, la función de penetración del separador ciclónico será en la práctica equivalente a 1,0.

#### 6.5 Función de penetración en el VPR

*Nota.*— Podría usarse una función continuamente diferenciable facilitada por el laboratorio de calibración que tenga bondad de ajuste ( $R^2$  superior a 0,95) para los cuatro puntos de penetración de calibración en el VPR en reemplazo de la función determinada siguiendo el procedimiento de cálculo que sigue.

Las pérdidas de partículas en el VPR se producen tanto por difusión como por termoforesis. El factor termoforético,  $\eta_{VPRth}$ , es una constante. El factor de difusión,  $\eta_{VPRdi}$ , va determinado por las pérdidas estándar de partículas debidas a la difusión en flujo laminar. La función de penetración total en el VPR se estimará usando la expresión:

$$\eta_{VPR} = \eta_{VPRth} \times \begin{cases} 1 - 5,5 \times \psi^{\frac{2}{3}} + 3,77 \times \psi & \psi < 0,007 \\ 0,819 \times e^{-11,5\psi} + 0,0975 \times e^{-70,1\psi} + 0,0325 \times e^{-179\psi} & \psi > 0,007 \end{cases}$$

donde

$$\begin{aligned} \psi & \frac{D \times L_{VPR} \times 100}{Q_{VPR}}, \text{ parámetro de deposición} \\ L_{VPR} & \text{ longitud efectiva del VPR, m} \\ Q_{VPR} & \text{ flujo del gas portador en el VPR, lspm} \\ T_{VPR} & \text{ temperatura del VPR, } ^\circ\text{C} \\ \eta_{VPRth} & \text{ pérdida termoforética en el VPR} \end{aligned}$$

La función de penetración en el VPR ( $\eta_{VPR}$ ) se ajustará a los cuatro puntos de penetración medidos variando la longitud efectiva del VPR ( $L_{VPR}$ ) y el factor de pérdida termoforética ( $\eta_{VPRth}$ ). El ajuste se calculará minimizando  $\delta_{VPR}$ , la diferencia cuadrática relativa entre la penetración medida en el VPR,  $\eta_{VPRmeas}$ , y la función de penetración calculada.

$$\delta_{VPR} = \sqrt{\sum_{D_m} \left( \frac{\eta_{VPRmeas}(D_m) - \eta_{VPR}(D_m)}{\eta_{VPRmeas}(D_m)} \right)^2}$$

Se ha demostrado que un valor  $\delta_{VPR}$  inferior a 0,08 asegura un buen ajuste a las penetraciones medidas.

### 6.6 Función de penetración en el diluidor 1

Se usará una penetración constante del diluidor 1,  $\eta_{dil}(D_m) = 1$ , con todos los tamaños de partícula.

### 6.7 Eficiencia de conteo del CPC

Se determinará una función continua de eficiencia de conteo del CPC tomando los dos valores de eficiencia de conteo del CPC especificados con una función sigmoide de dos parámetros usando la expresión:

$$\eta_{CPC} = 1 - e^{-\ln(2) \times \left[ \frac{D_m - D_0}{D_{50} - D_0} \right]}$$

donde

$$D_0 = \frac{\alpha_{10} D_{15} - \alpha_{15} D_{10}}{\alpha_{10} - \alpha_{15}}$$

$$D_{50} = \frac{(\alpha_{15} + 1) D_{10} - (\alpha_{10} + 1) D_{15}}{\alpha_{15} - \alpha_{10}}$$

$$\alpha_i = \frac{\ln(1 - \eta_{CPC,i})}{\ln(2)}, i = 10 \text{ nm o } 15 \text{ nm}$$

$D_{10}$  10 nm,

$D_{15}$  15 nm,

$\eta_{CPC,10}$  eficiencia de conteo a 10 nm, y

$\eta_{CPC,15}$  eficiencia de conteo a 15 nm.

<p><i>Origen :</i></p> <p>CAEP/11</p>	<p><i>Razón de la enmienda:</i></p> <p>Con la propuesta de enmienda, se introducen los cambios consiguientes necesarios en todo el Volumen II del Anexo 16 para reflejar las normas propuestas de nvPM en masa y en número, para guardar la coherencia y para respaldar la norma de nvPM. La enmienda propuesta incluye las siguientes actualizaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• los procedimientos para la medición y el cálculo de niveles de emisión de nvPM en masa y en número y su conversión a los valores característicos;</li> <li>• la evaluación de la nvPM para inventario y modelización, como antes se había hecho para las emisiones gaseosas;</li> <li>• actualización de procedimientos de cumplimiento aplicables a emisiones de materia particulada para que sean coherentes con las nuevas normas de nvPM en masa y en número;</li> <li>• técnicas de instrumentación y medición de emisiones de nvPM para que sean coherentes con otros factores de emisión;</li> <li>• actualizaciones sobre las correcciones para pérdidas por dilución y termoforesis en la Parte de recolección del sistema de muestreo con el fin de ajustar adecuadamente los valores de nvPM en masa y en número medidos para cubrir las incertidumbres asociadas con los procedimientos de medición;</li> <li>• determinación de los coeficientes de penetración de los componentes individuales del sistema de muestreo y medición de la nvPM para calcular la eficiencia de emisión de la nvPM para partículas de varios tamaños;</li> <li>• como algunos combustibles tienen un contenido de azufre muy bajo del orden de las 5 – 10 ppm por masa (0,0005 – 0,001% de la masa), el contenido podría indicarse como cero si las unidades corresponden a un porcentaje (%) de la masa, como se requiere actualmente en el Volumen II del Anexo 16. Por esa razón, se decidió reemplazar la unidad por el contenido de azufre, indicando ppm por masa.</li> </ul> <p>Además, en la enmienda propuesta se recomienda fijar el 1 de enero de 2023 como fecha de aplicación final para la norma del índice de humo (SN) para motores de empuje nominal superior a 26,7 kN. Dado que la concentración de nvPM en masa se correlaciona con la visibilidad del penacho y, consiguientemente, con el SN, y que el límite de nvPM acordado por la CAEP/10 (como se indica actualmente en el Volumen II del Anexo 16) indica la limitación de la visibilidad prevista en la norma de SN, se puede poner fin a la aplicabilidad para la norma de SN.</p>
---------------------------------------	---

**PROPUESTA INICIAL F**  
**CUESTIONES TÉCNICAS GENERALES, DE NOMENCLATURA Y TIPOGRAFÍA**

...

## **PARTE I. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS**

### **CAPÍTULO 1. DEFINICIONES**

Las expresiones que siguen, utilizadas en el Volumen II de este Anexo, tienen los significados que se indican a continuación:

**Certificado de tipo.** Documento expedido por un Estado contratante para definir el diseño de un tipo de aeronave, motor o hélice y certificar que dicho diseño satisface los requisitos pertinentes de aeronavegabilidad del Estado.

*Nota 1.— En algunos Estados contratantes puede expedirse un documento equivalente al certificado de tipo para un tipo de motor o hélice.*

*Nota 2.— En algunos Estados contratantes el certificado de tipo también puede certificar que el diseño cumple los requisitos de emisiones de motores de aeronaves apropiados para ese Estado.*

**Empuje nominal.** A los efectos de las emisiones de los motores, significa el empuje de despegue máximo aprobado por la autoridad encargada de la certificación que ha de aplicarse en condiciones normales de operación y en condiciones estáticas al nivel del mar, a la atmósfera tipo internacional (ISA), y sin utilizar inyección de agua. El empuje se expresa en kilonewtons.

...

## **PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES**

...

### **CAPÍTULO 2. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES EXCLUSIVAMENTE A VELOCIDADES SUBSÓNICAS**

#### 2.1 Generalidades

...

##### 2.1.4 Condiciones de referencia

###### 2.1.4.1 *Condiciones atmosféricas*

Las condiciones atmosféricas de referencia para la performance del motor se basarán en la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar, pero la humedad absoluta de referencia será de 0,00634 kg de agua/kg de aire seco.

...

## CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

### 4.1 Generalidades

...

#### 4.1.4 Condiciones de referencia

##### 4.1.4.1 *Condiciones atmosféricas*

Las condiciones atmosféricas de referencia para el motor normal de referencia serán en atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar con la excepción de que el valor de referencia de la humedad ~~absoluta~~ será de 0,00634 kg de agua/kg aire seco.

<i>Origen :</i>	<i>Razón de la enmienda:</i>
CAEP/11	Todas las enmiendas propuestas son correcciones de errores técnicos menores en el Volumen II del Anexo 16 o para mantener la uniformidad.

-----

**FORMULARIO DE RESPUESTA  
PARA LLENAR Y DEVOLVER A LA OACI  
JUNTO CON LOS COMENTARIOS QUE PUEDA TENER  
SOBRE LAS ENMIENDAS PROPUESTAS**

A la: Secretaria General  
Organización de Aviación Civil Internacional  
999 Robert Bourassa Boulevard  
Montréal, Quebec  
Canadá, H3C 5H7

(Estado) \_\_\_\_\_

Marque (✓) en el recuadro correspondiente a la opción elegida para cada enmienda. Si elige las opciones “acuerdo con comentarios” o “desacuerdo con comentarios”, **proporcione sus comentarios en hojas independientes.**

	<i>Acuerdo sin comentarios</i>	<i>Acuerdo con comentarios*</i>	<i>Desacuerdo sin comentarios</i>	<i>Desacuerdo con comentarios</i>	<i>No se indica la postura</i>
Enmienda del Anexo 16 — <i>Protección del medio ambiente</i> , Volumen II — <i>Emisiones de los motores de las aeronaves</i> (véase el Adjunto A)					

\* “Acuerdo con comentarios” indica que su Estado u organización está de acuerdo con la intención y el objetivo general de la propuesta de enmienda; en los comentarios propiamente dichos podría incluir, de ser necesario, sus reservas respecto a algunas partes de la propuesta, presentar una contrapropuesta al respecto, o elegir ambas opciones.

Firma \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_