



OACI

Normas y métodos
recomendados internacionales

Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional

Protección del medio ambiente

Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves
Cuarta edición, julio de 2017



Esta edición reemplaza, desde el 1 de enero de 2018, todas las ediciones anteriores del Volumen II del Anexo 16.

Véase en el Preámbulo la información relativa a la aplicación de las normas y métodos recomendados.

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL



| OACI

Normas y métodos
recomendados internacionales

Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional

Protección del medio ambiente

Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves
Cuarta edición, julio de 2017

Esta edición reemplaza, desde el 1 de enero de 2018, todas las ediciones anteriores del Volumen II del Anexo 16.

Véase en el Preámbulo la información relativa a la aplicación de las normas y métodos recomendados.

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL

Publicado por separado en español, árabe, chino, francés, inglés y ruso,
por la ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL
999 Boulevard Robert-Bourassa, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7

La información sobre pedidos y una lista completa de los agentes de ventas
y libreros, pueden obtenerse en el sitio web de la OACI: www.icao.int.

Primera edición, 1981
Segunda edición, 1993
Tercera edición, 2008
Cuarta edición, 2017

Anexo 16 — Protección del medio ambiente
Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves

Núm. de pedido: AN16-2
ISBN 978-92-9258-240-1

© OACI 2017

Reservados todos los derechos. No está permitida la reproducción, de ninguna
parte de esta publicación, ni su tratamiento informático, ni su transmisión de
ninguna forma ni por ningún medio, sin la autorización previa y por escrito de
la Organización de Aviación Civil Internacional.

ENMIENDAS

La publicación de enmiendas se anuncia periódicamente en los suplementos del *Catálogo de productos y servicios*; el Catálogo y sus suplementos pueden consultarse en el sitio web de la OACI: www.icao.org. Las casillas en blanco facilitan la anotación de estas enmiendas.

REGISTRO DE ENMIENDAS Y CORRIGENDOS

[illegible][illegible]

ÍNDICE

	<i>Página</i>
Preámbulo	(ix)
Parte I. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS	I-1-1
CAPÍTULO 1. Definiciones	I-1-1
CAPÍTULO 2. Símbolos	I-2-1
Parte II. PURGA DE COMBUSTIBLE	II-1-1
CAPÍTULO 1. Administración	II-1-1
CAPÍTULO 2. Prevención de la purga voluntaria de combustible	II-2-1
Parte III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES	III-1-1
CAPÍTULO 1. Administración	III-1-1
CAPÍTULO 2. Motores turborreactores y turbofán proyectados para propulsar aeronaves exclusivamente a velocidades subsónicas	III-2-1
2.1 Generalidades	III-2-1
2.2 Humo	III-2-3
2.3 Emisiones gaseosas	III-2-3
2.4 Información requerida	III-2-5
CAPÍTULO 3. Motores turborreactores y turbofán proyectados para propulsar aeronaves a velocidades supersónicas	III-3-1
3.1 Generalidades	III-3-1
3.2 Humo	III-3-3
3.3 Emisiones gaseosas	III-3-3
3.4 Información requerida	III-3-3
CAPÍTULO 4. Emisiones de materia particulada	III-4-1
4.1 Generalidades	III-4-1
4.2 Emisiones de materia particulada no volátil	III-4-2
4.3 Información requerida	III-4-3

Parte IV. EVALUACIÓN DE MATERIA PARTICULADA NO VOLÁTIL PARA FINES DE INVENTARIO Y MODELIZACIÓN	IV-1-1
---	---------------

APÉNDICES

APÉNDICE 1. Medición de la relación de presión de referencia	AP 1-1
1. Generalidades	AP 1-1
2. Medición	AP 1-1
APÉNDICE 2. Evaluación de las emisiones de humo	AP 2-1
1. Introducción y definiciones	AP 2-1
2. Medición de las emisiones de humo	AP 2-1
3. Cálculo del índice de humo a base de los datos medidos	AP 2-6
4. Notificación de los datos a la autoridad encargada de la certificación	AP 2-6
APÉNDICE 3. Instrumentos y métodos de medición de las emisiones gaseosas	AP 3-1
1. Introducción	AP 3-1
2. Definiciones	AP 3-1
3. Datos necesarios	AP 3-2
4. Disposición general del sistema	AP 3-3
5. Descripción de los componentes	AP 3-3
6. Procedimientos a seguir al hacer el ensayo general	AP 3-5
7. Cálculos	AP 3-7
Adjunto A del Apéndice 3. Especificaciones del analizador de HC	AP 3-15
Adjunto B del Apéndice 3. Especificaciones de los analizadores de CO y de CO ₂	AP 3-17
Adjunto C del Apéndice 3. Especificaciones del analizador de NO _x	AP 3-19
Adjunto D del Apéndice 3. Gases de calibración y de ensayo	AP 3-21
Adjunto E del Apéndice 3. Cálculo de los parámetros de las emisiones — base, correcciones de la medición y método numérico de alternativa	AP 3-23
Adjunto F del Apéndice 3. Especificaciones en cuanto a los datos adicionales	AP 3-29
APÉNDICE 4. Especificación del combustible que ha de utilizarse en las pruebas de las emisiones de los motores de turbina	AP 4-1
APÉNDICE 5. Instrumentos y métodos de medición de las emisiones gaseosas de los motores de turbina de gas con postcombustión	AP 5-1
1. Introducción	AP 5-1
2. Definiciones	AP 5-1

	<i>Página</i>
3. Datos necesarios	AP 5-2
4. Disposición general del sistema	AP 5-3
5. Descripción de los componentes	AP 5-3
6. Procedimientos a seguir al hacer el ensayo general	AP 5-6
7. Cálculos	AP 5-8
Adjunto A del Apéndice 5. Especificaciones del analizador de HC	AP 5-17
Adjunto B del Apéndice 5. Especificaciones de los analizadores de CO y de CO ₂	AP 5-19
Adjunto C del Apéndice 5. Especificaciones del analizador de NO _x	AP 5-21
Adjunto D del Apéndice 5. Gases de calibración y de ensayo	AP 5-23
Adjunto E del Apéndice 5. Cálculo de los parámetros de las emisiones — base, correcciones de la medición y método numérico de alternativa	AP 5-25
Adjunto F del Apéndice 5. Especificaciones en cuanto a los datos adicionales	AP 5-31
APÉNDICE 6. Procedimiento para certificar el cumplimiento con respecto a emisiones gaseosas, humo y emisiones de materia particulada	AP 6-1
1. Generalidades	AP 6-1
2. Procedimiento para certificar el cumplimiento	AP 6-1
3. Procedimiento en caso de rechazo	AP 6-3
APÉNDICE 7. Instrumentos y métodos de medición de las emisiones de materia particulada no volátil.....	AP-7-1
1. Introducción	AP 7-1
2. Definiciones, siglas y símbolos	AP 7-1
3. Datos necesarios	AP 7-5
4. Disposición general del sistema de muestreo y medición de nvPM	AP 7-6
5. Procedimientos a seguir al hacer el ensayo general	AP 7-10
6. Cálculos	AP 7-14
Adjunto A del Apéndice 7. Requisitos y recomendaciones para el sistema de muestreo de nvPM	AP 7-19
Adjunto B del Apéndice 7. Especificaciones y calibración del instrumento de medición de masa de nvPM....	AP 7-25
Adjunto C del Apéndice 7. Especificaciones y calibración del eliminador de partículas volátiles y el instrumento de índice de nvPM	AP 7-35
Adjunto D del Apéndice 7. Especificaciones relativas a datos adicionales	AP 7-39
Adjunto E del Apéndice 7. Procedimientos para la utilización del sistema.....	AP 7-41

APÉNDICE 8. Procedimientos para estimar las correcciones por pérdidas de materia particulada no volátil en el sistema	AP 8-1
1. Generalidades	AP 8-1
2. Definiciones, siglas y símbolos	AP 8-1
3. Factores de corrección para los EI en masa y número de nvPM	AP 8-4
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	AP 8-5
5. Coeficientes totales de penetración del sistema.....	AP 8-7
6. Procedimiento para determinar coeficientes de penetración de componentes individuales del sistema de muestreo y medición de nvPM	AP 8-8

PREÁMBULO

Antecedentes

En 1972 se celebró en Estocolmo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. La posición de la OACI, ante esa Conferencia, fue objeto de la Resolución A18-11 de la Asamblea, que, entre otras cosas, dice lo siguiente:

- “2. Que al desempeñar ese papel, la OACI está consciente de los efectos adversos en el medio ambiente que pueden relacionarse con la actividad de las aeronaves y de la responsabilidad de la OACI y de sus Estados miembros en lograr la mayor compatibilidad posible entre el desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil y la calidad del medio humano;”

El 18º período de sesiones de la Asamblea también adoptó la Resolución A18-12, relacionada con el medio humano, que dice lo siguiente:

“LA ASAMBLEA:

1. PIDE al Consejo que, con la ayuda y cooperación de otros órganos de la Organización y de otros organismos internacionales, prosiga enérgicamente la labor de preparación de normas, métodos recomendados y procedimientos, o de textos de orientación referentes a la calidad del medio humano;”

A raíz de esta resolución, la OACI organizó un programa de acción atinente al medio ambiente. Como parte de ese programa, se creó un grupo de estudio para que colaborase con la Secretaría en determinadas labores relacionadas con las emisiones de los motores de las aeronaves. Como resultado de la labor realizada por ese grupo de estudio, en 1977 la OACI publicó una circular titulada *Regulación de las emisiones de los motores de las aeronaves* (Circular 134). Esta Circular contiene textos de orientación a base de un procedimiento de certificación para regular la pérdida de combustible, el humo y ciertas emisiones gaseosas provenientes de los nuevos motores turborreactores y turbofán proyectados para la propulsión de aeronaves a velocidades subsónicas.

El Consejo convino en que el asunto de las emisiones de los motores de las aeronaves no sólo se confinaba a los aspectos técnicos objetivos, sino que también reclamaba el estudio de expertos en diferentes actividades, sin olvidar las opiniones directas de los Estados miembros. Así pues, en 1977 se creó un comité del Consejo, denominado Comité sobre las emisiones de los motores de las aeronaves (CAEE), para que profundizase varios aspectos de esta cuestión.

Con ocasión de la segunda reunión de ese Comité sobre las emisiones de los motores de las aeronaves, celebrada en mayo de 1980, se propusieron textos para su inclusión en algún Anexo de la OACI. Hechas las enmiendas necesarias, a raíz de la consulta acostumbrada a los Estados miembros de la Organización, el texto propuesto fue adoptado por el Consejo como texto del presente documento. El Consejo consideró que era conveniente incluir en un solo Anexo, todas las disposiciones relacionadas con los aspectos del ambiente en el que se desenvuelve la aviación. En vista de ello, cambió el título del Anexo 16 a “Protección del medio ambiente”, el texto actual del Anexo pasó a ser el “Volumen I — Ruido de las aeronaves”, y el contenido en el presente documento se convirtió en el “Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves”.

Aplicación

La Parte I del Volumen II del Anexo 16 contiene definiciones y símbolos, y la Parte II contiene normas relacionadas con la purga del combustible. La Parte III contiene normas relacionadas con la certificación de las emisiones, aplicables a las diversas clases de motores de aeronave especificadas en cada uno de los capítulos de esta parte, cuando esos motores se instalan en aeronaves que se dedican a la aviación civil internacional. La Parte IV contiene recomendaciones para evaluar la materia particulada no volátil con fines de inventario y modelización.

Medidas a tomar por los Estados contratantes

Notificación de diferencias. Se señala a la atención de los Estados contratantes la obligación que les impone el Artículo 38 del Convenio, en virtud del cual se pide a los Estados contratantes que notifiquen a la Organización cualquier diferencia entre sus reglamentos y métodos nacionales y las normas internacionales contenidas en este Anexo y en las enmiendas del mismo. Se pide a los Estados contratantes que en su notificación incluyan las diferencias respecto a los métodos recomendados contenidos en este Anexo y en las enmiendas del mismo, cuando la notificación de dichas diferencias sea de importancia para la seguridad de la navegación aérea. Además, se invita a los Estados contratantes a que mantengan a la Organización debidamente informada de todas las diferencias subsiguientes, o de la eliminación de cualquiera de ellas notificada previamente. Inmediatamente después de la adopción de cada enmienda de este Anexo, se enviará a los Estados contratantes una solicitud específica para la notificación de diferencias.

También se señala a la atención de los Estados lo dispuesto en el Anexo 15 referente a la publicación de diferencias entre sus reglamentos y métodos nacionales y las correspondientes normas y métodos recomendados de la OACI por medio del servicio de información aeronáutica, además de la obligación que impone a los Estados el Artículo 38 del Convenio.

Uso del texto del Anexo en los reglamentos nacionales. El Consejo, el 13 de abril de 1948, adoptó una resolución en la que hacía presente a los Estados contratantes, la conveniencia de que, en la medida de lo posible, emplearan en sus propios reglamentos nacionales la misma redacción de las normas de la OACI que tiene carácter preceptivo, y que indicaran también cuándo se han apartado del texto de las normas, así como las demás disposiciones nacionales que tuvieran importancia para la seguridad y regularidad de la navegación aérea internacional. Siempre que ha sido posible, las disposiciones de este Anexo se han redactado de manera que puedan incluirse en las legislaciones nacionales sin variaciones importantes.

Carácter de cada una de las partes componentes del Anexo

Los Anexos constan de las siguientes partes, aunque no obligatoriamente, y cada una de ellas tiene el carácter que se indica:

1.— Texto que constituye el Anexo propiamente dicho:

- a) *Normas y Métodos recomendados* que el Consejo ha adoptado de conformidad con las disposiciones del Convenio. Su definición es la siguiente:

Norma: Toda especificación de características físicas, configuración, material, performance, personal o procedimiento, cuya aplicación *uniforme* se considera necesaria para la seguridad o regularidad de la navegación aérea internacional y a la que, de acuerdo con el Convenio, se ajustarán los Estados contratantes. En el caso de que sea imposible su cumplimiento, el Artículo 38 del Convenio estipula que es obligatorio hacer la correspondiente notificación al Consejo.

Método recomendado. Toda especificación de características físicas, configuración, material, performance, personal o procedimiento, cuya aplicación uniforme se considera conveniente por razones de seguridad, regularidad o eficiencia de la navegación aérea internacional, y a la cual, de acuerdo con el Convenio, tratarán de ajustarse los Estados contratantes.

- b) *Apéndices* con texto que por conveniencia se agrupa por separado, pero que forma parte de las normas y métodos recomendados que ha adoptado el Consejo.
- c) *Disposiciones* que gobiernan la aplicación de las normas y métodos recomendados.
- d) *Definiciones* de la terminología empleada en las normas y métodos recomendados, que no es explícita porque no tiene el significado corriente. Las definiciones no tienen carácter independiente pues son parte esencial de cada una de las normas y métodos recomendados en que se usa la terminología, ya que cualquier cambio en el significado de ésta afectaría la disposición.

- e) *Tablas y Figuras* que aclaran o ilustran una norma o método recomendado y a las cuales éstos hacen referencia, forman parte de la norma o método recomendado correspondiente y tienen el mismo carácter.

2.— Texto aprobado por el Consejo para su publicación en relación con las normas y métodos recomendados:

- a) *Preámbulos* que comprenden antecedentes históricos y textos explicativos basados en las medidas del Consejo, y que incluyen una explicación de las obligaciones de los Estados, dimanantes del Convenio y de las resoluciones de adopción, en cuanto a la aplicación de las normas y métodos recomendados.
- b) *Introducciones* que contienen texto explicativo al principio de las partes, capítulos y secciones del Anexo, a fin de facilitar la comprensión de la aplicación del texto.
- c) *Notas* intercaladas en el texto, cuando corresponde, que proporcionan datos o referencias acerca de las normas o métodos recomendados de que se trate, sin formar parte de tales normas o métodos recomendados.
- d) *Adjuntos* que contienen texto suplementario a las normas y métodos recomendados o que sirven de guía para su aplicación.

Cláusula de exención de responsabilidad respecto a patentes

Se señala a la atención la posibilidad de que algunos elementos de las normas y métodos recomendados del presente Anexo pueden ser objeto de patentes u otros derechos de propiedad intelectual. La OACI no estará obligada ni asumirá ninguna responsabilidad jurídica por no señalar todas o cualquiera de tales patentes u otros derechos de propiedad intelectual. La OACI no adopta ninguna postura respecto a la existencia, validez, alcance o aplicación de cualesquiera patentes u otros derechos de propiedad intelectual aducidos y no acepta ninguna obligación ni responsabilidad jurídica consiguiente o en relación con los mismos.

Elección de idioma

Este Anexo se ha adoptado en seis idiomas — español, árabe, chino, francés, inglés y ruso. Se pide a cada uno de los Estados contratantes que elija uno de esos textos para los fines de aplicación nacional y demás efectos previstos en el Convenio, ya sea para utilizarlo directamente o mediante traducción a su propio idioma, y que notifique su preferencia a la Organización.

Presentación editorial

Para facilitar la lectura e indicar su condición respectiva, las Normas aparecen en tipo corriente; y los *Métodos recomendados* y las *Notas* en letra bastardilla, precedidas de la palabra **Recomendación** y *Nota* respectivamente.

Cabe señalar además que en el texto español el carácter obligatorio de las normas se expresa mediante el uso del futuro del verbo, mientras que en los métodos recomendados se utiliza el término “debería”.

Las unidades de medida utilizadas en el presente documento se ajustan al Sistema Internacional de Unidades (SI), según se especifica en el Anexo 5 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. En los casos en que el Anexo 5 permite la utilización de unidades opcionales ajenas al SI, las mismas se indican entre paréntesis a continuación de las unidades básicas. Cuando se indiquen dos conjuntos de unidades, no debe suponerse que los pares de valores son iguales e intercambiables. No obstante, puede inferirse que se logra un nivel de seguridad operacional equivalente cuando se utiliza exclusivamente uno u otro conjunto de unidades.

Toda referencia hecha a cualquier parte de este documento, identificada por un número, comprende todas las subdivisiones de dicha parte.

Coordinación con la actividad de ISO

En las disposiciones relativas a los procedimientos de certificación se han utilizado ampliamente las especificaciones conexas elaboradas por la Organización Internacional de Normalización (ISO). En la mayoría de los casos, dichas especificaciones se han incorporado directamente, pero en otros se ha considerado que convenía modificarlas para satisfacer los requisitos de la OACI; en dichos casos los textos modificados se han reproducido integralmente en el presente documento. Se agradece la asistencia proporcionada por la ISO en la elaboración de especificaciones detalladas.

Tabla A. Enmiendas del Anexo 16

Enmienda	Origen	Temas	Adoptada Surtió efecto Aplicable
1ª edición	Conferencia especial sobre el ruido producido por las aeronaves en las proximidades de los aeródromos (1969)		2 de abril de 1971 2 de agosto de 1971 6 de enero de 1972
1	Primera Reunión del Comité sobre el ruido producido por las aeronaves	Homologación en cuanto al ruido en la producción futura y versiones perfeccionadas de aviones subsónicos de reacción, y actualización de la terminología utilizada para describir el peso de las aeronaves.	6 de diciembre de 1972 6 de abril de 1973 16 de agosto de 1973
2	Tercera Reunión del Comité sobre el ruido producido por las aeronaves	Homologación en cuanto al ruido de aviones ligeros propulsados por hélice y de aviones subsónicos de reacción, de 5 700 kg o menos de peso máximo certificado de despegue, y orientación destinada a señalar a los Estados el modo de desempeñar sus funciones en los casos de arrendamiento, fletamento o intercambio de aeronaves.	3 de abril de 1974 3 de agosto de 1974 27 febrero de 1975
3 (2ª edición)	Cuarta Reunión del Comité sobre el ruido producido por las aeronaves	Homologación en cuanto al ruido para los futuros aviones subsónicos de reacción y de los propulsados por hélice, aparte de los aviones STOL, y directrices para la certificación acústica de los futuros aviones supersónicos de transporte, de los aviones STOL propulsados por hélice, de los grupos auxiliares de energía (APU) y de los sistemas auxiliares de las aeronaves durante las operaciones en tierra.	21 de junio de 1976 21 de octubre de 1976 6 de octubre de 1977
4 (3ª edición)	Quinta Reunión del Comité sobre el ruido producido por las aeronaves	Introducción de un nuevo parámetro, el número de motores, en las normas de certificación acústica de los aviones subsónicos de reacción; mejora de los procedimientos de prueba detallados para velar porque se aplique el mismo nivel de tecnología a todos los tipos de aeronaves; y mejoras editoriales para simplificar la redacción y eliminar incongruencias.	6 de marzo de 1978 6 de julio de 1978 10 de agosto de 1978
5 (Anexo 16, Volumen I — 1ª edición)	Sexta Reunión del Comité sobre el ruido producido por las aeronaves	1. El Anexo ha pasado a titularse <i>Protección del medio ambiente</i> y se publicará en dos volúmenes, a saber: Volumen I — <i>Ruido de las aeronaves</i> (incluye las disposiciones contenidas en la tercera edición del Anexo 16, modificadas por la Enmienda 5) y Volumen II — <i>Emisiones de los motores de las aeronaves</i>. 2. Introducción en el Volumen I de normas para la homologación de helicópteros en cuanto al ruido y relativas a la producción futura de aviones SST, actualización de las directrices para la homologación en cuanto al ruido de APU instalados y sistemas asociados de aeronaves, y enmiendas de redacción que incluyen los cambios en las unidades de medida dirigidos a armonizar este Anexo con las disposiciones del Anexo 5.	11 de mayo de 1981 11 de septiembre de 1981 26 de noviembre de 1981

<i>Enmienda</i>	<i>Origen</i>	<i>Temas</i>	<i>Adoptada Surtió efecto Aplicable</i>
6 (Anexo 16, Volumen II — 1ª edición)	Segunda Reunión del Comité sobre las emisiones de los motores de las aeronaves	Introducción del Volumen II que contiene normas relativas al control de la purga del combustible, del humo y de las emisiones gaseosas procedentes de los motores turborreactores y turbofán de nueva fabricación, previstos para la propulsión subsónica y supersónica.	30 de junio de 1981 30 de octubre de 1981 18 de febrero de 1982
1	Primera Reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación	Cambios de las especificaciones del combustible de prueba, Apéndice 4.	4 de marzo de 1988 31 de julio de 1988 17 de noviembre de 1988
2 (2ª edición)	Segunda reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación	a) mayor rigurosidad de los límites de las emisiones de NO _x ; b) mejoras en el procedimiento de certificación del humo y las emisiones gaseosas.	24 de marzo de 1993 26 de julio de 1993 11 de noviembre de 1993
3	Tercera reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación	Enmienda de los criterios sobre los gases de calibración y de ensayo en los Apéndices 3 y 5.	20 de marzo de 1997 20 de marzo de 1997
4	Cuarta reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación	Mayor rigurosidad de los límites de las emisiones NO _x .	26 de febrero de 1999 19 de julio de 1999 4 de noviembre de 1999
5	Sexta reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación	Aumento de la rigurosidad de las normas relativas a las emisiones de NO _x .	23 de febrero de 2005 11 de julio de 2005 24 de noviembre de 2005
6 (3ª edición)	Séptima reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación	a) aclaración de las correcciones aplicables a las condiciones diurnas de referencia y las condiciones del motor de referencia y de la terminología utilizada en relación con la humedad; b) enmiendas que permiten la utilización de combustibles que no sean los especificados, con la aprobación de las autoridades que se encargan de la certificación; c) normalización de la terminología relativa al reglaje del empuje; d) aclaración del valor apropiado del flujo de combustible que se utilizará en cada punto LTO; y e) enmiendas de los requisitos en los que se especifican los materiales que pueden utilizarse en los dispositivos de muestreo.	7 de marzo de 2008 20 de julio de 2008 20 de noviembre de 2008

<i>Enmienda</i>	<i>Origen</i>	<i>Temas</i>	<i>Adoptada Surtió efecto Aplicable</i>
7	Octava reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP/8).	a) aumento de la rigurosidad de las normas sobre emisiones de NO_x; b) actualización de las referencias al <i>Manual técnico-ambiental</i> (Doc 9501), Volumen II — <i>Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves</i>; c) actualización del texto para sustituir “modificaciones del procedimiento” por “procedimientos equivalentes” con el fin de mejorar la coherencia y armonización en el Anexo 16, Volumen II y con el <i>Manual técnico-ambiental</i> (Doc 9501), Volumen II — <i>Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves</i>; d) alineamiento del formato de las fechas de aplicación en 2.3.2 para que concuerde con la convención que se utiliza en el Anexo 6 y el Anexo 16, Volumen I; e) mejoramiento de la legibilidad mediante el traslado de algunos párrafos a lugares más apropiados; y f) modificaciones menores de carácter editorial.	4 de marzo de 2011 18 de julio de 2011 17 de noviembre de 2011
8	Novena reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP/9)	a) enmienda del Adjunto A del Apéndice 3 que actualiza el intervalo de temperatura de horno del analizador de hidrocarburos (HC); b) enmiendas por las que se permite el uso de instrumentos más modernos para medir la humedad y se actualiza el emplazamiento del instrumento de medición de la humedad en los ensayos para la certificación de emisiones; y c) cambios menores de carácter editorial en la terminología, la numeración y la tipografía.	3 de marzo de 2014 14 de julio de 2014 1 de enero de 2015
9 (4ª edición)	Décima reunión del Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP/10)	a) incorporación de la definición de “certificado de tipo” en el Anexo 16, Volumen II, Parte I, Capítulo 1; b) aclaración de los requisitos para la temperatura de los conductos de muestreo; c) cambios relativos al gas de calibración para el analizador de NO_x; d) cambios relativos al contenido de naftalinas para la especificación del combustible que ha de utilizarse en las pruebas de las emisiones; e) norma sobre las emisiones de materia particulada no volátil (nvPM) procedentes de los motores que se aplica a los motores turbopropulsor y turbohélice, con empuje nominal superior a 26,7 kN, fabricados a partir del 1 de enero de 2020; f) armonización del Anexo 16, Volumen II, para reflejar la nueva norma sobre las emisiones de nvPM de los motores; g) corrección de errores menores o para lograr congruencia.	3 de marzo de 2017 21 de julio de 2017 1 de enero de 2018

NORMAS Y MÉTODOS RECOMENDADOS INTERNACIONALES

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

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.

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

Fase de ascenso. Fase definida por el tiempo durante el cual el motor funciona en la modalidad de ascenso.

Fase de despegue. Fase de utilización definida por el tiempo durante el cual el motor funciona al régimen de empuje nominal.

Fecha de fabricación. La fecha en la cual se haya librado el correspondiente documento que atestigüe que el motor o la aeronave en cuestión se ajusta a las exigencias correspondientes al tipo de motor de que se trata, o la fecha de libramiento de algún documento análogo.

Hidrocarburos sin quemar. Cantidad de compuestos de hidrocarburos de todas clases y pesos moleculares, contenidos en una muestra de gas, calculada en el equivalente de metano.

Humo. Materias carbonosas, contenidas en las emisiones del escape, que obstaculizan la transmisión de la luz.

Índice de humo. Término adimensional que cuantifica las emisiones de humo (véase 3 del Apéndice 2).

Materia particulada no volátil (nvPM). Partículas emitidas que existen en el plano de salida de la tobera de escape del motor de turbina de gas que no se volatilizan al calentarse hasta una temperatura de 350°C.

Óxidos de nitrógeno. La suma de las partes de óxido nítrico y de bióxido de nitrógeno contenidas en una muestra de gas, calculada como si el óxido nítrico estuviese presente en forma de bióxido de nitrógeno.

Postcombustión. Modalidad de utilización de un motor con un sistema de combustión alimentado (total o parcialmente) con aire viciado.

Relación de presión de referencia. Relación entre la presión total media en el último plano de descarga del compresor y la presión total media en el plano de entrada del compresor, cuando el motor desarrolla el empuje nominal de despegue en condiciones estáticas en la atmósfera tipo internacional (ISA), al nivel del mar.

Nota.— Los métodos para medir la relación de presión de referencia aparecen en el Apéndice 1.

Rodaje/marcha lenta en tierra. Fases de utilización que comprenden el rodaje o el funcionamiento a bajo régimen desde la puesta en marcha inicial del motor o motores de propulsión hasta la iniciación del recorrido de despegue, y entre el momento de salida de la pista y aquél en el que se paran definitivamente todos los motores de propulsión.

Tobera de escape. Tratándose del muestreo de las emisiones de escape de los motores de turbina de gas en los que la emanación del chorro no sale mezclada (como por ejemplo, en algunos motores turbofán), la tobera considerada es aquella por la cual pasa únicamente el flujo de salida del generador de gas (núcleo). No obstante, cuando la emanación del chorro sale mezclada, la tobera considerada es aquella por la cual pasan todos los gases.

Versión derivada. Todo motor aéreo de turbina de gas genéricamente del mismo tipo previamente certificado, del que proceda, y que tenga características que retengan el núcleo básico y la cámara de combustión — y accesorios conexos — del motor de que dimane y cuyos otros factores, a juicio de la autoridad encargada de la certificación, no hayan variado.

Nota.— Se hace notar la diferencia entre la definición de “versión derivada de una aeronave” que figura en el Volumen I del Anexo 16 y la definición de “versión derivada” incluida en el presente volumen.

CAPÍTULO 2. SÍMBOLOS

Los símbolos que siguen, utilizados en el Volumen II de este Anexo, tienen los significados que se indican:

CO	Monóxido de carbono
D_p	La masa de todo gas contaminante emitido durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue para las emisiones
F_n	Empuje en la atmósfera tipo internacional (ISA), en condiciones al nivel del mar, correspondiente a determinada modalidad de utilización
F_{oo}	Empuje nominal (<i>véase</i> definición)
F^*_{oo}	Empuje nominal con postcombustión
HC	Hidrocarburos sin quemar (<i>véase</i> definición)
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Bióxido de nitrógeno
NO _x	Óxidos de nitrógeno (<i>véase</i> definición)
nvPM	Materia particulada no volátil (<i>véase</i> definición)
SN	Índice de humo (<i>véase</i> definición)
π_{oo}	Relación de presión de referencia (<i>véase</i> definición)

PARTE II. PURGA DEL COMBUSTIBLE

CAPÍTULO 1. ADMINISTRACIÓN

1.1 Lo previsto en esta parte se aplicará a todas las aeronaves equipadas con motor de turbina que hayan de utilizarse en la navegación aérea internacional, fabricadas después del 18 de febrero de 1982.

1.2 La certificación relacionada con la prevención de la purga voluntaria de combustible la otorgará, a base de pruebas convincentes, la autoridad encargada de la certificación, al efecto de que ya sea la aeronave o los motores de ésta, se ajusten a lo previsto en el Capítulo 2.

Nota.— El documento que atestigüe la certificación pertinente a la purga del combustible podrá consistir en un certificado independiente o en una declaración apropiada extendida en algún documento autorizado por la autoridad encargada de la certificación.

1.3 Los Estados contratantes reconocerán como válido todo certificado sobre la purga del combustible otorgado por la autoridad encargada de la certificación de otro Estado contratante, siempre que las formalidades, a base de las cuales se haya otorgado, sean no menos rigurosas que las previstas en el Volumen II del presente Anexo.

CAPÍTULO 2. PREVENCIÓN DE LA PURGA VOLUNTARIA DE COMBUSTIBLE

Las aeronaves se proyectarán y construirán de modo que sea posible prevenir la purga voluntaria del combustible líquido en la atmósfera, que, al parar los motores, se haya acumulado en los colectores de inyección del carburante, a raíz de las actividades normales de utilización, tanto en vuelo como en tierra.

PARTE III. CERTIFICACIÓN RESPECTO A LAS EMISIONES

CAPÍTULO 1. ADMINISTRACIÓN

1.1 Lo previsto en 1.2 a 1.5 se aplicará a todos los motores y sus versiones derivadas correspondientes a las clasificaciones definidas en los Capítulos 2, 3 y 4 en materia de certificación respecto a las emisiones, cuando esos motores se utilicen en aeronaves dedicadas a la navegación aérea internacional.

1.2 La autoridad encargada de la certificación concederá los certificados respecto a las emisiones a base de pruebas satisfactorias de que el motor en cuestión satisface requisitos por lo menos tan rigurosos como los prescritos en el Volumen II del presente Anexo. El cumplimiento de los niveles de emisión de los Capítulos 2 y 3 se demostrará por el procedimiento descrito en el Apéndice 6.

Nota.— El documento que atestigüe la certificación respecto a las emisiones puede consistir en un certificado independiente de las emisiones o en una declaración apropiada contenida en algún documento aprobado por la autoridad encargada de la certificación.

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.

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 de otro Estado contratante, 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*.

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 turborreactores 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:

- a) determinados tipos de motores y las versiones derivadas de éstos respecto a los cuales se haya expedido el certificado de prototipo, 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 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. Las exenciones se notificarán por medio de un número de serie del motor y se proporcionarán por conducto de un registro público oficial.

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 turborreactores 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 figura orientación adicional sobre la expedición de exenciones.

2.1.2 Emisiones de que se trata

Para certificar los motores de las aeronaves se verificarán las emisiones siguientes:

Humo

Emisiones gaseosas

Hidrocarburos sin quemar (HC);

Monóxido de carbono (CO); y

Óxidos de nitrógeno (NOx).

2.1.3 Unidades de medida

2.1.3.1 Las emisiones de humo se medirán y notificarán a base del índice del humo (SN).

2.1.3.2 Se medirá y notificará en gramos la masa (D_p) de los contaminantes gaseosos HC, CO or NO_x emitidos durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones, definido en 2.1.4.2 y 2.1.4.3.

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.

2.1.4.2 Reglaje del empuje

El motor se ensayará a un número suficiente de reglajes del empuje, a fin de determinar las características de las emisiones de gases y de humo del motor, de modo que pueda determinarse la masa de la emisión y los índices de humo a los siguientes porcentajes específicos del empuje nominal, según lo disponga la autoridad encargada de la certificación.

<i>Modalidad de utilización LTO</i>	<i>Reglaje del empuje</i>
Despegue	100% F_{oo}
Ascenso	85% F_{oo}
Aproximación	30% F_{oo}
Rodaje/marcha lenta en tierra	7% F_{oo}

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

El ciclo de referencia LTO, para calcular y notificar las emisiones gaseosas, se representará mediante los tiempos siguientes en cada modalidad de utilización.

<i>Modalidad de utilización LTO</i>	<i>Tiempo en la modalidad de utilización (minutos)</i>
Despegue	0,7
Ascenso	2,2
Aproximación	4,0
Rodaje/marcha lenta en tierra	26,0

2.1.4.4 Especificaciones en cuanto al combustible

El combustible utilizado para efectuar las pruebas se ajustará a las especificaciones del Apéndice 4.

2.1.5 Condiciones de las pruebas

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

2.1.5.2 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 necesarias para el funcionamiento básico del motor.

2.1.5.3 Cuando las condiciones de las pruebas difieran de las condiciones atmosféricas de referencia previstas en 2.1.4.1, los resultados de las pruebas de emisiones gaseosas se corregirán respecto a las condiciones atmosféricas de referencia mediante los métodos indicados en el Apéndice 3.

2.2 Humo

2.2.1 Campo de aplicación

Las disposiciones de 2.2.2 se aplicarán a los motores fabricados a partir del 1 de enero de 1983.

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.

2.3 Emisiones gaseosas

2.3.1 Campo de aplicación

Las disposiciones de 2.3.2 se aplicarán a los motores fabricados a partir del 1 de enero de 1986 cuyo empuje nominal sea mayor de 26,7 kN y con respecto a los óxidos de nitrógeno, según se especifica más adelante.

2.3.2 Niveles reglamentarios

Los niveles de las emisiones gaseosas, cuando se midan y calculen con arreglo a los procedimientos del Apéndice 3 y se conviertan a los niveles característicos mediante los procedimientos del Apéndice 6, o procedimientos equivalentes acordados por la autoridad encargada de la certificación, no podrán superar los niveles reglamentarios calculados a base de las fórmulas siguientes:

$$\text{Hidrocarburos (HC): } D_p/F_{oo} = 19,6$$

$$\text{Monóxido de carbono (CO): } D_p/F_{oo} = 118$$

Óxidos de nitrógeno (NOx):

- a) para los motores de tipo o de modelo cuya fecha de fabricación para el primer modelo individual construido era anterior al 1 de enero de 1996 y para los que la fecha de fabricación del motor en cuestión era anterior al 1 de enero de 2000:

$$D_p/F_{oo} = 40 + 2\pi_{oo}$$

- b) para los motores de tipo o de modelo cuya fecha de fabricación para el primer modelo individual construido era el 1 de enero de 1996 o después de esa fecha, o para los que la fecha de fabricación en cuestión era el 1 de enero de 2000 o después de esa fecha:

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

- c) para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación del primer modelo individual era el 1 de enero de 2004 o después de esa fecha:

- 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:

$$D_p/F_{oo} = 19 + 1,6\pi_{oo}$$

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

$$D_p/F_{oo} = 37,572 + 1,6\pi_{oo} - 0,2087F_{oo}$$

- 2) para motores con relación de presión de más de 30 pero menos de 62,5:

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

$$D_p/F_{oo} = 7 + 2,0\pi_{oo}$$

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

$$D_p/F_{oo} = 42,71 + 1,4286\pi_{oo} - 0,4013F_{oo} + 0,00642\pi_{oo} \times F_{oo}$$

- 3) para motores con relación de presión de 62,5 o más:

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

- d) para los motores de un tipo o modelo cuya fecha de fabricación del primer modelo individual era el 1 de enero de 2008 o después de esa fecha, o para los cuales la fecha de fabricación del motor en cuestión es el 1 de enero de 2013 o después de esa fecha:

- 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:

$$D_p/F_{oo} = 16,72 + 1,4080\pi_{oo}$$

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

$$D_p/F_{oo} = 38,5486 + 1,6823\pi_{oo} - 0,2453F_{oo} - 0,00308\pi_{oo}F_{oo}$$

- 2) para motores con relación de presión de más de 30 pero menos de 82,6:

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

$$D_p/F_{oo} = -1,04 + 2,0\pi_{oo}$$

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

$$D_p/F_{oo} = 46,1600 + 1,4286\pi_{oo} - 0,5303F_{oo} + 0,00642\pi_{oo}F_{oo}$$

- 3) para motores con relación de presión de 82,6 o más:

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

- 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:

- 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:

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

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.

2.4 Información requerida

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

2.4.1 Información general

Se proporcionará la información siguiente 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;
- g) método para hacer correcciones respecto a las condiciones ambientales; y
- h) método de análisis de los datos.

2.4.2 Información sobre las pruebas

Sobre cada motor que se pruebe para certificación, se proporcionará la información siguiente, correspondiente a cada uno de los reglajes del empuje prescritos en 2.1.4.2. Esta información se proporcionará una vez corregida con respecto a las condiciones ambientales de referencia, cuando corresponda;

- a) flujo de combustible (kg/s);
- b) índice de emisión (gramos/kg) de cada contaminante gaseoso; y
- c) índice de humo medido.

2.4.3 Información deducida

2.4.3.1 Sobre cada motor que se pruebe para certificación, se proporcionará la información deducida siguiente:

- a) la tasa de emisión, es decir, el índice de emisión multiplicado por el flujo de combustible (gramos/s) de cada contaminante gaseoso;
- b) la emisión bruta total de cada contaminante gaseoso medido durante el ciclo LTO (gramos);
- c) los valores Dp/F_{oo} de cada contaminante gaseoso (gramos/kN); y
- d) el índice de humo máximo.

2.4.3.2 Sobre cada tipo de motor que se desee certificar en cuanto a las emisiones, se proporcionará el índice de humo característico y los niveles de emisión de los contaminantes gaseosos.

CAPÍTULO 3. MOTORES TURBORREACTORES Y TURBOFÁN PROYECTADOS PARA PROPULSAR AERONAVES A VELOCIDADES SUPERSÓNICAS

3.1 Generalidades

3.1.1 Campo de aplicación

Las disposiciones del presente capítulo se aplicarán a todos los motores turborreactores y turbofán proyectados para propulsar aeronaves a velocidades supersónicas, fabricados a partir del 18 de febrero de 1982.

3.1.2 Emisiones de que se trata

Para certificar los motores de aviación se verificarán las emisiones siguientes:

Humo

Emisiones gaseosas

Hidrocarburos sin quemar (HC);

Monóxido de carbono (CO); y

Óxidos de nitrógeno (NOx).

3.1.3 Unidades de medida

3.1.3.1 Las emisiones de humo se medirán y notificarán a base del índice de humo (SN).

3.1.3.2 Se medirá y notificará en gramos la masa (D_p) de los contaminantes gaseosos HC, CO, NOx emitidos durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones, definido en 3.1.5.2 y 3.1.5.3.

3.1.4 Nomenclatura

En todo este capítulo, cuando se trate de motores sin postcombustión se utilizará la expresión F_{oo} en vez de F_{oo}^* . Cuando se trate del rodaje/marcha lenta, siempre se utilizará F_{oo} .

3.1.5 Condiciones de referencia

3.1.5.1 Condiciones atmosféricas

Las condiciones atmosféricas de referencia 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.

3.1.5.2 *Reglaje del empuje*

El motor se ensayará a un número suficiente de reglajes del empuje, a fin de determinar las características de las emisiones de gases y de humo del motor, de modo que pueda determinarse la masa de la emisión y los índices de humo corregidos a las condiciones ambientales de referencia, a los siguientes porcentajes específicos del empuje nominal, según lo disponga la autoridad encargada de la certificación.

<i>Modalidad de utilización</i>	<i>Reglaje del empuje</i>
Despegue	100% F_{oo}^*
Ascenso	65% F_{oo}^*
Descenso	15% F_{oo}^*
Aproximación	34% F_{oo}^*
Rodaje/marcha lenta en tierra	5,8% F_{oo}

3.1.5.3 *Ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones*

El ciclo de referencia LTO, para calcular las emisiones gaseosas, se representará mediante los tiempos siguientes en cada modalidad de utilización.

<i>Modalidad de utilización LTO</i>	<i>Tiempo en la modalidad de utilización (minutos)</i>
Despegue	1,2
Ascenso	2,0
Descenso	1,2
Aproximación	2,3
Rodaje/marcha lenta en tierra	26,0

3.1.5.4 *Especificaciones en cuanto al combustible*

El combustible utilizado para efectuar las pruebas se ajustará a las especificaciones del Apéndice 4, y no contendrá aditivos mezclados con objeto de suprimir el humo (tales como los compuestos orgánico-metálicos).

3.1.6 *Condiciones de las pruebas*

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

3.1.6.2 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.

3.1.6.3 Las mediciones hechas para determinar los niveles de emisión correspondientes a los empujes prescritos en 3.1.5.2, se efectuarán, cuando sea el caso, empleando el postcombustor al nivel utilizado normalmente.

3.1.6.4 Cuando las condiciones de las pruebas difieran de las de referencia previstas en 3.1.5, los resultados se corregirán respecto a las condiciones de referencia mediante los procedimientos del Apéndice 5.

3.2 Humo

3.2.1 Índice de humo reglamentario

El índice de humo en cualquier reglaje del empuje, cuando se mida y calcule conforme a los procedimientos del Apéndice 2 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.— La autoridad encargada de la certificación puede asimismo aceptar los valores obtenidos empleando la postcombustión, siempre que la validez de esos datos quede debidamente demostrada.

3.3 Emisiones gaseosas

3.3.1 Niveles reglamentarios

Los niveles de las emisiones gaseosas, cuando se midan y calculen con arreglo a los procedimientos del Apéndice 3 o Apéndice 5, según corresponda, y se conviertan a los niveles característicos mediante los procedimientos del Apéndice 6, no podrán superar los niveles reglamentarios calculados a base de las fórmulas siguientes:

Hidrocarburos (HC): $D_p/F^*_{oo} = 140(0,92)^{\pi_{oo}}$

Monóxido de carbono (CO): $D_p/F^*_{oo} = 4\,550(\pi_{oo})^{-1,03}$

Óxidos de nitrógeno (NOx): $D_p/F^*_{oo} = 36 + 2,42\pi_{oo}$

Nota.— El nivel característico del índice de humo o de las emisiones de los contaminantes gaseosos equivale a la media de los valores de todos los motores probados, medida y corregida con respecto al motor normal de referencia y a las condiciones ambientales de referencia, dividida por el coeficiente correspondiente al número de motores aprobados, según se indica en el Apéndice 6.

3.4 Información requerida

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

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

- a) designación del motor;
- b) empuje nominal (kN);

- c) empuje nominal con postcombustión, si corresponde (kN);
- d) relación de presión de referencia;
- e) referencia de la especificación del combustible;
- f) relación hidrógeno/carbono del combustible;
- g) métodos de obtención de los datos;
- h) método para hacer correcciones respecto a las condiciones ambientales; y
- i) método de análisis de los datos.

3.4.2 Información sobre las pruebas

Sobre cada motor que se pruebe para certificación, se proporcionará la información siguiente, correspondiente a cada uno de los reglajes del empuje prescritos en 3.1.5.2. Esta información se proporcionará una vez corregida con respecto a las condiciones ambientales de referencia, cuando corresponda;

- a) flujo de combustible (kg/s);
- b) índice de emisión (gramos/kg) de cada contaminante gaseoso;
- c) porcentaje del empuje aportado por la postcombustión; y
- d) índice de humo medido.

3.4.3 Información deducida

3.4.3.1 Sobre cada motor que se pruebe para certificación, se proporcionará la información siguiente:

- a) la tasa de emisión, es decir, el índice de emisión multiplicado por el flujo de combustible (gramos/s) de cada contaminante;
- b) la emisión bruta total de cada contaminante gaseoso medido durante el ciclo LTO (gramos);
- c) los valores D_p/F_{oo}^* de cada contaminante gaseoso (gramos/ kN); y
- d) el índice de humo máximo.

3.4.3.2 Sobre cada tipo de motor que se desee certificar en cuanto a las emisiones, se proporcionará el índice de humo característico y los niveles de emisión de los contaminantes gaseosos.

Nota.— El nivel característico del índice de humo o de las emisiones de los contaminantes gaseosos equivale a la media de los valores de todos los motores probados, medida y corregida con respecto al motor normal de referencia y a las condiciones ambientales de referencia, dividida por el coeficiente correspondiente al número de motores probados, según se indica en el Apéndice 6.

CAPÍTULO 4. EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

4.1 Generalidades

4.1.1 Aplicabilidad

Las disposiciones del presente capítulo serán aplicables a todos los motores de aeronave, 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. Se aplicarán las disposiciones específicas para las categorías de motores pertinentes detalladas en la sección 4.2.

4.1.2 Emisiones de que se trata

La finalidad de esta sección es controlar las emisiones de masa de materia particulada no volátil ($\text{nvPM}_{\text{mass}}$).

4.1.3 Unidades de medida

La concentración en masa de nvPM ($\text{nvPM}_{\text{mass}}$) se notificará expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

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.

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 y a empujes que produzcan la concentración máxima de $\text{nvPM}_{\text{mass}}$, un EI_{mass} máximo y un EI_{num} máximo según lo disponga la autoridad encargada de la certificación:

<i>Modalidad de utilización LTO</i>	<i>Reglaje del empuje</i>
Despegue	100% F_{oo}
Ascenso	85% F_{oo}
Aproximación	30% F_{oo}
Rodaje/marcha lenta en tierra	7% F_{oo}

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 $nvPM_{\text{mass}}$, EI_{mass} y EI_{num} en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección del sistema de muestreo conforme a los procedimientos indicados en el Apéndice 7.

4.2 Emisiones de materia particulada no volátil

4.2.1 Aplicabilidad

Las disposiciones que se detallan en 4.2.2 y 4.2.3 se aplicará a todos los motores turbofán y turborreactores 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.

4.2.2 Niveles reglamentarios

La concentración máxima de $nvPM_{\text{mass}}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 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 calculado según la fórmula siguiente:

$$\text{Límite reglamentario de la concentración de } nvPM_{\text{mass}} = 10^{(3 + 2,9 F_{oo}^{-0,274})}$$

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:

- nivel característico de la concentración máxima de $nvPM_{\text{mass}}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- flujo de combustible (kg/s) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;
- EI_{mass} (mg/kg de combustible) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;
- EI_{num} (partículas/kg de combustible) correspondiente a cada reglaje del empuje del ciclo LTO;
- EI_{mass} máximo (mg/kg de combustible); y
- EI_{num} máximo (partículas/kg de combustible).

4.3 Información requerida

Nota.— La información requerida se divide en dos 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.

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;
- g) método para hacer correcciones en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección del sistema de muestreo; y
- h) método de análisis de los datos.

4.3.2 Información sobre las pruebas

Se proporcionará la información siguiente para cada prueba:

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

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

Nota 1.— La finalidad de esta parte es formular recomendaciones relativas 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 de recolección. El sistema de nvPM, la 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.

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 en masa y número de nvPM obtenidas con los procedimientos del Apéndice 7 en función de las pérdidas del sistema mediante la metodología descrita en el Apéndice 8.*

APÉNDICE 1. MEDICIÓN DE LA RELACIÓN DE PRESIÓN DE REFERENCIA

1. GENERALIDADES

1.1 La relación de presión se determinará a base de un motor representativo.

1.2 La relación de presión de referencia se deducirá correlacionando la relación de presión medida con el empuje del motor corregido a la presión ambiente del día tipo, y leyendo en el gráfico dicha correlación al empuje nominal de despegue correspondiente al día tipo.

2. MEDICIÓN

2.1 La presión total se medirá en el último plano de descarga del compresor y en la parte delantera del primer compresor, colocando por lo menos cuatro sondas, de modo que sea posible dividir el área del flujo del aire en cuatro sectores idénticos y tomando la media de los cuatro valores obtenidos.

Nota.— La presión total de descarga del compresor puede obtenerse a base de la presión total o estática, medida en una posición lo más próxima posible al plano de descarga del compresor. Sin embargo, la autoridad encargada de la certificación podrá autorizar otros medios que permitan calcular la presión total de descarga del compresor, en el caso de que el motor esté proyectado de manera tal que no sea práctico, para hacer las pruebas de certificación de las emisiones, recurrir a las sondas antes referidas.

2.2 Al hacer las pruebas para la certificación de tipo, se determinarán los factores de correlación necesarios utilizando por lo menos un solo motor y a base de las pruebas y análisis de todo componente asociado al motor.

2.3 De todos modos, los procedimientos a seguir contarán previamente con el visto bueno de la autoridad encargada de la certificación.

APÉNDICE 2. EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE HUMO

1. INTRODUCCIÓN Y DEFINICIONES

Nota.— Los procedimientos indicados en este apéndice conciernen a la adquisición de muestras representativas del escape y a su introducción y análisis en el dispositivo medidor de las emisiones.

1.1 Sólo se permitirán procedimientos equivalentes a los contenidos en este apéndice previa solicitud dirigida a la autoridad encargada de la certificación, y después de que ésta los haya aprobado.

1.2 Las expresiones y símbolos siguientes utilizados en este Apéndice tienen el sentido que se les asigna a continuación:

Tamaño de la muestra. Muestra seleccionada del escape, la magnitud de cuya masa (expresada en kilogramos por metro cuadrado del área manchada del filtro) corresponde a la gama prescrita en 2.5.3 h) de este Apéndice y que, al atravesar el material filtrante produce un cambio de reflectancia que da el valor del parámetro SN'.

Tamaño de la muestra de referencia. La masa de la muestra, de 16,2 kg/m² del área manchada del filtro, que en caso de hacerla atravesar el material filtrante produce un cambio de reflectancia que da el valor del parámetro SN'.

Volumen de la muestra. El volumen de la muestra seleccionada (expresado en metros cúbicos), cuya masa equivalente, calculada según se indica en 3 de este apéndice, corresponde a la definición de tamaño de la muestra.

SN Índice de humo. Término adimensional que cuantifica el nivel de las emisiones de humo, guiándose por la mancha resultante en un filtro por la masa de referencia de la muestra de gases de escape, y graduados en una escala de 0 a 100 (véase 3 de este apéndice).

SN' Índice de humo obtenido de una sola muestra de humo, que no ha de ser forzosamente del tamaño de la de referencia, definido en 3 de este apéndice.

W Masa en kilogramos de una sola muestra de humo del gas de escape, calculada a base de la medición del volumen, presión y temperatura de la muestra (véase 3 de este apéndice).

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 acero inoxidable o cualquier otro material no reactivo.
- b) Si se emplea una sonda con orificios de muestreo múltiples, todos los orificios tendrán el mismo diámetro. 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.

- c) El número mínimo de lugares muestreados será de 12.
- d) El plano de muestreo estará lo más próximo al plano de salida de la tobera de escape del motor que permita la performance del motor, pero, en todo caso, a una distancia del plano de salida que no rebase 0,5 de la tobera.
- e) El solicitante demostrará a la autoridad encargada de la certificación, mediante desplazamientos pormenorizados de la sonda, que el sistema de sondeo que se propone utilizar y su posición proporcionan una muestra representativa respecto a cada reglaje del empuje prescrito.

2.2 Conducto de muestreo de las emisiones de humo

2.2.1 La muestra pasará de la sonda al colector de muestras, utilizando para ello un conducto de un diámetro interno de 4,0 a 8,5 mm, a base de la ruta más corta posible, que, en ningún caso, excederá de 25 m. La temperatura del conducto se mantendrá entre 60°C y 175°C, con una estabilidad de $\pm 15^\circ\text{C}$, excepto en cuanto a la distancia necesaria para enfriar el gas, de la temperatura de escape del motor a la de control del conducto.

2.2.2 Los conductos de muestreo serán lo más “rectos” posible. Los radios de toda curvatura necesaria serán más de 10 veces superiores al diámetro interno de los conductos. Éstos deberán ser de algún material que evite la acumulación de materia particulada o electricidad estática.

Nota.— Satisfacen esos requisitos el acero inoxidable o el politetrafluoroetileno (PTFE) con partículas de carbono y conexión a tierra.

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:

- a) *medición del volumen de la muestra:* se trata de un medidor de volumen de desplazamiento positivo, húmedo o seco, que se utilizará para medir el volumen de la muestra, con una precisión de $\pm 2\%$. También deberán medirse la presión y la temperatura a la entrada de la muestra al medidor, con una precisión de 0,2% y $\pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente;
- b) *medición del flujo de la muestra:* el flujo de la muestra se mantendrá a un valor de $14 \pm 0,5$ L/min y el instrumento medidor del gasto (flujómetro), utilizado con ese fin, deberá poder medir con una precisión de $\pm 5\%$;
- c) *filtro y portafiltro:* el portafiltro, que será de material anticorrosivo, deberá ajustarse a la configuración del canal de flujo ilustrada en la Figura A2-1. El filtro estará confeccionado con el material conocido como Whatman Tipo núm. 4, u otro equivalente que autorice la autoridad encargada de la certificación;
- d) *válvulas:* se instalarán cuatro válvulas como se indica en la Figura A2-1:
 - 1) la válvula A deberá poder accionarse con rapidez, permitir el paso total del flujo, desviar la muestra de entrada a través del filtro de medición o de los circuitos de derivación, y cerrar el circuito;

Nota.— Si es necesario, la válvula A puede consistir en dos válvulas acopladas, que permitan conseguir la función deseada.

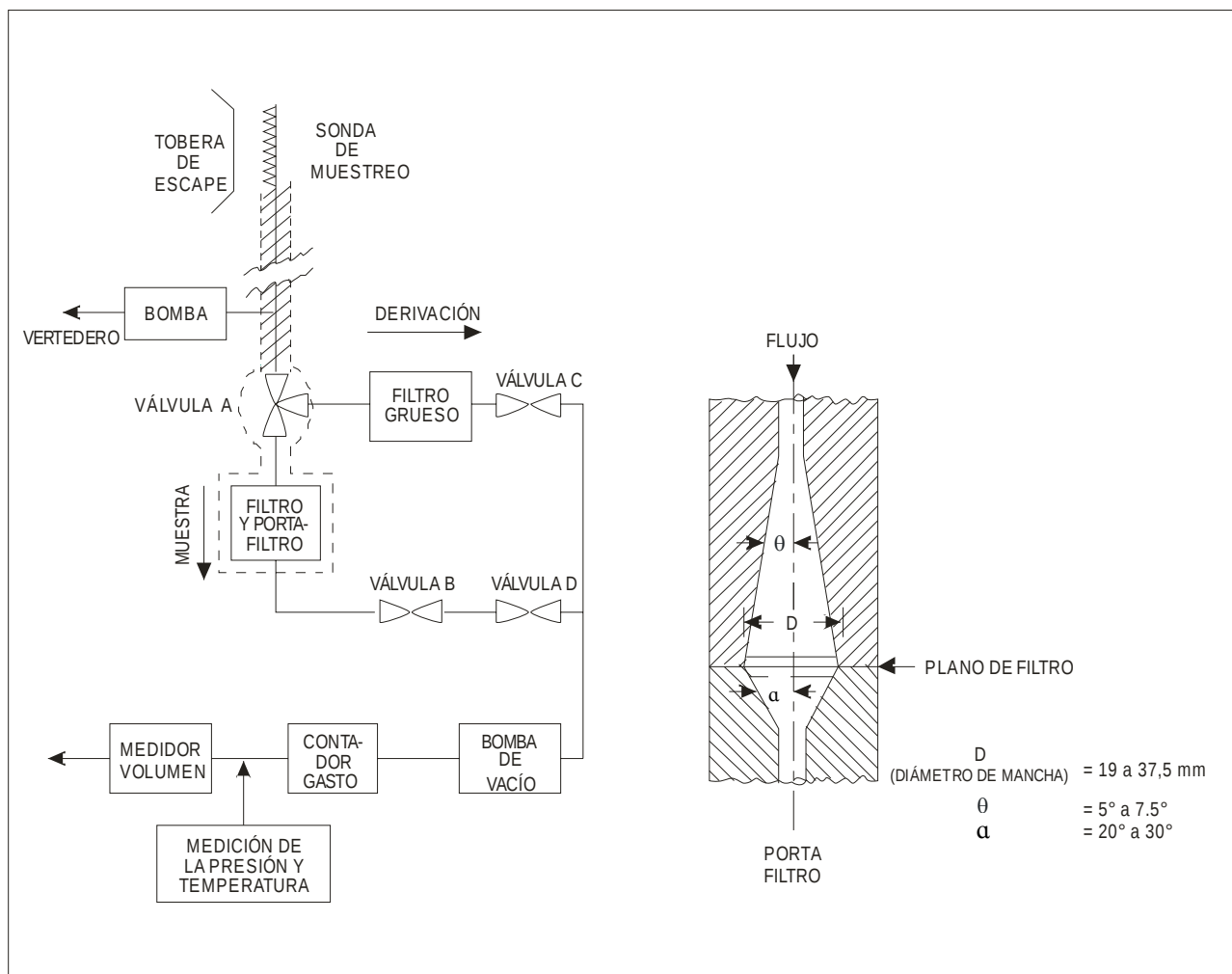


Figura A2-1. Sistema para analizar el humo

2) las válvulas B y C deberán ser reguladoras, ya que se utilizan para regular el gasto;

3) la válvula D será una válvula de cierre, que permita aislar el portafiltro;

todas estas válvulas deberán ser de material anticorrosivo;

- e) *bomba de vacío*: esta bomba, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de -75kPa en relación con la presión atmosférica; al gasto máximo, el régimen no deberá ser inferior a 28 L/min, a la temperatura y presión normales;
- f) *regulación de la temperatura*: el conducto de muestreo interno del analizador que llega hasta el portafiltro se mantendrá a una temperatura comprendida entre los 60°C y 175°C , con una estabilidad de $\pm 15^{\circ}\text{C}$;

Nota.— Se trata de evitar que se forme condensación de agua antes de llegar al portafiltro y dentro de él.

- g) si se desea que el flujo de muestra sea mayor a través de la sonda que a través del portafiltro, podrá instalarse un bifurcador de flujo optativo entre la sonda y la válvula A (Figura A2-1), para descargar el flujo excedente. El conducto de vaciado estará tan próximo como sea posible del orificio de salida de la sonda y no afectará la capacidad del sistema de muestreo para mantener la caída de presión de 80% que se requiere en el montaje de la sonda. El flujo de vaciado también podrá desviarse hacia el analizador de CO₂ o a un sistema de análisis completo de las emisiones;
- h) si se utiliza el bifurcador de flujo, se efectuará un ensayo para demostrar que el bifurcador de flujo no cambia el nivel de humo que pasa a través del portafiltro. Esto podrá efectuarse invirtiendo los conductos de salida del bifurcador de flujo y demostrando que, dentro de la precisión del método, el nivel de humo no varía;
- 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 no deberá exceder de 5 L (con referencia a la temperatura y presión normales). En el caso de que no se consiga esto, el dispositivo no deberá utilizarse;
- j) *reflectómetro*: la medición de la densidad de reflexión difusa del material del filtro se realizará con un instrumento que se ajuste a la norma ISO núm. 5.4¹ de la Organización Internacional de Normalización. El diámetro del haz luminoso del reflectómetro, proyectado sobre el filtro de papel, no excederá de D/2, ni será superior a D/10, siendo D el diámetro de la mancha que aparece en el filtro, indicado en la Figura A2-1.

2.4 Características del combustible

El combustible deberá ajustarse a las especificaciones del Apéndice 4.

2.5 Procedimientos aplicables a la medición del humo

2.5.1 Ensayo de motores

2.5.1.1 El motor se hará funcionar en un banco de pruebas estático, apropiado y debidamente equipado para hacer ensayos de performance de gran precisión.

2.5.1.2 Los ensayos se harán a reglajes del empuje aprobados por la autoridad encargada de la certificación. A cada régimen, habrá que estabilizar el motor.

1. Norma ISO núm. 5.4 de la Organización Internacional de Normalización titulada “Fotografía — Mediciones de la densidad — Parte 4: Condiciones geométricas para la densidad de reflexión”.

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 2 L. Colocar de nuevo la sonda en su lugar y abrir el conducto de interconexión;
- b) *verificación de la limpieza*:
 - 1) abrir las válvulas B, C y D;
 - 2) accionar la bomba de vacío y alternativamente poner la válvula A en la posición “derivación” y “muestra”, para purgar enteramente el sistema con aire limpio durante cinco minutos;
 - 3) poner la válvula A en “derivación”;
 - 4) cerrar la válvula D y colocar un filtro limpio en el portafiltro. Abrir la válvula D;
 - 5) poner la válvula A en “muestra” y ponerla de nuevo en “derivación” después que hayan pasado por el filtro 50 kg de aire por metro cuadrado de filtro;
 - 6) medir la mancha resultante SN', tal cual se describe en el párrafo 3 de este apéndice;
 - 7) si SN' excede de 3, será necesario limpiar el sistema (o rectificarlo) hasta conseguir un valor inferior a 3.

El sistema no deberá utilizarse a menos que se haya cumplido con los requisitos en cuanto a las pérdidas y a su limpieza.

2.5.3 Medición del humo

La medición del humo se hará independientemente de otras mediciones, a menos que los valores del humo, objeto de medición, sean considerablemente más bajos que los valores limitadores o bien que se pueda demostrar la validez de los valores del humo procedentes de mediciones simultáneas del humo y de las emisiones gaseosas, en cuyo caso la medición del humo puede hacerse simultáneamente con la de las emisiones gaseosas. En todos los casos deberán respetarse estrictamente los radios de curvatura de los conductos de muestreo, detallados en 2.2.2. Se determinará el subsistema de análisis de humos, que deberá ajustarse a las especificaciones que figuran en 2.3. Haciendo referencia a la Figura A2-1, a continuación se indican las operaciones principales que habrá que hacer para lograr las muestras constituidas por los filtros manchados:

- a) cuando el motor funciona con la sonda en posición de ensayo, no se colocará la válvula A en posición de cerrada, ya que podrían acumularse cuerpos extraños en los conductos;
- b) poner la válvula A en la posición de “derivación”, cerrar la válvula D y colocar un filtro limpio en el portafiltro. Seguir recogiendo la muestra de escape en la posición de derivación, por lo menos, durante 5 minutos, mientras el motor casi está, o está ya, en la modalidad de utilización deseada, regulando la válvula C de modo que el gasto sea de $14 \pm 0,5$ L/min;
- c) abrir la válvula D y regular la válvula A en la posición de “muestra”, y utilizar la válvula B para ajustar de nuevo el gasto al valor fijado en b);

- d) regular la válvula A en la posición “derivación”, cerrar la válvula D y colocar material filtrante en el portafiltro;
- e) cuando se haya estabilizado el motor, permitir que el flujo de muestra circule durante un minuto, con las válvulas en las posiciones relativas indicadas en d);
- f) abrir la válvula D, colocar la válvula A en la posición “muestra”, regular de nuevo el gasto (si es necesario) y, antes de poner de nuevo la válvula A en la posición de “derivación” y de cerrar la válvula D, permitir que circule el volumen elegido de la muestra [véase h)];
- g) sacar el filtro manchado para hacer el correspondiente análisis y poner otro limpio en el portafiltro;
- h) los volúmenes de las muestras seleccionadas estarán comprendidos en la gama de 12 a 21 kg del gas de escape por metro cuadrado de filtro, y deberán incluir muestras — por exceso y por defecto — de 16,2 kg o exactamente de esa cantidad, del gas de escape por metro cuadrado de filtro. Para cada régimen de utilización del motor, deberá hacer un mínimo de tres muestras, y, siempre que sea necesario, habrá que repetir las operaciones indicadas en e) a g).

3. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE HUMO A BASE DE LOS DATOS MEDIDOS

3.1 Las muestras, a base de los filtros manchados, obtenidas según lo indicado en 2.5.3 precedente, deberán analizarse con un reflectómetro, según se indica en 2.3. El material utilizado como fondo deberá ser negro y tener un coeficiente de reflexión absoluto inferior al 3%. La indicación RS del coeficiente de reflexión absoluto de cada filtro manchado deberá utilizarse para calcular la reducción de este coeficiente, según la fórmula siguiente:

$$SN' = 100 (1 - R_S/R_W)$$

en la que R_W representa el coeficiente de reflexión absoluto del filtro limpio.

3.2 Las masas de las diversas muestras deberán calcularse a base de la siguiente fórmula:

$$W = 0,348 PV/T \times 10^{-2}(\text{kg})$$

en la que P y T representan, respectivamente, la presión de la muestra en pascales y la temperatura en grados Kelvin, medidos inmediatamente contra la dirección del flujo del medidor de volumen. V representa el volumen medido de la muestra, en metros cúbicos.

3.3 Respecto a cada régimen del motor, en el caso de que el tamaño de las muestras fluctúe por debajo y por arriba del valor de referencia, los diversos valores de SN' y W deberán trazarse como SN' en función de $\log(W/A)$, y A representa la superficie de la mancha del filtro (m^2). Utilizando una recta que se ajuste a los mínimos cuadrados, deberá calcularse el valor de SN' cuando $W/A = 16,2 \text{ kg/m}^2$, y notificarse como el índice de humo (SN) de esa modalidad de utilización del motor. Cuando únicamente se utilice el muestreo al valor del tamaño de la muestra de referencia, el SN notificado se basará en la media aritmética de cada uno de los diversos valores de SN' .

4. NOTIFICACIÓN DE LOS DATOS A LA AUTORIDAD ENCARGADA DE LA CERTIFICACIÓN

Los datos obtenidos se notificarán a la autoridad encargada de la certificación. Además, para cada ensayo, se facilitarán los datos que siguen:

- a) temperatura de la muestra;

- b) presión de la muestra;
- c) volumen efectivo de la muestra en las condiciones en las cuales se ha efectuado el muestreo;
- d) gasto efectivo de la muestra en las condiciones en las cuales se ha hecho el muestreo; y
- e) corroboración de las verificaciones realizadas en cuanto a las pérdidas y al aspecto limpieza (*véase 2.5.2*).

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

1. INTRODUCCIÓN

Nota.— Los procedimientos aquí indicados conciernen a la adquisición de muestras representativas de los gases de escape y a su entrada y análisis en el dispositivo medidor de las emisiones. Este procedimiento no es aplicable a los motores que utilizan postquemador. Los métodos propuestos representan la práctica moderna más avanzada, conocida y aceptada.

Sólo se permitirán procedimientos equivalentes a los contenidos en este apéndice previa solicitud dirigida a la autoridad encargada de la certificación, y después de que ésta los haya aprobado.

2. DEFINICIONES

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

Analizador infrarrojo sin dispersión. Instrumento que, al absorber la energía infrarroja, mide selectivamente determinados componentes.

Concentración de gas. La fracción volumétrica del componente deseado, en la mezcla de gas, expresada como porcentaje del volumen total o como partes por millón.

Desviación cero. La desviación, en relación con el tiempo, de la indicación del instrumento a partir del punto cero, cuando por el mismo pasa gas que no contiene el elemento que se desea medir.

Detector de la ionización de la llama. Un detector de la difusión del hidrógeno-aire de la llama, que produce una señal nominalmente proporcional al gasto de hidrocarburos que penetra en la llama por unidad de tiempo; generalmente, se supone que es proporcionalmente sensible al número de átomos de carbono que penetran en la llama.

Estabilidad. La similitud que pueden registrar las mediciones repetidas de una muestra invariable dada durante un período determinado.

Gas cero. El gas que hay que utilizar para determinar la posición cero de calibración del instrumento, es decir, el punto en el cual la reacción es nula.

Gas de calibración. Un gas de referencia de gran precisión, que hay que utilizar para alinear, ajustar y hacer la verificación periódica de los instrumentos.

Gas de referencia. Una mezcla de gases de composición especificada y conocida, utilizada como base para interpretar la reacción del instrumento, en función de la concentración de gas del gas en presencia del cual reacciona el instrumento.

Interferencia. Toda reacción del instrumento debida a la presencia de elementos ajenos al gas (o vapor) que hay que medir.

Partes por millón (ppm). La concentración de gas en unidades de volumen de un gas por millón de unidades de volumen de la mezcla de gases de la cual forma parte.

Partes por millón de carbono (ppmC). La fracción mol de hidrocarburo multiplicada por 10^6 , medida por referencia al metano. Así pues, 1 ppm de metano se indica como 1 ppmC. Para convertir la concentración de una ppm de cualquier hidrocarburo a una ppmC equivalente, multiplíquese la concentración de gas ppm por el número de átomos de carbono por molécula de gas. Por ejemplo, 1 ppm de propano equivale a 3 ppmC de hidrocarburo; 1 ppm de hexano equivale a 6 ppmC de hidrocarburo.

Precisión. El grado de aproximación con que una medición se acerca al valor verdadero, medido independientemente.

Relación aire/combustible. El gasto de flujo de aire a través de la sección caliente del motor, dividido por el gasto de flujo del combustible que pasa al motor.

Repetibilidad. La precisión con que la medición de una muestra dada e invariable puede lograrse repetidas veces en breve plazo con el mismo resultado, sin que sea necesario calibrar de nuevo el instrumento.

Resolución. El cambio mínimo perceptible en una medición.

Respuesta. Toda variación de la señal indicadora del instrumento, que ocurre al variar la concentración de gas de la muestra.

Ruido. Toda variación aleatoria de la indicación del instrumento, que nada tiene que ver con las características de la muestra, en contacto con la cual reacciona el instrumento, y que puede distinguirse por sus características de desviación.

3. DATOS NECESARIOS

3.1 Emisiones gaseosas

Se determinarán las concentraciones de gas de las siguientes emisiones:

- a) hidrocarburos (HC): el cálculo combinado de todos los compuestos de hidrocarburos presentes en el gas de escape;
- b) monóxido de carbono (CO);
- c) bióxido de carbono (CO₂);

Nota.— Aunque el CO₂ no es una emisión de motor sujeta a reglamentación, se necesita la concentración de CO₂ para hacer cálculos y verificaciones.

- d) óxidos de nitrógeno (NO_x): el cálculo de la suma de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂); y
- e) óxido nítrico (NO).

3.2 Otros datos

Con objeto de normalizar los datos de medición de las emisiones y cuantificar las características de prueba del motor, se suministrará la siguiente información adicional:

- a) temperatura en la boca de entrada;

- b) humedad en la boca de entrada;
- c) presión atmosférica;
- d) relación hidrógeno/carbono del combustible; y
- e) otros parámetros necesarios del motor (por ejemplo, empuje, velocidad del rotor, temperaturas de la turbina y flujo de aire del generador de gas).

Estos datos se obtendrán por medición directa o por cálculo, según se indica en el Adjunto F del presente Apéndice.

4. DISPOSICIÓN GENERAL DEL SISTEMA

No se emplearán desecantes, secadoras, deshidratadoras ni equipo similar, para tratar la muestra de escape que vaya a parar a los instrumentos analizadores de los óxidos de nitrógeno y de los hidrocarburos. En el párrafo 5 se indican los requisitos para los diversos subsistemas componentes, pero la lista que sigue enumera algunas de las salvedades y variaciones:

- a) Se supone que cada uno de los diversos subsistemas tiene un regulador de flujo y los dispositivos de acondicionamiento y medición necesarios.
- b) La necesidad de contar con una bomba de vaciado y/o de muestra caliente dependerá de las posibilidades que haya que transferir la muestra en tiempo útil y del gasto de flujo que requiera el subsistema de análisis. Esto, a su vez, dependerá de la presión con la cual el escape desplace la muestra de gas y de las posibles pérdidas que haya en los conductos. Se considera que estas bombas serán habitualmente necesarias en ciertas condiciones de funcionamiento del motor.
- c) La posición de la bomba caliente, en relación con los subsistemas de análisis de los gases, puede variar, según sea necesario. (Por ejemplo, algunos analizadores de HC tienen bombas calientes, por lo que pueden considerarse apropiadas para su utilización más arriba que la bomba caliente del sistema.)

Nota.— En la Figura A3-1 se ilustra el sistema de muestreo y análisis del escape de gases, que representa las exigencias básicas, típicas, para verificar la calidad de las emisiones.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

Nota.— A continuación se describen, a grandes rasgos, las especificaciones de los elementos principales del sistema de medición de las emisiones de gases de los motores. Cuando se necesiten más detalles, consúltense los Adjuntos A, B y C de este apéndice.

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 con orificios de muestreo múltiples, todos los orificios tendrán el mismo diámetro. 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.
- c) El número mínimo de lugares muestreados será de 12.
- d) El plano de muestreo estará lo más próximo al plano de salida de la tobera de escape del motor que permita la performance del motor, pero, en todo caso, a una distancia del plano de salida que no rebase medio diámetro de la tobera.
- e) El solicitante demostrará a la autoridad encargada de la certificación, mediante desplazamientos pormenorizados de la sonda, que el sistema de sondeo que se propone utilizar y su posición proporcionan una muestra representativa respecto a cada reglaje del empuje prescrito.

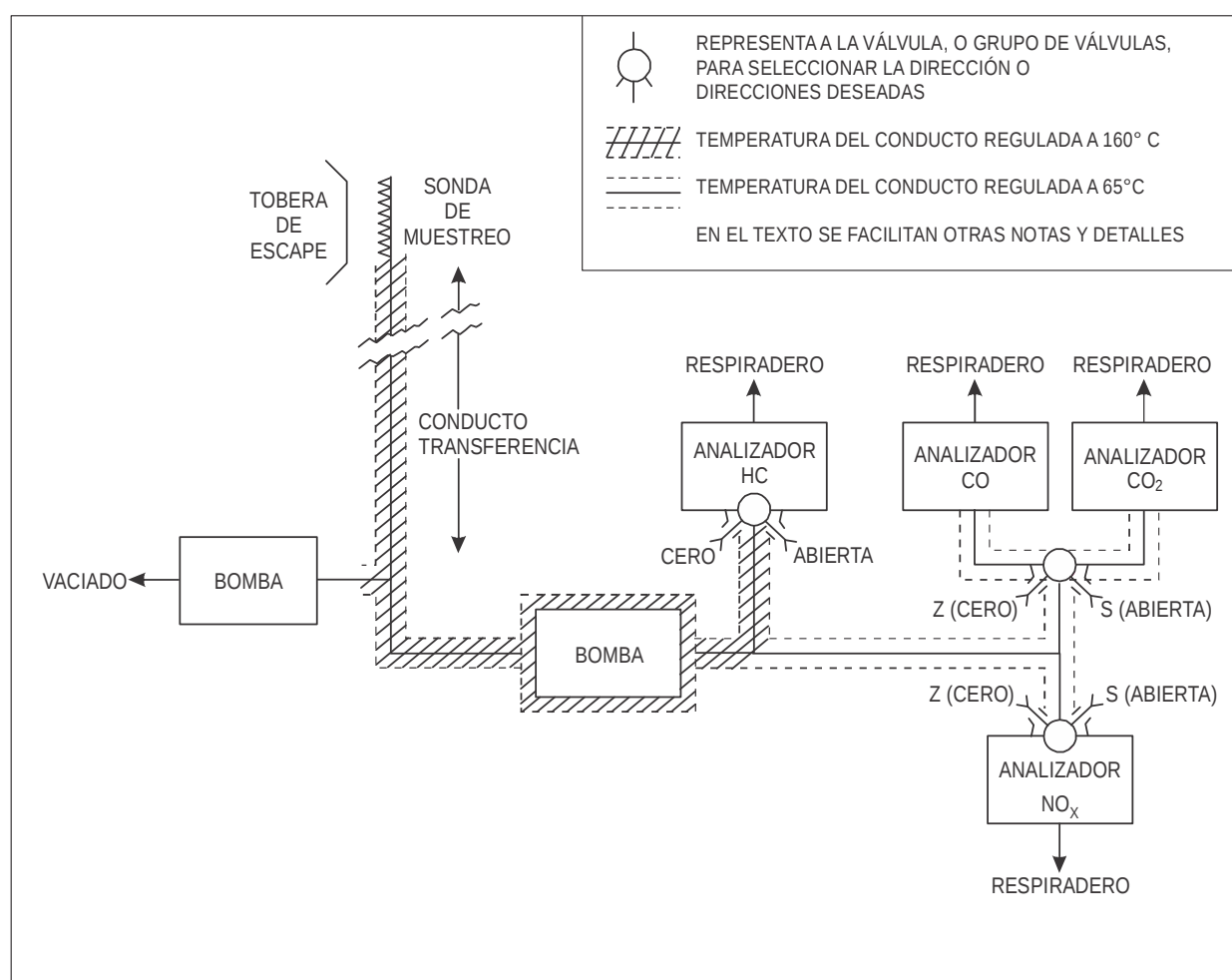


Figura A3-1. Diagrama del sistema de muestreo y análisis

5.1.2 Conductos de muestreo

La muestra se transferirá de la sonda a los analizadores por medio de un conducto de un diámetro interno de 4,0 a 8,5 mm, utilizando para ello el camino más corto posible y a base de un gasto tal que permita trasladarla en menos de 10 segundos. El conducto tendrá una temperatura constante de $160^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$, excepto: a) en cuanto a la distancia necesaria para enfriar el gas desde la temperatura de escape del motor hasta la temperatura de control del conducto, y b) en cuanto al ramal que alimenta las muestras a los analizadores de CO, CO₂ y NO_x. El conducto tendrá una temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$. Cuando el muestreo se haga para medir los elementos de HC, CO, CO₂ y NO_x, el conducto será de acero inoxidable o de PTFE relleno de carbón y con conexión a tierra.

5.2 Analizador HC

La medición del total de los hidrocarburos contenidos en la muestra se hará mediante un analizador equipado con un detector de ionización de la llama (FID) con calefacción, entre los electrodos del cual pase una corriente de ionización proporcional a la masa de hidrocarburos que penetre en la llama de hidrógeno. Es de suponer que el analizador en cuestión tendrá dispositivos apropiados para regular la temperatura y el gasto de la muestra, para desviar ésta, el combustible y los gases diluentes, y para hacer la verificación efectiva de las calibraciones S (abierta) y Z (cero).

Nota.— En el Adjunto A de este apéndice aparecen las especificaciones correspondientes.

5.3 Analizadores CO y CO₂

Para medir esos elementos, habrá que utilizar analizadores de infrarrojo sin dispersión, que deberán ser del tipo que funciona a base de la absorción diferencial de energía en células paralelas de gas de referencia y de gas de muestra; la célula o grupo de ellas, respecto a cada uno de esos elementos gaseosos, se sensibilizarán debidamente. Este subsistema de análisis incluirá todas las funciones necesarias para regular y manipular el flujo de la muestra, y el de los gases Z y S de referencia. La temperatura será la apropiada para la base de medición utilizada.

Nota.— En el Adjunto B de este apéndice aparecen las especificaciones correspondientes.

5.4 Analizador de NO_x

La medición de la concentración de gas de los óxidos de nitrógeno (NO) se hará por el método químico-luminiscente, mediante el cual la medición de la intensidad de la radiación emitida durante el tiempo de reacción de los NO contenidos en la muestra, más O₃, constituye la medición de la concentración de gas de los NO. El elemento NO₂ se convertirá en NO, en un convertidor idóneo, antes de hacer la medición. El sistema de medición de los NO_x resultantes deberá tener todos los controles necesarios de flujo, temperatura y de otra índole, y lo necesario para poder hacer la calibración acostumbrada de Z y S y permitir la verificación del rendimiento del convertidor.

Nota.— En el Adjunto C de este apéndice aparecen las especificaciones correspondientes.

6. PROCEDIMIENTOS A SEGUIR AL HACER EL ENSAYO GENERAL

6.1 Funcionamiento del motor

6.1.1 El motor se hará funcionar en un banco de pruebas estático apropiado y debidamente equipado para hacer ensayos de performance de gran precisión.

6.1.2 Los ensayos de las emisiones se harán a los reglajes del empuje prescritos por la encargada de la certificación. A cada régimen, habrá que estabilizar el motor.

6.2 Calibración básica de instrumentos

Nota.— El objetivo general de esta calibración es confirmar la estabilidad y linealidad.

6.2.1 En el momento de hacer el ensayo, el solicitante deberá demostrar a la autoridad encargada de la certificación que la calibración del sistema analítico es correcta.

6.2.2 En cuanto al analizador de hidrocarburos, la calibración incluirá la verificación de que tanto el detector de oxígeno como las respuestas diferenciales de los hidrocarburos se ajustan a los límites previstos, según se indica en el Adjunto A de este apéndice. También se verificará la eficacia del convertidor de NO_2/NO , cerciorándose de que satisface lo previsto en el Adjunto C de este apéndice.

6.2.3 El procedimiento para verificar el comportamiento de cada analizador será el que se indica a continuación (utilizando los gases de calibración y de ensayo indicados en el Adjunto D de este apéndice):

- a) introdúzcase el gas cero (gas de referencia Z) y hágase el reglaje a cero del instrumento, anotando la posición correspondiente;
- b) por cada gama que haya de utilizarse en servicio, introdúzcase el gas de calibración del 90% (nominal) de la concentración de gas correspondiente a la deflexión máxima de la escala (FSD); ajústese debidamente el regulador del instrumento y anótese su posición;
- c) introdúzcase aproximadamente el 30, 60 y 90% de las concentraciones FSD de gas de la gama y anótese las indicaciones del analizador;
- d) trácese la recta de mínimos cuadrados correspondiente a los puntos 0, 30, 60 y 90% de concentración de gas. En cuanto al analizador de CO y/o CO_2 utilizado en su configuración básica, sin linealización de salida, se ajustará la curva de mínimos cuadrados de la fórmula matemática apropiada valiéndose de puntos de calibración adicionales, si se estima necesario. Si algún punto se aparta en más de 2% del valor de la escala (o ± 1 ppm*, lo que sea mayor), habrá que trazar una curva de calibración para utilizarla en servicio.

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;
- 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

* Salvo en el caso del analizador del CO_2 , para el cual el valor será ± 100 ppm.

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.

Nota 1.— Al hacer funcionar el motor, es conveniente purgar los conductos de muestreo mientras la sonda esté en el interior del escape de gases del motor, pero sin medir las emisiones, con objeto de cerciorarse de que la contaminación no sea excesiva.

Nota 2.— También es conveniente controlar la calidad del aire de entrada al principio y al final del ensayo y por lo menos una vez por hora durante el mismo. Si se considera que los niveles son importantes, deberían tenerse en cuenta.

6.3.2 Para hacer la medición con el motor en funcionamiento, se adoptará el siguiente procedimiento:

- a) aplíquese el gas cero apropiado y háganse los ajustes necesarios del instrumento;
- b) aplíquese el gas de calibración apropiado, al 90% nominal de concentración FSD de gas con respecto a las gamas que haya que utilizar, y ajústese y anótese debidamente la posición del regulador de ganancia;
- c) una vez que el motor se haya estabilizado al reglaje del empuje requerido, debe seguir funcionando. Obsérvense las concentraciones de los gases contaminantes hasta obtener una indicación estabilizada, que habrá que anotar;
- d) una vez terminado el ensayo y también a intervalos máximos de una hora, durante los ensayos, verifíquense de nuevo el punto cero y los de calibración. Si uno de ellos ha variado más del $\pm 2\%$ de la escala FSD, habrá que repetir el ensayo hasta que el instrumento haya recuperado su posición indicada, dentro de los márgenes de la especificación de referencia.

6.4 Verificación del equilibrio de carbono

Respecto a cada ensayo, habrá que hacer una verificación al efecto de que la relación aire/combustible, estimada a base de la concentración de gas total de carbono de la muestra integrada, excluyendo el humo, concuerde con el cálculo basado en la relación aire/combustible del motor con una precisión de $\pm 15\%$ para la modalidad rodaje/marcha lenta en tierra y con una precisión del $\pm 10\%$ para todas las demás modalidades (véase 7.1.2).

7. CÁLCULOS

7.1 Emisiones gaseosas

7.1.1 Generalidades

Las mediciones analíticas realizadas representarán las concentraciones de gas de las diversas emisiones gaseosas que se detecten en sus analizadores respectivos para un intervalo de temperaturas (T_B) medidas en la boca de entrada de la cámara de combustión a presión y que abarquen las cuatro modalidades de utilización LTO. Por medio de los cálculos de 7.1.2, o de los métodos alternativos que se definen en el Adjunto E de este apéndice, se establecerán los índices de emisión (EI) para cada emisión gaseosa. Para considerar las desviaciones respecto de las condiciones atmosféricas de referencia, deberían aplicarse las correcciones de 7.1.3. Adviértase que estas correcciones también pueden aplicarse para considerar las desviaciones del motor sometido a prueba respecto del motor normal de referencia, cuando resulte conveniente [véase el Apéndice 6, 1 f)]. Al usar la temperatura (T_B) medida en la boca de entrada de la cámara de combustión a presión como parámetro de correlación,

se establecerán los índices de emisión y el flujo de combustible correspondientes a la operación en las cuatro modalidades de utilización LTO para un motor normal de referencia en condiciones diurnas de referencia aplicando los procedimientos de 7.2.

7.1.2 Parámetros básicos

$$EI_p(\text{índice de emisión del elemento } p) = \frac{\text{masa de } p \text{ producida en g}}{\text{masa de combustible utilizado en kg}}$$

$$EI(\text{CO}) = \left(\frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{CO}}}{M_{\text{C}} + (n/m) M_{\text{H}}} \right) \left(1 + [\text{CO}_2] (P_0/m) \right)$$

$$EI(\text{HC}) = \left(\frac{[\text{HC}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{HC}}}{M_{\text{C}} + (n/m) M_{\text{H}}} \right) \left(1 + [\text{CO}_2] (P_0/m) \right)$$

$$EI(\text{NOx}) \text{ como } \text{NO}_2 = \left(\frac{[\text{NOx}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{NO}_2}}{M_{\text{C}} + (n/m) M_{\text{H}}} \right) \left(1 + [\text{CO}_2] (P_0/m) \right)$$

$$\text{Relación } \frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = P_0/m \left(\frac{M_{\text{AIR}}}{M_{\text{C}} + (n/m) M_{\text{H}}} \right)$$

donde

$$P_0/m = \frac{2Z - n/m}{4(1 + h_{\text{vol}} - [TZ/2])}$$

y

$$Z = \frac{2 - [\text{CO}] - ([2/x] - [y/2x]) [\text{HC}] + [\text{NO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}$$

M_{AIR} masa molecular del aire seco = 28,966 g o bien, cuando corresponda = $(32 [\text{O}_2]_{\text{b}} + 28,156 4 [\text{N}_2]_{\text{b}} + 44,011 [\text{CO}_2]_{\text{b}})$ g

M_{CO} masa molecular del CO = 28,011 g

M_{HC} masa molecular de hidrocarburos del escape, considerados como CH₄ = 16,043 g

M_{NO_2} masa molecular del NO₂ = 46,008 g

M_{C} masa atómica del carbono = 12,011 g

M_{H} masa atómica del hidrógeno = 1,008 g

$[\text{O}_2]_{\text{b}}$ concentración de gas de O₂ en aire seco, por volumen = 0,209 5

$[\text{N}_2]_{\text{b}}$ concentración de gas de N₂ + gases raros en aire seco, por volumen = 0,790 2

$[\text{CO}_2]_{\text{b}}$ concentración de CO₂ en aire seco, por volumen = 0,000 3

[HC]	concentración de gas media de hidrocarburos del escape, por volumen/volumen, húmeda, expresada como carbono
[CO]	concentración de gas media de CO en la muestra de escape, por volumen/volumen, húmeda
[CO ₂]	concentración de gas media de CO ₂ en la muestra de escape, por volumen/volumen, húmeda
[NO _x]	concentración de gas media de NO y NO ₂ en la muestra de escape, por volumen/volumen, húmeda = [NO + NO ₂]
[NO]	concentración de gas media de NO en la muestra de escape, por volumen/volumen, húmeda
[NO ₂]	concentración de gas media de NO ₂ en la muestra de escape, por volumen/volumen, húmeda

$$\frac{([NO_x]_c - [NO])}{\eta}$$

[NO _x] _c	concentración de gas media de NO en la muestra de escape, una vez pasado el convertidor de NO ₂ a NO, por volumen/volumen, húmeda
η	eficacia del convertidor de NO ₂ a NO
<i>h_{vol}</i>	humedad del aire ambiente, volumen de agua/volumen de aire seco
<i>m</i>	número de átomos de C en una molécula característica de combustible
<i>n</i>	número de átomos de H en una molécula característica de combustible
<i>x</i>	número de átomos de C en una molécula característica de hidrocarburos del escape
<i>y</i>	número de átomos de H en una molécula característica de hidrocarburos del escape.

El valor de *n/m*, la relación entre el hidrógeno atómico y el carbono atómico del combustible utilizado, se evalúa analizando el tipo de combustible. La humedad del aire ambiente (*h_{vol}*) se medirá en cada condición de utilización. A falta de pruebas en contrario de la caracterización (*x*, *y*) de los hidrocarburos del escape, se utilizarán los valores *x* = 1, *y* = 4. Si hay que utilizar mediciones del CO y del CO₂, ya sea seco o semisecho, éstas se convertirán primero en las concentraciones de gas húmedas equivalentes que figuran en el Adjunto E de este apéndice, donde figuran fórmulas para corregir las interferencias, cuando sea necesario.

7.1.3 Corrección de los índices de emisión con respecto a las condiciones de referencia

7.1.3.1 Se harán las correcciones de los índices de emisión medidos, respecto a todos los contaminantes, en cada una de las modalidades pertinentes del motor para tener en cuenta las desviaciones de las condiciones reales de temperatura y presión del aire en la boca de entrada respecto a las condiciones atmosféricas de referencia (ISA al nivel del mar). Estas correcciones también pueden aplicarse para considerar las desviaciones del motor sometido a prueba respecto del motor normal de referencia, cuando resulte conveniente [véase el Apéndice 6, 1 f)]. El valor de referencia de la humedad será de 0,00634 kg de agua/kg de aire seco. Así, pues, tendremos: El corregido = *K* × El medido, donde la expresión generalizada de *K* es:

$$K = (P_{Bref}/P_B)^a \times (FAR_{ref}/FAR_B)^b \times \exp([T_{Bref} - T_B]/c) \times \exp(d[h_{masa} - 0,00634])$$

P_B	presión medida en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos
T_B	temperatura medida en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos
FAR_B	relación aire/combustible en la cámara de combustión y accesorios conexos
h_{mass}	humedad del aire ambiente, kg agua/kg aire seco
P_{ref}	presión ISA al nivel del mar
T_{ref}	temperatura ISA al nivel del mar
P_{Bref}	presión en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos del motor probado (o del motor de referencia, si los datos se corrigen respecto a un motor de esta índole) correspondiente a la T_B en condiciones ISA al nivel del mar.
T_{Bref}	temperatura en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos en condiciones ISA al nivel del mar, del motor probado (o del motor de referencia, si los datos han de corregirse respecto a un motor de referencia). Esta temperatura es la que corresponde a cada nivel de empuje especificado para cada modalidad de utilización.
FAR_{ref}	relación aire/combustible en la cámara de combustión y accesorios conexos en condiciones ISA al nivel del mar del motor probado (o del motor de referencia, si los datos han de corregirse respecto a un motor de referencia).
a, b, c, d	constantes específicas que pueden variar según el contaminante y el tipo de motor.

Preferiblemente, los parámetros de la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos se medirán, pero también pueden calcularse a partir de las condiciones ambientales, mediante fórmulas apropiadas.

7.1.3.2 Si se utiliza la técnica recomendada en 7.2 de ajuste de la curva para relacionar los índices de emisión con la temperatura de la boca de entrada de la cámara de combustión a presión, se elimina, de hecho, el término $\exp((T_{Bref} - T_B)/c)$ de la ecuación generalizada y, en la mayoría de los casos, el término (FAR_{ref}/FAR_B) puede considerarse igual a la unidad. En cuanto a los índices de las emisiones de CO y HC, muchos laboratorios de ensayo han determinado que la humedad está suficientemente cerca de la unidad como para eliminarla de la expresión y que el exponente del término (P_{Bref}/P_B) también se acerca a la unidad. Así pues,

$$EI(\text{CO}) \text{ corregido} = EI \text{ derivado de } (P_B/P_{Bref}) \times EI(\text{CO}) \text{ en función de la curva de } T_B$$

$$EI(\text{HC}) \text{ corregido} = EI \text{ derivado de } P_B/P_{Bref} \times EI(\text{HC}) \text{ en función de la curva de } T_B$$

$$EI(\text{NOx}) \text{ corregido} = EI \text{ derivado de } EI(\text{NOx}) \times (P_{Bref}/P_B)^{0.5} \times \exp(19[h_{masa} - 0,00634]) \text{ en función de la curva de } T_B$$

Si no se obtiene una correlación satisfactoria con este método recomendado para corrección del índice de emisiones de CO y HC, podrá utilizarse otro método con los parámetros que se derivan de los ensayos de componentes.

Cualquier otro método utilizado para corregir los índices de emisión del CO, los HC y los NOx debe contar con el visto bueno de la autoridad encargada de la certificación.

7.2 Funciones del parámetro regulador (D_p , F_{oo} , π)

7.2.1 Definiciones

D_p	La masa de todo contaminante gaseoso emitido durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue para las emisiones.
F_{oo}	Empuje nominal (véase la Parte I, Capítulo 1, Definiciones).
F_n	Empuje en la modalidad “n” de utilización LTO (en kN)
W_f	Gasto del flujo de la masa del combustible del motor normal de referencia en condiciones ISA al nivel del mar (en kg/s).
W_{fn}	Gasto del flujo de la masa del combustible del motor normal de referencia en condiciones ISA al nivel del mar en la modalidad “n” de utilización LTO.
π	La relación entre la presión total media en el último plano de descarga del compresor y la presión total media en el plano de entrada del compresor, cuando el motor desarrolla el empuje nominal de despegue en condiciones estáticas en la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar.

7.2.2 Los índices de emisión (EI_n) de cada contaminante, corregidos respecto de las condiciones atmosféricas y, si es preciso, respecto del motor normal de referencia [o sea, los EI_n (corregidos)], se obtendrán para cada modalidad de utilización LTO. Se requerirán tres puntos de prueba, como mínimo, para determinar la modalidad de marcha lenta. Se determinarán las relaciones siguientes para condiciones atmosféricas de referencia y para cada emisión gaseosa:

- a) entre EI (corregidos) y T_B ;
- b) entre W_f y T_B ; y
- c) entre F_n y T_B .

Nota 1.— Estas relaciones se ilustran, por ejemplo, en la Figura A3-2 a), b) y c).

Nota 2.— Las relaciones b) y c) pueden establecerse directamente a partir de datos de prueba de motores o derivarse de un modelo de eficiencia de motores validado.

7.2.2.1 Un motor de referencia se define como aquél que está suficientemente configurado respecto de la norma de producción para el tipo de motor de que se trate y que posee características de operación y eficiencia perfectamente representativas.

7.2.2.2 El fabricante también suministrará a la autoridad encargada de la certificación todos los datos necesarios sobre la performance del motor, a fin de poder comprobar esas relaciones, y en las condiciones ambientales de la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar:

- a) el empuje nominal (F_{oo}); y
- b) la relación de presión del motor (π) al empuje nominal máximo.

Nota.— Véase el ejemplo ilustrado en la Figura A3-2 d).

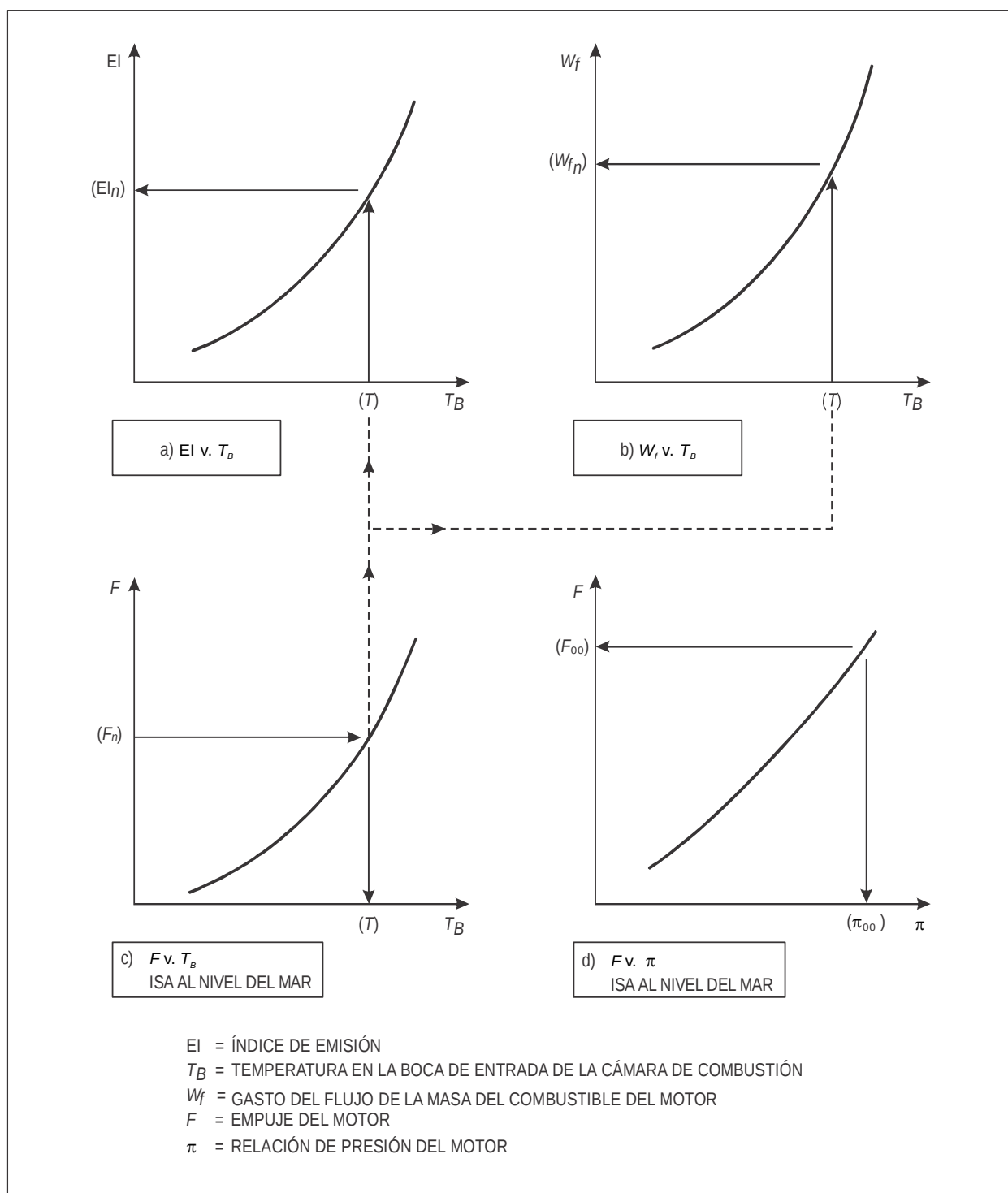


Figura A3-2. Procedimiento de cálculo

7.2.3 La estimación del EI (corregido) para cada emisión gaseosa en las cuatro modalidades de utilización LTO se ajustará al procedimiento general siguiente:

- a) determinar la temperatura (T_B), [Figura A3-2 c)] en la boca de entrada de la cámara de combustión a presión para los valores F_n correspondientes a las cuatro modalidades de utilización LTO, n , en condiciones atmosféricas de referencia;
- b) a partir de la curva característica EI (corregido)/ T_B [Figura A3-2 a)], determinese el valor EI_n correspondiente a T_B ;
- c) a partir de la curva característica W_f/T_B [Figura A3-2 b)], determinese el valor W_{fn} correspondiente a T_B .
- d) obsérvense los valores máximos del régimen nominal de empuje y de la relación de presión en la atmósfera tipo internacional (ISA), que son F_{oo} y π , respectivamente [Figura A3-2 d)];
- e) calcúlese, para cada contaminante $D_p = \Sigma (EI_n (W_{fn} (t)$, en la que;

t es el tiempo en la modalidad LTO (minutos)

W_f es el gasto del flujo de la masa de combustible (kg/min) y

Σ suma de la serie de modalidades que comprende el ciclo de referencia LTO.

7.2.4 Si bien la metodología descrita es la recomendada, la autoridad encargada de la certificación podrá aceptar procedimientos matemáticos equivalentes que se valgan de expresiones matemáticas para representar las curvas ilustradas, siempre que dichas expresiones se hayan derivado utilizando alguna técnica aceptada de adaptación de las curvas.

7.3 Excepciones en cuanto a los procedimientos propuestos

En aquellos casos en que la configuración del motor u otras condiciones atenuantes impidan la aplicación de este procedimiento, la autoridad encargada de la certificación podrá aprobar otro procedimiento, una vez que haya recibido pruebas técnicas convincentes de los resultados equivalentes obtenidos con el mismo.

ADJUNTO A DEL APÉNDICE 3. ESPECIFICACIONES DEL ANALIZADOR DE HC

Nota 1.— Como se describe en 5.2 del Apéndice 3, el elemento medidor de este analizador es el detector de ionización de la llama (FID), en el cual todo el flujo de la muestra, o una parte representativa de la misma, penetra en una llama de hidrógeno. A base de electrodos colocados en posiciones apropiadas, es posible hacer pasar una corriente ionizante en función de la proporción de los hidrocarburos que penetran en la llama. Es precisamente esta corriente la que, referida a un cero apropiado, se amplía y relaciona con la escala de la gama deseada del instrumento para conseguir la respuesta en función de la concentración de gas de hidrocarburos expresada como equivalente de las ppmC.

Nota 2.— La información sobre los gases de calibración y de ensayo figura en el Adjunto D.

1. GENERALIDADES

Precauciones: Las especificaciones de actuación que se indican corresponden generalmente al máximo de la escala del analizador. Los errores que no llegan al máximo de la escala pueden representar un porcentaje significativamente mayor de la lectura. La pertinencia y la importancia de estos aumentos se considerará al prepararse para efectuar las mediciones. Si es necesaria una mejor actuación, se habrán de tomar las precauciones apropiadas.

El instrumento que se utilice deberá poder mantener la temperatura del detector y de los componentes de manipulación de la muestra a determinada temperatura a un mínimo de 150°C. Los puntos de especificación principales deberán ser los indicados a continuación, con tal que la reacción del detector se haya optimizado y el instrumento se haya estabilizado en general:

- a) *Gama total:* de 0 a 5 000 ppmC, en las gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* superior al 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 0,5 ppmC, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* superior al $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 0,5$ ppmC, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* superior al $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 1,0$ ppmC, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos de $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 0,5$ ppmC, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos de $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 0,5$ ppmC, lo que sea mayor.
- g) *Tiempo de respuesta:* no deberá exceder de diez segundos, desde el momento de entrada de la muestra al sistema analizador hasta conseguir el 90% de la indicación definitiva.
- h) *Linealidad:* con propano mezclado con aire, la respuesta deberá ser lineal respecto a cada gama, con una tolerancia de $\pm 2\%$ del máximo de la escala, de no ser así, será necesario rectificar la calibración.

2. EFECTOS SINÉRGICOS

Nota — En su aplicación práctica, hay dos aspectos de la performance que pueden afectar a la precisión de la medición, a saber:

- a) *el efecto del oxígeno (ya que las distintas proporciones de oxígeno presentes en la muestra dan concentraciones de gas indicadas diferentes de hidrocarburos, en cuanto se trata de concentraciones de gas constantes verdaderas de HC); y*
- b) *la respuesta relativa de los hidrocarburos (por la cual la respuesta es diferente respecto a la misma concentración de gas de hidrocarburos de la muestra expresada como equivalente en ppmC, que depende de la clase o combinación de clases de los compuestos de hidrocarburo).*

La magnitud de los efectos señalados se determinará como se indica a continuación, y se limitará en consecuencia.

Respuesta del oxígeno: mídase ésta con dos mezclas de propano, en una concentración de gas aproximada de 500 ppmC, de una precisión relativa conocida del $\pm 1\%$, como se indica a continuación:

- a) propano en $10 \pm 1\%$ de O_2 , y el resto N_2 ; y
- b) propano en $21 \pm 1\%$ de O_2 , y el resto N_2 .

Si R_1 y R_2 constituyen las respuestas normalizadas respectivas, $(R_1 - R_2)$ no deberá alcanzar el 3% de R_1 .

Respuesta diferencial de los hidrocarburos: mídase la respuesta con cuatro mezclas de hidrocarburos distintos mezclados con aire, en concentraciones de gas de aproximadamente 500 ppmC, de una precisión relativa conocida del $\pm 1\%$ como sigue:

- a) propano en aire cero;
- b) propileno en aire cero;
- c) tolueno en aire cero; y
- d) n-hexano en aire cero.

Si R_a , R_b , R_c , R_d constituyen, respectivamente, las respuestas normalizadas (con respecto al propano), tendremos que: $(R_a - R_b)$, $(R_a - R_c)$ y $(R_a - R_d)$ deberán ser, cada una de ellas, inferiores al 5% de R_a .

3. OPTIMIZACIÓN DE LA REACCIÓN Y ALINEACIÓN DEL DETECTOR

3.1 Habrá que seguir siempre las instrucciones facilitadas por el fabricante en cuanto a la determinación de los procedimientos, servicios auxiliares y suministros necesarios, y dejar que el instrumento se estabilice. Todas las posiciones de ajuste requerirán la verificación iterativa de la posición cero, y hacer la corrección necesaria, si es menester. Utilizando como ejemplo una muestra de unas 500 ppmC de propano mezclado con aire, se determinará la característica de la respuesta: primero, en cuanto a las variaciones del flujo de combustible y, luego, casi al flujo óptimo de combustible, para poder seleccionar el punto óptimo en cuanto a las variaciones de la dilución del flujo de aire. A continuación se evaluarán la respuesta de oxígeno y la del diferencial de los hidrocarburos, como se describió.

3.2 La linealidad de cada escala de gamas del analizador se verificará añadiendo propano a las muestras de aire, en concentraciones de gas de un 30, 60 y 90% respecto al punto máximo de la escala. La desviación máxima de la respuesta de cada una de esas concentraciones, a partir de una recta de mínimos cuadrados (trazada a base de los puntos y el cero) no deberá discrepar más del $\pm 2\%$ del máximo de la escala. En caso contrario, será preciso trazar una curva de calibración para su empleo en servicio.

ADJUNTO B DEL APÉNDICE 3. ESPECIFICACIONES DE LOS ANALIZADORES DE CO Y CO₂

Nota 1.— En 5.3 del Apéndice 3, se resumen las características del subsistema de análisis que hay que utilizar para medir separadamente las concentraciones de gas de CO y CO₂ de la muestra de los gases de escape. Los instrumentos en cuestión se basan en el principio de la absorción sin dispersión de la radiación infrarroja en células paralelas del gas de referencia y del gas de muestra. Las gamas de sensibilidad se obtienen utilizando células de muestra superpuestas, o a base de las variaciones que se producen en los circuitos electrónicos, o ambas cosas a la vez. Los efectos debidos a los gases con bandas de absorción superpuestas, pueden reducirse mediante filtros que absorban el gas o con filtros ópticos, de preferencia estos últimos.

Nota 2.— La información sobre los gases de calibración y de ensayo figura en el Adjunto D.

Precauciones: Las especificaciones de actuación que se indican corresponden generalmente al máximo de la escala del analizador. Los errores que no llegan al máximo de la escala pueden representar un porcentaje significativamente mayor de la lectura. La pertinencia y la importancia de estos aumentos se considerarán al prepararse para efectuar las mediciones. Si es necesaria una mejor actuación, se habrán de tomar las precauciones apropiadas.

Las características de actuación principales deberán ser:

Analizador de CO

- a) *Gama total:* de 0 a 2 500 ppm, en gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* menos del 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 1 ppm, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* menos del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos del $\pm 1\%$ ppm del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos de $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 1 ppm, lo que sea mayor.
- g) *Interferencias:* habrá que limitarlas, con respecto a la concentración de gas de CO indicada, como sigue:
 - 1) menos de 500 ppm por ciento de la concentración de gas de etileno;
 - 2) menos de 2 ppm por ciento de la concentración de gas CO₂;
 - 3) menos de 2 ppm por ciento de la concentración de vapor acuoso.*

Si no es posible satisfacer las limitaciones de interferencia del CO₂ o del vapor de agua, se determinarán, notificarán y aplicarán los factores de corrección apropiados.

* No es aplicable necesariamente cuando las mediciones se han hecho a base de muestras “secas”.

Nota.— Se recomienda, de conformidad con la práctica apropiada, que esos procedimientos de corrección se adopten en todos los casos.

Analizador de CO₂

- a) *Gama total:* del 0 al 10% de gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* menos del 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 100 ppm, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* menos del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 100 ppm, lo que sea mayor.
- g) Se verificará el efecto del oxígeno (O₂) en la respuesta del analizador de CO₂. Para un cambio de 0% O₂ a 21% de O₂ la respuesta de una concentración de gas determinada de CO₂ no cambiará en más de 2% de la lectura. Si no se puede alcanzar este límite, se aplicará el factor de corrección apropiado.

Nota.— Se recomienda, de conformidad con la práctica apropiada, que estos procedimientos de corrección se adopten en todos los casos.

Analizadores de CO y de CO₂

- a) *Tiempo de respuesta:* no deberá exceder de 10 segundos, desde el momento de entrada de la muestra al sistema analizador hasta conseguir el 90% de la indicación definitiva.
- b) *Temperatura de la muestra:* la modalidad preferida es analizar la muestra “mojada” (sin tratar). Esto exige que tanto la célula de muestra como todos los demás elementos que, en este subsistema, entren en contacto con ella, permanezcan a una temperatura mínima de 50°C, con una estabilidad de $\pm 2^\circ\text{C}$. Se admite la posibilidad de medir el CO y el CO₂ en seco (con deshidratador apropiado), en cuyo caso se pueden utilizar analizadores sin calentar y anular así los efectos limitadores del vapor de agua; luego, es necesario hacer la corrección en cuanto al vapor acuoso de entrada y al agua desprendida por la combustión.
- c) *Curvas de calibración:*
 - 1) Se verificarán los analizadores con característica lineal de salida de señal en todas las gamas que se utilizan empleando gases de calibración en concentraciones conocidas de aproximadamente 0, 30, 60 y 90% del máximo de la escala. La desviación máxima de la respuesta en cualquiera de estos puntos a partir de una recta de mínimos cuadrados, ajustada a los puntos y la lectura cero, no excederá de $\pm 2\%$ del valor máximo de la escala. Si excede de este valor, será preciso trazar una curva de calibración para utilizarla en servicio.
 - 2) En el caso de los analizadores con característica no lineal de salida de señal, y de los que no cumplan con los requisitos de linealidad mencionados, será preciso trazar curvas de calibración para todas las gamas que se utilizan empleando gases de calibración en concentraciones de gas conocidas de aproximadamente 0, 30, 60 y 90% del máximo de la escala. Se utilizarán otras mezclas, si es necesario, para definir adecuadamente la forma de la curva.

— — — — —

ADJUNTO C DEL APÉNDICE 3. ESPECIFICACIONES DEL ANALIZADOR DE NO_x

Nota.— La información sobre los gases de calibración y de ensayo figura en el Adjunto D.

1. Como se indica en 5.4 del Apéndice 3, la medición de la concentración de gas de los óxidos de nitrógeno se hará por el método químico-luminiscente, mediante el cual se mide la intensidad de la radiación emitida por la reacción del NO con el O₃. Este método no es sensible al NO₂ y, por esto, será necesario pasar la muestra por un convertidor, en el cual el NO₂ se convierte en NO, antes de hacer la medición del NO_x total. Habrá que anotar tanto el NO original como las concentraciones de gas totales de NO_x. Así por diferenciación, se podrá medir la concentración de gas del NO₂.

2. El instrumento a utilizar deberá tener todos los componentes necesarios para regular el flujo, tales como reguladores, válvulas, flujómetro (aforador), etc. Los materiales que tengan que entrar en contacto con el gas de muestra se limitarán a aquellos que resistan la corrosión causada por los óxidos de nitrógeno, es decir, acero inoxidable, vidrio, etc. En todo momento, la temperatura de la muestra se mantendrá en aquellos valores compatibles con las presiones locales, que eviten la condensación de agua.

Precauciones: Las especificaciones de actuación que se indican corresponden generalmente al máximo de la escala del analizador. Los errores que no llegan al máximo de la escala pueden representar un porcentaje significativamente mayor de la lectura. La pertinencia y la importancia de estos aumentos se considerarán al prepararse para efectuar las mediciones. Si es necesaria una mejor actuación, se habrán de tomar las precauciones apropiadas.

3. Las especificaciones principales de actuación del instrumento utilizado a la temperatura ambiente y estable, dentro de un margen de tolerancia de 2°C, serán las siguientes:

- a) *Gama total:* de 0 a 2 500 ppm, en las gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* menos del 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 1 ppm, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* menos del ±1% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* menos del ±2% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos de ±1% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos de ±1,0% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, lo que sea mayor, en un período de dos horas.
- g) *Interferencias:* la supresión, respecto a las muestras que contengan CO₂ y vapor de agua, se limitará a lo siguiente:
 - 1) menos del 0,5% de la indicación/porcentaje de concentración de gas de CO₂;
 - 2) menos del 0,1% de la indicación/porcentaje de concentración de gas en el vapor de agua.

Si no es posible satisfacer las limitaciones de interferencia del CO₂ o del vapor de agua, se determinarán, notificarán y aplicarán los factores de corrección apropiados.

Nota.— Se recomienda, de conformidad con la práctica apropiada, que esos procedimientos de corrección se adopten en todos los casos.

h) *Tiempo de respuesta:* no deberá exceder de 10 segundos, desde el momento de entrada de la muestra al sistema analizador hasta conseguir el 90% de la indicación definitiva.

i) *Linealidad:* menos del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor.

j) *Convertidor:* estará concebido y funcionará de manera que reduzca a NO el NO₂ presente en la muestra. El convertidor no alterará el NO contenido inicialmente en la muestra.

El rendimiento técnico del convertidor será, por lo menos, del 90%. Este valor del rendimiento se empleará para corregir el valor del NO₂ de la muestra medida (es decir, $[\text{NO}_x]_c - [\text{NO}]$) el que se habría obtenido si el rendimiento hubiese sido del 100%.

— — — — —

ADJUNTO D DEL APÉNDICE 3. GASES DE CALIBRACIÓN Y DE ENSAYO

Tabla de gases de calibración

<i>Analizador</i>	<i>Gas</i>	<i>Precisión*</i>
HC	propano en aire cero	$\pm 2\%$ o $\pm 0,05$ ppm**
CO ₂	CO ₂ en aire cero	$\pm 2\%$ o ± 100 ppm**
CO	CO en aire cero	$\pm 2\%$ o ± 2 ppm**
NOx	NOx en nitrógeno cero	$\pm 2\%$ o ± 1 ppm**

* Basada en el “intervalo” de confianza del 95%.

** La que sea mayor.

Los gases que anteceden se requieren para llevar a cabo la calibración ordinaria de los analizadores durante el uso operacional normal.

Tabla de gases de ensayo

<i>Analizador</i>	<i>Gas</i>	<i>Precisión*</i>
HC	propano en $10 \pm 1\%$ de O ₂ , el resto nitrógeno cero	$\pm 1\%$
HC	propano en $21 \pm 1\%$ de O ₂ , el resto nitrógeno cero	$\pm 1\%$
HC	propileno en aire cero	$\pm 1\%$
HC	tolueno en aire cero	$\pm 1\%$
HC	n-hexano en aire cero	$\pm 1\%$
HC	propano en aire cero	$\pm 1\%$
CO ₂	CO ₂ en aire cero	$\pm 1\%$
CO ₂	CO ₂ en nitrógeno cero	$\pm 1\%$
CO	CO en aire cero	$\pm 1\%$
NOx	NO en nitrógeno cero	$\pm 1\%$

* Basada en el “intervalo” de confianza del 95%.

Los gases que anteceden se requieren para llevar a cabo los ensayos de los Adjuntos A, B y C.

Los gases de calibración monóxido de carbono y dióxido de carbono podrán mezclarse separadamente o como mezclas de dos componentes. Pueden emplearse mezclas, compuestas de monóxido de carbono, bióxido de carbono y propano en aire seco, a condición de que pueda preservarse la estabilidad de la mezcla.

El gas cero especificado para el analizador del CO, CO₂ y HC equivaldrá al aire cero (el cual incluye el aire “artificial” con un 20 a 22% de O₂ combinado con N₂). Con respecto al analizador de NO_x, el nitrógeno cero se considerará como gas cero. Las impurezas contenidas en ambas variedades de gas cero deberán limitarse, de modo que sean inferiores a las concentraciones de gas siguientes:

1 ppm C
1 ppm CO
100 ppm CO₂
1 ppm NO_x

El solicitante deberá cerciorarse de que los gases comerciales que haya recibido respondan efectivamente a esta especificación, o de que así los especifique el vendedor del producto.

ADJUNTO E DEL APÉNDICE 3. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LAS EMISIONES — BASE, CORRECCIONES DE LA MEDICIÓN Y MÉTODO NUMÉRICO DE ALTERNATIVA

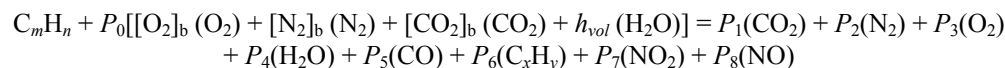
1. SÍMBOLOS

AFR	relación aire/combustible; la relación del gasto del flujo de la masa de aire seco con respecto al del combustible
EI	índice de emisión; $10^3 \times$ gasto del flujo de la masa del producto de las emisiones gaseosas en el escape, por unidad de gasto del flujo de la masa de combustible
K	relación de concentración de gas medida húmeda con respecto a la medida en seco (pasado el deshidratador)
L, L'	coeficiente de interferencia del analizador, de la interferencia del CO_2
M, M'	coeficiente de interferencia del analizador, de la interferencia del H_2O
M_{AIR}	masa molecular de aire seco = 28,966 g, o bien, cuando corresponda, = $(32 R + 28,156 4 S + 44,011 T)$ g
M_{CO}	masa molecular de CO = 28,011 g
M_{HC}	masa molecular de hidrocarburos del escape, considerados como CH_4 = 16,043 g
M_{NO_2}	masa molecular del NO_2 = 46,008 g
M_C	masa atómica del carbono = 12,011 g
M_H	masa atómica del hidrógeno = 1,008 g
P_1	número de moles de CO^2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_2	número de moles de N_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_3	número de moles de O_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_4	número de moles de H_2O , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_5	número de moles de CO , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_6	número de moles de C_xH_y , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_7	número de moles de NO_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_8	número de moles de NO , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_T	$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8$

$[O_2]_b$	concentración de gas O_2 en aire seco, por volumen = 0,209 5
$[N_2]_b$	concentración de gas de N_2 + gases raros en aire seco, por volumen = 0,790 2
$[CO_2]_b$	concentración de gas de CO_2 en aire seco, por volumen = 0,000 3
P_o	número de moles de aire por mol de combustible en la mezcla inicial aire/combustible
Z	símbolo utilizado y definido en 3.4
$[CO_2]$	concentración de gas media de CO_2 en la muestra del escape, por volumen/volumen, húmeda
$[CO]$	concentración de gas media de CO en la muestra del escape, por volumen/volumen, húmeda
$[HC]$	concentración de gas media de hidrocarburos del escape, por volumen/volumen, húmeda expresada como carbono
$[NO]$	concentración de gas media de NO en la muestra del escape, por volumen/volumen, húmeda
$[NO_2]$	concentración de gas media de NO_2 en la muestra del escape, por volumen/volumen, húmeda
$= \frac{([NOx]_c - [NO])}{\eta}$	
$[NOx]$	concentración de gas media de NO y NO_2 en la muestra del escape, por volumen/volumen, húmeda = $[NO + NO_2]$
$[NOx]_c$	concentración de gas media de NO en la muestra del escape una vez pasado el convertidor de NO_2 a NO , por volumen/volumen, húmeda
$[]_d$	concentración de gas media en la muestra del escape, pasado el deshidratador frío, por volumen/volumen
$[]_m$	medida de la concentración de gas media indicada antes de aplicar la corrección del instrumento, por volumen/volumen
h_{vol}	humedad del aire ambiente, vol de agua/vol de aire seco
h_d	humedad de la muestra de emisiones del escape que salen del “secador”, o del “deshidratador frío”, vol de agua/vol de muestra seca
m	número de átomos de C en una molécula característica del combustible
n	número de átomos de H en una molécula característica del combustible
x	número de átomos de C en una molécula característica de hidrocarburo de las emisiones del escape
y	número de átomos de H en una molécula característica de hidrocarburo de las emisiones del escape
η	eficacia del convertidor de NO_2 a NO

2. BASE PARA CALCULAR LOS PARÁMETROS EI Y AFR

2.1 Se supone que el equilibrio entre la mezcla original de combustible y aire y el estado resultante de las emisiones del escape de las cuales se ha extraído la muestra puede representarse mediante la ecuación siguiente:



a partir de la cual, por definición, los parámetros requeridos se pueden expresar de la forma siguiente:

$$EI(CO) = P_5 \left(\frac{10^3 M_{CO}}{mM_C + nM_H} \right)$$

$$EI(HC) = xP_6 \left(\frac{10^3 M_{HC}}{mM_C + nM_H} \right) \text{ expresado como el equivalente del metano}$$

$$EI(NO_x) = (P_7 + P_8) \left(\frac{10^3 M_{NO_2}}{mM_C + nM_H} \right) \text{ expresado como equivalente del } NO_2$$

$$AFR = P_0 \left(\frac{M_{AIR}}{mM_C + nM_H} \right)$$

2.2 A base de la especificación o análisis del combustible se asignan los valores de la composición de hidrocarburos del combustible (m , n). Si solamente se determina la relación n/m , se puede asignar el valor $m = 12$. Normalmente se supone que las fracciones de los moles de los elementos constitutivos del aire seco ($[O_2]_b$, $[N_2]_b$, $[CO_2]_b$) corresponden a los valores normales recomendados, si bien pueden asignarse otros valores, a reserva de la restricción $[O_2]_b + [N_2]_b + [CO_2]_b = 1$ y de la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.

2.3 La humedad del aire ambiente, h_{vol} , es la medida en cada ensayo. Se recomienda que, de no existir prueba en contrario en cuanto a la caracterización de los hidrocarburos de las emisiones del escape (x , y), se asignen valores de $x = 1$ y de $y = 4$.

2.4 La determinación de las incógnitas restantes exige la solución de la serie siguiente de ecuaciones lineales simultáneas, en las que (1) a (4) dimanen de las relaciones fundamentales de conservación atómica, y (5) a (9) representan las relaciones de concentración de gas en el producto gaseoso de las emisiones.

$$m + [CO_2]_b P_0 = P_1 + P_5 + xP_6 \dots\dots\dots (1)$$

$$n + 2h_{vol}P_0 = 2P_4 + yP_6 \dots\dots\dots (2)$$

$$(2[O_2]_b + 2[CO_2]_b + h_{vol})P_0 = 2P_1 + 2P_3 + P_4 + P_5 + 2P_7 + P_8 \dots\dots\dots (3)$$

$$2[N_2]_b P_0 = 2P_2 + P_7 + P_8 \dots\dots\dots (4)$$

$$[CO_2] P_T = P_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$[CO] P_T = P_5 \dots\dots\dots (6)$$

$$[HC] P_T = xP_6 \dots\dots\dots (7)$$

$$[NO_x]_c P_T = \eta P_7 + P_8 \dots\dots\dots (8)$$

$$[\text{NO}] P_T = P_8 \dots\dots\dots (9)$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 \dots\dots\dots (10)$$

Estas ecuaciones condicionales se aplican en el caso de que todas las concentraciones de gas medidas sean verídicas, es decir, que no estén viciadas por interferencias o que requieran corrección para obtener la muestra seca. En la práctica, los efectos de la interferencia suelen manifestarse en grado considerable en las mediciones de CO y de NO, de modo que suele acudir a la medición del CO₂ y del CO, ya sea en seco o en condiciones semisecas. Las modificaciones necesarias de las ecuaciones pertinentes se exponen en 2.5 y 2.6.

2.5 Los efectos de interferencia obedecen sobre todo a la presencia de CO₂ y de H₂O en la muestra, que pueden afectar a los analizadores del CO y del NO_x de maneras básicamente distintas. El analizador de CO tiene tendencia a desplazarse al punto cero, en tanto que el analizador de NO_x experimenta cambios de sensibilidad, representados como sigue:

$$[\text{CO}] = [\text{CO}]_m + L[\text{CO}_2] + M[\text{H}_2\text{O}]$$

$$\text{y } [\text{NO}_x]_c = [\text{NO}_x]_{cm} (1 + L'[\text{CO}_2] + M'[\text{H}_2\text{O}])$$

que se transforman en las ecuaciones siguientes de alternativa de (6), (8) y (9), en cuyo caso hay que corregir los efectos de interferencia.

$$[\text{CO}]_m P_T + L P_1 + M P_4 = P_5 \dots\dots\dots (6A)$$

$$[\text{NO}_x]_{cm} (P_T + L' P_1 + M' P_4) = \eta P_7 + P_8 \dots\dots\dots (8A)$$

$$[\text{NO}]_m (P_T + L' P_1 + M' P_4) = P_8 \dots\dots\dots (9A)$$

2.6 La opción de medir las concentraciones de gas de CO₂ y de CO a base de una muestra seca o parcialmente seca, o sea con la humedad de muestra reducida a h_d , requiere el empleo de las ecuaciones condicionales modificadas siguientes:

$$[\text{CO}_2]_d (P_T - P_4) (1 + h_d) = P_1 \dots\dots\dots (5A)$$

y

$$[\text{CO}]_d (P_T - P_4) (1 + h_d) = P_5$$

Sin embargo, el analizador de CO también puede estar viciado por la interferencia descrita en 2.5, de modo que la ecuación completa de alternativa, para la medición de la concentración de gas de CO, pasa a ser:

$$[\text{CO}]_{md} (P_T - P_4) (1 + h_d) + L P_1 + M h_d (P_T - P_4) = P_5 \dots\dots\dots (6B)$$

3. FÓRMULAS ANALÍTICAS

3.1 Generalidades

Las ecuaciones (1) a (10) pueden reducirse para conseguir las fórmulas analíticas de los parámetros EI y AFR, que figuran en la Sección 7.1. Esta reducción constituye un proceso de eliminación progresiva de las raíces de P_0 , P_1 a P_8 , P_T , en el supuesto de que todas las mediciones de la concentración de gas se hayan efectuado con la muestra “húmeda” y de que no requieran correcciones debido a interferencias o por algún otro concepto. En la práctica, a menudo se prefiere efectuar las mediciones de la concentración de gas “seca” o “semiseca” del CO₂ y del CO. También a menudo, es necesario hacer correcciones para compensar la interferencia. Las fórmulas que han de utilizarse en estas diversas circunstancias se dan en 3.2, 3.3 y 3.4 siguientes.

3.2 Ecuación para convertir las mediciones de la concentración de gas seca a húmeda

Concentración de gas húmeda = $K \times$ concentración de gas seca; es decir:

$$[] = K []_d$$

La expresión siguiente de K se aplica cuando el CO y el CO₂ se determinan “en seco”.

$$K = \frac{\{4 + (n/m) [\text{CO}_2]_b + ([n/m] [\text{CO}_2]_b - 2h_{vol}) ([\text{NO}_2] - (2[\text{HC}]/x)) + (2 + h_{vol}) ([y/x] - [n/m]) [\text{HC}]\} (1 + h_d)}{(2 + h) \{2 + (n/m) (1 + h_d) ([\text{CO}_2]_d + [\text{CO}]_d)\} - ([n/m] [\text{CO}_2]_b - 2h) (1 - [1 + h_d] [\text{CO}]_d)}$$

3.3 Correcciones debidas a interferencias

Es posible que las mediciones de CO de NO_x y de NO requieran correcciones para anular la interferencia ocasionada por las concentraciones de CO₂ y de agua, en la muestra, antes de utilizarlas en estas ecuaciones analíticas. Tales correcciones pueden normalmente expresarse de las formas generales siguientes:

$$[\text{CO}] = [\text{CO}]_m + L[\text{CO}_2] + M[\text{H}_2\text{O}]$$

$$[\text{CO}]_d = [\text{CO}]_{md} + L[\text{CO}_2]_d + M \left(\frac{h_d}{1 + h_d} \right)$$

$$[\text{NO}] = [\text{NO}]_m (1 + L'[\text{CO}_2] + M'[\text{H}_2\text{O}])$$

$$\eta[\text{NO}_2] = ([\text{NO}_x]_{cm} - [\text{NO}]_m) (1 + L'[\text{CO}_2] + M'[\text{H}_2\text{O}])$$

3.4 Ecuación para calcular el agua de la muestra

Concentración de agua en la muestra

$$[\text{H}_2\text{O}] = \frac{([n/2m] + h_{vol} [P_0/m]) ([\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}])}{1 + [\text{CO}_2]_b (P_0/m)} - (y/2x)[\text{HC}]$$

donde

$$P_0/m = \frac{2Z - n/m}{4(1 + h_{vol} - [TZ/2])}$$

y

$$Z = \frac{2 - [\text{CO}] - ([2/x] - [y/2x])[\text{HC}] + [\text{NO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}$$

Cabe señalar que esta estimación es función de las lecturas de los distintos análisis de concentración de gas, que acaso, a su vez, requieran corrección de la interferencia del agua. A fin de lograr mayor precisión, en esos casos se requieren reiterados análisis en los que se vuelve a calcular sucesivamente la concentración de agua hasta obtener la estabilidad requerida. Se soslaya esta dificultad utilizando el método alternativo de solución numérica (4).

4. MÉTODO ALTERNATIVO — SOLUCIÓN NUMÉRICA

4.1 Como alternativa de los procedimientos analíticos resumidos en 3, es posible obtener sin mayor dificultad los índices de emisión, la relación aire/combustible, las concentraciones de gas húmedas corregidas, etc., mediante la solución numérica de las ecuaciones (1) a (10), respecto a cada serie de mediciones, con la ayuda de una computadora digital.

4.2 En la serie de ecuaciones de (1) a (10), las mediciones efectivas de la concentración de gas quedan sustituidas por el empleo de cualesquiera de las ecuaciones de alternativa (5A), (6A), etc., aplicadas respecto a determinado sistema de medición, a fin de tener en cuenta las correcciones de interferencia y/o las mediciones de muestras en seco.

4.3 Existe amplia disponibilidad de combinaciones bidimensionales idóneas y sencillas para resolver ecuaciones con ayuda de computadoras, y su empleo resulta conveniente y flexible a estos efectos, a fin de incorporar e identificar inmediatamente todas las posibilidades de secado de una muestra y las correcciones por interferencia u otras causas.

ADJUNTO F DEL APÉNDICE 3. ESPECIFICACIONES EN CUANTO A LOS DATOS ADICIONALES

Como se requiere en 3.2 del Apéndice 3, además de las concentraciones de gas medidas de los componentes de las muestras, deberán suministrarse los datos siguientes:

- a) temperatura en la boca de entrada: medida como la temperatura total en un punto distanciado un diámetro del plano de entrada del motor, con una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- b) humedad en la boca de entrada (kg agua/kg aire seco): medida en un punto situado hasta 50 m, como máximo, del plano de entrada, por delante del motor, con una precisión de:
 - 1) $\pm 5\%$ cuando la humedad del aire ambiente es superior o igual a 0,00634 kg de agua/kg de aire seco; o
 - 2) $\pm 0,000317$ kg de agua/kg de aire seco cuando la humedad del aire ambiente es inferior a 0,00634 kg de agua/kg de aire seco;
- c) presión atmosférica: medida hasta 1 km, como máximo, del lugar donde se ensaya el motor y corregida, según sea necesario, a la altitud del banco de pruebas, con una precisión de ± 100 Pa;
- d) flujo de combustible: por medición directa, con una precisión de $\pm 2\%$;
- e) relación H/C del combustible: definida como n/m , en la que C_mH_n constituye la representación equivalente de los hidrocarburos del combustible utilizado para hacer el ensayo y evaluada por referencia al análisis del tipo de combustible del motor;
- f) parámetros del motor:
 - 1) empuje: por medición directa, con una precisión de $\pm 1\%$ al régimen de despegue y $\pm 5\%$ al empuje mínimo utilizado en la prueba de homologación, con variación lineal entre esos puntos;
 - 2) velocidad(es) de rotación: por medición directa, con una precisión mínima de $\pm 0,5\%$;
 - 3) flujo de aire del generador de gas: determinado con una precisión de $\pm 2\%$, por referencia a la calibración de performance del motor.

Los parámetros a), b), d) y f) se determinarán a cada ajuste de potencia para el ensayo de las emisiones, pero el parámetro c) deberá determinarse a intervalos mínimos de una hora, en el transcurso del período que requieran los ensayos de las emisiones.

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 ³ 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 masa	menos de 0,3%
Viscosidad cinemática a –20°C, mm ² /s	2,5 – 6,5

APÉNDICE 5. INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LAS EMISIONES GASEOSAS DE LOS MOTORES DE TURBINA DE GAS CON POSTCOMBUSTIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Nota.— Los procedimientos aquí indicados conciernen a la adquisición de muestras representativas de los gases de escape y a su entrada y análisis en el dispositivo medidor de las emisiones. Este procedimiento sólo se aplica cuando media postcombustión. Los métodos propuestos representan la práctica moderna más avanzada, conocida y aceptada. Se admite la necesidad de hacer correcciones con respecto a las condiciones ambientales, pero el método se especificará cuando se cuente con alguno viable. Entretanto, todo método de corrección utilizado con postcombustión debería aprobarlo previamente la autoridad encargada de la certificación.

Sólo se admitirán variaciones en el procedimiento contenido en este apéndice previa solicitud a la autoridad encargada de la certificación y aprobación de la misma.

2. DEFINICIONES

En el presente apéndice, las expresiones siguientes, salvo que se expliquen con más detalle, tendrán los significados que se indican a continuación:

Analizador infrarrojo sin dispersión. Instrumento que, al absorber la energía infrarroja, mide selectivamente determinados componentes.

Concentración. La fracción volumétrica del componente deseado, en la mezcla de gas, expresada como porcentaje del volumen total o como partes por millón.

Desviación cero. La desviación, en relación con el tiempo, de la indicación del instrumento a partir del punto cero, cuando por el mismo pasa gas que no contiene el elemento que se desea medir.

Detector de la ionización de la llama. Detector de la difusión del hidrógeno-aire de la llama, que produce una señal nominalmente proporcional al gasto de hidrocarburos que penetra en la llama por unidad de tiempo; generalmente, se supone que es proporcionalmente sensible al número de átomos de carbono que penetran en la llama.

Estabilidad. La similitud que pueden registrar las mediciones repetidas de una muestra variable dada durante un período determinado.

Gas cero. El gas que hay que utilizar para determinar la posición cero de calibración del instrumento, es decir, el punto en el cual la reacción es nula.

Gas de calibración. Un gas de referencia de gran precisión, que hay que utilizar para alinear, ajustar y hacer la verificación periódica de los instrumentos.

Gas de referencia. Una mezcla de gases de composición especificada y conocida, utilizada como base para interpretar la reacción del instrumento, en función de la concentración del gas en presencia del cual reacciona el instrumento.

Interferencia. Toda reacción del instrumento debida a la presencia de elementos ajenos al gas (o vapor) que hay que medir.

Partes por millón (ppm). La concentración del volumen unitario de un gas por un millón de unidades de volumen de la mezcla de gases de la cual forma parte.

Partes por millón de carbono (ppmC). La fracción mol de hidrocarburo multiplicada por 10^6 , medida por referencia al metano. Así pues, 1 ppm de metano se indica como 1 ppmC. Para convertir la concentración de una ppm de cualquier hidrocarburo a una ppmC equivalente, multiplíquese la concentración ppm por el número de átomos de carbono por molécula de gas. Por ejemplo, 1 ppm de propano equivale a 3 ppmC de hidrocarburo; 1 ppm de hexano equivale a 6 ppmC de hidrocarburo.

Penacho. El flujo externo total exhalado, con inclusión de todo aire ambiente que se le mezcle.

Precisión. El grado de aproximación con que una medición se acerca al valor verdadero, medido independientemente.

Repetibilidad. La precisión con que la medición de una muestra dada e invariable puede lograrse repetidas veces en breve plazo con el mismo resultado, sin que sea necesario calibrar de nuevo el instrumento.

Resolución. El cambio mínimo perceptible en una medición.

Respuesta. Toda variación de la señal indicadora del instrumento, que ocurre al variar la concentración de la muestra. También, la señal indicadora correspondiente a la concentración de una muestra dada.

Ruido. Toda variación aleatoria de la indicación del instrumento, que nada tiene que ver con las características de la muestra, en contacto con la cual reacciona el instrumento, y que puede distinguirse por sus características de desviación.

3. DATOS NECESARIOS

3.1 Emisiones gaseosas

Se determinará la concentración de las siguientes emisiones:

- Hidrocarburos (HC): se hará el cálculo combinado de todos los compuestos de hidrocarburos presentes en el gas de escape.
- Monóxido de carbono (CO).
- Bióxido de carbono (CO₂).

Nota.— Aunque no se lo considera como contaminante, se necesita su concentración para hacer los cálculos y verificaciones.

- Óxidos de nitrógeno (NO_x): se hará un cálculo de la suma de óxido nítrico (NO) y bióxido de nitrógeno (NO₂).
- Óxido nítrico (NO).

3.2 Otros datos

Con objeto de normalizar los datos de medición de las emisiones y cuantificar las características de ensayo del motor, se suministrarán los datos siguientes, además de lo requerido en el Capítulo 3, 3.4:

- temperatura en la boca de entrada;
- humedad en la boca de entrada;
- presión atmosférica;
- vectores del viento en relación con el eje del escape del motor;
- relación hidrógeno/carbono del combustible;
- pormenores sobre la instalación del motor;
- otros parámetros necesarios del motor (por ejemplo, empuje, revoluciones del motor, temperaturas de la turbina);
- datos sobre la concentración de contaminantes y parámetros para la confirmación estadística.

Estos datos se obtendrán por medición directa o por cálculo, según se indica en el Adjunto F del presente apéndice.

4. DISPOSICIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Debido a la naturaleza reactiva del penacho de escape de los motores con postcombustión, es preciso cerciorarse de que las emisiones medidas correspondan realmente a las efectivamente emitidas en la atmósfera circundante. Ello se logra extrayendo una muestra del penacho, a suficiente distancia del motor, para que los gases de escape se hayan enfriado hasta una temperatura tal que hayan cesado las reacciones. No se emplearán desecantes, secadoras, deshidratadoras ni equipo similar, para tratar la muestra que vaya a parar a los instrumentos analizadores de los óxidos de nitrógeno y de los hidrocarburos. En el párrafo 5 se indican los requisitos para los diversos subsistemas componentes, pero la lista que sigue a continuación enumera algunas de las salvedades y variaciones:

- a) se supone que cada uno de los diversos subsistemas tiene un regulador de flujo y los dispositivos de acondicionamiento y medición necesarios;
- b) la necesidad de contar con una bomba de vaciado y/o de muestra caliente dependerá de las posibilidades que haya de transferir la muestra en tiempo útil y del gasto de flujo que requiera el subsistema de análisis. Esto, a su vez, dependerá de la presión con la cual el escape desplace la muestra de gas y de las posibles pérdidas que haya en los conductos. Se considera que estas bombas serán mayormente necesarias en ciertas condiciones de funcionamiento del motor; y
- c) la posición de la bomba caliente, en relación con los subsistemas de análisis de los gases, puede variar, según sea necesario. (Por ejemplo, algunos analizadores de HC tienen bombas calientes, por lo que pueden considerarse apropiadas para su utilización más arriba que la bomba caliente del sistema).

Nota.— En las Figuras A5-1 y A5-2 se ilustra el sistema de muestreo y análisis del escape de gases, que representa las exigencias básicas, típicas, para verificar la calidad de las emisiones.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

Nota.— A continuación se describen, a grandes rasgos, las especificaciones de los elementos principales del sistema de medición de las emisiones de gases de los motores. Cuando se necesiten más detalles, consúltense los Adjuntos A, B y C de este apéndice.

5.1 Dispositivo para medir las muestras

5.1.1 Sonda de muestreo

- La sonda estará construida de tal manera que permita la extracción de muestras separadas en diversos puntos a lo largo del diámetro del penacho exhalado. No se permitirán muestras mezcladas.
- El material con el cual la muestra está en contacto deberá ser de acero inoxidable y su temperatura se mantendrá a un mínimo de 60°C.

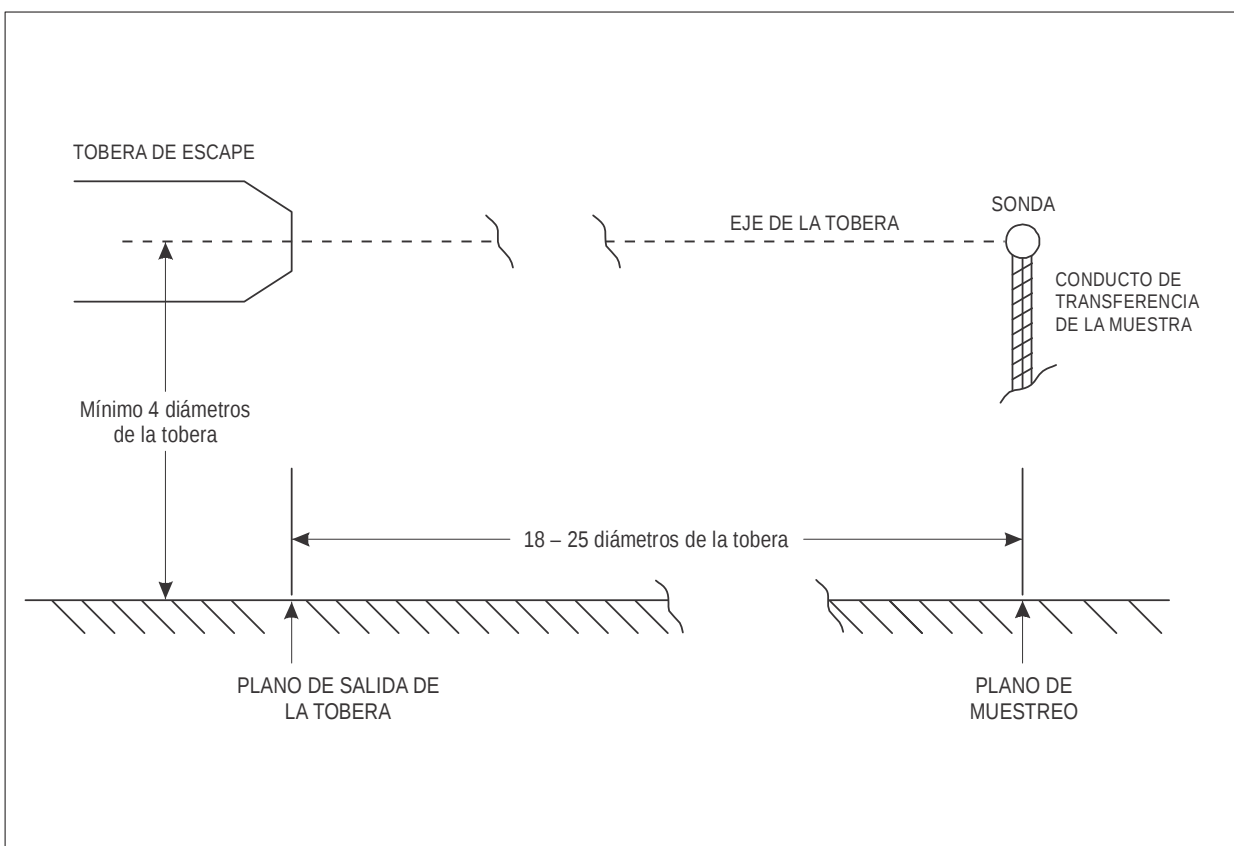


Figura A5-1. Diagrama del sistema de muestreo de los gases de escape

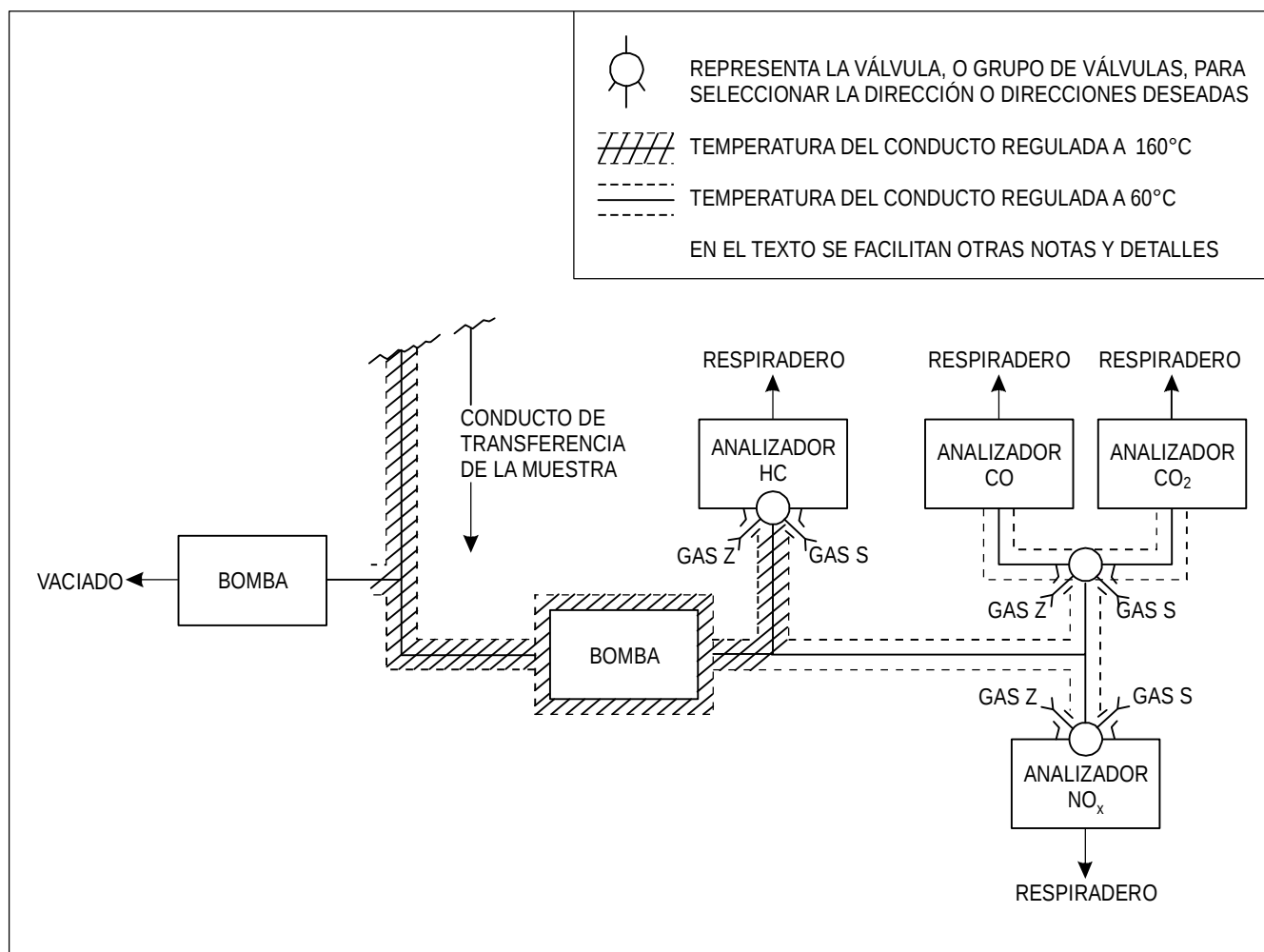


Figura A5-2. Diagrama del sistema de muestreo, transferencia y análisis de la muestra

- c) El plano de muestreo será perpendicular a la proyección del eje de la tobera del motor, y se colocará lo más cerca posible de un punto situado a 18 diámetros de la tobera del plano de salida de ésta, de conformidad con lo previsto en 7.1.2, pero, en ningún caso, a más de 25 diámetros de la tobera. El diámetro de la tobera de escape deberá ser el previsto para el régimen máximo de potencia del motor. Entre el escape, incluido éste y los planos de muestreo, deberá haber una porción sin obstrucciones de, por lo menos, 4 diámetros de la tobera de escape, en distancia radial a lo largo de la proyección del eje de la tobera del motor.
- d) Habrá, como mínimo, 11 puntos de muestreo. El plano de medición, situado a una distancia X del motor, se dividirá en tres secciones delimitadas por círculos concéntricos en torno al eje del chorro de escape con los radios siguientes:

$$R1 = 0,05X$$

$$R2 = 0,09X$$

y se tomarán como mínimo 3 muestras por sección. La diferencia entre el número de muestras de cada sección debe ser inferior a 3. La muestra extraída a mayor distancia del eje estará distanciada a un radio comprendido entre $0,11X$ y $0,16X$.

5.1.2 Conductos de canalización de la muestra

La muestra se transferirá de la sonda a los analizadores por medio de un conducto de un diámetro interno de 4,0 a 8,5 mm, utilizando para ello el camino más corto posible y a base de un gasto de flujo tal que permita trasladarla en menos de 10 segundos. El conducto tendrá una temperatura constante de $160^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$, con una estabilidad de $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Cuando el muestreo se haga para medir los elementos HC, CO, CO_2 y NO_x , el conducto será de acero inoxidable o de politetrafluoretileno (PTFE) imprimado, con carga de negro de carbón.

5.2 Analizador de HC

La medición del total de los hidrocarburos contenidos en la muestra se hará mediante un analizador equipado con un detector de ionización de llama (FID) con calefacción, entre cuyos electrodos pasa una corriente de ionización proporcional a la masa de hidrocarburos que penetra en la llama de hidrógeno. Es de suponer que el analizador en cuestión tendrá dispositivos apropiados para regular la temperatura y el gasto de la muestra, para desviar ésta, el combustible y los gases diluentes, y para hacer la verificación efectiva de las calibraciones S (span) y Z (zero).

Nota.— En el Adjunto A de este apéndice aparecen las especificaciones correspondientes.

5.3 Analizadores CO y CO_2

Para medir esos elementos, habrá que utilizar analizadores de infrarrojo sin dispersión, que deberán ser del tipo que funciona a base de la absorción diferencial de energía en células paralelas de gas de referencia y de gas de muestra; la célula o grupo de ellas, respecto a cada uno de esos elementos gaseosos, se sensibilizará debidamente. Este subsistema de análisis incluirá todas las funciones necesarias para regular y manipular el flujo de la muestra, y el de los gases Z y S de referencia. La temperatura será la apropiada para la base de medición utilizada, húmeda o seca.

Nota.— En el Adjunto B de este apéndice aparecen las especificaciones correspondientes.

5.4 Analizador de NO_x

La medición de la concentración de los óxidos de nitrógeno (NO) se hará por el método químico-luminiscente, mediante el cual la medición de la intensidad de la radiación emitida durante el tiempo de reacción de los NO contenidos en la muestra, más O_3 , constituye la medición de la concentración de los NO. El elemento NO_2 se convertirá en NO, en un convertidor idóneo, antes de hacer la medición. El sistema de medición de los NO_x resultantes deberá tener todos los reguladores necesarios de flujo, temperatura y demás, y lo necesario para poder hacer la calibración acostumbrada de Z y S y permitir la verificación del rendimiento del convertidor.

Nota.— En el Adjunto C de este apéndice aparecen las especificaciones correspondientes.

6. PROCEDIMIENTOS A SEGUIR AL HACER EL ENSAYO GENERAL

6.1 Funcionamiento del motor

El motor se hará funcionar en un banco de pruebas al aire libre y estático apropiado y debidamente equipado para hacer ensayos de performance de gran precisión, que se ajuste a los requisitos para la instalación de la sonda de muestreo, según se la describe en 5.1. Los ensayos de las emisiones se harán a los regímenes de potencia prescritos por la autoridad encargada de la certificación. A cada régimen, habrá que estabilizar el motor.

6.2 Condiciones atmosféricas ambientales

6.2.1 Deberán verificarse las concentraciones de CO, HC, CO₂ y NO_x en el medio ambiente, con el motor marchando en condiciones de ensayo. Las concentraciones inusualmente elevadas de dichos gases revelan condiciones anormales, tales como la recirculación de gases de escape, pérdidas de combustible o cualquier otra fuente de emisiones que se desea evitar en la zona de prueba, y esas situaciones se corregirán o evitarán, según corresponda.

Nota.— A título informativo, la concentración normal de CO₂ en el ambiente es de 0,03% y los niveles de concentración de CO y HC de 5 ppm, y el de NO_x de 0,5 ppm, los cuales difícilmente se sobrepasan en condiciones ambientales normales.

6.2.2 También se evitarán las condiciones climáticas extremas, tales como las que conlleva la precipitación o vientos de velocidad excesiva.

6.3 Calibración básica de instrumentos

Nota.— El objetivo general de esta calibración es confirmar la estabilidad y linealidad.

6.3.1 En el momento de hacer el ensayo, el solicitante deberá demostrar a la autoridad encargada de la certificación que la calibración del sistema analítico es correcta.

6.3.2 En cuanto al analizador de hidrocarburos, la calibración incluirá la verificación de que tanto el detector de oxígeno como las respuestas diferenciales de los hidrocarburos se ajustan a los límites previstos, según se indica en el Adjunto A de este apéndice. También se verificará la eficacia del convertidor de NO₂/NO, cerciorándose de que satisface lo previsto en el Adjunto C de este apéndice.

6.3.3 El procedimiento para verificar el comportamiento de cada analizador será el que se indica a continuación (utilizando los gases de calibración y de ensayo indicados en el Adjunto D de este apéndice):

- a) introdúzcase el gas cero (gas de referencia Z) y hágase el reglaje a cero del instrumento, anotando la posición correspondiente;
- b) por cada gama que haya de utilizarse en servicio, introdúzcase el gas de calibración del 90% (nominal) de la concentración correspondiente a la deflexión máxima de la escala (FSD); ajústese debidamente el regulador del instrumento y anótese su posición;
- c) introdúzcase aproximadamente el 30, 60 y 90% de las concentraciones FSD de la gama y anótese las indicaciones del analizador;
- d) trácese la recta de mínimos cuadrados correspondiente a los puntos 0, 30, 60 y 90% de concentración. En cuanto al analizador de CO y/o CO₂, utilizado en su configuración básica, sin linealización de salida, se ajustará la curva de mínimos cuadrados de la fórmula matemática apropiada valiéndose de puntos de calibración adicionales, si se estima necesario. Si algún punto se aparta en más de 2% del valor de la escala (± 1 ppm*, lo que sea mayor), habrá que trazar una curva de calibración para utilizarla en servicio.

* Salvo en el caso del analizador de CO₂, respecto al cual el valor debería ser de ± 100 ppm.

6.4 Utilización

6.4.1 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/m, a la temperatura y presión normales;
- 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 valor utilizado 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.

Nota 1.— Al hacer funcionar el motor, es conveniente purgar los conductos de muestreo mientras la sonda esté en el interior del escape de gases de motor, pero sin medir las emisiones, con objeto de cerciorarse de que la contaminación no sea excesiva.

Nota 2.— También es conveniente controlar la calidad del aire de entrada al principio y al final del ensayo y por lo menos una vez por hora durante el mismo. Si se considera que los niveles son importantes, deberían tenerse en cuenta.

6.4.2 Para hacer la medición con el motor en funcionamiento, se adoptará el siguiente procedimiento:

- a) aplíquese el gas cero apropiado y háganse los ajustes necesarios del instrumento;
- b) aplíquese el gas de calibración apropiado, al 90% nominal de concentración FSD con respecto a las gamas que haya que utilizar, y ajústese y anótese debidamente la posición del regulador de ganancia;
- c) una vez que el motor se haya estabilizado a la modalidad de utilización necesaria y en el emplazamiento de muestreo, deberá seguir funcionando. Obsérvense las concentraciones de los contaminantes hasta obtener una indicación estabilizada, que habrá que anotar. En la misma modalidad de utilización del motor, repítase el procedimiento de medición en cada emplazamiento de muestreo restante;
- d) una vez terminado el ensayo y también a intervalos máximos de una hora, durante los ensayos, verifíquense de nuevo el punto cero y los de calibración. Si uno de ellos ha variado más del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama, habrá que repetir el ensayo hasta que el instrumento haya recuperado su posición indicada, dentro de los márgenes de la especificación de referencia.

7. CÁLCULOS

7.1 Emisiones gaseosas

7.1.1 Generalidades

Las mediciones analíticas realizadas representarán las concentraciones de las diversas clases de contaminantes que correspondan al (a los) régimen(es) de postcombustión del motor, en los diversos puntos del plano de muestreo. Además de anotar estos parámetros básicos, será necesario calcular y notificar otros parámetros, como se indica a continuación:

7.1.2 Análisis y confirmación de las mediciones

- a) Para cada reglaje del motor, deberán promediarse las concentraciones medidas a base de diferentes posiciones de la sonda de muestreo, de la forma siguiente:

$$C_{i \text{ moy}} = \sum_{j=1}^n C_{i \ j}$$

donde:

- $\sum_{j=1}^n$ Suma del número total n de las posiciones de muestreo utilizadas.
- $C_{i \ j}$ Concentraciones de la especie i medidas en la j -ésima posición de muestreo.
- $C_{i \text{ moy}}$ Promedio de concentración o media de la especie i .

Las mediciones de la concentración seca se convertirán en concentraciones húmedas reales (véase el Adjunto E de este apéndice).

- b) La calidad de las mediciones de cada contaminante se determinará comparándolas con las mediciones de CO_2 aplicando el coeficiente de correlación siguiente:

$$r_i = \frac{n \sum_{j=1}^n C_{ij} \text{CO}_{2j} - \sum_{j=1}^n C_{ij} \sum_{j=1}^n \text{CO}_{2j}}{\sqrt{\left(\left\{ n \sum_{j=1}^n (\text{CO}_{2j})^2 - \left(\sum_{j=1}^n \text{CO}_{2j} \right)^2 \right\} \left\{ n \sum_{j=1}^n C_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n C_{ij} \right)^2 \right\} \right)}}$$

Los valores de r_i que se aproximan a 1 indican que las ediciones obtenidas durante el transcurso de todo el período de muestreo son suficientemente estables y que las curvas son gaussianas. En el caso de que r_i sea inferior a 0,95, habrá que repetir las mediciones en un plano de muestreo situado a mayor distancia del motor de la aeronave. Completado el proceso de medición propiamente dicho, se hacen luego los mismos cálculos y demostración precedentes.

7.1.3 Parámetros básicos

Para la medición de cada modalidad de utilización del motor se estima la concentración media de cada especie gaseosa del modo ilustrado en 7.1.2, habiendo efectuado de la forma indicada en el Adjunto E de este apéndice todas las correcciones necesarias en concepto de mediciones de muestra en seco y/o de interferencias. Estas concentraciones medias se utilizan para el cómputo de los parámetros básicos siguientes:

$$\text{EI}_p \text{ (índice de emisión del elemento } p) = \frac{\text{masa de } p \text{ producida en g}}{\text{masa de combustible utilizado en kg}}$$

$$\text{EI}(\text{CO}) = \left(\frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{CO}}}{M_{\text{C}} + (n/m) M_{\text{H}}} \right) (1 + T(P_0 / m))$$

$$EI(HC) = \left(\frac{[HC]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \right) \left(\frac{10^3 M_{HC}}{M_C + (n/m)M_H} \right) (1 + T(P_0 / m))$$

$$EI(NO_x) \text{ (como } NO_2) = \left(\frac{[NO_x]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \right) \left(\frac{10^3 M_{NO_2}}{M_C + (n/m)M_H} \right) (1 + T(P_0 / m))$$

$$\text{Relación aire/combustible} = (P_0 / m) \left(\frac{M_{AIR}}{M_C + (n/m)M_H} \right)$$

en la que:

$$P_0 / m = \frac{2Z - (n/m)}{4(1 + h_{vol} - [TZ / 2])}$$

y

$$Z = \frac{2 - [CO] - ([2/x] - [y/2x])[HC] + [NO_2]}{[CO_2] + [CO] + [HC]}$$

M_{AIR} masa molecular de aire seco = 28,966 g, o bien, cuando corresponda, = (32 R + 28,156 4 S + 44,011 T) g

M_{HC} masa molecular de hidrocarburos del escape, considerados como CH_4 = 16,043 g

M_{CO} masa molecular de CO = 28,011 g

M_{NO_2} masa molecular del NO_2 = 46,008 g

M_C masa atómica del carbono = 12,011 g

M_H masa atómica del hidrógeno = 1,008 g

R concentración de O_2 en aire seco, por volumen = normalmente 0,209 5

S concentración de N_2 + gases raros en aire seco, por volumen = normalmente 0,790 2

T concentración de CO_2 en aire seco, por volumen = normalmente 0,000 3

$[HC]$ concentración húmeda media de hidrocarburos del escape por volumen/volumen, expresada como carbono

$[CO]$ concentración húmeda media de CO , por volumen/volumen

$[CO_2]$ concentración húmeda media de CO_2 , por volumen/volumen

$[NO_x]$ concentración húmeda media de NO_x , por volumen/volumen = ($[NO]$ + $[NO_2]$)

$[NO]$ concentración húmeda media de NO en la muestra de escape, por volumen/volumen

[NO₂] concentración húmeda media de NO₂ en la muestra de escape, por volumen/volumen

$$= \frac{([\text{NO}_x]_c - [\text{NO}])}{\eta}$$

[NO_x]_c concentración media de NO en la muestra de escape una vez pasado el convertidor de NO₂ a NO, por volumen/volumen

η eficacia del convertidor de NO₂ a NO

*h*_{vol} humedad del aire ambiente, volumen de agua/volumen de aire seco

m número de átomos de C en una molécula característica del combustible

n número de átomos de H en una molécula característica del combustible

x número de átomos de C en una molécula característica de hidrocarburo de las emisiones del escape

y número de átomos de H en una molécula característica de hidrocarburo de las emisiones del escape

El valor de (*n/m*), la relación entre el hidrógeno atómico y el carbono atómico del combustible utilizado, se evalúa analizando el tipo de combustible. La humedad del aire ambiente (*h*) se medirá en cada condición de utilización. A falta de pruebas en contrario de la caracterización (*x,y*) de los hidrocarburos del escape, se utilizarán los valores *x* = 1, *y* = 4. Si hay que utilizar mediciones del CO y del CO₂, ya sea seco o semiseco, éstas se convertirán primero en las concentraciones húmedas equivalentes que figuran en el Adjunto E de este apéndice, donde también figuran fórmulas para corregir las interferencias, cuando sea necesario.

Nota.— El procedimiento previsto en 7.1.4 y en 7.2 sólo es aplicable a las pruebas hechas sin postcombustión. Cuando las pruebas se hagan con postcombustión podría emplearse un procedimiento similar, previa aprobación de la autoridad encargada de la certificación.

7.1.4 Corrección de los índices de emisión con respecto a las condiciones de referencia

Se harán las correcciones a los índices de emisión medidos, respecto a todos los contaminantes, en cada una de las modalidades pertinentes de utilización del motor, para tener en cuenta las discrepancias respecto a las condiciones verdaderas de referencia (ISA al nivel del mar) de la temperatura y presión del aire en la boca de entrada. El valor de referencia de la humedad será de 0,00634 kg H₂O/kg de aire seco.

Así, pues, tendremos: El corregido = *K* × EI medido,

en que la expresión generalizada de *K* es:

$$K = (P_{\text{Bref}}/P_B)^a \times (FAR_{\text{ref}}/FAR_B)^b \times \exp ([T_{\text{Bref}} - T_B]/c) \times \exp (d[h_{\text{vol}} - 0,00634])$$

P_B presión medida en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos

T_B temperatura medida en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos

FAR_B relación aire/combustible en la cámara de combustión y accesorios conexos

h_{vol}	humedad del aire ambiente
P_{ref}	presión ISA al nivel del mar
T_{ref}	temperatura ISA al nivel del mar
P_{Bref}	presión en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos del motor probado (o del motor de referencia, si los datos se corrigen respecto a un motor de esta índole) correspondiente a la T_B en condiciones ISA al nivel del mar
T_{Bref}	temperatura en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos en condiciones ISA al nivel del mar, del motor probado (o del motor de referencia, si los datos han de corregirse respecto a un motor de referencia). Esta temperatura es la que corresponde a cada nivel de empuje especificado para cada modalidad de utilización
FAR_{ref}	relación aire/combustible en la cámara de combustión y accesorios conexos en condiciones ISA al nivel del mar del motor probado (o del motor de referencia, si los datos han de corregirse respecto a un motor de referencia)
a, b, c, d	constantes específicas que pueden variar según el contaminante y el tipo de motor

Preferiblemente, los parámetros de la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos se medirán, pero también pueden calcularse a partir de las condiciones ambientales, mediante fórmulas apropiadas.

7.1.5 Si se utiliza la técnica recomendada de ajuste de la curva para relacionar los índices de emisión con la temperatura de la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos, se elimina, de hecho, el término $\exp([T_{Bref} - T_B]/c)$ de la ecuación generalizada y, en la mayoría de los casos, el término (FAR_{ref}/FAR_B) puede considerarse igual a la unidad. En cuanto a los índices de las emisiones de CO y HC, muchos laboratorios de ensayo han determinado que la humedad está suficientemente cerca de la unidad como para eliminarla de la expresión y que el exponente del término (P_{Bref}/P_B) también se acerca a la unidad.

Así pues,

EI(CO) corregido = EI derivado de $(P_B/P_{Bref}) \cdot$ EI(CO) en función de la curva de T_B ;

EI(HC) corregido = EI derivado de $(P_B/P_{Bref}) \cdot$ EI(HC) en función de la curva de T_B ;

EI(NOx) corregido = EI derivado de EI(NOx) $(P_{Bref}/P_B)^{0,5 \exp(19[h_{vol} - 0,00634])}$ en función de la curva de T_B .

Si no se obtiene una correlación satisfactoria con este método recomendado para corrección del índice de emisiones de CO y HC, podrá utilizarse otro método con los parámetros que se derivan de los ensayos de componentes.

Cualquier otro método utilizado para corregir los índices de emisión del CO, los HC y los NOx debe contar con el visto bueno de la autoridad encargada de la certificación.

7.2 Funciones del parámetro regulador

(D_p, F_{oo}, π)

7.2.1 Definiciones

D_p La masa de todo contaminante gaseoso emitido durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue para las emisiones.

F_{oo}	El empuje máximo desarrollado para el despegue en condiciones normales de utilización y en condiciones estáticas en la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar, sin inyección de agua, que haya aprobado la autoridad competente encargada de la certificación.
π	La relación entre la presión total media en el último plano de descarga del compresor y la presión total media en el plano de entrada del compresor, cuando el motor desarrolla el empuje nominal de despegue en condiciones estáticas en la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar.

7.2.2 Los índices de emisión (EI) de cada contaminante, corregidos en cuanto a la presión y humedad (según sea el caso) en relación con las condiciones atmosféricas ambientales de referencia, según se indica en 7.1.4, y, si es preciso, en relación con el motor de referencia, se obtendrán a base de la modalidad de utilización del ciclo LTO requerido del motor (n), es decir: marcha lenta, aproximación, ascenso y despegue, en cada una de las condiciones de empuje equivalentes corregidas. Se requerirán tres puntos de prueba, como mínimo, para determinar la modalidad de marcha lenta. Con respecto a cada contaminante, se determinarán las relaciones siguientes:

- a) entre EI y T_B ; y
- b) entre W_f (gasto del flujo de la masa de combustible del motor) y T_B ; y
- c) entre F_n (corregido a las condiciones ISA al nivel mar) y T_B (corregida a las condiciones ISA al nivel del mar);

Nota.— Véanse los ejemplos ilustrados en la Figura A5-3 a), b) y c).

Cuando el motor en ensayo no sea un motor “de referencia”, los datos podrán corregirse a las condiciones del motor “de referencia” utilizando las relaciones b) y c) obtenidas de un motor de referencia. Se entiende por motor de referencia aquél que corresponde fundamentalmente a la descripción del motor cuya certificación se solicita y que la autoridad encargada de la certificación ha aceptado como representativo del tipo de motor en cuestión.

El fabricante también suministrará a la autoridad encargada de la certificación todos los datos necesarios sobre la performance del motor, a fin de poder comprobar esas relaciones, y en las condiciones ambientales de la atmósfera tipo internacional (ISA) al nivel del mar:

- d) el empuje nominal máximo (F_{oo}); y
- e) la relación de presión del motor (π) al empuje nominal máximo.

Nota.— Véase el ejemplo ilustrado en la Figura A5-3 d).

7.2.3 La estimación del EI de cada contaminante, en cada uno de los reglajes requeridos del régimen del motor, corregido a las condiciones ambientales de referencia, se ajustará al procedimiento general siguiente:

- a) en cada modalidad de empuje F_n en condiciones ISA, determinar la temperatura equivalente en la boca de entrada de la cámara de combustión y accesorios conexos (T_B) [Figura A5-3 c)];
- b) a partir de la característica EI/ T_B [Figura A5-3 a)], determinar el valor EI $_n$ correspondiente a T_B ;
- c) a partir de la característica W_f/T_B [Figura A5-3 b)], determinar el valor W_{fn} correspondiente a T_B ;
- d) obsérvense los valores máximos del régimen nominal de empuje y de la relación de presión en la atmósfera tipo internacional (ISA), que son F_{oo} y π , respectivamente [Figura A5-3 d)];

e) calcúlese, para cada contaminante $D_p = \Sigma (EI_n) (W_{fn}) (t)$, en la que:

t tiempo en la modalidad LTO (minutos)

W_{fn} gasto del flujo de la masa de combustible (kg/min)

Σ suma de la serie de modalidades que comprende el ciclo de referencia LTO.

7.2.4 Si bien la metodología descrita es la recomendada, la autoridad encargada de la certificación podrá aceptar procedimientos matemáticos equivalentes que se valgan de expresiones matemáticas para representar las curvas ilustradas, siempre que dichas expresiones se hayan derivado utilizando alguna técnica aceptada de adaptación de las curvas.

7.3 Excepciones en cuanto a los procedimientos propuestos

En aquellos casos en que la configuración del motor u otras condiciones atenuantes impidan la aplicación de este procedimiento, la autoridad encargada de la certificación podrá aprobar otro procedimiento, una vez que haya recibido pruebas técnicas convincentes de los resultados equivalentes obtenidos con el mismo.

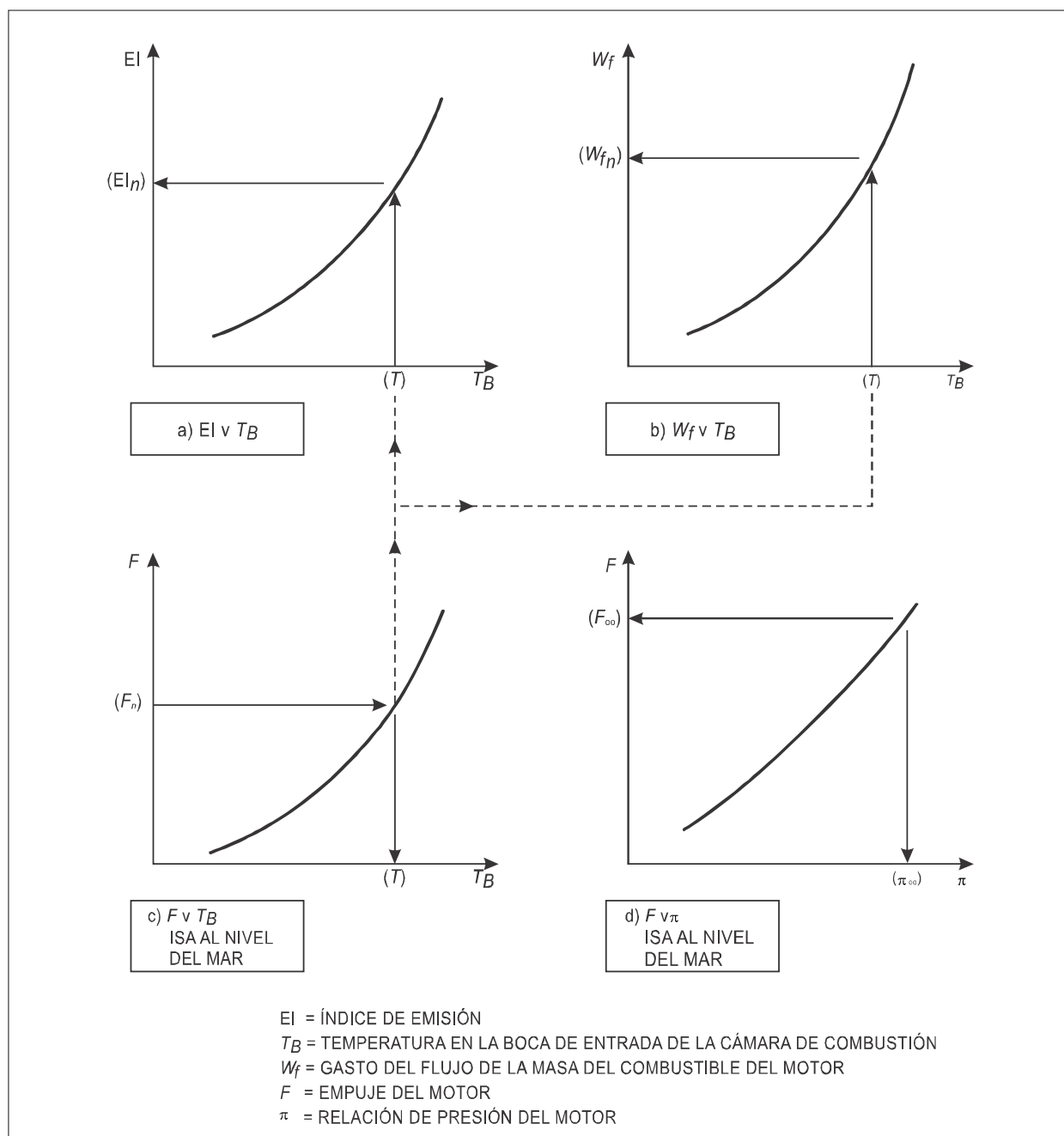


Figura A5-3. Procedimiento de cálculo

ADJUNTO A DEL APÉNDICE 5. ESPECIFICACIONES DEL ANALIZADOR DE HC

Nota 1.— Como se describe en 5.2 del Apéndice 5, el elemento medidor de este analizador es el detector de ionización de la llama (FID), en el cual todo el flujo de la muestra, o una parte representativa de la misma, penetra en una llama de hidrógeno. A base de electrodos colocados en posiciones apropiadas, es posible hacer pasar una corriente ionizante en función de la proporción de los hidrocarburos que penetran en la llama. Es precisamente esta corriente la que, referida a un cero apropiado, se amplía y relaciona con la escala de la gama deseada del instrumento para conseguir la respuesta en función de la concentración de hidrocarburos expresada como equivalente de las ppmC.

Nota 2.— La información sobre los gases de calibración y de ensayo figura en el Adjunto D.

1. GENERALIDADES

Precauciones: Las especificaciones de actuación que se indican corresponden generalmente al máximo de la escala del analizador. Los errores que no llegan al máximo de la escala pueden representar un porcentaje significativamente mayor de la lectura. La pertinencia y la importancia de estos aumentos se considerará al prepararse para efectuar las mediciones. Si es necesaria una mejor actuación, se habrán de tomar las precauciones apropiadas.

El instrumento que se utilice deberá poder mantener la temperatura del detector y de los componentes de manipulación de la muestra a determinada temperatura, comprendida en la gama de 155°C a 165°C, con una estabilidad de $\pm 2^\circ\text{C}$. Los puntos de especificación iniciales deberán ser los indicados a continuación, con tal que la reacción del detector se haya optimizado y el instrumento se haya estabilizado en general:

- a) *Gama total:* de 0 a 500 ppmC, en las gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* superior al 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 0,5 ppmC, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* superior al $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 0,5$ ppmC, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* superior al $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 1,0$ ppmC, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos de $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 0,5$ ppmC, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos de $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o $\pm 0,5$ ppmC, lo que sea mayor.
- g) *Tiempo de respuesta:* no deberá exceder de 10 segundos, desde el momento de entrada de la muestra al sistema analizador hasta conseguir el 90% de la indicación definitiva.
- h) *Linealidad:* con propano mezclado con aire, la respuesta deberá ser lineal respecto a cada gama, con una tolerancia de $\pm 2\%$ del máximo de la escala, de no ser así, será necesario rectificar la calibración.

2. EFECTOS SINÉRGICOS

Nota.— En su aplicación práctica, hay dos aspectos de la performance que pueden afectar la precisión de la medición, a saber:

- a)* el efecto del oxígeno (ya que las distintas proporciones de oxígeno presentes en la muestra dan concentraciones indicadas diferentes de hidrocarburos, en cuanto se trata de concentraciones constantes verdaderas de HC); y
- b)* la respuesta relativa de los hidrocarburos (por la cual la respuesta es diferente respecto a la misma concentración de hidrocarburos de la muestra expresada como equivalente en ppmC, que depende de la clase o combinación de clases de los compuestos de hidrocarburo).

La magnitud de los efectos señalados se determinará como se indica a continuación, y se limitará en consecuencia.

Respuesta del oxígeno: mídase ésta con dos mezclas de propano, en una concentración aproximada de 500 ppmC, de una precisión relativa conocida del $\pm 1\%$, como se indica a continuación:

- 1) propano en $10 \pm 1\%$ de O_2 , y el resto N_2
- 2) propano en $21 \pm 1\%$ de O_2 , y el resto N_2

Si R_1 y R_2 constituyen las respuestas normalizadas respectivas, $(R_1 - R_2)$ no deberá alcanzar el 3% de R_1 .

Respuesta diferencial de los hidrocarburos: mídase la respuesta con cuatro mezclas de hidrocarburos distintos mezclados con aire, en concentraciones de unas 500 ppmC, de una precisión relativa conocida del $\pm 1\%$ como sigue:

- a) propano en aire cero;
- b) propileno en aire cero;
- c) tolueno en aire cero;
- d) n-hexano en aire cero.

Si R_a , R_b , R_c y R_d constituyen, respectivamente, las respuestas normalizadas (con respecto al propano), tendremos que $(R_a - R_b)$, $(R_a - R_c)$ y $(R_a - R_d)$ deberán ser, cada una de ellas, inferiores al 5% de R_a .

3. OPTIMIZACIÓN DE LA REACCIÓN Y ALINEACIÓN DEL DETECTOR

3.1 Habrá que seguir siempre las instrucciones facilitadas por el fabricante en cuanto a la determinación de los procedimientos, servicios auxiliares y suministros necesarios, y dejar que el instrumento se estabilice. Todas las posiciones de ajuste requerirán la verificación iterativa de la posición cero, y hacer la corrección necesaria, si es menester. Utilizando como ejemplo una muestra de unas 500 ppmC de propano mezclado con aire, se determinará la característica de la respuesta: primero, en cuanto a las variaciones del flujo de combustible y, luego, casi al flujo óptimo de combustible, para poder seleccionar el punto óptimo en cuanto a las variaciones de la dilución del flujo de aire. A continuación se evaluarán la respuesta de oxígeno y la del diferencial de los hidrocarburos, como se deja apuntado.

3.2 La linealidad de cada escala de gamas del analizador se verificará añadiendo propano a las muestras de aire, en concentraciones de un 30, 60 y 90% respecto al punto máximo de la escala. La desviación máxima de la respuesta de cada una de esas concentraciones, a partir de una recta de mínimos cuadrados (trazada a base de los puntos y el cero) no deberá discrepar más del $\pm 2\%$ del máximo de la escala. En caso contrario, será preciso trazar una curva de calibración para su empleo en servicio.

ADJUNTO B DEL APÉNDICE 5. ESPECIFICACIONES DE LOS ANALIZADORES DE CO Y DE CO₂

Nota 1.— En 5.3 del Apéndice 5 se resumen las características del subsistema de análisis que hay que utilizar para medir separadamente las concentraciones de CO y CO₂ de la muestra de los gases de escape. Los instrumentos en cuestión se basan en el principio de la absorción sin dispersión de la radiación infrarroja en células paralelas del gas de referencia y del gas de muestra. Las gamas de sensibilidad se obtienen utilizando células de muestra superpuestas, o a base de las variaciones que se producen en los circuitos electrónicos, o ambas cosas a la vez. Los efectos debidos a los gases con bandas de absorción superpuestas, pueden reducirse mediante filtros que absorban el gas o con filtros ópticos, de preferencia estos últimos.

Nota 2.— La información sobre los gases de calibración y de ensayo figura en el Adjunto D.

Precauciones: Las especificaciones de actuación que se indican corresponden generalmente al máximo de la escala del analizador. Los errores que no llegan al máximo de la escala pueden representar un porcentaje significativamente mayor de la lectura. La pertinencia y la importancia de estos aumentos se considerará al prepararse para efectuar las mediciones. Si es necesaria una mejor actuación, se habrán de tomar las precauciones apropiadas.

Las características de actuación principales deberán ser:

Analizador de CO

- a) *Gama total:* de 0 a 2 500 ppm, en gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* menos del 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 1 ppm, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* menos del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos del $\pm 1\%$ ppm del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos de $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 1 ppm, lo que sea mayor.
- g) *Interferencias:* habrá que limitarlas, con respecto a la concentración de CO indicada, como sigue:
 - 1) menos de 500 ppm % de la concentración de etileno;
 - 2) menos de 2 ppm % de la concentración de CO₂;
 - 3) menos de 2 ppm % de la concentración de vapor acuoso.*

Si no es posible satisfacer las limitaciones de interferencia del CO₂ o del vapor de agua, se determinarán, notificarán y aplicarán los factores de corrección apropiados.

* No es aplicable necesariamente cuando las mediciones se han hecho a base de muestras “secas”.

Nota.— Se recomienda, de conformidad con la práctica apropiada, que estos procedimientos de corrección se adopten en todos los casos.

Analizador de CO₂

- a) *Gama total:* del 0 al 10% de gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* menos del 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 100 ppm, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* menos del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos del $\pm 1\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 100 ppm, la que sea mayor.
- g) Se verificará el efecto del oxígeno (O₂) en la respuesta del analizador de CO₂. Para un cambio de 0% O₂ a 21% de O₂ la respuesta de una concentración determinada de CO₂ no cambiará en más de 2% de la lectura. Si no se puede alcanzar este límite, se aplicará el factor de corrección apropiado.

Nota.— Se recomienda, de conformidad con la práctica apropiada, que estos procedimientos de corrección se adopten en todos los casos.

Analizadores de CO y de CO₂

- a) *Tiempo de respuesta:* no deberá exceder de 10 segundos, desde el momento de entrada de la muestra al sistema analizador hasta conseguir el 90% de la indicación definitiva.
- b) *Temperatura de la muestra:* la modalidad preferida es analizar la muestra “mojada” (sin tratar). Esto exige que tanto la célula de muestra como todos los demás elementos que, en este subsistema, entren en contacto con ella, permanezcan a una temperatura mínima de 50°C, con una estabilidad de $\pm 2^\circ\text{C}$. Se admite la posibilidad de medir el CO y el CO₂ en seco (con deshidratador apropiado), en cuyo caso se pueden utilizar analizadores sin calentar y anular así los efectos limitadores del vapor de agua; luego, es necesario hacer la corrección en cuanto al vapor acuoso de entrada y al agua desprendida por la combustión.
- c) *Curvas de calibración:*
 - i) Se verificarán los analizadores con característica lineal de salida de señal en todas las gamas que se utilizan empleando gases de calibración en concentraciones conocidas de aproximadamente 0, 30, 60 y 90% del máximo de la escala. La desviación máxima de la respuesta en cualquiera de estos puntos a partir de una recta de mínimos cuadrados, ajustada a los puntos y la lectura cero, no excederá de $\pm 2\%$ del valor máximo de la escala. Si excede de este valor, será preciso trazar una curva de calibración para utilizarla en servicio.
 - ii) En el caso de los analizadores con característica no lineal de salida de señal, y de los que no cumplan con los requisitos de linealidad mencionados, será preciso trazar curvas de calibración para todas las gamas que se utilizan empleando gases de calibración en concentraciones conocidas de aproximadamente 0, 30, 60 y 90% del máximo de la escala. Se utilizarán otras mezclas, si es necesario, para definir adecuadamente la forma de la curva.

ADJUNTO C DEL APÉNDICE 5. ESPECIFICACIONES DEL ANALIZADOR DE NO_x

Nota.— La información sobre los gases de calibración y de ensayo figura en el Adjunto D.

1. Como se indica en 5.4 del Apéndice 5, la medición de la concentración de los óxidos de nitrógeno se hará por el método químico-luminiscente, mediante el cual se mide la intensidad de la radiación emitida por la reacción del NO con el O₃. Este método no es sensible al NO₂ y, por esto, será necesario pasar la muestra por un convertidor, en el cual el NO₂ se convierte en NO, antes de hacer la medición del NO_x total. Habrá que anotar tanto el NO original como el NO_x. Así por diferenciación, se podrá medir la concentración del NO₂.

2. El instrumento a utilizar deberá tener todos los componentes necesarios para regular el flujo, tales como reguladores, válvulas, flujómetro (aforador), etc. Los materiales que tengan que entrar en contacto con el gas de muestra se limitarán a aquellos que resistan la corrosión causada por los óxidos de nitrógeno, es decir, acero inoxidable, vidrio, etc. En todo momento, la temperatura de la muestra se mantendrá en aquellos valores compatibles con las presiones locales, que eviten la condensación de agua.

Precauciones: Las especificaciones de actuación que se indican corresponden generalmente al máximo de la escala del analizador. Los errores que no llegan al máximo de la escala pueden representar un porcentaje significativamente mayor de la lectura. La pertinencia y la importancia de estos aumentos se considerará al prepararse para efectuar las mediciones. Si es necesaria una mejor actuación, se habrán de tomar las precauciones apropiadas.

3. Las especificaciones principales de actuación del instrumento utilizado a la temperatura ambiente y estable, dentro de un margen de tolerancia de 2°C, serán las siguientes:

- a) *Gama total:* de 0 a 2 500 ppm, en las gamas apropiadas.
- b) *Resolución:* menos del 0,5% del máximo de la escala de la gama utilizada o 1 ppm, la que sea mayor.
- c) *Repetibilidad:* menos del ±1% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, la que sea mayor.
- d) *Estabilidad:* menos del ±2% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- e) *Desviación cero:* menos de ±1% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, la que sea mayor, en un período de una hora.
- f) *Ruido:* 0,5 Hz y mayor, menos de ±1,0% del máximo de la escala de la gama utilizada o ±1 ppm, lo que sea mayor, en un período de dos horas.
- g) *Interferencias:* la supresión, respecto a las muestras que contienen CO₂ y vapor acuoso, se limitará a lo siguiente:
 - menos del 0,5% de la indicación/porcentaje de la concentración de CO₂;
 - menos del 0,1% de la indicación/porcentaje de la concentración del vapor de agua.

Si no es posible satisfacer las limitaciones de interferencia del CO₂ o del vapor de agua, se determinarán, notificarán y aplicarán los factores de corrección apropiados.

Nota.— Se recomienda, de conformidad con la práctica apropiada, que esos procedimientos de corrección se adopten en todos los casos.

- h) *Tiempo de respuesta:* no deberá exceder de 10 segundos, desde el momento de entrada de la muestra al sistema analizador hasta conseguir el 90% de la indicación definitiva.
- i) *Linealidad:* menos del $\pm 2\%$ del máximo de la escala de la gama utilizada o ± 2 ppm, la que sea mayor.
- j) *Convertidor:* estará concebido y funcionará de manera que reduzca a NO el NO₂ presente en la muestra. El convertidor no alterará el NO contenido inicialmente en la muestra.

El rendimiento técnico del convertidor será, por lo menos, del 90%.

Este valor del rendimiento se empleará para corregir el valor del NO₂ de la muestra medida (es decir, $[\text{NO}_x]_c - [\text{NO}]$) el que habría obtenido si el rendimiento hubiese sido del 100%.

— — — — —

ADJUNTO D DEL APÉNDICE 5. GASES DE CALIBRACIÓN Y DE ENSAYO

Tabla de gases de calibración

<i>Analizador</i>	<i>Gas</i>	<i>Precisión*</i>
HC	propano en aire cero	$\pm 2\%$ o $\pm 0,05$ ppm**
CO ₂	CO ₂ en aire cero	$\pm 2\%$ o ± 100 ppm**
CO	CO en aire cero	$\pm 2\%$ o ± 2 ppm**
NOx	NOx en nitrógeno cero	$\pm 2\%$ o ± 1 ppm**

* Basada en el “intervalo” de confianza del 95%.

** La que sea mayor.

Los gases que anteceden se requieren para llevar a cabo la calibración ordinaria de los analizadores durante el uso operacional normal.

Tabla de gases de ensayo

<i>Analizador</i>	<i>Gas</i>	<i>Precisión*</i>
HC	propano en 10 $\pm 1\%$ de O ₂ , el resto nitrógeno cero	$\pm 1\%$
HC	propano en 21 $\pm 1\%$ de O ₂ , el resto nitrógeno cero	$\pm 1\%$
HC	propileno en aire cero	$\pm 1\%$
HC	tolueno en aire cero	$\pm 1\%$
HC	n-hexano en aire cero	$\pm 1\%$
HC	propano en aire cero	$\pm 1\%$
CO ₂	CO ₂ en aire cero	$\pm 1\%$
CO ₂	CO ₂ en nitrógeno cero	$\pm 1\%$
CO	CO en aire cero	$\pm 1\%$
NOx	NO en nitrógeno cero	$\pm 1\%$

* Basada en el “intervalo” de confianza del 95%.

Los gases que anteceden se requieren para llevar a cabo los ensayos de los Adjuntos A, B y C. Los gases de calibración monóxido de carbono y bióxido de carbono podrán mezclarse separadamente o como mezclas de dos componentes. Pueden emplearse mezclas, compuestas de monóxido de carbono, bióxido de carbono y propano en aire seco, a condición de que pueda preservarse la estabilidad de la mezcla.

El gas cero especificado para el analizador del CO, CO₂ y HC equivaldrá al aire cero (el cual incluye el aire “artificial” con un 20 a 22% de O₂ combinado con N₂). Con respecto al analizador de NO_x, el nitrógeno cero se considerará como gas cero. Las impurezas contenidas en ambas variedades de gas cero deberán limitarse, de modo que sean inferiores a las concentraciones siguientes:

1 ppm C
1 ppm CO
100 ppm CO₂
1 ppm NO_x

El solicitante deberá cerciorarse de que los gases comerciales que haya recibido respondan efectivamente a esta especificación, o de que así los especifique el vendedor del producto.

ADJUNTO E DEL APÉNDICE 5. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE LAS EMISIONES — BASE, CORRECCIONES DE LA MEDICIÓN Y MÉTODO NUMÉRICO DE ALTERNATIVA

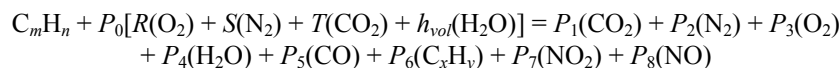
1. SÍMBOLOS

AFR	relación aire/combustible; la relación del gasto del flujo de la masa de aire seco con respecto al del combustible
EI	índice de emisión: $10_3 \times$ gastos del flujo de la masa del producto de las emisiones gaseosas en el escape, por unidad de gasto del flujo de la masa de combustible
K	relación de concentración medida húmeda con respecto a la medida en seco (pasado el deshidratador)
L, L'	coeficiente de interferencia del analizador, de la interferencia del CO_2
M, M'	coeficiente de interferencia del analizador, de la interferencia del H_2O
M_{AIR}	masa molecular de aire seco = 28,966 g, o bien, cuando corresponda, = $(32 R + 28,156 4 S + 44,011 T)$ g
M_{CO}	masa molecular de CO = 28,011 g
M_{HC}	masa molecular de hidrocarburos del escape, considerados como CH_4 = 16,043 g
M_{NO_2}	masa molecular del NO_2 = 46,008 g
M_C	masa atómica del carbono = 12,011 g
M_H	masa atómica del hidrógeno = 1,008 g
P_1	número de moles de CO_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_2	número de moles de N_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_3	número de moles de O_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_4	número de moles de H_2O , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_5	número de moles de CO , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_6	número de moles de C_xH_y , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_7	número de moles de NO_2 , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_8	número de moles de NO , en la muestra de emisiones del escape, por mol de combustible
P_T	$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8$

R	concentración de O_2 en aire seco, por volumen = 0,2095 (normalmente)
S	concentración de N_2 + gases raros en aire seco, por volumen = 0,7902 (normalmente)
T	concentración de CO_2 en aire seco, por volumen = 0,0003 (normalmente)
P_o	número de moles de aire por mol de combustible en la mezcla inicial aire/combustible
Z	símbolo utilizado y definido en 3.4
$[CO_2]$	concentración media de CO_2 en la muestra de emisiones del escape, volumen/volumen
$[CO]$	concentración media de CO en la muestra de emisiones del escape, volumen/volumen
$[HC]$	concentración media de hidrocarburos en la muestra de emisiones de escape, volumen/volumen
$[NO]$	concentración media de NO en la muestra de emisiones del escape, volumen/volumen
$[NO_2]$	concentración media de NO_2 en la muestra de emisiones del escape, volumen/volumen
$[NO_x]$	concentración media de NO y NO_2 en la muestra de emisiones del escape, volumen/volumen
$[NO_x]_c$	concentración media de NO en la muestra de emisiones del escape una vez pasado el convertidor de NO_2 a NO , volumen/volumen
$[NO_2]$	concentración media de $= \frac{([NO_x]_c - [NO])}{\eta}$
$[]_d$	concentración media en la muestra de emisiones del escape, pasado el deshidratador frío, volumen/volumen
$[]_m$	medida de la concentración media indicada antes de aplicar la corrección del instrumento, volumen/volumen
h_{vol}	humedad del aire ambiente, vol de agua/vol de aire seco
h_d	humedad de la muestra de emisiones del escape que salen del “secador”, o del “deshidratador frío”, vol de agua/vol de muestra seca
m	número de átomos de C en una molécula característica del combustible
n	número de átomos de H en una molécula característica del combustible
x	número de átomos de C en una molécula característica de hidrocarburo de las emisiones del escape
y	número de átomos de H en una molécula característica de hidrocarburo de las emisiones del escape
η	eficacia del convertidor de NO_2 a NO

2. BASE PARA CALCULAR LOS PARÁMETROS EI Y AFR

2.1 Se supone que el equilibrio entre la mezcla original de combustible y aire y el estado resultante de las emisiones del escape de las cuales se ha extraído la muestra puede representarse mediante la ecuación siguiente:



a partir de la cual, por definición, los parámetros requeridos se pueden expresar de la forma siguiente:

$$EI(CO) = P_5 \left(\frac{10^3 M_{CO}}{mM_C + nM_H} \right)$$

$$EI(HC) = xP_6 \left(\frac{10^3 M_{HC}}{mM_C + nM_H} \right) \text{ expresado como equivalente del metano}$$

$$EI(NO_x) = (P_7 + P_8) \left(\frac{10^3 M_{NO_2}}{mM_C + nM_H} \right) \text{ expresado como equivalente del } NO_2$$

$$AFR = P_0 \left(\frac{M_{AIR}}{mM_C + nM_H} \right)$$

2.2 A base de la especificación o análisis del combustible se asignan los valores de la composición de hidrocarburos del combustible (m , n). Si solamente se determina la relación n/m , se puede asignar el valor $m = 12$. Normalmente se supone que las fracciones de los moles de los elementos constitutivos del aire seco (R , S , T) corresponden a los valores normales recomendados, si bien pueden asignarse otros valores, a reserva de la restricción $R + S + T = 1$ y de la aprobación de la autoridad encargada de la certificación.

2.3 La humedad del aire ambiente, h_{vol} , es la medida en cada ensayo. Se recomienda que, de no existir prueba en contrario en cuanto a la caracterización de los hidrocarburos de las emisiones del escape (x , y), se asignen valores de $x = 1$ y de $y = 4$.

2.4 La determinación de las incógnitas restantes exige la solución de la serie siguiente de ecuaciones lineales simultáneas, en las que (1) a (4) dimanen de las relaciones fundamentales de conservación atómica, y (5) a (9) representan las relaciones de concentración del producto gaseoso de las emisiones.

$$m + TP_0 = P_1 + P_5 + xP_6 \dots\dots\dots (1)$$

$$n + 2hP_0 = 2P_4 + yP_6 \dots\dots\dots (2)$$

$$(2R + 2T + h_{vol})P_0 = 2P_1 + 2P_3 + P_4 + P_5 + 2P_7 + P_8 \dots\dots\dots (3)$$

$$2SP_0 = 2P_2 + P_7 + P_8 \dots\dots\dots (4)$$

$$[CO_2] P_T = P_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$[CO] P_T = P_5 \dots\dots\dots (6)$$

$$[\text{HC}] P_T = xP_6 \dots\dots\dots (7)$$

$$[\text{NOx}]_c P_T = \eta P_7 + P_8 \dots\dots\dots (8)$$

$$[\text{NO}] P_T = P_8 \dots\dots\dots (9)$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 \dots\dots\dots (10)$$

Estas ecuaciones condicionales se aplican en el caso de que todas las concentraciones medidas sean verídicas, es decir, que no estén viciadas por interferencias o que requieran corrección para obtener la muestra seca. En la práctica, los efectos de la interferencia suelen manifestarse en grado considerable en las mediciones de CO, NOx y de NO, de modo que suele acudir a la medición del CO₂ y del CO, ya sea en seco o en condiciones semisecas. Las modificaciones necesarias de las ecuaciones pertinentes se exponen en 2.5 y 2.6.

2.5 Los efectos de interferencia obedecen sobre todo a la presencia de CO₂ y de H₂O en la muestra, que pueden afectar a los analizadores del CO y del NOx de maneras básicamente distintas. El analizador de CO tiene tendencia a desplazarse al punto cero, en tanto que el analizador de NOx experimenta cambios de sensibilidad, representados como sigue:

$$[\text{CO}] = [\text{CP}]_m + L[\text{CO}_2] + M[\text{H}_2\text{O}]$$

$$[\text{NOx}]_c = [\text{NOx}]_{cm} \left(1 + L' [\text{CO}_2] + M' [\text{H}_2\text{O}] \right)$$

que se transforman en las ecuaciones siguientes de alternativa de (6), (8) y (9), en cuyo caso hay que corregir los efectos de interferencia.

$$[\text{CO}]_m P_T + LP_1 + MP_4 = P_5 \dots\dots\dots (6A)$$

$$[\text{NOx}]_{cm} (P_T + L'P_1 + M'P_4) = \eta P_7 + P_8 \dots\dots\dots (8A)$$

$$[\text{NO}]_m (P_T + L'P_1 + M'P_4) = P_8 \dots\dots\dots (9A)$$

2.6 La opción de medir las concentraciones de CO₂ y de CO a base de una muestra seca o parcialmente seca, o sea con la humedad de muestra reducida a h_d, requiere el empleo de las ecuaciones condicionales modificadas siguientes:

$$[\text{CO}_2]_d (P_T - P_4) (1 + h_d) = P_1 \dots\dots\dots (5A)$$

y

$$[\text{CO}]_d (P_T - P_4) (1 + h_d) = P_5$$

Sin embargo, el analizador CO también puede estar viciado por la interferencia descrita en 2.5, de modo que la ecuación completa de alternativa, para la medición de la concentración del CO, pasa a ser:

$$[\text{CO}]_{md} (P_T - P_4) (1 + h_d) + LP_1 + Mh_d (P_T - P_4) = P_5 \dots\dots\dots (6B)$$

3. FÓRMULAS ANALÍTICAS

3.1 Generalidades

Las ecuaciones (1) a (10) pueden reducirse para conseguir las fórmulas analíticas de los parámetros EI y AFR, que figuran en 7.1. Esta reducción constituye un proceso de eliminación progresiva de las raíces de P_0 , P_1 a P_8 , P_T , en el supuesto de que todas las mediciones de la concentración se hayan efectuado con la muestra “húmeda” y de que no requieran correcciones debido a interferencias o por algún otro concepto. En la práctica, a menudo se prefiere efectuar las mediciones de la concentración “seca” o “semiseca” del CO_2 y del CO . También a menudo, es necesario hacer correcciones para compensar la interferencia. Las fórmulas que han de utilizarse en estas diversas circunstancias se dan en 3.2, 3.3 y 3.4 siguientes.

3.2 Ecuación para convertir las mediciones de la concentración seca a húmeda

Concentración húmeda = $K \times$ concentración seca es decir:

$$[] = K []_d$$

La expresión siguiente de K se aplica cuando el CO y el CO_2 se determinan “en seco”.

$$K = \frac{\{4 + (n/m)T + ([n/m]T - 2h_{vol})([NO_2] - (2[HC]/x)) + (2 + h_{vol})([y/x] - [n/m])[HC]\}(1 + h_d)}{(2 + h_{vol})\{2 + (n/m)(1 + h_d)([CO_2]_d + [CO]_d)\} - ([n/m]T - 2h_{vol})(1 - [1 + h_d])[CO]_d)}$$

3.3 Correcciones debidas a interferencias

Es posible que las mediciones de CO y/o de NO_x y de NO requieran correcciones para anular la interferencia ocasionada por las concentraciones de CO_2 y de agua, en la muestra, antes de utilizarlas en estas ecuaciones analíticas. Tales correcciones pueden normalmente expresarse de las formas generales siguientes:

$$[\text{CO}] = [\text{CO}]_m + L[\text{CO}_2] + M[\text{H}_2\text{O}]$$

$$[\text{CO}]_d = [\text{CO}]_{md} + L[\text{CO}_2]_d + M \left(\frac{h_d}{1 + h_d} \right)$$

$$[\text{NO}] = [\text{NO}]_m (1 + L'[\text{CO}_2] + M'[\text{H}_2\text{O}])$$

$$\eta[\text{NO}_2] = ([\text{NO}_x]_{cm} - [\text{NO}]_m) (1 + L'[\text{CO}_2] + M'[\text{H}_2\text{O}])$$

3.4 Ecuación para calcular el agua de la muestra

Concentración de agua en la muestra

$$[\text{H}_2\text{O}] = \frac{([n/2m] + h_{vol} [P_0/m]) ([CO_2] + [CO] + [HC])}{1 + T(P_0/m)} - (y/2x)[HC]$$

donde

$$P_{0/m} = \frac{2Z - (n/m)}{4(1 + h_{vol} - [TZ/2])}$$

y

$$Z = \frac{2 - [\text{CO}] - ([2/x] - y/2x) [\text{HC}] + [\text{NO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}$$

Cabe señalar que en esta estimación es función de las lecturas de los distintos análisis de concentración, que acaso, a su vez, requieran corrección de la interferencia del agua. A fin de lograr mayor precisión, en esos casos se requieren reiterados análisis en los que se vuelve a calcular sucesivamente la concentración de agua hasta obtener la estabilidad requerida. Se soslaya esta dificultad utilizando el método alternativo de solución numérica (4).

4. MÉTODO ALTERNATIVO — SOLUCIÓN NUMÉRICA

4.1 Como alternativa de los procedimientos analíticos resumidos en 3, es posible obtener sin mayor dificultad los índices de emisión, la relación aire/combustible, las concentraciones corregidas de humedad, etc., mediante la solución numérica de las ecuaciones (1) a (10), respecto a cada serie de mediciones, con la ayuda de una computadora digital.

4.2 En la serie de ecuaciones de (1) a (10), las mediciones efectivas de la concentración quedan sustituidas por el empleo de cualesquiera de las ecuaciones de alternativa (5A), (6A), etc., aplicadas respecto a determinado sistema de medición, a fin de tener en cuenta las correcciones de interferencia y/o las mediciones de muestras en seco.

4.3 Existe amplia disponibilidad de combinaciones bidimensionales idóneas y sencillas para resolver ecuaciones con ayuda de computadoras, y su empleo resulta conveniente y flexible a estos efectos, a fin de incorporar e identificar inmediatamente todas las posibilidades de secado de una muestra y las correcciones por interferencia u otras causas.

ADJUNTO F DEL APÉNDICE 5. ESPECIFICACIONES EN CUANTO A LOS DATOS ADICIONALES

Como se requiere en 3.2 del Apéndice 5, además de las concentraciones medidas de los componentes de las muestras, deberán suministrarse los datos siguientes:

- a) temperatura en la boca de entrada: medida como la temperatura total en un punto distanciado un diámetro del plano de entrada del motor, con una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- b) humedad en la boca de entrada (kg agua/kg aire seco): medida en un punto situado hasta 15 m, como máximo, del plano de entrada, por delante del motor, con una precisión de $\pm 5\%$;
- c) presión atmosférica: medida hasta 1 km, como máximo, del lugar donde se ensaya el motor y corregida, según sea necesario, a la altitud del banco de pruebas, con una precisión de $\pm 100\text{ Pa}$;
- d) flujo de combustible: por medición directa, con una precisión de $\pm 2\%$;
- e) relación H/C del combustible: definida como n/m , en la que C_mH_n constituye la representación equivalente de los hidrocarburos del combustible utilizado para hacer el ensayo y evaluada por referencia al análisis del tipo de combustible del motor;
- f) parámetros del motor:
 - 1) empuje: por medición directa, con una precisión de $\pm 1\%$ al régimen de despegue y $\pm 5\%$ a base del empuje mínimo utilizado en la prueba de homologación, con variación lineal entre esos puntos;
 - 2) velocidad(es) de rotación: por medición directa, con una precisión mínima de $\pm 0,5\%$;
 - 3) flujo de aire del generador de gas: determinado con una precisión de $\pm 2\%$, por referencia a la calibración de performance del motor.

Los parámetros a), b), d) y f) se determinarán a cada ajuste de potencia para el ensayo de las emisiones, pero el parámetro c) deberá determinarse a intervalos mínimos de una hora, en el transcurso del período que requieran los ensayos de las emisiones.

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

1. GENERALIDADES

Para satisfacer los niveles reglamentarios prescritos en la Parte III, 2.2, 2.3, 3.2, 3.3 y 4.2 se observarán los principios generales siguientes:

- a) para las pruebas de certificación, el fabricante podrá seleccionar cualquier número de motores, incluso un solo motor, si así lo desea;
- b) la autoridad encargada de la certificación tendrá en cuenta todos los resultados obtenidos durante las pruebas de certificación;
- c) se realizarán como mínimo tres pruebas de motor, de modo que si se somete para certificación un solo motor, éste tendrá que probarse por lo menos tres veces;
- d) si determinado motor (*i*) se prueba varias veces, el valor medio aritmético (X_i) de las pruebas se considerará como valor medio de ese motor (*i*). El resultado de la certificación equivale entonces a la media aritmética de los valores (X_i) obtenidos respecto a cada motor probado;
- e) el fabricante facilitará a la autoridad encargada de la certificación los datos prescritos la Parte III, 2.4, 3.4, 4.2 y/o 4.3 según sea el caso;
- f) los motores sometidos a prueba tendrán las características de emisión correspondientes al tipo de motor respecto al cual se desee la certificación. No obstante, por lo menos uno de los motores responderá fundamentalmente a la norma de fabricación del tipo de motor y tendrá características de operación y de performance enteramente representativas. Uno de esos motores se declarará motor normal de referencia. Los métodos para corregir todo otro motor probado con respecto a este motor normal de referencia, deberán contar con el visto bueno de la autoridad nacional encargada de la certificación. Los métodos para corregir los resultados de las pruebas teniendo en cuenta los efectos ambientales se describen en la sección 7 del Apéndice 3, en la sección 7 del Apéndice 5, o en la sección 6 del Apéndice 7, según corresponda.

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

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

2.2 Emisiones de materia particulada

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 termoforéticas en el colector 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 termoforéticas en el colector del sistema de muestreo, divididos por el coeficiente correspondiente al número de motores probados, como se indica 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.

3.1 Si un tipo de motor no satisface la prueba para la certificación, la autoridad competente permitirá al fabricante, si éste lo solicita, realizar pruebas adicionales de los motores presentados para su certificación. Si los resultados totales disponibles todavía no satisfacen las exigencias de la certificación, se permitirá al fabricante que pruebe cuantos motores adicionales desee. Luego, estos resultados se examinarán junto con todos los datos precedentes.

3.2 Si el resultado sigue siendo negativo, se permitirá al fabricante que seleccione uno o más motores para modificarlos. Se estudiarán entonces los resultados de las pruebas ya realizadas del motor (o motores) seleccionado(s) antes de ser modificado(s) y se procederá a nuevas pruebas de modo que, por lo menos, se disponga de tres de ellas. Para cada motor se determinará la media de esas pruebas, que se denominará la “media sin modificar”.

3.3 Posteriormente, el motor (o motores) podrá(n) modificarse, y con el motor (o motores) modificado(s) se realizarán por lo menos tres pruebas, cuya media se denominará, en cada caso, la “media modificada”. Esta “media modificada” se comparará con la “media sin modificar” a fin de obtener un mejoramiento proporcional, que se aplicará al resultado de la prueba previa de certificación para determinar si finalmente se ha logrado el cumplimiento. Cabe señalar que antes de iniciar las pruebas de las emisiones de cualquier motor modificado, deberá determinarse si la modificación satisface las exigencias pertinentes de aeronavegabilidad.

3.4 Este procedimiento se repetirá hasta que quede demostrado el cumplimiento o se retire la solicitud de certificación del tipo de motor.

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

1. INTRODUCCIÓN

Nota.— Los procedimientos que se describen en el presente apéndice contienen directrices para la obtención de muestras representativas de materia particulada no volátil (nvPM) del escape de una turbina y su transporte al sistema de muestreo y medición y posterior análisis. Este procedimiento no es aplicable a los motores que utilizan posquemador.

Solo se permitirán procedimientos equivalentes a los contenidos en este apéndice previa solicitud dirigida a la autoridad encargada de la certificación y después de que esta los haya aprobado.

2. DEFINICIONES, SIGLAS Y SÍMBOLOS

2.1 Definiciones

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

Carbono elemental (EC). Carbono que absorbe la luz y se elimina de una muestra de filtro calentada a 870°C en una atmósfera inerte durante un análisis por el método de transmitancia termoóptica (TOT), con exclusión del residuo de carbón.

Carbono orgánico (OC). Carbono que se volatiliza en helio cuando se calienta una muestra de filtro de fibra de cuarzo a 870°C durante el análisis por el método de transmitancia termoóptica (TOT). Incluye el residuo de carbón formado durante la pirólisis de algunos materiales.

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

Concentración de gases. La fracción en volumen del componente de la mezcla de gases que reviste interés.

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.

Convertidor catalítico Aparato catalizador que elimina elementos volátiles mediante la oxidación.

Diámetro aerodinámico de una partícula. El diámetro de una esfera equivalente de densidad unitaria con la misma velocidad terminal de decantación que la partícula en cuestión, también denominado “diámetro aerodinámico clásico”.

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. Lista de valores o función matemática que representa la concentración en número de partículas en función del tamaño.

Estabilidad. La similitud que pueden registrar las mediciones repetidas de una muestra invariable dada durante un período determinado.

Gas de calibración. Un gas de referencia de gran precisión, que hay que utilizar para alinear, ajustar y hacer la verificación periódica de los instrumentos.

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, 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°C.

Partes por millón (ppm). La concentración del volumen unitario de un gas por un millón de unidades de volumen de la mezcla de gases de la cual forma parte.

Pérdida de partículas. Las partículas que se pierden durante el transporte a través de un sistema de muestreo. Esta pérdida se debe a diversos mecanismos de deposición, algunos de los cuales dependen del tamaño de la partícula.

Precisión. El grado de aproximación con que una medición se acerca al valor verdadero, medido independientemente.

Repetibilidad. La precisión con que puede lograrse la medición de una muestra dada e invariable repetidas veces en breve plazo con el mismo resultado, sin que sea necesario calibrar de nuevo el instrumento.

Resolución. El cambio mínimo perceptible en una medición.

Respuesta. Toda variación de la señal indicadora del instrumento, que ocurre al variar la concentración de la muestra.

Separador ciclónico. Separa, mediante rotación y fuerza gravitatoria, partículas de mayor tamaño que el diámetro aerodinámico indicado. El punto de corte del diámetro aerodinámico está asociado con el porcentaje de partículas de un tamaño dado que atraviesan el separador ciclónico.

Sistema de calidad. Un sistema de gestión en el que el laboratorio competente documenta sus políticas, sistemas, programas, procedimientos e instrucciones en la medida necesaria para garantizar la calidad de los resultados de la prueba y/o calibración.

Tiempo de subida. El tiempo necesario para que la señal de salida pase del 10 al 90% del cambio final de la señal de salida cuando se aplica abruptamente un material de referencia al sistema automático de medición que, inicialmente, se encuentra en estado básico. (Este término solo se aplica a un analizador en línea).

2.2 Siglas

CPC	Contador de partículas de condensación
FS	Rango completo de la escala del analizador
GL	Conducto de gas
HEPA	Filtro de aire de partículas de elevada eficacia, clase H13, que elimina por lo menos 99,97% de las partículas de ftalato de dioctilo (0,3 µm de diámetro)
ID	Diámetro interno
ISA	Atmósfera tipo internacional (ISO 2533:1975)
LOD	Límite de detección
NMI	Instituto Nacional de Metrología
nvPM	Materia particulada no volátil (<i>véase</i> la definición)
nvPMmi	Instrumento de medición de masa de materia particulada no volátil
nvPMni	Instrumento de índice de materia particulada no volátil
PTFE	Politetrafluoroetileno
slpm	Litros normalizados por minuto (litros por minuto en STP)
STP	Condición del instrumento a temperatura (0°C) y presión (101,325 kPa) normalizadas
TOT	Transmitancia termoóptica
VPR	Eliminador de partículas volátiles
VRE	Rendimiento de depuración de materia volátil

2.3 Símbolos

[CO]	Concentración de gas media de CO en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda
[CO ₂]	Concentración de gas media de CO ₂ en muestra de escape sin diluir, volumen/volumen, húmeda
[CO ₂] _b	Concentración de CO ₂ en aire seco, en volumen = 0,0003
[CO ₂] _{dil1}	Concentración de gas media de CO ₂ volumen/volumen tras la primera etapa de dilución, húmeda
[CO ₂] _{dil2}	Concentración de gas media de CO ₂ volumen/volumen tras la segunda etapa de dilución, húmeda
[CO ₂] _s	Concentración de gas media de CO ₂ volumen/volumen en muestra de escape sin diluir, húmeda, semihúmeda o seca

DF	Factor de dilución = (Concentración de la muestra antes de la dilución)/(Concentración de la muestra después de la dilución)
	$\frac{\text{Volumen de la muestra sin diluir}}{\text{Volumen de la muestra diluida}}$
DF ₁	Factor de dilución de la primera etapa = $\frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]_{\text{dil1}}}$
DF _{1_S}	Factor de dilución de la primera etapa calculado utilizando [CO ₂] _S y [CO ₂] _{dil1} tomados directamente de la muestra
DF ₂	Factor de dilución de la segunda etapa (VPR) conforme a la calibración de un laboratorio competente
D _m	Diámetro de movilidad eléctrica de nvPM, µm
D _{xy} , a z nm	Diámetro aerodinámico al que se detectan xy % (eficiencia de detección) de las partículas de tamaño z
EI _{mass}	Índice de emisión en masa de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis, en mg/kg de combustible
EI _{num}	Índice de emisión en número de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis, en número/kg de combustible
[HC]	Concentración media de hidrocarburos en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda, expresada como carbono
η _{VPR(D_m)}	Coeficiente de penetración de partículas del VPR para partículas de D _m
k _{thermo}	Factor de corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección
[NO]	Concentración de gas media de NO en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda
[NO ₂]	Concentración de gas media de NO ₂ en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda
[NO _x]	Concentración de gas media de NO y NO ₂ en muestra de escape, volumen/volumen, húmeda = [NO]+[NO ₂]
M _C	Masa atómica del carbono = 12,011
M _H	Masa atómica del hidrógeno = 1,008
m	Cantidad de átomos de C en molécula de combustible característica
n	Cantidad de átomos de H en molécula de combustible característica
nvPM _{mass}	Concentración en masa de nvPM con el instrumento en condición STP, corregida en función de las pérdidas por dilución y termoforesis en la sección de recolección del sistema de muestreo, µg/m ³
nvPM _{mass_STP}	Concentración en masa de nvPM con el instrumento en condición STP, µg/m ³
nvPM _{num_STP}	Concentración en número de nvPM con el instrumento en condición STP, número/cm ³

T_{line}	Temperatura de la pared del conducto de muestreo
T_1	Temperatura de la pared en la entrada del equipo de dilución en °C
T_{EGT}	Temperatura de los gases en el plano de salida de la tobera de escape del motor en °C, medida en el motor o calculada a partir de la performance
t_{90}	Tiempo de respuesta de 90% (tiempo transcurrido entre el cambio de concentración en la entrada y el momento en que el detector llega al 90% de su señal final)
α	Relación atómica entre hidrógeno y carbono del combustible = n/m , donde C_mH_n es la representación equivalente de hidrocarburos del combustible empleado en la prueba y evaluado por referencia al análisis del tipo de combustible del motor.

3. DATOS NECESARIOS

3.1 Emisiones de nvPM

3.1.1 Para calcular las emisiones en masa y número de nvPM, se han de determinar las siguientes concentraciones:

- a) Masa de nvPM: $nvPM_{mass_STP}$;
- b) Número de nvPM: $nvPM_{num_STP}$;
- c) Dióxido de carbono (CO_2): $[CO_2]$ y $[CO_2]_{dil}$;
- d) Monóxido de carbono (CO): $[CO]$;
- e) Hidrocarburos (HC): $[HC]$ y
- f) Óxidos de nitrógeno (NO_x): $[NO_x]$, $[NO]$, $[NO_2]$.

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

3.1.2 A los efectos de la verificación de la operabilidad del sistema, se debe determinar la concentración de la siguiente emisión:

Dióxido de carbono (CO_2): $[CO_2]_s$

3.2 Otra información

Para normalizar los datos de mediciones de emisiones y definir las características de las pruebas de motores, se brindará la información adicional enumerada desde el Adjunto F hasta el Apéndice 3 y desde el Adjunto D hasta el presente apéndice.

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

4.1 Sistema de muestreo y medición de nvPM

4.1.1 El sistema de muestreo y medición de nvPM constará de tres partes divididas en cinco secciones:

- a) parte de recolección (Sección 1);
- b) parte de transferencia (Secciones 2, 3 y 4); y
- c) parte de medición (Sección 5).

Nota 1.— La Figura A7-1 y la Tabla A7-1 contienen una descripción general del sistema de muestreo y medición de nvPM.

Nota 2 — En los Adjuntos A, B, C y E del presente apéndice figuran requisitos y recomendaciones más detallados para cada sección del sistema.

4.1.2 Las secciones 1 a 4 cumplirán los siguientes requisitos:

- a) Los conductos de muestreo serán lo más directos que sea posible.
- b) La longitud total de los conductos no excederá los 35 m desde el extremo de la sonda hasta la entrada del instrumento de medición. Esta longitud total no equivale a la suma de longitudes máximas permisibles de cada sección de muestreo. En el Adjunto A del presente Apéndice figuran los requisitos de longitud detallados, que se ilustran en la Figura A7-1.

4.1.3 **Recomendación.**— *A continuación se detallan recomendaciones para las Secciones 1 a 4:*

- a) *Se debería reducir al mínimo la cantidad de conexiones, que deberían estar hechas de acero inoxidable con un diámetro interior liso.*
- b) *Se debería reducir al mínimo la cantidad de conexiones de unión del mamparo, que deberían contar con aislamiento térmico para reducir al mínimo los gradientes de temperatura.*

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

4.1.4 Las secciones 2 a 4 deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a) Los radios de toda curvatura necesaria de los conductos de muestreo serán más de 10 veces superiores al ID de los conductos.
- b) No habrá bordes de escalones hacia el frente de tamaño mayor al 15% del ID.
- c) Los cambios en el ID del conducto de muestreo que superen el 15% solo podrán producirse en una interfaz con el conducto del separador.
- d) Las diferencias de ID menores o iguales a 15% no se considerarán cambios.

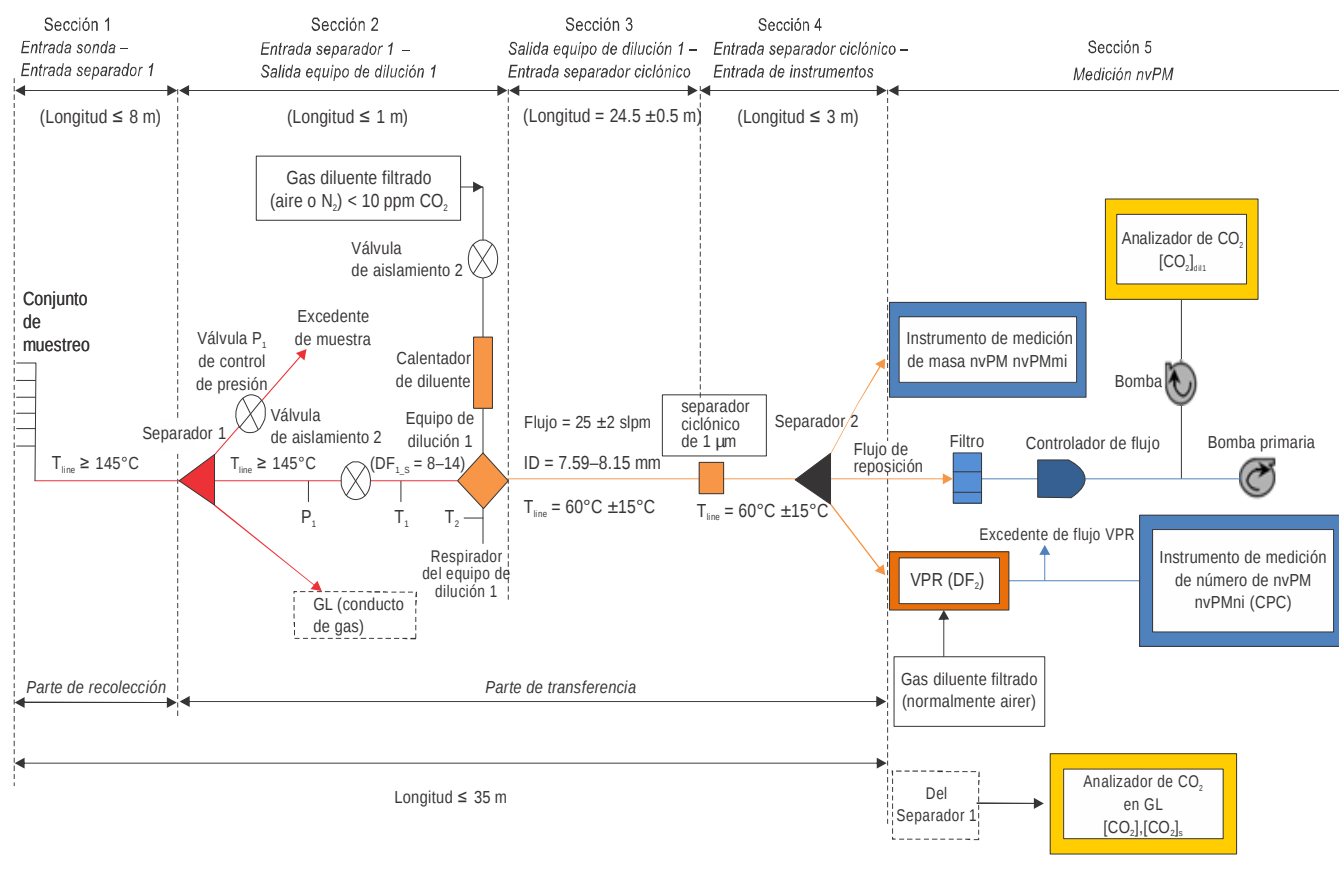


Figura A-7.1 Esquema general de un sistema de muestreo y medición de nvPM

4.1.5 Recomendación.— *Para las Secciones 2 a 4 se debe calentar activamente el conducto de muestreo a través de una conexión. Si esto no resulta práctico, se debe calentar el conducto de muestreo lo más cerca posible del elemento caliente más próximo y se debe aislar a lo largo de la conexión.*

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. 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.

Tabla A7-1. Terminología general del sistema de muestreo y medición de nvPM

Terminología		Descripción
Sección 1	Conjunto de sonda de muestreo	Aparato de tubos de uno o múltiples orificios utilizado para obtener una muestra representativa del escape del motor de una aeronave.
	Conducto de conexión	Longitud de la tubería que transporta la muestra de la sonda a la entrada del separador 1.
Sección 2	Separador 1	Conjunto separador de flujo para permitir la separación controlada de muestras destinadas a los sistemas de muestreo de partículas y gases. También suministra un conducto (excedente de muestra) para aliviar y controlar la presión del conducto de muestreo.
	Válvula P ₁ de control de presión	Válvula utilizada para controlar la presión en la entrada del equipo de dilución 1.
	P ₁	Presión en la entrada del equipo de dilución 1; regulada por la válvula de control de presión cuando el nivel de P ₁ es superior al ambiental.
	T ₁	Temperatura del tubo de muestra en la entrada del equipo de dilución 1 necesaria para el cálculo de pérdida por termoforesis de partículas en las secciones 1 y 2.
	Válvula de aislamiento 1	Permite aislar el sistema de partículas de la muestra del GL y buscar fugas en el GL (sonda incluida) y verificar la limpieza de la parte de transferencia.
	Válvula de aislamiento 2	Válvula de cierre del paso de diluentes por el equipo de dilución 1.
	Equipo de dilución 1	Equipo de dilución 1 de tipo eyector, que aplica una presión cercana a la ambiente a la entrada de la sección 3. Diluye la muestra de nvPM al comienzo de la parte de transferencia (dilución de la primera etapa, DF ₁) para que sea mínima la coagulación de las partículas y disminuye la temperatura de la muestra para reducir al mínimo las pérdidas por termoforesis.
	Gas diluyente filtrado	Gas comprimido (nitrógeno o aire) para el equipo de dilución 1.
	Calentador de diluyente	Calienta el diluyente antes de que ingrese en el equipo de dilución 1. La temperatura del calentador está controlada por la temperatura del respiradero del equipo de dilución 1 (T ₂).
	Respiradero del equipo de dilución 1	Permite ventilar el exceso de muestra diluida en la atmósfera para mantener una presión cercana a la ambiente en el escape del equipo de dilución 1 e impedir que se suministre una presión excesiva a la parte de transferencia.
	T ₂	Temperatura en el flujo del respiradero para controlar la temperatura de la salida del equipo de dilución 1.
GL		Conducto de gas. Sección calentada para transportar la muestra del escape a fin de realizar mediciones de las emisiones gaseosas.
Sección 3	Conducto caliente de muestreo	Sección de muestreo normalizada. Permite efectuar mediciones a una distancia segura del motor.
Sección 4	Separador ciclónico de 1 µm	Elimina las partículas de gran tamaño que se generaron por combustión y ayuda a prevenir obstrucciones en los instrumentos.
	Separador 2	Conjunto separador de flujo que provee conductos para las muestras para la medición de la concentración en masa y número de nvPM y un tercero para mantener el gasto total de flujo del sistema en la sección 3.
Sección 5	Filtro	Filtro de partículas para prevenir obstrucciones y daño al controlador de flujo.
	Controlador de flujo	Mantiene un gasto de flujo constante en la sección 3 controlando el flujo de reposición.
	Bomba primaria	Provee succión para el flujo de reposición.
	Analizador de CO ₂	Medición de [CO ₂] _{dil1} en la muestra diluida.
	nvPMmi	Instrumento de medición de masa de nvPM
	VPR (DF ₂)	Dispositivo que elimina elementos volátiles y diluye aún más la muestra (segunda etapa de dilución, DF ₂) antes de que esta pase por el nvPMni.
	Gas diluyente filtrado	Gas diluyente (nitrógeno o aire) para el VPR.
	nvPMni (CPC)	Instrumento de índice de nvPM que es un contador de partículas de condensación.

- d) El plano de muestreo estará lo más próximo al plano de salida de la tobera de escape del motor que permita la performance del motor, pero, en todo caso, a una distancia del plano de salida que no rebase el diámetro de 0,5 de la tobera.
- e) El solicitante demostrará a la autoridad encargada de la certificación, mediante desplazamientos pormenorizados de la sonda, que el sistema de sondeo que se propone utilizar y su posición proporcionan una muestra representativa respecto a cada reglaje del empuje prescrito.

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

4.3 Parte de transferencia

4.3.1 En la entrada de la sección 2, el conjunto de Separador 1 dividirá la muestra entre el conducto de la parte de transferencia, el GL para la medición de CO₂, CO, HC, y NO_x sin diluir, y el conducto del excedente de muestra.

Nota.— Esta disposición también permite utilizar el GL para medir el Índice de humo, si procede, especificado en el Apéndice 2.

4.3.2 Se deberá disponer el conducto de la parte de referencia de modo que la muestra de nvPM:

- a) pase a través del equipo de dilución 1, de dilución de tipo eyector, que recoge, diluye y enfría la muestra;
- b) pase a través de la sección 3; y
- c) pase por un separador ciclónico y el separador 2 en la sección 4 antes de ingresar en la parte de medición, de la sección 5.

4.4 Parte de medición

4.4.1 Medición en masa de nvPM

4.4.1.1 El nvPMmi deberá cumplir los requisitos del Adjunto B del presente apéndice.

4.4.1.2. Cada marca y modelo de nvPMmi recibirá un certificado del fabricante del instrumento o de otro laboratorio de prueba y calibración competente que confirme que la marca y el modelo del nvPMmi cumplen las especificaciones de actuación que se enumeran en la Tabla A7-3 del Adjunto B del presente apéndice.

4.4.2 Medición en número de nvPM

4.4.2.1 Se determinará la concentración en número de nvPM mediante un sistema que consta de un eliminador de partículas volátiles (VPR) y un contador de partículas de condensación (CPC) (nvPMni) conectados en serie. El VPR incluye un sistema de dilución (DF₂) y un dispositivo para eliminar especies volátiles.

4.4.2.2 Cada marca y modelo de VPR y CPC recibirá un certificado del fabricante del instrumento o de otro laboratorio de prueba y calibración competente que confirme que la marca y el modelo de cada dispositivo cumplen las especificaciones de actuación que se enumeran en el Adjunto C del presente apéndice.

4.4.3 Conducto del flujo de reposición

- a) Se utilizará el conducto del flujo de reposición para mantener un gasto de flujo constante de la muestra a través de la sección 3 y proporcionar una medición de la concentración de CO₂ de la muestra diluida.
- b) El conducto del flujo de reposición deberá contener una bomba, un controlador del flujo y un analizador de CO₂.
- c) **Recomendación.**— *Se debería colocar un filtro de partículas aguas arriba del controlador de flujo para impedir que se dañen los componentes.*

5. PROCEDIMIENTOS A SEGUIR AL HACER EL ENSAYO GENERAL

5.1 Calibración y mantenimiento

5.1.1 Se llevará a cabo el mantenimiento de todos los instrumentos conforme a las indicaciones del fabricante.

5.1.2 Sistema de muestreo y medición de nvPM

Se efectuará la calibración y el mantenimiento del sistema de muestreo y medición de nvPM como se indica a continuación, con una frecuencia anual o siguiendo las recomendaciones del fabricante:

- a) Se vaciará y limpiará el depósito de recolección del separador ciclónico.
- b) Se limpiará la boquilla del orificio del equipo de dilución 1.
- c) Se calibrará el gasto de flujo del controlador de flujo de reposición y de la entrada del nvPMmi, nvPMni y VPR con un caudalímetro trazable a las normas del NMI.
- d) **Recomendación.**— *Todos los gastos de flujo calibrados deberían encontrarse dentro del 5% de FS.*
- e) Se calibrarán transductores de presión mediante un transductor de presión trazable a las normas del NMI.
- f) **Recomendación.**— *Todas las mediciones de presión calibradas deberían encontrarse dentro del 2% de FS.*

5.1.3 nvPMmi

- a) Calibrará anualmente el nvPMmi un laboratorio competente para cumplir los requisitos de calibración que figuran en el Adjunto B del presente apéndice.
- b) El nvPMmi demostrará el cumplimiento de las especificaciones de actuación que se enumeran en la Tabla A7-3 del Adjunto B del presente apéndice si se producen cambios de soporte físico o lógico en el nvPMmi que afecten la adquisición y el procesamiento de datos.

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

5.1.4 VPR

- a) Calibrará anualmente el VPR un laboratorio competente para cumplir los requisitos que figuran en el Adjunto C del presente apéndice.
- b) Si el VPR contiene un convertidor catalítico, el reemplazo de este componente se efectuará conforme a las indicaciones del fabricante.

5.1.5 nvPMni (CPC)

- a) Calibrará anualmente el nvPMni un laboratorio competente para cumplir los requisitos de calibración que figuran en el Adjunto C del presente apéndice.
- b) El fluido de trabajo del nvPMni será el n-butanol y se reemplazará conforme a las indicaciones del fabricante.
- c) El nvPMni demostrará el cumplimiento de las especificaciones de actuación que se enumeran en el Adjunto C del presente apéndice si se producen cambios de soporte físico o lógico en el nvPMni que afecten la adquisición y el procesamiento de datos.

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

5.1.6 Analizadores de gases

- a) La calibración de los analizadores de CO₂, CO, HC y NO_x se llevará a cabo de conformidad con los procedimientos del Apéndice 3.
- b) El gas de calibración Z (cero) del analizador de CO₂ aguas abajo del equipo de dilución 1 tendrá un nivel de impurezas de CO₂ inferior a 10 ppm.

Nota.— La especificación de impurezas de CO₂ para el analizador de CO₂ aguas abajo del equipo de dilución 1 es diferente de aquella del Adjunto D del Apéndice 3.

- c) **Recomendación.—** El diluyente del equipo de dilución 1 debería ser el mismo que el gas de calibración Z usado para el analizador de CO₂.

5.2 Funcionamiento del motor

5.2.1 El motor se hará funcionar en instalaciones de pruebas estáticas apropiadas y debidamente equipadas para hacer ensayos de performance de gran precisión.

5.2.2 Los ensayos de las emisiones de nvPM se harán a los reglajes de empuje prescritos por la autoridad encargada de la certificación. A cada reglaje, habrá que estabilizar el motor.

5.3 Equilibrio de carbono

Respecto a cada ensayo, habrá que hacer una verificación al efecto de que la relación aire/combustible, estimada a base de la concentración total de carbono de la muestra integrada, excluyendo el humo, concuerde con el cálculo basado en la relación aire/combustible del motor con una precisión de $\pm 15\%$ para la modalidad rodaje/marcha lenta en tierra y con una precisión de $\pm 10\%$ para todas las demás modalidades de utilización.

Nota.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II – Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves contiene textos de orientación sobre el uso de un procedimiento equivalente.

5.4 Utilización del sistema de muestreo y medición de nvPM

5.4.1 Antes de una serie de pruebas de un motor, se cumplirán los siguientes requisitos:

- a) Se realizarán verificaciones de fugas y limpieza de la parte de recolección aplicando los procedimientos descritos en el Adjunto E del presente apéndice.
- b) Se efectuará una verificación del factor de dilución (DF_2) del VPR descrita en el Adjunto E.

5.4.2 Se adoptará el siguiente procedimiento para mediciones de gases en el GL y aguas abajo del equipo de dilución 1:

- a) Aplíquese el gas Z apropiado y háganse los ajustes necesarios del instrumento.
- b) Aplíquese el gas de calibración apropiado del 90% de la concentración correspondiente a FS para abarcar los rangos que haya que utilizar y ajústese y anótese debidamente la posición del regulador de ganancia.

5.4.3 Durante una serie de pruebas de un motor, se cumplirán los siguientes requisitos:

- a) solo se tomarán mediciones de nvPM una vez que todos los instrumentos y conductos de transferencia de muestras hayan sido calentados y se encuentren estables.
- b) Si algún componente o sección del sistema de muestreo de nvPM es nuevo, fue limpiado tras el último uso o empleado con anterioridad para un fin distinto del muestreo del escape de un motor, el sistema de muestreo de nvPM tomará muestras del escape del motor de la aeronave durante 30 minutos, como mínimo, a cualquier potencia del motor, antes de efectuar mediciones de nvPM.

Nota.— La eliminación de obstrucciones por hollín del orificio del equipo de dilución 1 no constituye un proceso de limpieza según la definición de b).

- c) Se llevarán a cabo las verificaciones de operabilidad del nvPMmi recomendadas por el fabricante.
- d) Para las mediciones en número de nvPM, se cumplirán los siguientes requisitos:
 - 1) En la etapa caliente, el VPR está a $350^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$.
 - 2) Si se usa un convertidor catalítico en el VPR, el diluyente contendrá al menos 10% de O_2 .
 - 3) El fluido de trabajo del nvPMni se encuentra en el nivel exigido por el fabricante.
 - 4) El saturador del nvPMni y el condensador alcanzaron la temperatura de funcionamiento correcta.

- e) Se llevarán a cabo las verificaciones de operabilidad del nvPMni recomendadas por el fabricante.
- f) Se realizarán verificaciones de limpieza de la parte de transferencia al comienzo y al final de una prueba de motor aplicando los procedimientos descritos en el Adjunto E del presente apéndice.

Nota.— La verificación de limpieza de la parte de transferencia también sirve como verificación en servicio Z de los instrumentos de medición de nvPM.

- g) Se realizarán mediciones de nvPM ambiente al inicio y al final de una prueba de motor aplicando los procedimientos descritos en el Adjunto E del presente apéndice.

Nota.— La medición ambiente sirve también como verificación de respuesta del nvPMni en servicio.

- h) Se verificarán nuevamente los puntos Z y de calibración del analizador de gases al final de la prueba y a intervalos no superiores a 1 hora durante las pruebas. Si alguno de los dos ha variado en más de $\pm 2\%$ del FS, se repetirá la prueba tras recalibrar el instrumento a los valores dentro de la especificación.

5.4.3.1 **Recomendación.**— *Se debería purgar la sección 1 durante el inicio y la detención del motor.*

5.4.4 Durante las mediciones de nvPM del motor, se cumplirán los siguientes requisitos:

- a) Si el valor de P_1 es inferior a la presión atmosférica, se cerrará la válvula P_1 de control de presión; y, si está instalada, se cerrará también la válvula opcional de cierre.
- b) Se medirán continuamente la concentración de CO_2 en el GL y la concentración de CO_2 aguas abajo del equipo de dilución 1, $[CO_2]_{dil1}$, y se utilizarán para validar y controlar DF_1 en tiempo real (DF_{1_s}) para que su valor se encuentre dentro del rango de 8 a 14. Se define DF_{1_s} como:

$$DF_{1_s} = \frac{[CO_2]}{[CO_2]_{dil1}}$$

Nota.— El cálculo de DF_{1_s} no requiere la concentración seca de CO_2 .

- c) Se vigilará que el gasto del flujo de la muestra se mantenga en 25 slpm ± 2 slpm en la sección 3 sumando el gasto de flujo de reposición y de la entrada del nvPMmi y el VPR.
- d) Cuando el funcionamiento del motor y la concentración de nvPM y $[CO_2]_{dil1}$ medidas sean estables al reglaje del empuje requerido, se promediará y anotará un mínimo de 30 segundos de datos.
- e) Si el nvPMmi no tiene una medición de presión de la muestra, se medirá la presión en un lugar ubicado entre la salida del separador 2 y la entrada del flujo de reposición; se tomará nota de esa medición.
- f) Si el nvPMni no tiene una medición de presión de la muestra, se medirá la presión en un lugar ubicado entre la salida del VPR y la entrada del nvPMni; se tomará nota de esa medición.

6. CÁLCULOS

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

Este procedimiento se emplea para calcular ecuaciones de concentración en masa de nvPM e índices de emisión (EI) de nvPM en masa y número de motores de turbinas de gas de aeronaves que queman combustible hidrocarbúrico en el aire. Todas las ecuaciones utilizan la concentración en masa y la concentración en número de nvPM con el instrumento en condiciones STP. Si no es este el caso, el usuario seguirá los procedimientos recomendados por el fabricante del instrumento para corregir las concentraciones notificadas a condiciones STP para el instrumento.

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 por termoforesis de partículas de la parte de recolección. Se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$EI_{mass} = \frac{22.4 \times nvPM_{mass_STP} \times 10^{-3}}{\left([CO_2]_{dil} + \frac{1}{DF_1} ([CO] - [CO_2]_b + [HC]) \right) (M_C + \alpha M_H)} \times k_{thermo}$$

$$EI_{num} = \frac{22.4 \times DF_2 \times nvPM_{num_STP} \times 10^6}{\left([CO_2]_{dil} + \frac{1}{DF_1} ([CO] - [CO_2]_b + [HC]) \right) (M_C + \alpha M_H)} \times k_{thermo}$$

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

Nota 1.— La constante 22,4 empleada anteriormente en las ecuaciones de EI es el volumen de un mol de aire en litros en condiciones STP redondeado hasta el primer decimal.

Nota 2.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves contiene textos de orientación sobre el uso de un procedimiento equivalente.

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

La corrección de las pérdidas por termoforesis de nvPM en la parte de recolección se determinará utilizando:

$$k_{\text{thermo}} = \left(\frac{T_1 + 273,15}{T_{\text{EGT}} + 273,15} \right)^{-0,38}$$

Si $T_{\text{EGT}} < T_1$, entonces $k_{\text{thermo}} = 1$

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

6.3 Funciones del parámetro regulador

Se normalizará el EI a la temperatura en la boca de entrada de la cámara de combustión del motor normal de referencia en condiciones ISA al nivel del mar.

6.3.1 Definiciones

Motor normal de referencia: aquél configurado fundamentalmente siguiendo la norma de producción aplicable al tipo de motor en cuestión y que posee características de operación y performance perfectamente representativas.

F_{oo} Empuje nominal (véase Parte I, Capítulo 1, Definiciones)

F_n Empuje en la modalidad “n” de utilización para las emisiones de nvPM notificadas (kN)

W_f Gasto del flujo de la masa del combustible del motor normal de referencia en condiciones ISA al nivel del mar (kg/s)

W_{fn} Gasto del flujo de la masa del combustible del motor normal de referencia en condiciones ISA al nivel del mar en la modalidad “n” de utilización LTO.

T_B Temperatura en la boca de entrada de la cámara de combustión

6.3.2 Se obtendrán (EI) de nvPM en masa y número para cada modalidad de utilización LTO a la T_B del motor normal de referencia. Se requerirán tres puntos de prueba, como mínimo, para determinar la modalidad de marcha lenta. Se obtendrá el gasto del flujo de combustible del motor normal de referencia en condiciones ISA al nivel del mar para cada modalidad de utilización LTO. Se determinarán las siguientes relaciones en condiciones de referencia ISA para los IE de nvPM en masa y número:

- a) entre EI y T_B ; y
- b) entre W_f y T_B ; y
- c) entre F_n y T_B ;

Nota 1.— Estas relaciones están ilustradas, por ejemplo, en la Figura A7-2 a), b) y c).

Nota 2.— Las relaciones b) y c) pueden establecerse directamente a partir de datos de prueba de motores o derivarse de un modelo de eficiencia de motores validado.

6.4 Procedimiento de cálculo

El cálculo de EI (con referencia a T_B) para las emisiones en masa y número de nvPM en las modalidades de utilización notificadas cumplirá el siguiente procedimiento general:

- a) determinar la temperatura (T_B), [Figura A7-2 c] en la boca de entrada de la cámara de combustión para los valores de F_n correspondientes a las modalidades de utilización notificadas, n , en condiciones atmosféricas de referencia.
- b) a partir de la curva característica EI/ T_B [Figura A7-2 a)], determinese el valor EI_n correspondiente a T_B .
- c) a partir de la curva característica W_f/T_B [Figura A7-2 b)], determinese el valor W_{fn} correspondiente a T_B .

Nota.— Si bien la metodología descrita es la recomendada, la autoridad encargada de la certificación podrá aceptar procedimientos matemáticos equivalentes que se valgan de expresiones matemáticas para representar las curvas ilustradas, siempre que dichas expresiones se hayan derivado utilizando alguna técnica aceptada de adaptación de las curvas.

6.5 Excepciones en cuanto a los procedimientos propuestos

Nota.— En aquellos casos en que la configuración del motor u otras condiciones atenuantes impidan la aplicación de este procedimiento, la autoridad encargada de la certificación podrá aprobar otro procedimiento, una vez que haya recibido pruebas técnicas convincentes de los resultados equivalentes obtenidos con el mismo.

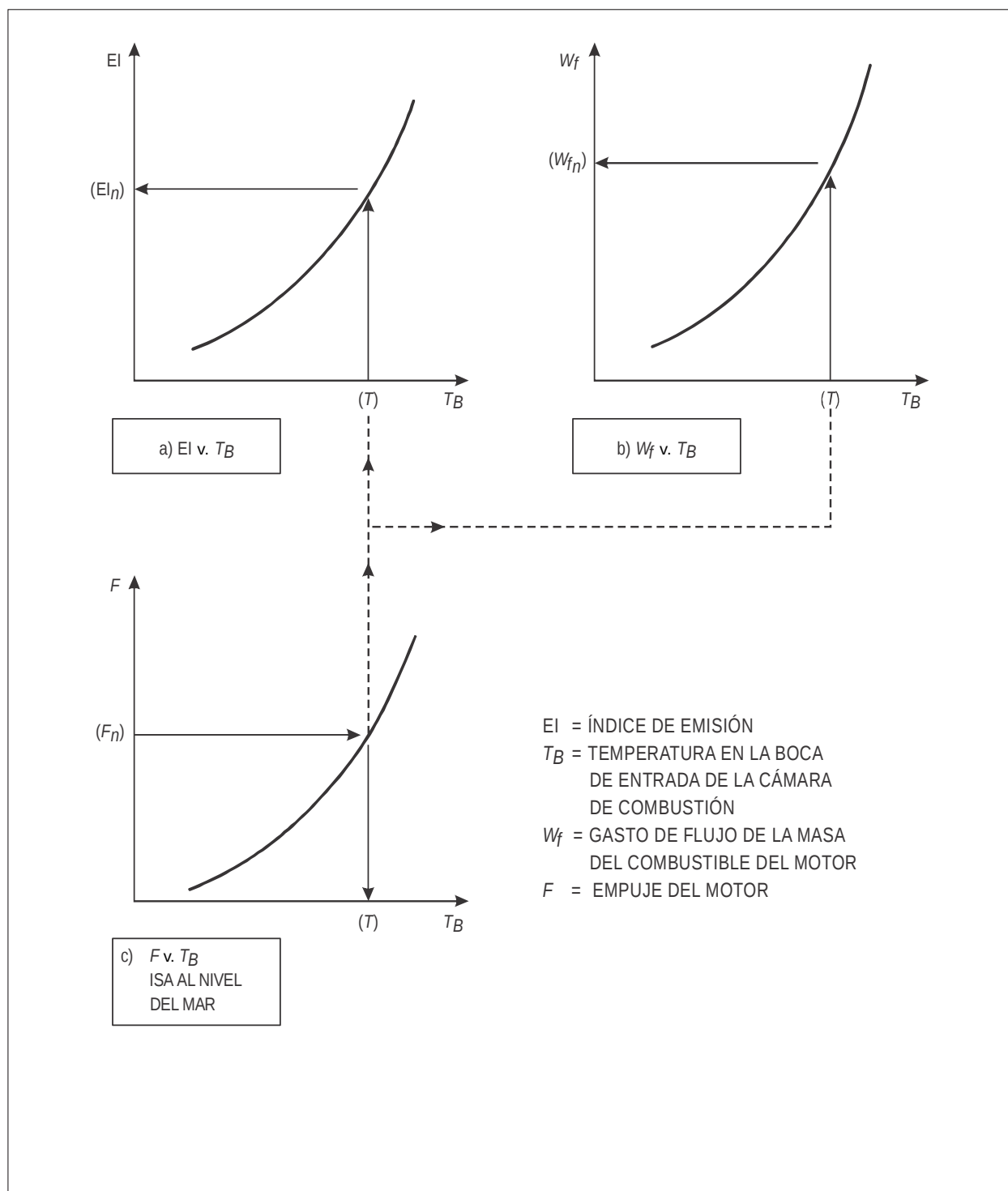


Figura A7-2. EI de nvPM de la turbina de un motor como función de varios parámetros del motor

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

1. SECCIÓN 1: ENTRADA DE LA SONDA – ENTRADA DEL SEPARADOR 1

1.1 La sección 1 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) Se transferirá la muestra de la sonda a la sección 2 a través de un conducto de 4,0 a 8,5 mm de ID a través del camino más corto que sea viable.
- b) Se mantendrá el conducto de muestreo a una temperatura mayor o igual a 145°C.
- c) La longitud desde la entrada de la sonda a la entrada del separador 1 debe ser menor o igual a 8 m.

2. SECCIÓN 2: ENTRADA DEL SEPARADOR 1 – SALIDA DEL EQUIPO DE DILUCIÓN

2.1 La sección 2 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) La sección 2 contendrá el separador 1 y el equipo de dilución 1.
- b) El material del conducto de muestreo será tal que permita reducir al mínimo la acumulación de materia particulada o electricidad estática.

Nota.— El acero inoxidable o el politetrafluoroetileno (PTFE) con partículas de carbono y conexión a tierra satisfacen estos requisitos.

- c) La longitud de la sección 2 de la entrada del separador 1 a la salida del equipo de dilución 1 no superará 1 m.
- d) La sección 2 contendrá la válvula de aislamiento 1 para efectuar la verificación de fugas en el GL.

2.2 El separador 1 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) El separador 1 será de acero inoxidable.
- b) Se mantendrá el cuerpo del separador 1 a una temperatura mayor o igual a 145°C.
- c) El separador 1 dividirá la muestra del escape del motor en tres conductos.
- d) Los ángulos de división respecto del flujo entrante serán lo más agudos que resulte viable, pero no deberán exceder los 35°.
- e) La trayectoria de la muestra de nvPM será lo más directa y corta posible.
- f) La geometría interna del separador 1 deberá cumplir los siguientes requisitos:
 - 1) No habrá bordes de escalones hacia el frente en la pared interna.
 - 2) No variará el ID de la salida del separador 1 respecto de la entrada del equipo de dilución 1.

3) GL ID = 4 a 8,5 mm.

4) La superficie transversal interna del conducto del excedente de muestra deberá ser mayor o igual a la superficie total de los extremos de la sonda.

2.3 La válvula de aislamiento 1 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) Se colocará la válvula de aislamiento entre la salida del separador 1 y la entrada del equipo de dilución 1.
- b) La válvula de aislamiento 1 será de diámetro completo, sin bordes de escalones hacia el frente de tamaño mayor al 15% del ID.
- c) Los sellos de la válvula de aislamiento 1 serán juntas secas y resistentes al calor hasta 175°C.

2.4 Se mantendrá la temperatura de la pared del conducto de nvPM de la sección 2 (T_1) hasta dentro de los 5 cm del plano de mezcla del equipo de dilución 1 a un valor mayor o igual a 145°C, como se muestra en la Figura A7-3.

2.5 El equipo de dilución 1 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) El equipo de dilución 1 será de tipo eyector.
- b) El ID de la entrada del equipo de dilución 1 será mayor o igual a 7,59 mm.
- c) Se controlará el flujo del diluyente de conformidad con las especificaciones del fabricante.
- d) Se controlará el DF del equipo de dilución 1 en tiempo real para que se mantenga en el rango de 8 a 14.

Nota 1.— Se requiere un DF mínimo para reducir la coagulación de nvPM al mínimo, mientras que el máximo es necesario para mantener la muestra diluida dentro del rango de medición de los instrumentos.

Nota 2.— Se puede ajustar el DF_1 controlando la P_1 con la válvula de control de presión en el paso del flujo del excedente de muestra o ajustando el flujo del gas diluyente.

- e) El respiradero del equipo de dilución 1 estará abierto a la presión ambiente (igual a la presión en la entrada del motor).
- f) Se calentará el cuerpo del equipo de dilución 1 a 60°C ±15°C como se muestra en la Figura A7-3.
- g) El diluyente será nitrógeno o aire, estará filtrado mediante HEPA y contendrá menos de 10 ppm de CO₂.
- h) Se calentará el diluyente para que la muestra de nvPM diluida tenga una temperatura de 60 °C ±15 °C en el respirador del equipo de dilución 1 (T_2).
- i) La penetración de partículas del equipo de dilución 1 cumplirá los requisitos mínimos de la Tabla A7-2.

Tabla A7-2: Requisitos mínimos de los coeficientes de penetración de partículas (rendimientos de transmisión) del equipo de dilución 1

Tamaño de movilidad de partículas (diámetro)	15 nm	30 nm	50 nm	100 nm
Coeficiente mínimo de penetración de partículas	80%	90%	90%	90%

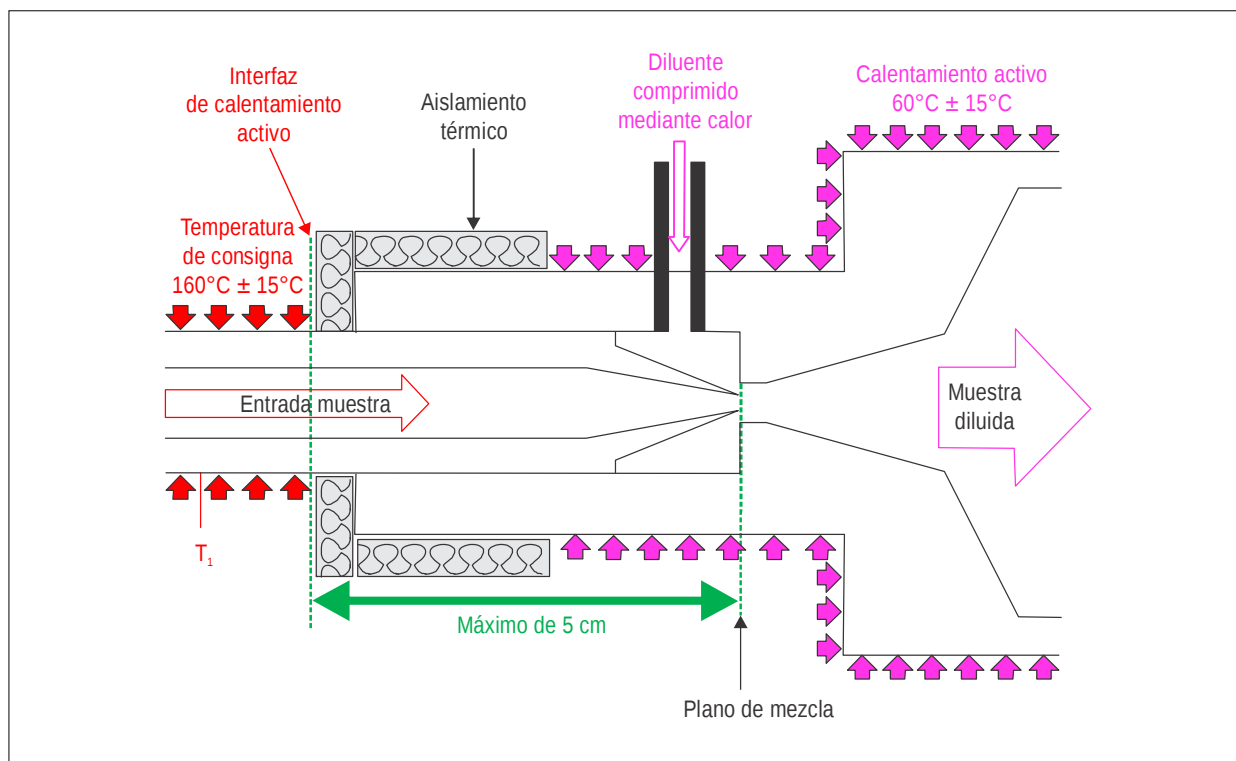


Figura A7-3. Corte transversal de entrada de un ejemplo de equipo de dilución 1 de tipo eyector con interfaz de calentamiento

2.5.1 **Recomendación.**— Para reducir al mínimo el impacto en el rango operable de DF_1 , se debería mantener al mínimo la caída de presión del conducto respirador del equipo de dilución 1, en la medida de lo posible.

2.5.2 **Recomendación.**— Se debería incorporar una medida de seguridad para impedir que se recaliente el calentador del diluyente cuando éste no esté circulando.

2.6 Conducto de gas

2.6.1 El GL y los analizadores de emisiones gaseosas deberán cumplir las especificaciones del Apéndice 3 y los adjuntos del Apéndice 3.

Nota.— La parte de recolección (sección 1) del sistema de muestreo y medición de nvPM cumple las especificaciones del Apéndice 3.

2.6.2 Para determinar el EI de nvPM, se deben efectuar, simultáneamente, las mediciones de las concentraciones gaseosas de CO, HC y NOx en el GL.

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

2.6.3 Para determinar el $DF_{1,S}$, se efectuará la medición de GL de la concentración de CO₂ (seco, semiseco o húmedo) simultáneamente con las mediciones de nvPM.

2.7 Conducto del excedente de muestra

2.7.1 Se mantendrá la presión del conducto de muestreo en la entrada del equipo de dilución 1 (P_1) en valores cercanos a los de la presión del aire ambiente por medio de una válvula de control de presión que tenga una superficie interna suficiente. Cuando esté completamente cerrada, la válvula deberá poder mantener una presión de vacío de -75kPa respecto de la presión ambiente.

2.7.2 **Recomendación.**— *Se debería agregar una válvula de cierre opcional, con superficie interna suficiente para evitar la contrapresión del sistema aguas abajo de la válvula de control de presión para impedir fugas en condiciones subatmosféricas dentro del separador 1.*

3. SECCIÓN 3: SALIDA DEL EQUIPO DE DILUCIÓN 1 – ENTRADA DEL SEPARADOR CICLÓNICO

3.1 El conducto de muestreo deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) El conducto de muestreo será de PTFE con partículas de carbono y conexión a tierra.
- b) **Recomendación.**— *El conducto de muestreo debería cumplir la especificación relativa a la protección antiestática de la norma ISO 8031.*
- c) El conducto de muestreo tendrá un ID de entre 7,59 y 8,15 mm.

Nota.— En lo que respecta a las tolerancias de fabricación, la especificación de ID del conducto de muestreo corresponde a conductos disponibles en el mercado de 3/8 pulgadas y 7/16 pulgadas de diámetro externo, ambos con un grosor de pared de 0,035 pulgadas; y de 10 mm con un grosor de pared de 1 mm.

- d) El conducto deberá tener 24,5 m $\pm$ 0,5 m de longitud, no poseer conexiones innecesarias y constar de tres segmentos, como máximo.
- e) El radio de curva enrollada del conducto de muestreo será mayor a 0,5 m.
- f) Se deberá mantener la temperatura del conducto de muestreo a 60°C $\pm$ 15°C mediante calentamiento activo.
- g) Se deberá mantener el flujo de la muestra a 25 slpm $\pm$ 2 slpm.

4. SECCIÓN 4: SALIDA DEL SEPARADOR CICLÓNICO – ENTRADA DEL INSTRUMENTO

4.1 Separador ciclónico

El separador ciclónico deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) El separador ciclónico será de acero inoxidable.
- b) Se calentará el separador ciclónico a 60°C $\pm$ 15°C.

- c) El ID de la entrada y salida del separador ciclónico tendrá una diferencia de menos de un 15% del ID de la entrada y salida del conducto de muestreo.
- d) La actuación del separador ciclónico a un gasto del flujo de la muestra de 25 slpm deberá cumplir las siguientes especificaciones:
 - 1) punto de corte: $D_{50} = 1,0\mu\text{m} \pm 0,1\mu\text{m}$;
 - 2) eficacia: $(D_{16}/D_{84})^{0,5}$ menor o igual a 1,25; y
 - 3) caída de presión: ΔP menor o igual a 2 kPa.

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° .
- e) Todos los conductos de flujo de nvPM serán lo más directos y cortos posible.
- f) La geometría del separador 2 deberá cumplir los siguientes requisitos:
 - 1) no habrá bordes hacia el frente en la pared interna;
 - 2) no variará el ID de la salida del separador 2 a la entrada del nvPMmi; y
 - 3) no variará el ID de la salida del separador 2 a la entrada del VPR.

4.3 Interfaz del sistema de medición

Los conductos de muestreo hacia el nvPMmi y el VPR deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a) El conducto de muestreo será de acero inoxidable o PTFE con partículas de carbono y conexión a tierra.
- b) **Recomendación.**— *Si es de PTFE con partículas de carbono y conexión a tierra, el conducto de muestreo tendría que cumplir la especificación relativa a la protección antiestática de la norma ISO 8031.*

- c) Deberá calentarse el conducto de muestreo a $60^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$.
- d) No debe variar el ID entre el conducto de muestreo y las entradas de los instrumentos.
- e) Cada longitud total de conducto de la entrada del separador ciclónico a la entrada del nvPMmi y el VPR será lo más corta que sea posible y no deberá exceder los 3 m.

5. SECCIÓN 5: MEDICIÓN DE nvPM

5.1 Flujo de reposición

5.1.1 Los componentes del conducto de flujo de reposición deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a) La bomba primaria y el controlador de flujo deberán mantener un gasto total constante del flujo de la muestra (suma del gasto de flujo del flujo de reposición, nvPMmi y VPR), de 25 slpm $\pm$ 2 slpm hasta 10 kPa por debajo de la presión ambiente, en toda la sección 3.
- b) El analizador de CO_2 deberá analizar continuamente la concentración de CO_2 aguas abajo del equipo de dilución 1, $[\text{CO}_2]_{\text{dil1}}$, durante la medición de nvPM.

Nota 1.— Según la configuración de muestreo, es posible que haya varios controladores de flujo y bombas.

Nota 2.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II – Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves contiene textos de orientación.

5.1.1.1 **Recomendación.**— *Se deberían colocar filtros de partículas aguas arriba de los controladores de flujo para impedir que se dañen los componentes.*

5.1.2 Si el nvPMmi no tiene una medición de presión de la muestra, se deberá medir la presión en la salida del separador 2 hacia el paso del flujo de reposición.

5.1.3 El analizador de CO_2 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) el analizador de CO_2 deberá estar ubicado a continuación de un controlador de flujo.
- b) el analizador de CO_2 deberá cumplir las especificaciones de actuación que figuran en el Adjunto B del Apéndice 3, bajo los títulos “Analizadores de CO y CO_2 ” y “Analizador de CO_2 ”, con la excepción de a).

5.1.3.1 **Recomendación.**— *El rango total del analizador de CO_2 debería ser unas diez veces menor que el analizador de CO_2 utilizado en el GL.*

— — — — —

ADJUNTO B DEL APÉNDICE 7. ESPECIFICACIONES Y CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE MASA DE nvPM

Nota 1.— En el presente adjunto se utiliza la masa del carbono elemental (EC) como sustituto de la masa de nvPM. El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves contiene orientación al respecto.

Nota 2.—La sección 2 de este adjunto contiene un texto descriptivo completo del método de referencia de medición de la transmitancia termoóptica (TOT). Este método se aplica comúnmente en laboratorios de calibración; no se pretende que lo aplique el fabricante del motor de la aeronave.

Nota 3.— En el presente adjunto se utiliza la siguiente referencia ISO: Organización Internacional de Normalización, Calidad del aire — Definición y determinación de las características de funcionamiento de un sistema automático de medida. (ISO 9169: 2006).

1. ESPECIFICACIONES

Cada marca y modelo de nvPMmi recibirá un certificado del fabricante del instrumento o de otro laboratorio de prueba y calibración competente que confirme que:

- a) deberá tener un rango de medición de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o superior;
- b) deberá tener una resolución igual o mayor a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- c) no deberá ser sensible a la materia particulada volátil;

Nota 1.— La materia particulada volátil es el material de combustión del escape que se volatiliza a temperaturas iguales o menores a 350°C .

Nota 2.— Se cumple esta especificación cuando el nvPMmi cumple la especificación de Actuación de aplicabilidad de la Tabla A7-3.

- d) cumple las especificaciones de actuación enumeradas en la Tabla A7-3.

Nota 1.— Las referencias a la norma ISO 9169 en la Tabla A-37 que figuran con un asterisco aluden a secciones para las cuales se aplican modificaciones, como se describe en la sección 4 del presente adjunto.

Nota 2.— Las especificaciones de actuación reflejan los límites de las cantidades que se pueden verificar mediante la transmitancia termoóptica (TOT) como método de referencia de medición. El método TOT se describe en la sección 2.

Nota 3.— Solo se necesita y aplica la especificación de actuación en el procedimiento anual de calibración descrito en la sección 5 del presente adjunto.

Nota 4.— Se determina la aplicabilidad siguiendo el procedimiento que figura en la sección 3 del presente adjunto.

Tabla A7-3 Especificaciones de actuación para instrumentos de medición de masa de (nvPMmi)

<i>Especificación de actuación</i>	<i>Valor (igual a o menor que)</i>	<i>Método de determinación</i>
Repetibilidad	10 µg/m ³	ISO* 6.4.5.3
Desviación cero	10 µg/m ³ /h	ISO 6.6 (solo para CO)
Linealidad	15 µg /m ³	ISO* 6.4.5.4
Límite de detección (LOD)	1 µg/m ³	ISO* 6.4.5.5
Tiempo de subida	2 segundos	ISO 6.3
Intervalo de muestreo	1 segundo	ISO 2.1.7
Precisión (Correspondencia con la concentración de masa de EC determinada mediante el TOT)	± 10%	Pendiente de la regresión lineal entre la concentración en masa del nvPMmi y la concentración de masa de EC determinada a partir del TOT tras la calibración (Tabla A7-5)
Aplicabilidad	±16%	Validación de escapes de turbinas de aeronave

2. MÉTODO DE TRANSMITANCIA TERMOÓPTICA (TOT)

La transmitancia termoóptica (TOT) será el método de referencia de medición para demostrar conformidad con las especificaciones de actuación de cada marca y modelo de nvPMmi y para calibrar el nvPMmi. Este método permite determinar el nivel de EC y OC en las muestras de nvPM.

2.1 Generalidades

2.1.1 El analizador TOT será un instrumento de laboratorio (con un detector de ionización de la llama, FID) o un instrumento semicontinuo (con un sensor de infrarrojo no dispersivo, NDIR).

2.1.2 El método TOT deberá emplear el perfil de temperatura especificado en la Tabla A7-4.

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

2.2 Reactivos y materiales

2.2.1 Se emplearán los siguientes reactivos:

- soluciones acuosas de sacarosa de grado de reactivo (99% o superior), diluida con H₂O ultrapuro de Tipo I, o equivalente, para producir 0,1 a 3 mg de C por mililitro de solución;
- He – 5,0 de pureza (superior al 99,999%);
- H₂ – 4,5 de pureza (superior al 99,995%);
- aire cero (con menos de 0,2 ppm de hidrocarburos);

- e) una mezcla certificada de 10% de O₂ en He; y
- f) una mezcla certificada de 5% de CH₄ en He.

2.2.2 Se empleará el siguiente material:

- a) para el instrumento de laboratorio, una perforadora de metal incorporada en el instrumento para retirar una sección rectangular de 1,0 cm² o 1,5 cm² del filtro;
- b) para el instrumento semicontinuo, una perforadora de metal incorporada en el instrumento para retirar dos filtros circulares de 2,0 cm²;
- c) filtros de fibra de cuarzo Pall Tissuquarz™ o equivalentes; y
- d) jeringa de 10 microlitros.

2.2.3 Preparación de los filtros

Según el instrumento que se utilice, los filtros se prepararán como se indica a continuación:

- a) para muestreo y análisis manual, todos los filtros de fibra de cuarzo estarán precalentados en un horno de mufla a una temperatura mayor o igual a 550°C durante 12 horas, o mayor o igual a 800°C durante 1 a 2 horas antes del muestreo, y se guardarán en un recipiente sellado; o
- b) para el analizador semicontinuo, se acondicionarán los filtros de medición efectuando al menos un ciclo completo de medición, como se describe en la Tabla A7-4.

Tabla A7-4 Perfil de temperatura requerida para el ciclo de análisis con el método TOT.

<i>Gas portador</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo a la temperatura (segundos)</i>
100% He	310	80
	475	80
	615	80
	870	110
	550	45
10% O ₂ en He	550	45
	625	45
	700	45
	775	45
	850	45
	870	60
	930	120
5% CH ₄ en He	0	120

2.3 Preparación de la muestra

2.3.1 Se colocará el filtro de muestreo sobre una superficie limpia de papel de aluminio.

Nota.— Se puede usar alcohol isopropílico o acetona para limpiar la superficie del papel. En este caso, dejar que se evapore el solvente residual antes del uso. Como alternativa, se puede limpiar el papel cociéndolo en un horno de mufla antes del uso.

2.3.2 Se debe perforar y retirar una parte representativa del filtro. Se deben emplear las buenas prácticas de laboratorio para manipular los filtros.

2.4 Calibración y control de calidad

2.4.1 Se debe calibrar el sensor de temperatura que controla la temperatura del horno mediante una norma de transferencia trazable dentro del período de un año antes de la realización de cualquier análisis TOT.

2.4.2 Si se emplea el instrumento de laboratorio, se debe calibrar la respuesta del FID. La calibración deberá seguir el procedimiento que se indica a continuación:

- a) Preparar la norma de calibración externa, que consiste en una solución de sacarosa en agua sin materia orgánica.
- b) Esparcir 10 microlitros de la solución sobre muestras perforadas de un filtro de cuarzo nuevo, limpio y precocido.
- c) Analizar un mínimo de tres muestras en blanco del método y tres muestras de solución de sacarosa para asegurarse de que la calibración del instrumento muestre una recuperación porcentual de la masa teórica de C de 95 a 105% (μgC medidos/ μgC esparcidos).

2.4.3 Si se emplea el instrumento semicontinuo, se debe calibrar la respuesta del NDIR. La calibración deberá seguir el procedimiento que se indica a continuación:

- a) Preparar la norma de calibración externa, que consiste en una solución de sacarosa en agua sin materia orgánica.
- b) Esparcir 10 microlitros de la solución sobre muestras perforadas de un filtro preacondicionado de tipo recipiente insertado en el fondo del semitubo de cuarzo;
- c) Analizar un mínimo de tres muestras en blanco del método y tres muestras de solución de sacarosa para asegurarse de que la calibración del instrumento muestre una recuperación porcentual de la masa teórica de C de 95 a 105% (μgC medidos/ μgC esparcidos).

2.4.4 Si el análisis del filtro requiere más de un día, se deberá esparcir cada día una verificación única de calidad, normalmente de la solución de sacarosa de las existencias, sobre el filtro y analizar según corresponda. Los resultados deberán estar entre 95 y 105% de la masa teórica de C.

Nota.— La muestra en blanco del método es un filtro de cuarzo precalentado sin adición de sacarosa pero que se ha manipulado del mismo modo.

2.5 Medición

Se obtendrá la medición con el siguiente procedimiento:

- a) se debe operar el analizador TOT conforme a las recomendaciones del fabricante;
- b) coloque la porción de la muestra en el horno para muestras;
- c) determine la masa de EC y OC en μg ;

Nota.— Los resultados del analizador TOT se informan en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ de C.

- d) se deben corregir siempre los resultados finales de la muestra con muestras en blanco:
 - 1) para el instrumento de laboratorio, el blanco del campo consiste en filtros de fibra de cuarzo precalentados que reciben el mismo tratamiento que las muestras, salvo que no se hace pasar aire por el filtro. Una carga de masa de EC por unidad de área mayor o igual a $0,3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ en las muestras en blanco indica contaminación;
 - 2) para el analizador semicontinuo, se debe efectuar una medición del conjunto de filtros internos sin hacer pasar ningún gas de muestra a través de los filtros;
- e) se deben corregir siempre los resultados finales de la muestra con respecto a los artefactos de OC en fase gaseosa. Para esa corrección, las condiciones de utilización (duración y gasto del flujo) deben ser idénticas a las de la recolección de la muestra. Según el instrumento que se utilice, el procedimiento deberá ser como se indica a continuación:
 - 1) para los análisis de laboratorio, se debe utilizar una configuración de muestreo que consiste bien en un filtro de teflón y luego un filtro de cuarzo precalentado de respaldo o bien en un filtro de cuarzo precalentado y luego un filtro de cuarzo precalentado de respaldo y el filtro de respaldo debe ser analizado como se establece en la Tabla A7-4. Todo OC que se halle en los filtros de respaldo se restará del OC de los filtros de muestreo.
 - 2) para los análisis semicontinuos, se insertará en la configuración de muestreo un filtro de teflón antes del analizador. Todo OC que se halle durante esta medición se restará del OC detectado en los filtros de muestreo durante la medición de las muestras.

2.6 Cálculos

Para el instrumento de laboratorio:

- a) multiplicar el resultado de la carga de masa de EC ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) por el área de depósito del filtro (cm^2) para calcular la masa total de EC (μg) de cada muestra de filtro (W_{EC});
- b) realizar el mismo cálculo que en a) para las muestras en blanco y calcular la masa hallada en la muestra en blanco promedio (W_{b}); y
- c) calcular la concentración de masa de EC (C_{EC}) en el volumen de aire tomado como muestra en condiciones STP, V (en m^3):

$$C_{\text{EC}} = \frac{W_{\text{EC}} - W_{\text{b}}}{V} \quad (\mu\text{g}/\text{m}^3)$$

Nota 1.— El instrumento semicontinuo indica la concentración de masa de EC como resultado notificado.

Nota 2.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves contiene textos de orientación sobre el principio del método TOT.

3. PROCEDIMIENTO PARA DEMOSTRAR CONFORMIDAD CON LAS ESPECIFICACIONES DE ACTUACIÓN

Nota.— El procedimiento descrito en esta sección se utiliza para demostrar conformidad con las especificaciones de actuación de cada marca y modelo de nvPMmi.

Se deberán demostrar las especificaciones de actuación enumeradas en la Tabla A7-3 mediante el método TOT descrito en la sección 2 de este adjunto. Se llevarán a cabo las mediciones utilizando las dos fuentes siguientes: una fuente de aerosol de la combustión de la llama de difusión y una fuente de nvPM del escape del motor de una turbina de gas.

3.1 Medición mediante una fuente de aerosol de la combustión de la llama de difusión

3.1.1 El sistema de medición debe contener:

- a) una fuente de aerosol de la combustión de la llama de difusión;
- b) un sistema de dilución que utilice diluyente filtrado con HEPA para controlar las concentraciones objetivo en masa EC;
- c) un separador ciclónico con un punto de corte de 1 μm aguas arriba de los instrumentos TOT y nvPMmi;
- d) un conjunto separador que cumpla los requisitos del párrafo 4.2 d) y f) del Adjunto A del presente apéndice;

Nota.— En el Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves se indica un procedimiento equivalente.

- e) tubería de acero inoxidable o antiestática para conectar el muestreador manual de filtros de cuarzo, o un analizador EC/OC semicontinuo, y el nvPMmi. Toda la tubería será del mismo material, longitud y temperatura desde el punto de separación hasta la entrada de los instrumentos; y
- f) **Recomendación.**— *Si se emplean tuberías antiestáticas, estas deberían cumplir la especificación relativa a la protección antiestática de la norma ISO 8031.*

3.1.2 Según el instrumento que se emplee para la medición TOT, se debe cumplir el siguiente requisito:

- a) si se utilizan muestreo manual y analizador de laboratorio, se empleará un filtro de cuarzo precalentado dentro de un portafiltro de acero inoxidable con una sección de entrada cónica de un semiángulo $\leq 12,5^\circ$ a una velocidad de filtración menor o igual a 0,5 m/s en condiciones de utilización reales. El diámetro del depósito del filtro será lo suficientemente grande para permitir la recolección de al menos una perforación por cada filtro. Se analizará al menos una perforación de cada muestra de filtro de cuarzo recolectada; o
- b) si se emplea un analizador TOT semicontinuo, este deberá funcionar a una velocidad de filtración menor o igual a 0,5 m/s.

3.1.3 Se deben realizar las mediciones en los niveles de concentración objetivo de masa de EC especificados en la Tabla A7-5. Las concentraciones en masa de EC logradas estarán dentro del 20% de las concentraciones en masa objetivo especificadas.

3.1.4 A cada nivel de concentración se tomarán muestras durante un tiempo similar para establecer una carga de filtro de EC que pueda repetirse. La carga del filtro de EC será de $12 \pm 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

3.1.5 El tiempo promedio definido en la norma ISO 9169 será el mismo que el tiempo de recolección de la muestra.

3.1.6 El contenido promedio de EC determinado por el método TOT será mayor o igual al 80% del C total.

3.1.7 Se usarán las concentraciones en masa de EC obtenidas mediante el método TOT y las concentraciones en masa de nvPMmi para medir los parámetros especificados en la sección 4 de este adjunto que demuestran conformidad con las especificaciones de actuación de la Tabla A7-3.

3.1.8 **Recomendación.**— *Se deberían probar tres puntos a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la calibración anual.*

Tabla A7-5. Parámetros de carga de masa de EC para las muestras de calibración

<i>Concentración objetivo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Certificado de aprobación Núm. de pruebas</i>	<i>Calibración anual Núm. de pruebas</i>
0 (prueba con muestras en blanco)	6	3
50	6	0
100	6	3
250	0	3
500	6	3

3.2 Medición mediante una fuente de nvPM del escape del motor de una turbina de gas

3.2.1 Se repetirán los pasos de los párrafos 3.1.4 a 3.1.5 de este adjunto para una fuente de nvPM del escape del motor de una turbina de gas mediante el sistema de medición especificado en los párrafos 3.1.1 c), d), e) y 3.1.2 con un sistema de dilución que utilice diluyente filtrado con HEPA.

Nota.— *La dilución debería ser suficiente para prevenir la condensación de agua en el conducto de muestreo.*

3.2.2 Se obtendrán como mínimo cuatro puntos de datos para un mínimo de tres reglajes de empuje y se duplicará la medición en uno de los reglajes mediante el sistema de muestreo de nvPM ya especificado. Se realizarán las mediciones como mínimo a tres concentraciones objetivo, cada una con una variación de un factor de 1,5, como mínimo, respecto de la siguiente; al menos una concentración deberá ser superior a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y al menos una, inferior a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La carga del filtro de EC para estos cuatro puntos de datos será de entre $2,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ y $17 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

3.2.3 Se emplearán las concentraciones en masa de EC obtenidas mediante el método TOT y las concentraciones en masa de nvPMmi para determinar la aplicabilidad especificada en la Tabla A7-3 para demostrar conformidad con las especificaciones de actuación.

3.2.4 El combustible de la prueba de motores será uno de los combustibles para motores de turbina de aviación enumerados en el *Manual sobre suministro de combustible para reactores de la aviación civil* (Doc 9977), Capítulo 3, 3.2. Se debe emplear el mismo combustible para los cuatro puntos mínimos de datos.

4.1 CÁLCULO DE ACTUACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

4.1 Se determinarán la desviación cero, el tiempo de subida y la frecuencia de muestreo de los parámetros de actuación del nvPMmi conforme a las especificaciones de la norma ISO 9169, párrafos 6.6, 6.3 y 2.1.7, respectivamente.

4.2 Se determinará el parámetro de repetibilidad del nvPMmi a un intervalo de confianza del 95% mediante seis mediciones consecutivas a cada nivel de concentración según:

$$s_{r_i}^2 = s_{Y_i}^2 - \Delta^2 \cdot s_{C_i}^2$$

donde

$$s_{Y_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{i,j} - \bar{Y}_i)^2}{(n - 1)}$$

s_{C_i} la desviación estándar respecto de j de $C_{i,j}$ para el nivel i

$Y_{i,j}$ el resultado de la medición por el instrumento del material de referencia $C_{i,j}$

$C_{i,j}$ la j^a instancia de concentración de material de referencia en el nivel i

$\bar{Y}_i$ el promedio sobre j de $Y_{i,j}$

n la cantidad de mediciones consecutivas a cada nivel de concentración (seis como mínimo)

Δ la pendiente de la función de regresión aplicada en la prueba de falta de ajuste determinada a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,j} = Y_{i,j} - (\Gamma + \Delta \times C_{i,j})$$

$$\bar{E}_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{i,j}}{n}$$

donde

$E_{i,j}$ es la diferencia entre $C_{i,j}$, y $Y_{i,j}$;

$\bar{E}_i$ es el promedio sobre j de $E_{i,j}$; y

Γ es la intersección de la función de regresión aplicada en la prueba de falta de ajuste.

Nota.— Si la repetibilidad así determinada resulta negativa, lo que indica que no se pudo discriminar la variancia de la medición de la variabilidad del material de referencia, se deben repetir las pruebas centrando más la atención en la estabilidad de la fuente de material de referencia (flujo de la fuente de nvPM de la llama de difusión y configuración de presión) y la precisión de la determinación del nivel de material de referencia (cargas y procedimientos del método TOT). En caso contrario, la reproducibilidad puede ser notificada como “considerablemente mejor que $\Delta \cdot s_{C_i}^2$ ”.

4.3 Se determinará la linealidad del nvPMmi conforme a las especificaciones de la norma ISO 9169, párrafo 6.4.5.4, si bien el residuo deberá determinarse del siguiente modo:

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{ij}}{n}$$

4.4 Se determinará el LOD del nvPMmi conforme a las especificaciones de la norma ISO 9169, párrafos 6.4.5.5. Si el instrumento no hace mediciones cuando no hay partículas en la muestra, entonces se deberá usar una concentración en masa de nvPM más elevada, C_{LOD} , que se encuentre apenas por encima de cero de modo que el instrumento haga mediciones regulares. En este caso el LOD se determinará como:

$$Y_{LOD,0.95} = \bar{Y}_{LOD} - C_{LOD} + 2 \times t_{v,0.95} \times s_{LOD}$$

donde

$Y_{LOD,0.95}$ es el límite de detección a un intervalo de confianza del 95%;

$\bar{Y}_{LOD}$ es el promedio de los valores $Y_{LOD,j}$;

C_{LOD} es el promedio de los valores $C_{LOD,j}$;

$t_{v,0.95}$ es el factor de Student, para ambos lados, a un intervalo de confianza de 95%, grado $v = n-1$;

s_{LOD} es la desviación estándar asociada con Y_{LOD} promedio.

Nota.— Es posible que el material de referencia no sea el mismo en mediciones consecutivas tomadas a lo largo del tiempo promedio. Así, cada determinación del valor del material de referencia puede ser diferente, aunque bien conocida por la determinación mediante el método TOT. Las definiciones de la norma ISO 9169 están ajustadas para contemplar esa variabilidad.

5. CALIBRACIÓN

5.1 Se calibrará anualmente el nvPMmi mediante el método TOT y una configuración del sistema que se especifica en 3.1.1 y 3.1.2 de este adjunto.

5.2 Se realizarán las mediciones en los niveles objetivo de concentración en masa de EC especificados en la Tabla A7-5. Las concentraciones en masa de EC logradas estarán dentro del $\pm 20\%$ de las concentraciones objetivo en masa especificadas.

5.3 A cada nivel de concentración se tomarán muestras durante un tiempo similar para establecer una carga de filtro de EC que pueda repetirse. La carga del filtro de EC será de $12 \pm 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

5.4 El tiempo promedio definido en la norma ISO 9169 será el mismo que el tiempo de recolección del filtro.

5.5 Se usarán las concentraciones en masa de EC obtenidas mediante el método TOT y las concentraciones en masa de nvPMmi para determinar el mejor ajuste con los puntos de datos recolectados en la calibración de los instrumentos. Se empleará un método de cuadrados mínimos lineales para determinar el factor de extrapolación b para ajustar las concentraciones en masa de nvPM informadas por el nvPMmi según:

$$b = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2}$$

donde

x_i es la i° medición del nvPMmi;

y_i es la i^a concentración en masa de EC obtenida mediante el método TOT y

b es la pendiente de la recta del mejor ajuste.

Nota 1.— Una vez aplicado el factor de extrapolación b , la pendiente de una regresión lineal de los ensayos de EC respecto de las mediciones del instrumento ajustadas según b será matemáticamente igual a 1,0 y se cumplirá, por definición, el requisito de pendiente de la Tabla A7-3.

Nota 2.— Debido a las incertidumbres previstas respecto de la repetibilidad de los ensayos EC con el método TOT, es posible que una repetición del proceso en el mismo o en otro laboratorio arroje una pendiente distinta sin que varíe la respuesta del instrumento. Las especificaciones de precisión de la Tabla A7-3 pretenden explicar esa variabilidad.

5.6 Recomendación.— *Antes de cada calibración anual, se debería evaluar la actuación de cada instrumento de medición de masa en el estado comprobado al principio a una concentración en masa de EC de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indicada en la Tabla A7-5. Esta evaluación permitirá la trazabilidad a calibraciones anteriores del instrumento y comparar constantes de calibraciones nuevas y existentes.*

— — — — —

ADJUNTO C DEL APÉNDICE 7. ESPECIFICACIONES Y CALIBRACIÓN DEL ELIMINADOR DE PARTÍCULAS VOLÁTILES Y EL INSTRUMENTO DE ÍNDICE DE η_{VPM}

1. ESPECIFICACIONES

1.1 Especificaciones del VPR

1.1.1. Cada marca y modelo del eliminador de partículas volátiles (VPR) recibirá un certificado del fabricante del instrumento o de otro laboratorio de prueba y calibración competente que confirme que cumple las especificaciones de actuación enumeradas en este adjunto.

1.1.2 El factor de dilución (DF_2) del VPR deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) Se ajustará el DF_2 para mantener la concentración en número de partículas dentro del modo de conteo único del CPC y reducir la temperatura de la muestra a entre 10°C y 35°C en la entrada del CPC.
- b) La variabilidad del DF_2 debe ser inferior al 10%.

1.1.3 La sección calentada que evapora los elementos volátiles se mantendrá a una temperatura de 350°C $\pm$ 15°C.

1.1.4 Si el VPR contiene múltiples secciones calentadas, los controles adicionales de temperatura serán $\pm$ 15°C de las temperaturas de utilización especificadas por el fabricante del VPR.

1.1.5 El control de presión de la muestra deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) un dispositivo de control de presión deberá permitir el envío de una muestra diluida al CPC a una presión de $\pm$ 15 kPa de la presión ambiente (escape del CPC);
- b) la presión no deberá exceder 105 kPa.

1.1.6 Los coeficientes mínimos de penetración de partículas permitidos para el VPR para cada ajuste de dilución cumplirán las especificaciones de la Tabla A7-6.

**Tabla A7-6. Coeficientes mínimos permitidos de penetración del VPR
a cuatro diámetros de partículas**

Diámetro de movilidad eléctrica de una partícula, D_m	15 nm	30 nm	50 nm	100 nm
Coeficiente mínimo de penetración, $\eta_{\text{VPR}}(D_m)$	0,30	0,55	0,65	0,70

1.1.7 El rendimiento de depuración de materia volátil (VRE) del VPR eliminará más del 99,5% de las partículas de tetracontano ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{38}\text{CH}_3$, de pureza superior al 95%) con una concentración en la entrada de 10.000 partículas/cm³, como mínimo, a un diámetro de movilidad eléctrica de 30 nm. Este VRE se deberá demostrar cuando se utilice el VPR en el ajuste mínimo de dilución y a la temperatura de funcionamiento recomendada por el fabricante.

1.1.8 Si se usa un convertidor catalítico en el VPR, el diluyente deberá contener al menos 10% de O₂.

1.2 Interfaz del VPR al CPC

El tubo que conecta la salida del VPR con la entrada del CPC deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) el material será conductor de electricidad;
- b) el tubo deberá tener un diámetro interno igual o mayor a 4 mm;
- c) la muestra deberá tener un tiempo de permanencia dentro del tubo igual o menor a 0,8 segundos.

1.3 Especificaciones del CPC

1.3.1 Cada marca y modelo de CPC recibirá un certificado del fabricante del instrumento o de otro laboratorio de prueba y calibración competente que confirme que cumple las especificaciones de actuación enumeradas a continuación.

1.3.2 Se permitirá una función de corrección de coincidencias de hasta un 10% de corrección, como máximo. La función de corrección de coincidencias no empleará ningún algoritmo para corregir o definir el rendimiento de conteo.

1.3.3 El conteo de partículas deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) la modalidad de conteo será de conteo único. No se permite el uso del CPC en la modalidad fotométrica. Así, para garantizar que se use la modalidad de conteo único, se incrementará DF₂ en la medida en que sea necesario;
- b) la precisión de conteo deberá ser de $\pm 10\%$ a partir del umbral de 2 000 partículas/cm³ hasta el umbral superior de la modalidad de conteo único de partículas con respecto a una norma trazable (ISO 27891);
- c) el rendimiento de conteo será mayor o igual a 50% a 10 nm de diámetro de movilidad eléctrica y mayor o igual a 90% a 15 nm de diámetro de movilidad eléctrica;
- d) se establecerá el rendimiento de conteo mediante un aerosol de aceite de esmeril.

1.3.4 La frecuencia de adquisición de datos será mayor o igual a 1,0 Hz en un intervalo mínimo de 30 segundos una vez estabilizado el motor.

1.3.5 Se informará la concentración en número de partículas en partículas/cm³ en condiciones STP. Si el valor informado no corresponde a condiciones STP, se medirá la presión absoluta de la entrada del CPC con una precisión superior al 2% de modo que se pueda corregir la concentración en número a condiciones STP, conforme a las indicaciones del fabricante.

1.3.6 La resolución será superior a 0,1 partículas/cm³ a concentraciones menores a 100 partículas/cm³.

1.3.7 El tiempo de subida será menor a 4 segundos.

1.3.8 Se deberá mantener el flujo de la muestra al máximo. No se permite la división interna del flujo.

1.3.9 El fluido de trabajo será el n-butanol.

1.3.10 La respuesta será lineal.

1.4 Requisito del sistema

El t_{90} de recorrido desde la entrada del VPR hasta el CPC será menor o igual a 10 segundos.

2. CALIBRACIÓN

2.1 VPR

Recomendación.— *Antes de cada calibración del VPR, se debería validar el instrumento en el estado en que se lo encontró a una sola configuración de DF_2 que sea característica de las mediciones que se realizan en motores de turbinas de aeronaves. Esa validación debería incluir el factor de dilución del VPR en la configuración de DF_2 seleccionada, la determinación de los coeficientes de penetración y la VRE.*

2.1.1 La calibración del DF_2 deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) Se calibrará el DF_2 a cada configuración de calibración del VPR, según lo establezca el fabricante del VPR.
- b) **Recomendación.**— *Debería efectuar la calibración del DF_2 un laboratorio competente, bien mediante trazas de gases como el CO_2 o bien con mediciones de flujo.*

2.1.2 Los coeficientes de penetración de partículas del VPR deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a) Se medirán los coeficientes de penetración de partículas del VPR a 350°C con partículas sólidas de diámetros de movilidad eléctrica de 15 nm, 30 nm, 50 nm y 100 nm para cada configuración de dilución del VPR. Se deberá enviar al VPR al menos 5000 partículas/cm³ entre los cuatro tamaños de partículas. Si se usa hollín para la generación de partículas, es posible que se necesite un dispositivo de pretratamiento técnico calentado a 350°C para enviar solo nvPM al VPR.
- b) Las concentraciones de partículas se deben medir aguas arriba y abajo del VPR con un CPC que tenga, como mínimo, un rendimiento de conteo de 90% para partículas de un diámetro de movilidad eléctrica mayor o igual a 15 nm.
- c) Los coeficientes de penetración del VPR se determinarán del siguiente modo:

$$\eta_{VPR}(D_m) = \frac{DF_2 \times N_{out}(D_m)}{N_{in}(D_m)}$$

donde

$N_{in}(D_m)$ es la concentración en número de partículas aguas arriba para partículas de D_m ; y

$N_{out}(D_m)$ es la concentración en número de partículas aguas abajo para partículas de D_m .

- d) $N_{in}(D_m)$ y $N_{out}(D_m)$ deberán estar referenciadas a las mismas condiciones de T y P.
- e) **Recomendación.**— *Se debería calibrar el VPR como una unidad completa.*

2.1.3 VRE del VPR

- a) Se determinará el VRE con un CPC que tenga, como mínimo, un rendimiento de conteo de 90% para partículas de un diámetro de movilidad eléctrica mayor o igual a 15 nm, según se indica:

$$\text{VRE}(D_{30}) = 100 \times \left[1 - \frac{DF_2 \times N_{\text{out}}(D_{30})}{N_{\text{in}}(D_{30})} \right]$$

donde

VRE(D_{30}) es el VRE para partículas de D_{30} ;

$N_{\text{in}}(D_{30})$ es la concentración en número de partículas aguas arriba para partículas de D_{30} ;

$N_{\text{out}}(D_{30})$ es la concentración en número de partículas aguas abajo para partículas de D_{30} ; y

D_{30} es el diámetro de movilidad eléctrica de las partículas.

- b) $N_{\text{in}}(D_{30})$ and $N_{\text{out}}(D_{30})$ estarán referenciadas a las mismas condiciones de T y P.

2.2 Calibración del CPC

2.2.1 La calibración del CPC deberá ser trazable a un método normalizado de calibración (ISO 27891): comparación de la respuesta del CPC al que se efectúa la calibración con la de un electrómetro de aerosol calibrado en el muestreo simultáneo de partículas de calibración clasificadas electrostáticamente.

2.2.2 **Recomendación.**— *Antes de cada calibración, se debería validar el CPC (“en el estado en que se lo encontró”).*

2.2.3 Se llevarán a cabo la calibración y validación mediante los siguientes procedimientos:

- a) Se calibrará la eficiencia de detección del CPC con partículas de 10 a 15 nm de diámetro de movilidad eléctrica. El rendimiento de conteo del CPC será mayor o igual a 50% a 10 nm y mayor o igual a 90% a 15 nm.
- b) El aerosol de calibración deberá ser aceite de esmeril.

— — — — —

ADJUNTO D DEL APÉNDICE 7. ESPECIFICACIONES RELATIVAS A DATOS ADICIONALES

Según se exige en el párrafo 3.2 del Apéndice 7, se deben suministrar los datos de las Tablas A7-7 y A7-8.

Tabla A7-7. Requisitos de nvPM ambiente

<i>Datos necesarios</i>	<i>Unidad</i>
Concentración ambiente en masa de nvPM ($\text{nvPM}_{\text{mass_STP}}$)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Concentración ambiente en número de nvPM ($\text{DF}_2 \times \text{nvPM}_{\text{num_STP}}$)	partículas/ cm^3

Tabla A7-8. Sistema de muestreo de nvPM y requisitos de parámetros de medición

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>
Temperatura en la entrada de la sonda ($T_{\text{engine_exit}}$) (Equivalente a la temperatura T_{EGT} del gas del escape a la salida del motor pronosticada a partir de la actuación)	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura en la entrada del equipo de dilución 1 (T_1)	$^{\circ}\text{C}$
Gastos de flujo individuales (Medición en sección 3 y sección 4; estimación práctica en sección 1, sección 2)	slpm
Diámetro interno de cada conducto en las secciones 1 a 4	mm
Longitud interna de cada conducto en las secciones 1 a 4	m
Temperatura de la pared de cada conducto en las secciones 1 a 4	$^{\circ}\text{C}$
Ángulo total de la(s) curva(s) de la tubería de muestreo de la sección 1	grados
Punto de corte D_{50} del separador ciclónico (especificación del fabricante)	nm
Eficacia del separador ciclónico (especificación del fabricante)	fracción decimal
Cuatro valores de penetración del equipo de dilución 1 (Adjunto A Tabla A7-2)	fracción decimal
Cuatro valores de penetración de la calibración del VPR (Adjunto C Tabla A7-6)	fracción decimal
Dos rendimientos de conteo de la calibración del CPC	fracción decimal
Factor de dilución de la primera etapa DF_1	
Factor de dilución de la segunda etapa (VPR) DF_2	
Concentración en masa de partículas corregida para DF_1 : $\text{DF}_1 \times \text{nvPM}_{\text{mass_STP}}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Concentración en número de partículas corregida para DF_1 y DF_2 : $\text{DF}_1 \times \text{DF}_2 \times \text{nvPM}_{\text{num_STP}}$	partículas/ cm^3

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 parte de recolección y el GL para detectar pérdidas mediante el procedimiento siguiente:

- a) Aislar el GL de la parte de medición de nvPM mediante la válvula de aislamiento 1, la válvula de control de presión P_1 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 las pérdidas del gasto.
- d) La bomba de vacío, a gasto nulo, deberá poder producir un vacío de -75 kPa respecto de la presión atmosférica; el gasto máximo no deberá ser inferior a 28 L/min a la temperatura y presión normales.

1.2 Requisito de verificación de pérdidas

Las pérdidas del gasto serán inferiores a 0,4 slpm.

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

2.1 Procedimiento de verificación de la limpieza

Se debe verificar la limpieza de la 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.*

3. VERIFICACIÓN DE LIMPIEZA Y PÉRDIDAS DE LA PARTE DE TRANSFERENCIA

Nota 1.— Las verificaciones de limpieza pueden fallar debido a contaminación en componentes de la parte de transferencia o pérdidas en esa parte o en la de medición.

Nota 2.— Si el sistema tiene pérdidas, absorberá partículas del aire ambiente.

3.1 Procedimiento de verificación de limpieza y pérdidas

3.1.1 Antes de realizar una serie de pruebas en un motor, se debe verificar la parte de transferencia para detectar problemas de limpieza y pérdidas mediante el procedimiento siguiente:

- a) Hacer circular diluyente filtrado por el equipo de dilución 1 con la válvula de aislamiento 1 cerrada.
- b) El gasto del flujo en cada conducto del separador 2 será igual a los empleados durante las pruebas del motor.
- c) Ajustar DF_2 en la configuración menor del VPR.

3.1.2 Cuando las concentraciones en masa y número de nvPM medidas sean estables, registrar los datos durante 30 segundos, como mínimo.

Nota.— En la Figura A7-4 se ilustra el esquema de flujo de la verificación de limpieza de la parte de transferencia.

3.2 Requisito de verificación de limpieza/pérdidas

3.2.1 El promedio de 30 segundos de concentración en masa de nvPM ($nvPM_{mass_STP}$) será inferior a $1 \mu g/m^3$.

3.2.2 El promedio de 30 segundos de concentración en número de nvPM ($nvPM_{num_STP}$) será inferior a 2,0 partículas/cm³.

3.2.3 **Recomendación.**— *Si falla la verificación de limpieza, se debería inspeccionar primero el sistema para detectar pérdidas. Si no se observan pérdidas, se debería inspeccionar y limpiar el depósito de recolección del separador ciclónico. Si aun así falla la verificación de limpieza, es posible que sea necesario limpiar o reemplazar segmentos del sistema de muestreo.*

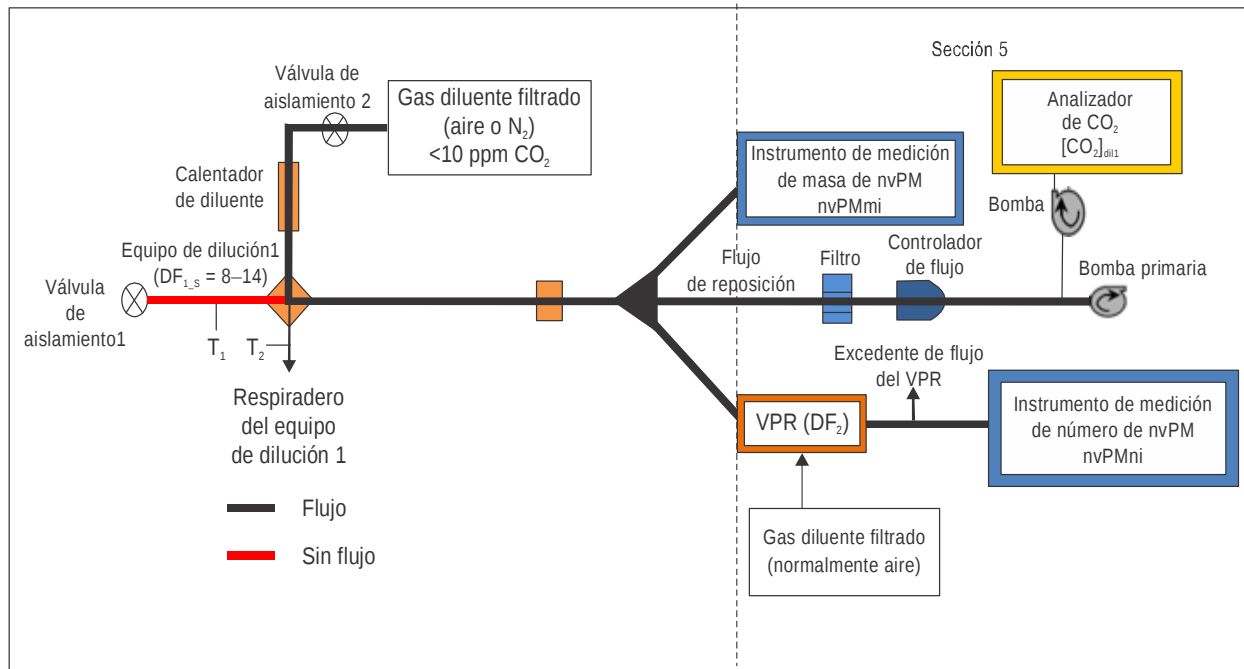


Figura A7-4. Esquema de flujo de la verificación de limpieza de la parte de transferencia

4. PURGADO DE LA PARTE DE RECOLECCIÓN

A fin de mantener los conductos y sondas de muestreo de la sección 1 libres de combustible sin quemar, se purgará esa sección durante el arranque y apagado de los motores, como se ilustra en la Figura A7-5.

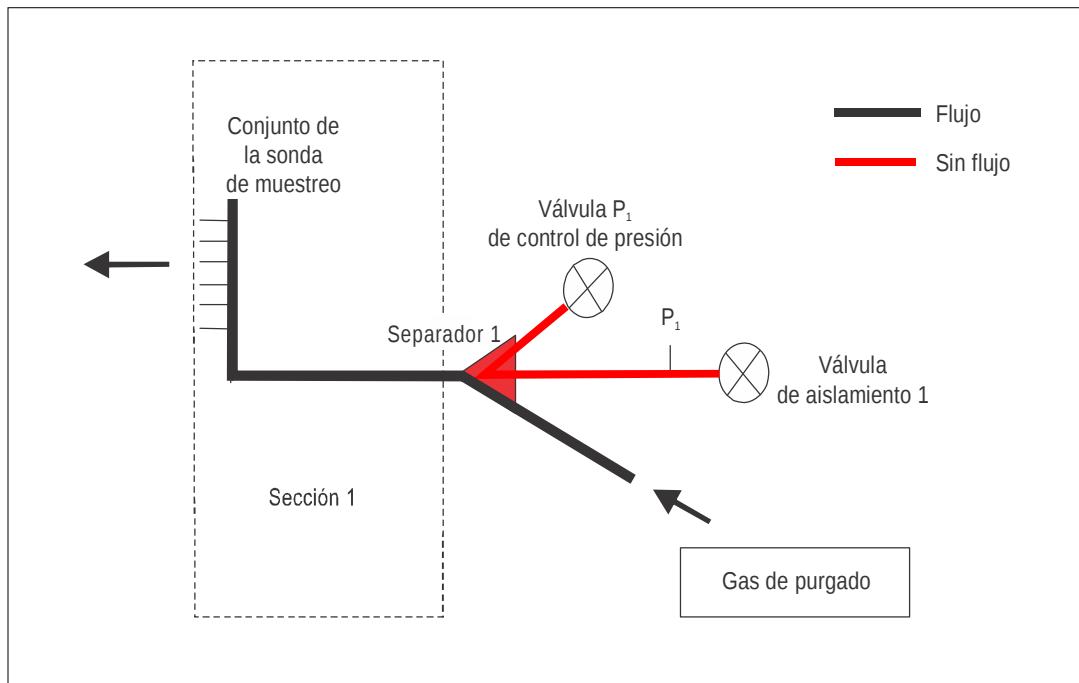


Figura A7-5. Esquema de flujo del purgado de la Sección 1

5. MEDICIÓN DE nvPM AMBIENTE

5.1 Generalidades

5.1.1 Se obtendrán concentraciones ambiente en masa y número de nvPM representativas de la entrada de aire de los motores antes y después de las pruebas de motores y se notificarán como promedio de ambos valores.

5.1.2 **Recomendación.**— *Para una cámara de ensayo cerrada, a fin de lograr representatividad, se recomienda obtener mediciones ambiente de las partículas con el motor en marcha. Se debería obtener la primera medición ambiente al cabo de un mínimo de cinco minutos del arranque del motor.*

5.2 Procedimiento de muestreo ambiente de nvPM

Se obtendrán concentraciones ambiente en masa y número de nvPM representativas de la entrada de aire de los motores mediante:

5.2.1 Método 1: Muestreo a través del respiradero del equipo de dilución 1

Se empleará el sistema de muestreo y medición de nvPM para tomar la muestra del respiradero del equipo de dilución 1.

Al tomar la muestra del respiradero del equipo de dilución 1, se aplicará el siguiente procedimiento:

- a) apagar el suministro de diluyente del equipo de dilución 1 cerrando la válvula de aislamiento 2 y verificando que la válvula de aislamiento 1 esté cerrada;
- b) **Recomendación.**— *Se debería proteger el calentador de diluyente de la exposición a un sobrecalentamiento cuando esté interrumpido el suministro de diluyente.*
- c) verificar que el gasto del flujo en cada conducto del separador 2 sea igual a los que se han de emplear durante las pruebas del motor.
- d) cuando las concentraciones en masa y número de nvPM medidas sean estables, registrar los datos durante tres minutos, como mínimo.

Nota.— *En la Figura A7-6 se ilustra el esquema de flujo de medición de nvPM ambiente con el método 1.*

Solo se empleará esta configuración si la ubicación del escape del respiradero es representativa del aire de la entrada del motor.

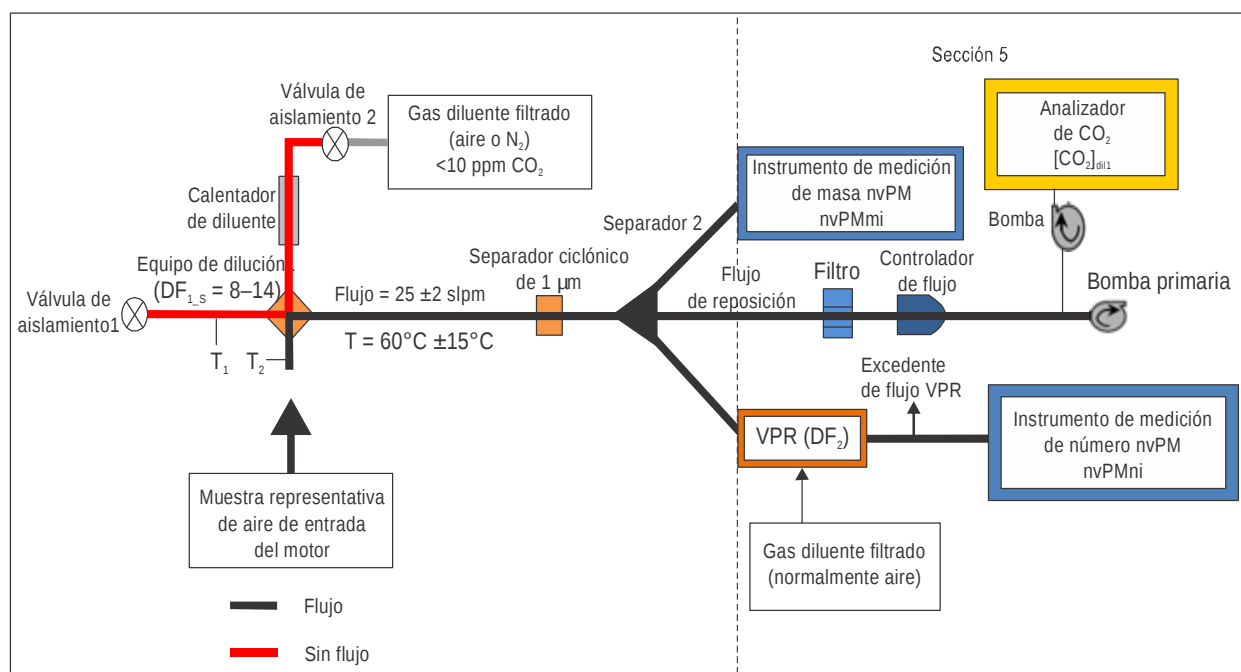


Figura A7-6. Esquema del flujo para la medición ambiente de partículas en el aire

5.2.2 Método 2: Sistema adicional de medición de nvPM

5.2.2.1 Un sistema adicional de muestreo y medición ambiente de nvPM deberá cumplir los siguientes requisitos:

- El sistema de muestreo y medición ambiente de nvPM se ajustará a los requisitos del sistema de muestreo de las secciones 3 y 4 que figuran en el Adjunto A del presente apéndice.
- El nvPMmi, VPR y nvPMni cumplirán lo establecido en los Adjuntos B y C del presente apéndice.
- La entrada del sistema de muestreo de nvPM ambiente estará ubicada a lo sumo a 50 m del plano de entrada del motor.

5.2.2.2 Al tomar la muestra con un sistema de muestreo y medición de nvPM adicional, se aplicará el siguiente procedimiento:

- Verificar que el gasto del flujo en cada conducto del separador 2 sea igual a los que se han de emplear durante las pruebas del motor.
- Cuando las concentraciones en masa y número de nvPM medidas sean estables, registrar los datos durante tres minutos, como mínimo.

5.3 Requisito de medición de las partículas ambiente

5.3.1 Se notificarán la concentración en masa de nvPM promediada en tres minutos ($\text{nvPM}_{\text{mass_STP}}$) y la concentración en número de nvPM corregida en función de DF_2 ($DF_2 \times \text{nvPM}_{\text{num_STP}}$).

Nota.— El nivel ambiente de la concentración en masa de nvPM puede estar por debajo del LOD del nvPMmi.

5.3.2 Recomendación.— El valor de concentración promedio del nvPMni corregido en función del DF_2 debería ser más de 10 veces el valor obtenido en la verificación de limpieza. Si falla esta verificación, se debería revisar el funcionamiento del sistema (posición de válvulas, gastos de flujo, presiones y temperaturas) y repetir la medición.

5.3.3 Recomendación.— Si se registran niveles significativos de nvPM ambiente, estos niveles deberían tenerse en cuenta.

6. VERIFICACIÓN DE CALIBRACIÓN DE LOS FACTORES DE DILUCIÓN DEL VPR

6.1 Se verificarán los factores de dilución (DF_2) del VPR anticipados durante la prueba del motor, con la siguiente configuración:

- a) un analizador de gas CO_2 conforme a lo dispuesto en el Adjunto B del Apéndice 3;
- b) un gas CO_2 certificado con alta concentración y una pureza de CO_2 de 2,0 (superior al 99,0 %);

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

- c) conectar el analizador de gas CO_2 a la salida del VPR con una conexión en T para impedir que se presurice en exceso la muestra de CO_2 ;
- d) conectar el gas CO_2 de alta concentración a la entrada del VPR mediante una conexión en T y una válvula de control de flujo para suministrar presión a la entrada del VPR al igual que en la prueba de motor; y
- e) permitir que la muestra en la entrada del VPR tenga el mismo gasto de flujo y presión que los que se emplean durante una prueba de motor.

Nota.— En la Figura A7-7 se ilustra el esquema de flujo de la verificación del factor de dilución.

6.2 Se verificará el factor de dilución (DF_2) del VPR mediante el siguiente procedimiento:

- a) Calentar el VPR y asegurarse de que alcance las temperaturas de funcionamiento.
- b) Verificar que la entrada del VPR impulse un flujo de muestreo.
- c) Calentar el analizador de CO_2 en consecuencia y preparar el registro de datos.
- d) Aplicar el gas de calibración Z apropiado al analizador de CO_2 y hacer los ajustes necesarios del instrumento.
- e) Aplicar el gas de calibración apropiado del 90% de la concentración correspondiente a FS al analizador de CO_2 para abarcar los rangos que haya que utilizar y ajustar y anotar debidamente la posición del regulador de ganancia.
- f) Verificar que el flujo de la muestra hacia el analizador de CO_2 sea adecuado (tal vez sea necesario colocar una bomba aguas arriba del analizador de CO_2).
- g) Hacer fluir el gas CO_2 de alta concentración hacia la entrada del VPR y asegurarse de que haya un excedente de flujo en el respirador aguas arriba de la entrada del VPR.

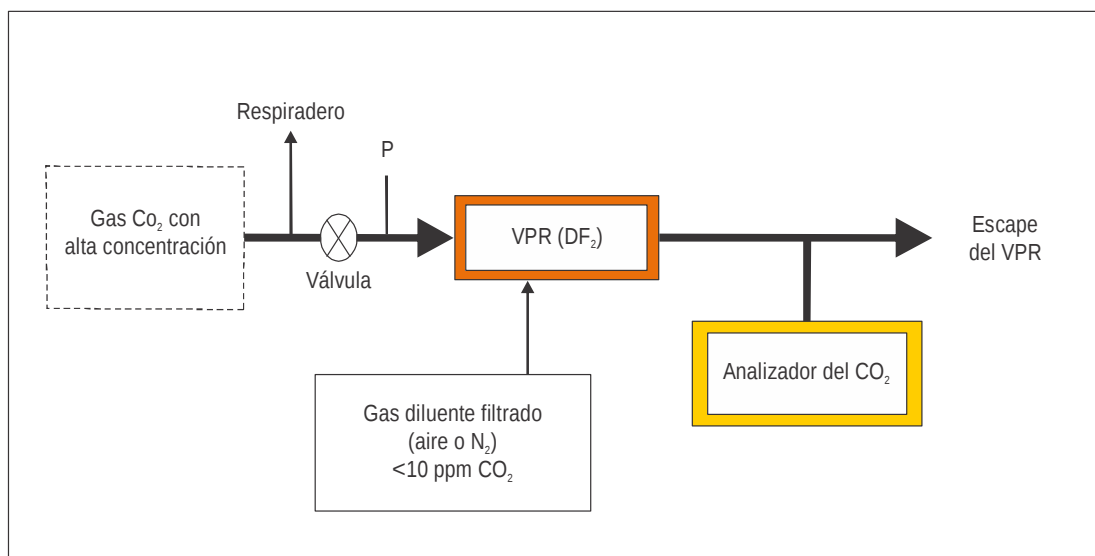


Figura A7-7. Configuración para la verificación del factor de dilución del VPR

- h) Configurar el VPR en una configuración de factor de dilución.
- i) Ajustar la válvula de control de flujo de la entrada del VPR, de modo que se cree una caída de presión para simular la presión de la muestra subambiente en la entrada del VPR durante una medición del n_{vPMni} en la prueba del motor.
- j) Muestrear el flujo del escape del VPR con el analizador de gas CO_2 .
- k) Cuando sea estable la lectura del analizador de gas CO_2 , registrar como mínimo siete puntos de datos de concentración de CO_2 a lo largo de tres minutos y calcular la media.
- l) Calcular el valor medio de DF_2 como proporción de la media de las mediciones de CO_2 y la concentración de gas CO_2 certificada.
- m) Repetir lo establecido en los párrafos 6.2 h) a 6.2 l) mencionados arriba para cada configuración de dilución del VPR que se ha de emplear en la prueba del motor.

6.3 Se compararán los valores medios calculados de DF_2 con los resultados de calibración de un laboratorio competente. Si la diferencia es:

- a) menor o igual a $\pm 10\%$, se emplearán los valores de DF_2 de la calibración del laboratorio competente; y
- b) mayor a $\pm 10\%$, se volverán a determinar los valores de DF_2 del VPR a partir de la calibración del laboratorio competente.

Nota.— El Manual técnico-ambiental (Doc 9501), Volumen II — Procedimientos para la certificación respecto a las emisiones de los motores de las aeronaves contiene textos de orientación sobre el uso de un procedimiento equivalente.

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 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 μm y ausencia de coagulación.

Nota 4.— El método propuesto en el presente apéndice emplea datos y mediciones especificados en el Apéndice 7 y sus adjuntos. Los símbolos y definiciones que no aparecen en este apéndice figuran en el Apéndice 7 y sus 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 de recolección, están especificadas en 6.2 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 de recolección.

1.3 Se debe tener en cuenta la distribución por tamaño de nvPM porque los mecanismos de pérdida 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.

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 con la misma velocidad terminal de decantación que la partícula en cuestión, también denominado “diámetro aerodinámico clásico”.

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°C.

Pérdida de partículas. Las partículas que se pierden durante el transporte a través de un sistema de muestreo. Esta pérdida 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
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	$\frac{k_B \times (273,15 + T_i) \times C_c}{3 \times \pi \times \mu \times D_m \times 10^{-4}}$, coeficiente de difusión de partículas, cm^2/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 movilidad eléctrica de nvPM, μm
D_{mg}	diámetro medio geométrico, μm
δ	suma del cuadrado de las diferencias relativas entre concentraciones en masa y número 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, en mg/kg de combustible
EI_{num}	índice de emisión en número de nvPM corregido en función de las pérdidas por termoforesis en número/kg de combustible
ε	criterio de convergencia (1×10^{-9})
$f_{\text{ign}}(D_m)$	función de distribución logarítmica normal con parámetros de desviación geométrica estándar, σ_g , y diámetro medio geométrico, D_{mg}
$f_N(D_m)$	función de distribución logarítmica normal del número de partículas del plano de salida de la tobera de escape del motor
ID_{ti}	diámetro interno del i^{er} segmento del conducto de muestreo, mm
k_B	$1,3806 \times 10^{-16} (\text{g} \cdot \text{cm}^2)/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$
$k_{\text{SL_mass}}$	factor de corrección de EI_{mass} en función de las pérdidas del sistema sin la corrección de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$k_{\text{SL_num}}$	factor de corrección de EI_{num} en función de las pérdidas del sistema sin la corrección de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección, número/ cm^3
k_{thermo}	factor de corrección en función de las pérdidas por termoforesis de la parte de recolección, especificado en 6.2 del Apéndice 7.
λ	$67,3 \times 10^{-3} \times \left(\frac{273,15 + T_i}{296,15}\right) \times \left(\frac{101,325}{P_i}\right) \times \left(\frac{406,55}{T_i + 383,55}\right)$, recorrido libre medio del gas portador, μm

$nvPM_{mass_EST}$	concentración en masa, medición estimada por el instrumento de la muestra sin diluir (es decir, corregida en función de la dilución), $\mu g/m^3$
$nvPM_{num_EST}$	concentración en número, medición estimada por el instrumento de la muestra sin diluir (es decir, corregida en función de la dilución), número/ cm^3
$nvPM_{mass_EP}$	concentración en masa 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 parte de recolección.
$nvPM_{num_EP}$	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 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^3
$\eta_{mass}(D_m)$	el coeficiente de penetración total del sistema de muestreo y medición correspondiente al nvPMmi sin pérdidas por termoforesis de la parte de recolección al tamaño D_m de movilidad eléctrica de las partículas
$\eta_{num}(D_m)$	el coeficiente de penetración total del sistema de muestreo y medición correspondiente al nvPMni sin pérdidas por termoforesis de la parte de recolección al tamaño D_m de movilidad eléctrica de las partículas
$\eta_i(D_m)$	coeficiente de penetración del i^{er} componente del sistema de muestreo y medición
$\eta_{bi}(D_m)$	coeficiente de penetración de la curva del conducto de muestreo del i^{er} componente del sistema de muestreo y medición
ρ	hipótesis de densidad efectiva de nvPM, g/cm^3
σ_g	hipótesis de desviación geométrica estándar de distribución logarítmica normal
Q_i	flujo del gas portador en el i^{er} segmento del conducto de muestreo, slpm
Re	$\frac{2 \times \rho_{gas} \times Q_i}{3 \times \pi \times \mu \times ID_{ti}}$, número de Reynolds del gas portador
T_i	temperatura del gas portador en el i^{er} 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_{mass} 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:*

$$k_{SL_mass} = \frac{nvPM_{mass_EP}}{DF_1 \times nvPM_{mass_STP}}$$

3.2 Recomendación.— El factor de corrección de EI_{num} 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:

$$k_{SL_num} = \frac{nvPM_{num_EP}}{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num_STP}}$$

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 ($nvPM_{mass_EP}$) y el número ($nvPM_{num_EP}$) en el plano de salida de la tobera de escape del motor conforme al siguiente procedimiento:

- Para una $nvPM_{num_STP}$ medida, comenzar con un valor inicial de $nvPM_{num_EP} = 3 \times DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num_STP}$.
- 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.
- 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:

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

$$nvPM_{num_EST} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \eta_{num}(D_m) \times nvPM_{num_EP} \times f_{lgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

donde

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

$\Delta \ln(D_m) = \frac{1}{n} \times \frac{1}{\log_{10}(e)}$ es 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.

- Determinar la diferencia, δ , 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:

$$\delta = \left(\frac{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num_STP} - nvPM_{num_EST}}{DF_1 \times DF_2 \times nvPM_{num_STP}} \right)^2 + \left(\frac{DF_1 \times nvPM_{mass_STP} - nvPM_{mass_EST}}{DF_1 \times nvPM_{mass_STP}} \right)^2$$

- Repetir los pasos c) a d) haciendo variar $nvPM_{num_EP}$ y D_{mg} hasta que δ se reduzca a menos de 1×10^{-9} .

f) Una vez que δ se redujo a menos de 1×10^{-9} , los valores finales de $nvPM_{num_EP}$ y D_{mg} son aquellos asociados con ese valor minimizado de δ .

g) Utilizando $nvPM_{num_EP}$ y D_{mg} del paso f), se debería determinar $nvPM_{mass_EP}$ empleando la siguiente expresión:

$$nvPM_{mass_EP} = \sum_{D_m=0,01\mu m}^{1\mu m} \frac{\rho \pi D_m^3}{6} \times nvPM_{num_EP} \times f_{lgn}(D_m) \times \Delta \ln(D_m)$$

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 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 μm lo cual difiere de los valores tabulados del Apéndice 7.

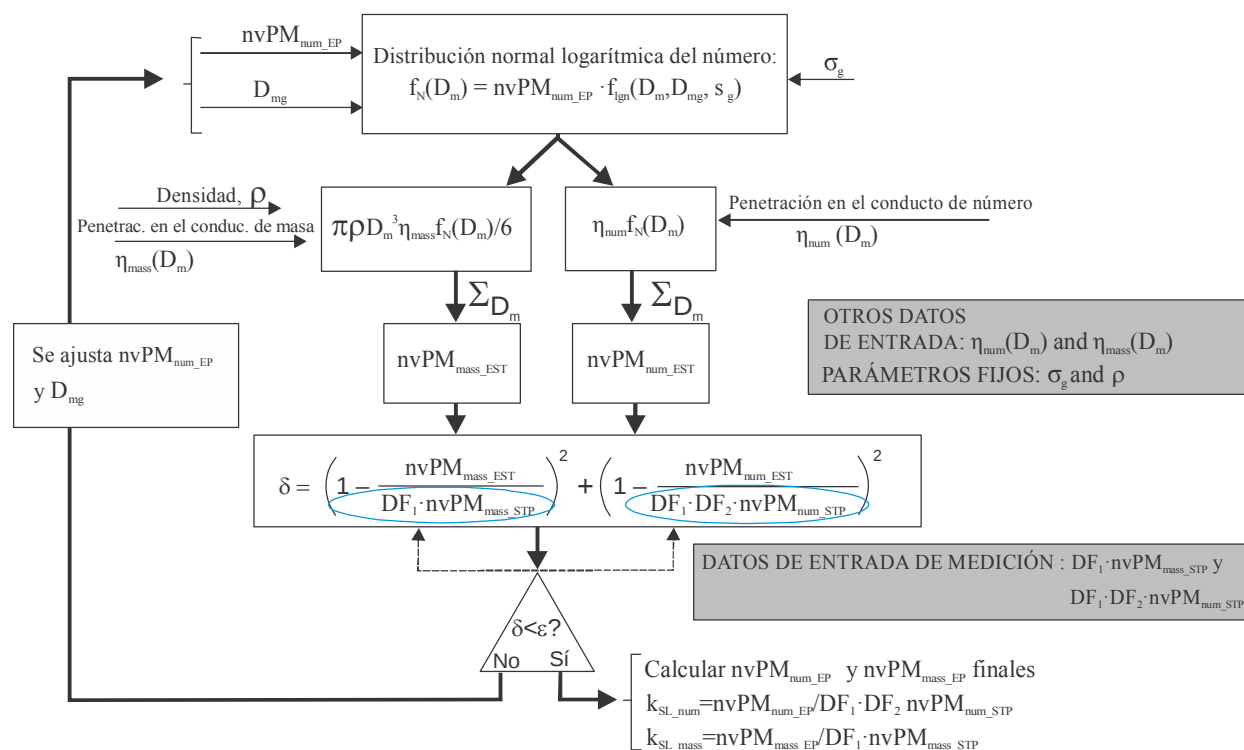


Figura A8-1. Método iterativo de cálculo de la masa y número de nvPM corregido en función de pérdidas distintas de la pérdida por termoforesis en la parte de recolección

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
$\eta_{di1}(D_m)$	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
$\eta_{cyc}(D_m)$	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 nvPMni (CPC)
$\eta_{th\ n}$	Sección 5 – Debido a pérdidas por termoforesis en la entrada del nvPMni

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 μm a 1 μm , se debería calcular combinando coeficientes de penetración del sistema:

$$\eta_{\text{mass}}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \eta_{\text{cyc}} \times \eta_4 \times \eta_{b4} \times \eta_5 \times \eta_{b5} \times \eta_{\text{th}_m}$$

donde η 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 μm a 1 μm , se debería calcular combinando coeficientes de penetración del sistema:

$$\eta_{\text{num}}(D_m) = \eta_1 \times \eta_{b1} \times \eta_2 \times \eta_{b2} \times \eta_3 \times \eta_{b3} \times \eta_{\text{cyc}} \times \eta_4 \times \eta_{b4} \times \eta_6 \times \eta_{b6} \times \eta_{\text{VPR}} \times \eta_{\text{CPC}} \times \eta_{\text{th}_n}$$

donde η 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^{er} 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^{er} segmento del conducto de muestreo	°C
P_i	Presión del gas portador en el i^{er} segmento del conducto de muestreo, que se supone que es constante a lo largo de la i^{a} sección y equivalente a 101,325 kPa	kPa
Q_i	Gasto del flujo del gas portador a lo largo del i^{er} segmento del conducto de muestreo	slpm
ID_{ti}	Diámetro interno del i^{er} segmento del conducto de muestreo	mm
L_i	Longitud del i^{er} segmento del conducto de muestreo	m
θ_{bi}	Ángulo total de las curvas del i^{er} 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^{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 nvPMmi y se debería usar $\eta_{th_n}(D_m) = 1$ para el nvPMni 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 $\eta_{bi}(D_m)$, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 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

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

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:

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

donde

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

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

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:

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

donde

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

$$\sigma_{cyc} = \ln(D_{16}/D_{84})^{0.5}$$

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: $(D_{16}/D_{84})^{0,5}$ 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, η_{VPRth} , es una constante. El factor de difusión, η_{VPRdi} , 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

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

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

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

$$T_{VPR} = \text{temperatura del VPR, } ^\circ\text{C}$$

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

6.2.2 Recomendación.— Se debería ajustar la función de penetración del VPR (η_{VPR}) a los cuatro puntos de penetración medidos haciendo variar la longitud efectiva del VPR (L_{VPR}) y el factor de pérdida por termoforesis (η_{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 μm	0,03 μm	0,05 μm	0,1 μm
Coeficiente 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 μm a 1 μm 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:

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

donde

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

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

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

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

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

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

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

6.8.2 Recomendación.— Se deberían calcular coeficientes de penetración para 80 tamaños de partícula discretos (D_m) dentro del rango de 0,003 μm a 1 μm en relación con la función de continua del CPC.

— FIN —

ISBN 978-92-9258-240-1



9

789292

582401