

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

**METODOLOGÍA DE PRUEBAS Y SU APLICACIÓN, PARA EL
DIAGNÓSTICO DE CONVERTIDORES CATALÍTICOS, MEDIANTE
CICLO ASM, EN VEHÍCULOS CON MOTORES DE ENCENDIDO
PROVOCADO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁGÍSTER EN SISTEMAS
AUTOMOTRICES**

DIANA CAROLINA MIRANDA VIZUETE

dcmv21@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ÁNGEL PORTILLA AGUILAR, MSC.

angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, Abril 2016

DECLARACIÓN

Yo Diana Carolina Miranda Vizuete, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Diana Carolina Miranda Vizuete

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diana Carolina Miranda Vizuite bajo mi supervisión.

Ing. Ángel Portilla A., Msc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, hermanos y amigos por su apoyo y contribución durante mis estudios de maestría y en la realización de esta Tesis.

A los profesores de la Maestría en Sistemas Automotrices de la Escuela Politécnica Nacional por brindar sus conocimientos y experiencia al desarrollo académico y profesional de los estudiantes. Principalmente agradezco al Ing. Ángel Portilla por dirigir este proyecto de investigación.

Al personal del CCICEV que me facilitaron sus equipos para la realización de las pruebas en los vehículos utilizados.

Diana Carolina Miranda Vizuite

DEDICATORIA

Dedico esta Tesis a los estudiantes y profesionales que se beneficien de la investigación realizada y plasmada en estas páginas.

Diana Carolina Miranda Vizuite

CONTENIDO

CAPITULO 1

MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

1.1	Introducción.....	1
1.2	Características de los motores de encendido provocado.....	1
1.2.1	Renovación de la carga en motores de encendido provocado	2
1.2.1.1	Rendimiento volumétrico	2
1.2.1.2	Diagrama de distribución	2
1.2.1.3	Diseño de válvulas y colectores.....	3
1.2.1.4	Sistemas de distribución variable.....	4
1.2.1.5	Sistema de recirculación de gases (EGR Interno)	4
1.2.1.6	Sistema de sobrealimentación	4
1.2.2	Formación de la mezcla en motores de encendido provocado	5
1.2.2.1	Estequiometría.....	5
1.2.2.2	Dosado	5
1.2.2.3	Inyección directa de combustible	7
1.2.2.4	Inyección indirecta de combustible	7
1.2.3	Procesos de combustión en motores de encendido provocado.....	8
1.2.3.1	Encendido.....	8
1.2.3.2	Combustión premezclada	8
1.2.3.3	Combustión de mezcla estratificada	9
1.2.3.4	Combustión con autoinflamación.....	9
1.3	Emisiones contaminantes de los motores de encendido provocado	10
1.3.1	Emisiones gaseosas	10
1.3.1.1	Monóxido de carbono	10
1.3.1.2	Hidrocarburos	11
1.3.1.3	Óxidos de nitrógeno.....	12
1.3.2	Emisiones evaporativas	12

CAPITULO 2

REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES VEHICULARES

2.1 Control electrónico en motores de encendido provocado mediante el sensor de oxígeno.....	14
2.2 Técnicas de reducción de emisiones en motores de encendido provocado....	15
2.2.1 Reducción de emisiones gaseosas.....	15
2.2.1.1 Convertidor catalítico: constitución, tipos y mantenimiento.....	16
2.2.1.2 Diseño de la cámara de combustión.....	23
2.2.1.3 Sistema de formación de la mezcla.....	23
2.2.1.4 Sistema de distribución.....	24
2.2.1.5 Recirculación de gases de escape (EGR).....	24
2.2.2 Reducción de emisiones evaporativas.....	25
2.2.2.1 Ventilación positiva del cárter (PCV).....	25
2.2.2.2 Sistema de control evaporativo de gases (EVAP).....	25

CAPITULO 3

NORMATIVA Y MEDICIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES

3.1 Normativa de emisiones contaminantes vehiculares.....	27
3.1.1 Normas EURO.....	27
3.1.2 Normas EPA.....	28
3.1.3 Norma INEN 2204: 2002 Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina.....	29
3.2 Revisión técnica vehicular.....	31
3.2.1 Antecedentes.....	31
3.2.2 Procedimiento de revisión vehicular (RTV).....	32
3.2.2.1 Equipamiento de inspección.....	32
3.2.2.2 Métodos de inspección.....	33
3.2.2.3 Calificación de inspección.....	35
3.3 Medición de emisiones vehiculares.....	36
3.3.1 Tipos de pruebas de emisiones.....	36
3.3.1.1 Pruebas estacionarias.....	36
3.3.1.2 Pruebas dinámicas.....	37
3.3.2 Equipamiento para ciclos de pruebas dinámicas.....	38
3.3.2.1 Dinamómetro de chasis.....	38
3.3.2.2 Análisis de gases con muestreo de volumen constante (CVS).....	39

3.3.3 Ciclos de pruebas dinámicas	40
3.3.3.1 Ciclo FTP-75	40
3.3.3.2 Ciclo IM240	44
3.3.3.3 Ciclo NEDC	45
3.3.3.4 Ciclo WLTP	46

CAPITULO 4

METODOLOGÍA DE PRUEBAS

4.1 Ciclo de pruebas ASM	51
4.1.1 Valores estándar de emisiones para pruebas ASM	51
4.1.1.1 Límites de emisiones ASM durante la puesta en marcha del vehículo	52
4.1.1.2 Límites de emisiones ASM en condiciones normales de funcionamiento del vehículo	52
4.1.2 Procedimiento de pruebas ASM	53
4.1.2.1 Modo ASM 5015	53
4.1.2.2 Modo ASM 2525	55
4.2 Metodología de pruebas	56
4.2.1 Objetivo	56
4.2.2 Alcance	57
4.2.3 Disposiciones generales	57
4.2.4 Método de ensayo	57
4.2.4.1 Revisión visual del vehículo	57
4.2.4.2 Preparación del vehículo para las pruebas	58
4.2.4.3 Preparación para la prueba dinámica	58
4.2.4.4 Procedimiento de medición del ciclo ASM 5015	59
4.2.4.5 Procedimiento de medición del ciclo ASM 2525	59
4.2.5 Cálculo del tamaño de la muestra	60
4.2.6 Gráficos de control para evaluar variaciones en las mediciones	61
4.2.6.1 Gráfico de control para media	62
4.2.6.2 Gráfico de control para dispersión	63
4.2.7 Evaluación de resultados	64

CAPITULO 5

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Pruebas ASM en vehículos en uso	66
5.1.1 Gráfico de control de los resultados del vehículo A	66
5.1.1.1 Gráfico de control de CO en ciclo ASM 2525, tomado antes del convertidor catalítico	66
5.1.1.2 Promedio de las mediciones del vehículo A.....	69
5.1.2 Gráfico de control de los resultados del vehículo B	69
5.1.2.1 Gráfico de control del NOx en ciclo ASM 5015, tomado después del convertidor catalítico	70
5.1.2.2 Promedio de las mediciones del vehículo B.....	72
5.2 Análisis de resultados.....	73
5.2.1 Comparación de resultados del vehículo A con la norma chilena	73
5.2.2 Comparación de resultados del vehículo B con la norma chilena	75
5.2.3 Evaluación de resultados de los vehículos de prueba	77
5.2.3.1 Evaluación de resultados del vehículo A.....	78
5.2.3.2 Evaluación de resultados del vehículo B.....	78
5.2.4 Criterio de diagnóstico	79

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.....	80
6.2 Recomendaciones.....	81
 Referencias Bibliográficas	 83
Anexos	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Valores de dosado estequiométrico	6
Tabla 1.2	Valores típicos de dosado relativo	6
Tabla 3.1	Límites máximos de emisiones para vehículos a gasolina.....	28
Tabla 3.2	Límites máximos de emisiones para vehículos y camiones ligeros	28
Tabla 3.3	Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralentí (prueba estática)	30
Tabla 3.4	Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina (prueba dinámica), a partir del año modelo 2000 (ciclos americanos).....	30
Tabla 3.5	Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina (prueba dinámica), a partir del año modelo 2000 (ciclos europeos)	31
Tabla 3.6	Parámetros del Ciclo WLTC clase 1	48
Tabla 3.7	Parámetros del Ciclo WLTC clase 2	49
Tabla 3.8	Parámetros del Ciclo WLTC clase 3	50
Tabla 4.1	Valores estándar de emisiones de puesta en marcha de LDV para pruebas ASM	52
Tabla 4.2	Valores estándar en condiciones normales de emisiones de LDV para pruebas ASM	52
Tabla 4.3	Configuración de potencia para ASM 5015, en dinamómetro de 8.6 pulgadas	53
Tabla 4.4	Configuración de potencia para ASM 5015, en dinamómetro de 20 pulgadas	54
Tabla 4.5	Configuración de potencia para ASM 2525, en dinamómetro de 8.6 pulgadas	55
Tabla 4.6	Configuración de potencia para ASM 2525, en dinamómetro de 20 pulgadas	55
Tabla 4.7	Valores de niveles de confianza	60
Tabla 5.1	Mediciones de CO en ciclo ASM 2525, antes del convertidor catalítico	67
Tabla 5.2	Promedio de mediciones antes del convertidor catalítico	69
Tabla 5.3	Promedio de mediciones después del convertidor catalítico	69

Tabla 5.4	Mediciones de NOx en ciclo ASM 5015, después del convertidor catalítico	70
Tabla 5.5	Promedio de mediciones antes del convertidor catalítico	72
Tabla 5.6	Promedio de mediciones después del convertidor catalítico	72
Tabla 5.7	Límites de emisiones en pruebas dinámicas ASM	73
Tabla 5.8	Eficiencia del convertidor catalítico en el vehículo A	78
Tabla 5.9	Eficiencia del convertidor catalítico en el vehículo B	79

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1	Diagrama de distribución	3
Fig. 1.2	Sistemas de inyección de combustible	7
Fig. 1.3	Avance del frente de llama.....	9
Fig. 1.4	Emisiones contaminantes de vehículos	10
Fig. 2.1	Esquema de funcionamiento del sensor de oxígeno.....	15
Fig. 2.2	Esquema de funcionamiento del convertidor catalítico	16
Fig. 2.3	Ubicación del convertidor catalítico	16
Fig. 2.4	Emisiones de CO, HC y NOx, antes y después del convertidor catalítico	17
Fig. 2.5	Constitución del convertidor catalítico.....	18
Fig. 2.6	Formación de un monolito metálico de tipo espiral por enrollamiento de placas corrugada y lisa	19
Fig. 2.7	Detalle de los componentes del convertidor catalítico	19
Fig. 2.8	Convertidor catalítico de tres vías	21
Fig. 2.9	Rendimiento de la conversión de CO, HC y NOx de un catalizador con mezcla homogénea	21
Fig. 2.10	Esquema de funcionamiento de la recirculación de gases EGR.....	24
Fig. 2.11	Esquema de funcionamiento de la válvula de ventilación positiva del cárter	25
Fig. 2.12	Esquema de funcionamiento del sistema de control evaporativo de gases.....	26
Fig. 3.1	Centro de revisión vehicular en quito	32
Fig. 3.2	Inspección visual.....	34
Fig. 3.3	Inspección mecatrónica	34
Fig. 3.4	Prueba estática de emisiones	37
Fig. 3.5	Prueba dinámica de emisiones	38
Fig. 3.6	Esquema del sistema de muestreo de volumen constante utilizando un venturi de flujo crítico para la medición de la masa de emisiones ...	39
Fig. 3.7	EPA procedimiento de ensayo federal (FTP).....	41
Fig. 3.8	EPA procedimiento de ensayo federal suplementario (SFTP) US06 ...	42

Fig. 3.9	EPA procedimiento de ensayo federal suplementario (SFTP) SC03	43
Fig. 3.10	EPA ciclo de prueba de inspección y mantenimiento IM240.....	44
Fig. 3.11	NEDC nuevo ciclo europeo de conducción.....	46
Fig. 3.12	Ciclo WLTC clase 1.....	48
Fig. 3.13	Ciclo WLTC clase 2.....	49
Fig. 3.14	Ciclo WLTC clase 3.....	50
Fig. 4.1	Gráfico del intervalo de media μ	63
Fig. 4.2	Gráfico del intervalo de rango σ	64
Fig. 5.1	Gráfico de control de media de CO en ciclo ASM 2525, antes del convertidor catalítico.....	68
Fig. 5.2	Gráfico de control de media de NOx en ciclo ASM 5015, después del convertidor catalítico.....	71
Fig. 5.3	Gráfico de comparación de CO y los límites de emisiones de la norma chilena	74
Fig. 5.4	Gráfico de comparación de HC y los límites de emisiones de la norma chilena	74
Fig. 5.5	Gráfico de comparación de NOx y los límites de emisiones de la norma chilena	75
Fig. 5.6	Gráfico de comparación de CO y los límites de emisiones de la norma chilena	76
Fig. 5.7	Gráfico de comparación de HC y los límites de emisiones de la norma chilena	76
Fig. 5.8	Gráfico de comparación de NOx y los límites de emisiones de la norma chilena	77

INDICE DE ANEXOS

ANEXO I:	Proyecto de norma técnica. Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Procedimiento de medición de la concentración de emisiones de escape de vehículos automotores en prueba dinámica de aceleración simulada ASM (Acceleration Simulated Mode).....	86
ANEXO II:	Acceleration simulation mode test procedures, emission standards, quality control requirements, and equipment specifications. Technical guidance	93
ANEXO III:	International council on clean transportation, inertia classes proposal (Rangos de peso inercial vehicular en Estados Unidos)	100
ANEXO IV:	Gráficas de control de la calidad para variables: factores críticos de las gráficas o cartas de control.....	102
ANEXO V:	Ejecución de pruebas ASM en vehículos de prueba.....	103
ANEXO VI:	Registro de resultados de las pruebas en ciclo ASM 2525 y 5015	106
ANEXO VII:	Registro de cálculo de media, rango y límites de media y rango para el análisis de resultados	108
ANEXO VIII:	Formato de informe de resultados	111

RESUMEN

El presente trabajo de investigación ha desarrollado una metodología de pruebas que permitió determinar la eficiencia de convertidores catalíticos de vehículos, mediante la ejecución de pruebas en ciclo ASM. Conociendo la eficiencia, se pudo diagnosticar a los convertidores catalíticos, estableciendo el recambio de los mismos.

El desarrollo de esta investigación se realizó de la siguiente manera: se estableció el procedimiento de pruebas, en ciclo ASM, basado en la guía técnica emitida por EPA. Se ejecutaron las pruebas en dos vehículos (A y B), con el equipamiento adecuado en las instalaciones del CCICEV. De éstas pruebas se obtuvieron mediciones antes y después del convertidor catalítico, en cada vehículo. Se analizaron las mediciones en base a la norma chilena, utilizada por el CCICEV para la homologación y en la diferencia porcentual entre los promedios de las mediciones antes y después del convertidor catalítico.

Los resultados obtenidos en el vehículo de prueba A, muestran que ninguna de las mediciones obtenidas sobrepasó los límites de la norma chilena y que la eficiencia del convertidor catalítico en CO es de 85,62%, en HC es de 100% y en NOx es de 94%. Los resultados obtenidos en el vehículo de prueba B, muestran que ninguna de las mediciones obtenidas sobrepasó los límites de la norma chilena y que la eficiencia del convertidor catalítico en CO es de 84,17%, en HC es de 96,25% y en NOx es de 95,56%.

PRESENTACIÓN

Las emisiones contaminantes vehiculares han sido catalogadas como una de las principales fuentes de contaminación ambiental. La industria automotriz ha estado desarrollando sistemas de control de emisiones para evitar que no sobrepasen los límites máximos establecidos por las normas internacionales vigentes.

El principal elemento para el control de las emisiones en los vehículos con motores de encendido provocado es el convertidor catalítico. El actual parque automotor cuenta con convertidores catalíticos de los que se desconoce su eficiencia. Siendo la menor eficiencia reflejada en el incremento de las emisiones contaminantes.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar una metodología de pruebas que permita comprobar la eficiencia de convertidores catalíticos de vehículos en uso, mediante pruebas en ciclo ASM. Los resultados de estas pruebas permitirán determinar la eficiencia de los convertidores catalíticos, permitirá compararlos con los límites de emisiones vigentes y se podrá diagnosticar a los convertidores catalíticos para establecer su recambio.

CAPITULO I. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El motor de combustión interna alternativo transforma la energía química del combustible en energía calorífica a través de la combustión del mismo, y aprovecha la fuerza de expansión de los gases de combustión para transformar esta energía en trabajo mecánico.

El funcionamiento de los motores de combustión interna alternativos depende de los procesos de renovación de la carga, formación de la mezcla aire-combustible y la combustión de la mezcla. Estos procesos inciden en el rendimiento efectivo obtenido, el cual llega a un valor máximo de 55%¹, con respecto a la energía aprovechable del combustible.

En este capítulo se analizarán las principales características de los motores de encendido provocado. El proceso de renovación de carga se encuentra influenciado por el sistema de distribución, el diseño de las válvulas y colectores de admisión y escape y otros sistemas de admisión de aire.

El proceso de formación de la mezcla se caracteriza por el aporte dosificado de combustible al aire ingresado al colector o al cilindro, mediante el sistema de inyección.

El proceso de combustión se caracteriza por el encendido y la combustión de la mezcla homogénea o estratificada de aire-combustible formada en el proceso anterior.

Finalmente, se explicará la formación de los siguientes gases contaminantes: monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

Los motores de encendido provocado (MEP) se caracterizan por su proceso de combustión, el cual se produce a través del salto de una chispa entre dos

¹ Prof. F. Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 25.

electrodos de una bujía, lo que aporta energía externa a la mezcla aire-combustible.

1.2.1 RENOVACIÓN DE LA CARGA EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

El proceso de renovación de carga en motores de encendido provocado consiste en evacuar los gases quemados del cilindro y reemplazarlos con aire o la mezcla aire-combustible.

El parámetro que caracteriza al proceso de renovación de la carga es el rendimiento volumétrico. Además de estar influenciado por la distribución, el diseño de las válvulas y colectores y otros sistemas de ingreso de aire.

1.2.1.1 Rendimiento volumétrico

Es el parámetro más útil para cuantificar el proceso de llenado del cilindro. Es el gasto de aire real admitido por el motor dividido por el gasto de aire de referencia, que supone es, la capacidad total de aspiración del motor. Se expresa de la siguiente manera:

$$n_V = \frac{m_{real}}{m_{ref}} \quad (\text{E.C.1.1})$$

El gasto de aire de referencia se toma a partir de la densidad del aire (ρ_{ref}) en un punto corriente arriba del colector de admisión, la cilindrada total (V_T), el régimen de giro (n) y el número de ciclos por vuelta (i). Por lo tanto, el rendimiento volumétrico se calcula:

$$n_V = \frac{m_{aire}}{\rho_{ref} V_T n i} \quad (\text{E.C.1.2})$$

1.2.1.2 Diagrama de distribución

El llenado del cilindro depende del momento en que las válvulas de admisión y escape inicien su apertura y cierre, momentos antes y después de que el pistón llegue al PMI y PMS (Fig. 1.1).

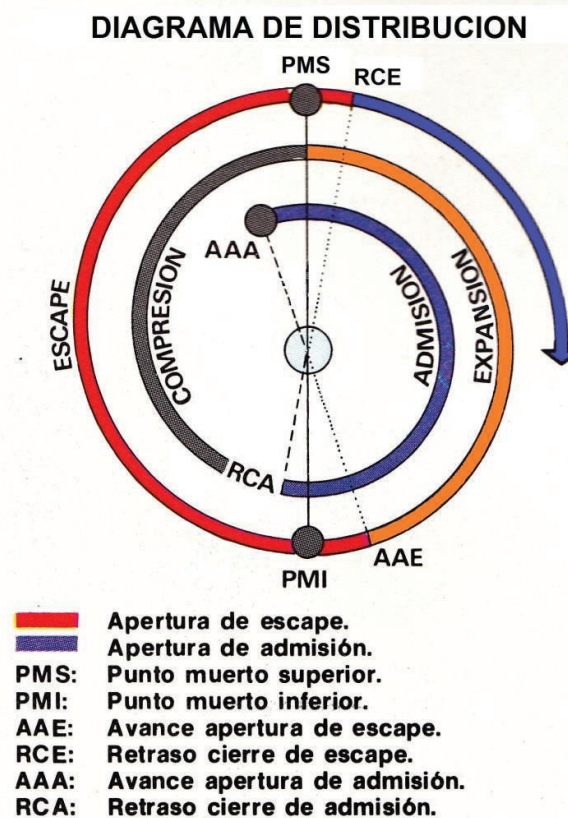


Fig. 1.1. Diagrama de distribución.²

El valor óptimo de estos ángulos depende de las características constructivas del motor, como son número de cilindros y su disposición y las dimensiones de los colectores de admisión; además del régimen de giro y las condiciones de operación del motor.

1.2.1.3 Diseño de válvulas y colectores

Las válvulas de admisión y escape son los elementos que permiten la renovación de la carga del cilindro. El tamaño de las válvulas se limita por el diámetro del pistón y por la forma del alojamiento de las válvulas en la culata. El número y la posición de las válvulas se condicionan por la posición que toma la bujía y el inyector.

La longitud y la sección de los colectores de admisión y escape influyen en el llenado y evacuación del cilindro.

² Adaptado de: Prof. F.Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 29.

El diseño adecuado de los colectores busca evitar la aparición de ondas de sobrepresión en el escape y ondas de rarefacción en la admisión.

1.2.1.4 Sistemas de distribución variable

Los sistemas de distribución variable se desarrollaron para optimizar el diagrama de distribución en cualquier condición de funcionamiento del motor. Los primeros sistemas de distribución variable consistían en la desactivación de ciertas válvulas a bajo régimen de giro y/o carga.

Un segundo tipo de sistemas de distribución variable permite modificar el calado angular de las levas, con lo que se modifica los momentos de apertura y cierre de una válvula. Los últimos sistemas permiten modificar de manera independiente los adelantos y retrasos de válvulas de admisión y escape, así como el levantamiento máximo.

1.2.1.5 Sistema de recirculación de gases (EGR Interno)

El sistema de recirculación de gases aporta sustancias inertes a la cámara de combustión que durante este proceso absorben calor de la masa de gases, bajando su temperatura instantánea e inhibiendo la formación de NOx.

El denominado EGR interno son los gases de escape del ciclo anterior y que se han quedado dentro de la cámara de combustión durante el proceso de combustión del nuevo ciclo. El EGR interno puede suceder por un barrido deficiente de los gases quemados o por un reflujó de gases de escape hacia la admisión durante el cruce de válvulas. El EGR interno puede provocarse con un diseño adecuado las levas de admisión y escape o con los sistemas de distribución variable.

1.2.1.6 Sistema de sobrealimentación

El sistema de sobrealimentación produce un aumento en la presión de admisión que conduce al aumento del llenado del cilindro. Si se calcula el rendimiento volumétrico, con respecto a condiciones ambientales, se puede alcanzar valores superiores a la unidad. El sistema de sobrealimentación se compone de un compresor que ayuda al llenado del cilindro y una turbina que ayuda al vaciado de los gases de escape.

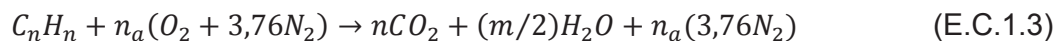
1.2.2 FORMACIÓN DE LA MEZCLA EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

El sistema de formación de la mezcla determina la cantidad de combustible que se debe introducir en el cilindro, en función de la cantidad de aire ingresado en el proceso de renovación de carga.

En los motores de encendido provocado se requiere que la mezcla aire-combustible sea gaseosa, homogénea en el momento de la combustión y con el dosado correspondiente a las condiciones deseadas (mínimo consumo, máxima potencia, estequiometría). Los sistemas para la formación de la mezcla son la inyección directa e indirecta de combustible.

1.2.2.1 Estequiometría

La estequiometría calcula las relaciones cuantitativas entre el aire y el combustible y los gases de combustión. La reacción de combustión se expresa de la siguiente manera:



Donde: n es el número de moles de oxígeno necesario para la oxidación completa del combustible y m es la masa de la mol.

Esta ecuación define la proporción exacta de aire y combustible que es necesaria para que todo el combustible se oxide y se obtenga una combustión completa.

1.2.2.2 Dosado

El dosado absoluto es la relación másica entre el consumo real de combustible y aire. Se expresa de la siguiente manera:

$$F = \frac{m_f}{m_a} \quad (\text{E.C.1.4})$$

Si todo el aire y combustible reaccionan en la combustión, sin dejar residuos, se tiene el dosado estequiométrico (F_e). Por lo tanto, el dosado relativo, es la relación entre el dosado absoluto y el estequiométrico:

$$F_R = \frac{F}{F_e} \quad (\text{E.C.1.5})$$

El dosado estequiométrico depende de la composición química del combustible y el aire. Según el combustible utilizado, el dosado estequiométrico puede tomar los valores expresados en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Valores de dosado estequiométrico.³

Valores de dosado estequiométrico	
Combustible	Fe
H ₂	1/34
Gas Natural	1/17
Propano	1/15,6
Gasolinas	1/14,6
Gasóleos	1/14,5
Fuel-oil	1/13,8
Etanol	1/9

El dosado relativo es el parámetro que indica si la mezcla de aire-combustible es pobre o rica. Si $F_R < 1$, el dosado es pobre debido a la falta de combustible en la mezcla aire-combustible. Si $F_R > 1$, el dosado es rico debido al exceso de combustible en la mezcla aire-combustible. Si $F_R = 1$, el dosado es estequiométrico. Los valores típicos de dosado relativo en motores actuales se expresan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Valores típicos de dosado relativo.⁴

Valores típicos de dosado relativo	
Motor	F_R
MEC	< 0,95
MEP con catalizador de tres vías	1
MEP sin catalizador	0,9 - 1,2
MEP combustión estratificada	< 0,9 salvo alto grado de carga

³ Prof. F. Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 55.

⁴ Prof. F. Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 55.

Al dosado también se le conoce como relación aire-combustible. Por lo tanto, el dosado relativo es el factor lambda (λ).

1.2.2.3 Inyección directa de combustible

El combustible se inyecta dentro de la cámara de combustión (Fig.1.2). A plena carga el combustible se inyecta durante la fase de admisión, logrando una mezcla homogénea en toda la cámara. A cargas parciales el combustible se inyecta durante la fase de compresión, logrando una mezcla estratificada con dosado alto en las proximidades de la bujía y más pobre en las zonas más alejadas de ella. La distribución del combustible depende de la forma de la cámara, la posición del inyector, la forma del chorro y el inicio y duración de la inyección.

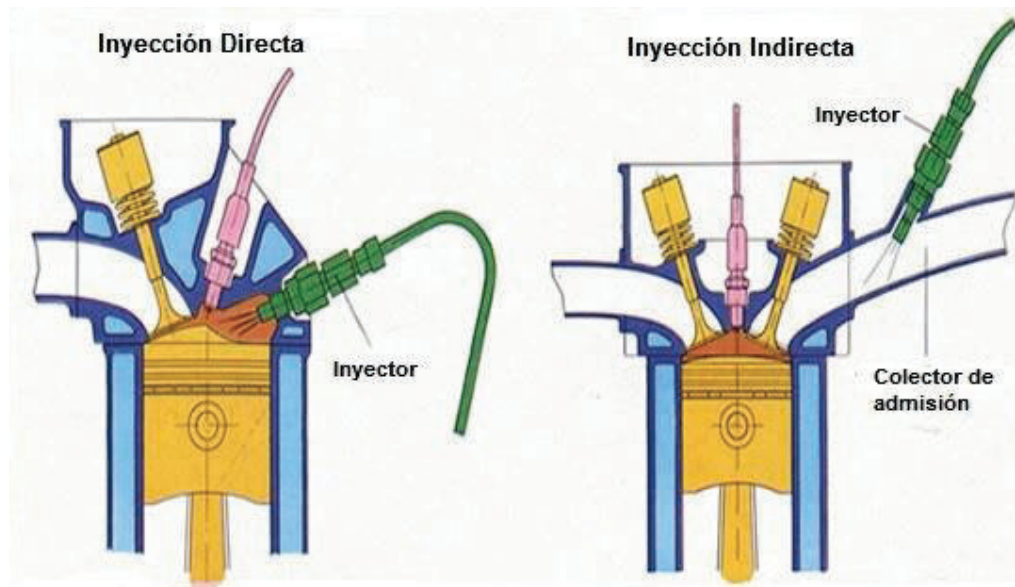


Fig.1.2. Sistemas de inyección de combustible.⁵

1.2.2.4 Inyección indirecta de combustible

El combustible se inyecta en las proximidades de las válvulas de admisión (Fig.1.2), en el colector de admisión. La mezcla de aire-combustible es homogénea en todo el volumen de la cámara de combustión. Para mantener el valor del dosado cercano al valor del dosado estequiométrico, se modifica la masa de la mezcla admitida variando su densidad mediante una válvula de

⁵ Disponible en: <http://www.computacioncuantica.com/wp/wp-content/uploads/diferencias-inyeccion-directa-e-indirecta.jpg>. Ingresado el 10 de noviembre de 2015.

estrangulación, colocada en el colector de admisión y que modifica la presión de admisión.

1.2.3 PROCESOS DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

En los motores de encendido provocado se ha realizado habitualmente la combustión de la mezcla premezclada con carga homogénea. Con la aparición de la inyección directa (mezcla estratificada), se ha modificado en parte este proceso de combustión. La combustión de la mezcla aire-combustible es uno de los fenómenos que controlan la potencia, el rendimiento y las emisiones del motor de encendido provocado.

1.2.3.1 Encendido

El proceso de ignición comienza con la formación de una columna o canal de plasma entre los electrodos de la bujía. La propagación de la llama se inicia en la superficie exterior del plasma y se expande de forma violenta con velocidad laminar.

La variación del momento del encendido modifica la cantidad de mezcla que se quema antes y después del PMS. La cantidad de masa quemada antes del PMS, la temperatura y la presión máxima en la cámara de combustión crecen al avanzar el encendido. Además crece la cantidad de calor transferido a las paredes antes del PMS.

1.2.3.2 Combustión premezclada

La combustión premezclada requiere que la mezcla aire-combustible sea evaporada homogénea o relativamente homogénea. Para obtener esta homogeneidad, es necesario que el proceso de formación de la mezcla se complete antes del inicio del proceso de combustión.

Durante la primera fase de combustión, la llama se propaga en el volumen de la mezcla alrededor de la superficie exterior de la bujía (Fig.1.3). En la segunda fase de combustión, aumentan la superficie del frente de llama, la velocidad de combustión y la temperatura de la mezcla sin quemar. En la última fase de

combustión, se quema el resto de mezcla que se encuentra en las zonas lejanas de la cámara de combustión y se extingue la llama.

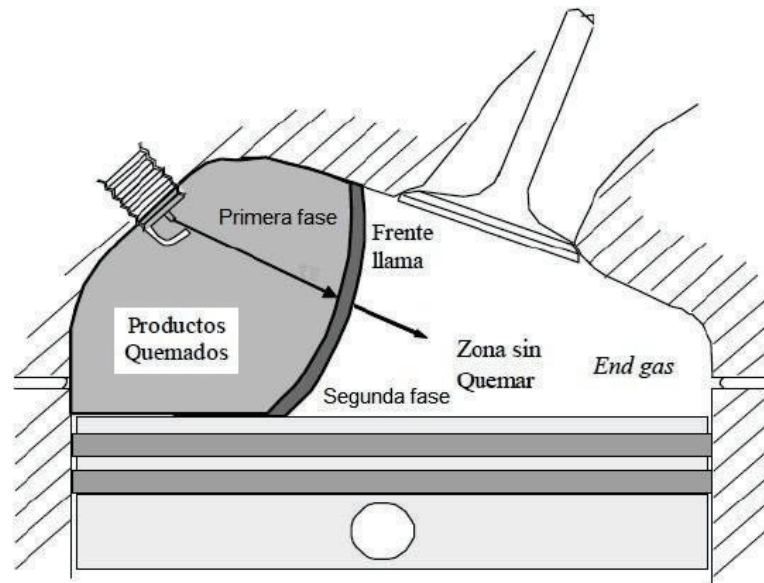


Fig.1.3. Avance del frente de llama.⁶

1.2.3.3 Combustión de mezcla estratificada

En ciertas condiciones de operación, en un motor de encendido provocado con inyección directa, se provoca la estratificación de la carga para obtener mejor rendimiento del motor a baja carga. La combustión de mezcla estratificada ayuda a reducir la temperatura de combustión y las pérdidas por calor en la cámara.

Este es un proceso de combustión premezclada no homogénea, el cual puede suceder adicional y simultáneamente al proceso habitual.

1.2.3.4 Combustión con autoinflamación

La combustión con autoinflamación se desarrolla en forma espontánea, cuando parte de la mezcla sin quemar se autoinflama antes de que llegue el frente de llama. La autoinflamación o autoencendido provoca un incremento repentino en la temperatura y presión en la parte de la mezcla que autoinflama, lo que a su vez crea una onda de presión que se propaga violentamente en la cámara de combustión.

⁶ Prof. F. Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 539.

1.3 EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

Los procesos de combustión que toman lugar dentro de los motores de encendido provocado producen gases tanto contaminantes como no contaminantes. Cuando la combustión es completa, los gases de escape que se producen son el dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua (H_2O). Cuando la combustión es incompleta, los gases contaminantes que se producen son el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x).

Adicionalmente, se producen emisiones contaminantes evaporativas (HC), las cuales son producto de la evaporación de los fluidos del vehículo (Fig.1.4).

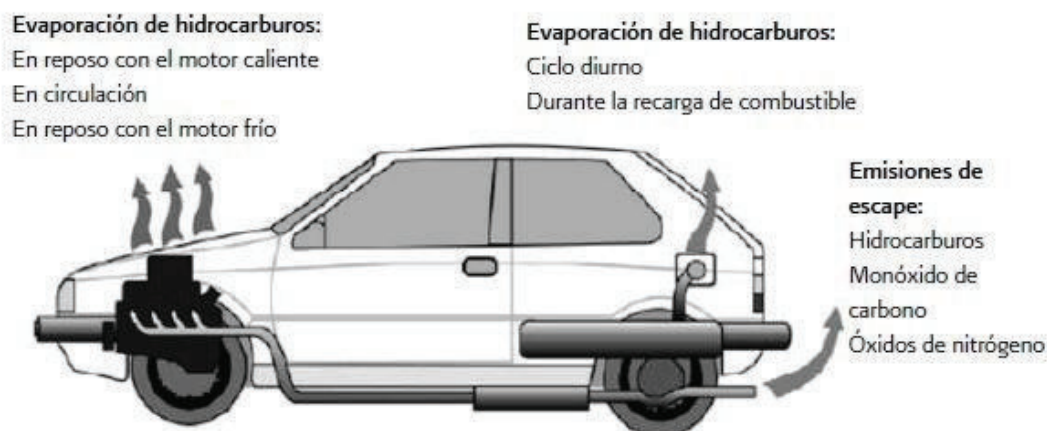


Fig.1.4. Emisiones contaminantes de vehículos.⁷

1.3.1 EMISIONES GASEOSAS

Las emisiones contaminantes gaseosas son las producidas por el proceso de combustión del motor de encendido provocado. Estos gases de escape representan el 60% de las emisiones totales del vehículo.⁸

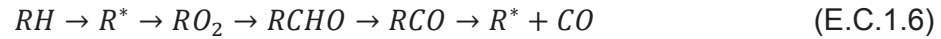
1.3.1.1 Monóxido de carbono (CO)

La formación de monóxido de carbono CO es un paso intermedio en la oxidación de un hidrocarburo. La combustión del hidrocarburo empieza con la ruptura de las

⁷ Inecc, Los vehículos automotores como fuentes de emisión, pág. 26. Disponible en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/618/vehiculos.pdf. Ingresado el 10 de noviembre de 2015.

⁸ Disponible en: <http://www.banrepcultural.org/node/92123>. Ingresado el 10 de noviembre de 2015.

moléculas de combustible para formar CO, luego éstas se oxidan para formar CO₂.



Otro proceso de formación se debe a la disociación de las moléculas de CO₂ a altas temperaturas (aprox. a partir de 2000°K). El CO se forma en condiciones de mezcla rica, especialmente en motores de gasolina que funcionan con mezcla estequiométrica o rica, en donde las concentraciones de CO en el escape aumentan a medida que aumenta el dosado.

En motores de combustión interna hay dos fuentes que provocan la formación de CO. La primera se genera en zonas dentro de la cámara de combustión en donde la mezcla es muy pobre y la llama no se puede propagar, obteniéndose la oxidación parcial del carbono del combustible. La segunda se da en zonas con mezcla muy rica, donde existe una mezcla de combustible evaporado y aire muy deficiente, el cual no da tiempo a que se completen las reacciones de oxidación.

1.3.1.2 Hidrocarburos (HC)

Los hidrocarburos HC sin quemar se forman generalmente en combustiones incompletas. La combustión incompleta se presenta debido al apagado de llama por efecto pared o misfiring, insuficiente evaporación del combustible, combustible atrapado en pequeños volúmenes y dosados extremos locales. Los combustibles compuestos de aromáticos y olefinas producen altas concentraciones de hidrocarburos reactivos. La formación de HC se debe a procesos de pirolisis y síntesis durante el proceso de combustión.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) se forman durante la combustión incompleta del combustible. Los procesos de piro-síntesis y pirolisis explican la formación de PAH en la combustión. Los PAH contribuyen a la formación de las partículas de hollín.

Entre los hidrocarburos se pueden encontrar distintos compuestos oxigenados como alcoholes, fenoles y derivados, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y derivados, los cuales no se encuentran en los combustibles pero aparecen en etapas intermedias de la combustión. Estos compuestos tienen el potencial de formar ozono (smog fotoquímico) en capas bajas de la atmósfera. El

formaldehído, acetaldehído y propionaldehído son responsables del 40% de este fenómeno.

1.3.1.3 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno se los generaliza como NO_x y se refiere en gran parte al óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido nitroso (N₂O).

La formación de óxido nítrico (NO) en la combustión se debe a la oxidación del nitrógeno (N₂) en temperaturas locales elevadas. Se forma NO cuando existe dosados pobres o cercanos al dosado estequiométrico, una elevada presión de inyección y adelanto a la inyección.



La formación de dióxido de nitrógeno NO₂ en la combustión sucede cuando las moléculas de NO se propagan hacia zonas ricas en HO₂, las cuales se encuentran a menor temperatura, produciéndose una reacción entre éstas.



La formación de óxido nitroso N₂O se debe a componentes volátiles de los combustibles como NH₃ y HCN. El N₂O se produce solo en mezclas pobres debido a la reducción de la temperatura de combustión.



1.3.2 EMISIONES EVAPORATIVAS

Las emisiones contaminantes evaporativas son las producidas por la evaporación del combustible y aceite del motor del vehículo. Estas emisiones evaporativas representan el 40% del total de las emisiones del vehículo. El 20% corresponde a las emisiones del depósito de combustible y el sistema de inyección. El 20% restante corresponde a los vapores del cárter y a los residuos de la combustión que escapan hacia el motor.⁹

Las emisiones evaporativas ocurren debido a condiciones cambiantes de temperatura y presión dentro los depósitos, cañerías y zonas por donde circulan el combustible y el aceite de motor.

⁹ Disponible en: <http://www.banrepcultural.org/node/92123>. Ingresado el 10 de noviembre de 2015.

CAPITULO II. REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES VEHICULARES

Las emisiones contaminantes de los vehículos, tanto gaseosas como evaporativas, se reducen mediante la utilización de sistemas de control electrónico y, principalmente, de técnicas de reducción de emisiones.

Las técnicas de reducción de emisiones se basan en sistemas de postratamiento de gases de escape como el convertidor catalítico, la recirculación de gases, la ventilación positiva del cárter, el control evaporativo de gases y la modificación en el diseño de la cámara de combustión del motor y la optimización de los sistemas de inyección y distribución.

2.1 CONTROL ELECTRÓNICO EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO MEDIANTE EL SENSOR DE OXÍGENO

El sistema de control del motor es el encargado de realizar la adaptación de los sistemas de inyección electrónica y de distribución variable, a las condiciones de operación del motor (transitorio o estacionario). Debe asegurar el correcto funcionamiento del motor, satisfacer la demanda de potencia y mantener las emisiones dentro de los límites establecidos en normas.

El sistema de control se compone de sensores, actuadores, cableado y la unidad de control electrónica. La unidad de control electrónico (ECU) procesa las medidas de parámetros de funcionamiento del motor proporcionados por los sensores, y tras realizar ciertos cálculos, decide las acciones de control a aplicar, mediante señales eléctricas, a los actuadores del motor.

El sensor de oxígeno es el principal sensor involucrado en el control de emisiones contaminantes del vehículo. Su función es controlar la correcta dosificación de la mezcla aire-combustible en condiciones de ralentí, aceleración parcial y plena carga. Mide la diferencia entre la presión parcial del oxígeno del aire atmosférico y la presión parcial del oxígeno de los gases de escape (Fig.2.1).

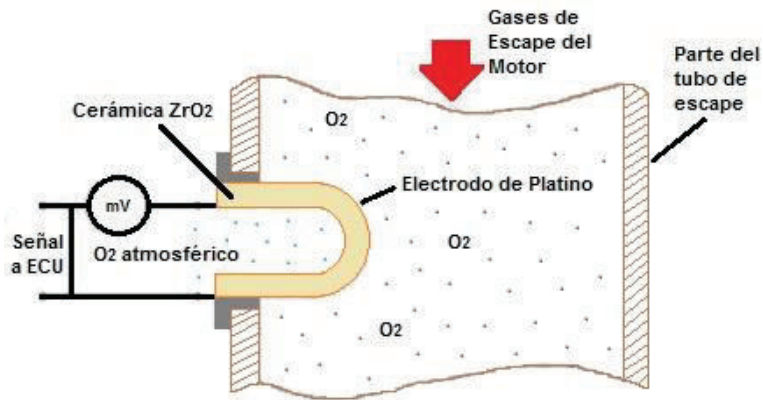


Fig.2.1. Esquema de funcionamiento del sensor de oxígeno.¹⁰

La información es enviada a la unidad de control, la cual considera si es necesario empobrecer o enriquecer la mezcla, para llegar al valor de $\lambda=1$. Una vez realizada las correcciones sobre la mezcla, el sensor de oxígeno, verifica nuevamente la cantidad de oxígeno en los gases de escape, informando a la unidad de control para realizar nuevas correcciones.

2.2 TECNICAS DE REDUCCION DE EMISIONES EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

Las emisiones contaminantes producidas por los motores de encendido provocado se pueden reducir modificando el diseño de ciertos componentes del motor y/o con sistemas de postratamiento de gases de escape.

2.2.1 REDUCCIÓN DE EMISIONES GASEOSAS

Los motores de encendido provocado de carga homogénea trabajan, generalmente, con dosado estequiométrico. En estas condiciones, el convertidor catalítico permite reducir drásticamente las emisiones de CO, HC y NO_x. Sin embargo, existen ciertas técnicas adicionales que disminuyen las emisiones contaminantes.

¹⁰ Adaptado de: MARTINEZ. J, Electrónica Automotriz y Control, EPN, Agosto 2012.

2.2.1.1 Convertidor catalítico: constitución, tipos y mantenimiento

El convertidor catalítico recibe los gases contaminantes de escape (CO, HC, NOx) y los transforma, mediante reacciones químicas, en gases no contaminantes, generalmente agua, nitrógeno y dióxido de carbono (Fig.2.2).

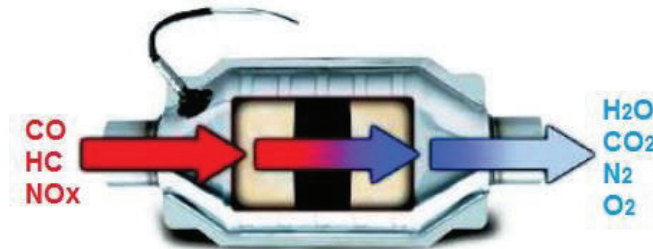


Fig.2.2. Esquema de funcionamiento del convertidor catalítico.¹¹

El convertidor catalítico se ubica después del colector de escape del motor (Fig.2.3). A temperaturas de entre 400 y 700°C, se realizan reacciones de oxidación y reducción debido al efecto catalítico de los compuestos del catalizador.

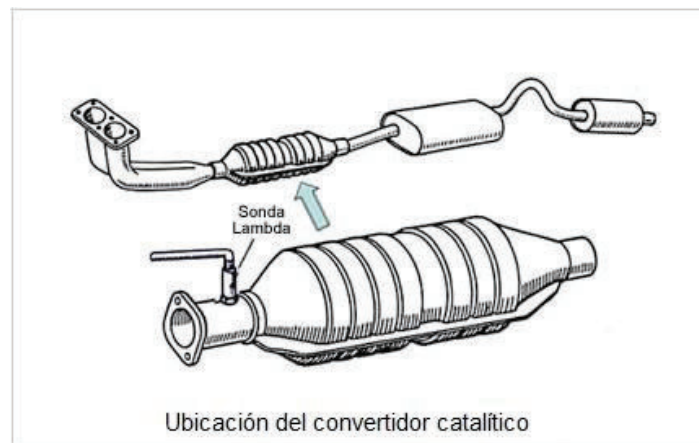


Fig.2.3. Ubicación del convertidor catalítico.¹²

Los gases de escape contaminantes dependen de la composición de la mezcla aire-combustible o del factor lambda. Se procura que la relación aire-combustible sea aproximadamente 14,7:1, esta relación coincide con $\lambda=1$.

¹¹ Adaptado de: http://prosil.com.mx/files/convertidor_catalitico_web.pdf. Ingresado el 5 de octubre de 2015.

¹² Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-emisiones/catalizador-escape.jpg>, Ingresado el 5 de octubre de 2015.

Con la utilización del convertidor catalítico, las emisiones de monóxido de carbono (CO) se reducen hasta casi llegar al 0% en condiciones de funcionamiento cercanas a $\lambda=1$ y en mezcla pobre (Fig.2.4). Las emisiones de hidrocarburos (HC) se reducen en condiciones de funcionamiento cercanas a $\lambda=1$ y en mezcla pobre (Fig.2.4). Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) se reducen en condiciones de funcionamiento cercanas a $\lambda=1$ y en ciertas condiciones de mezcla rica (Fig.2.4).

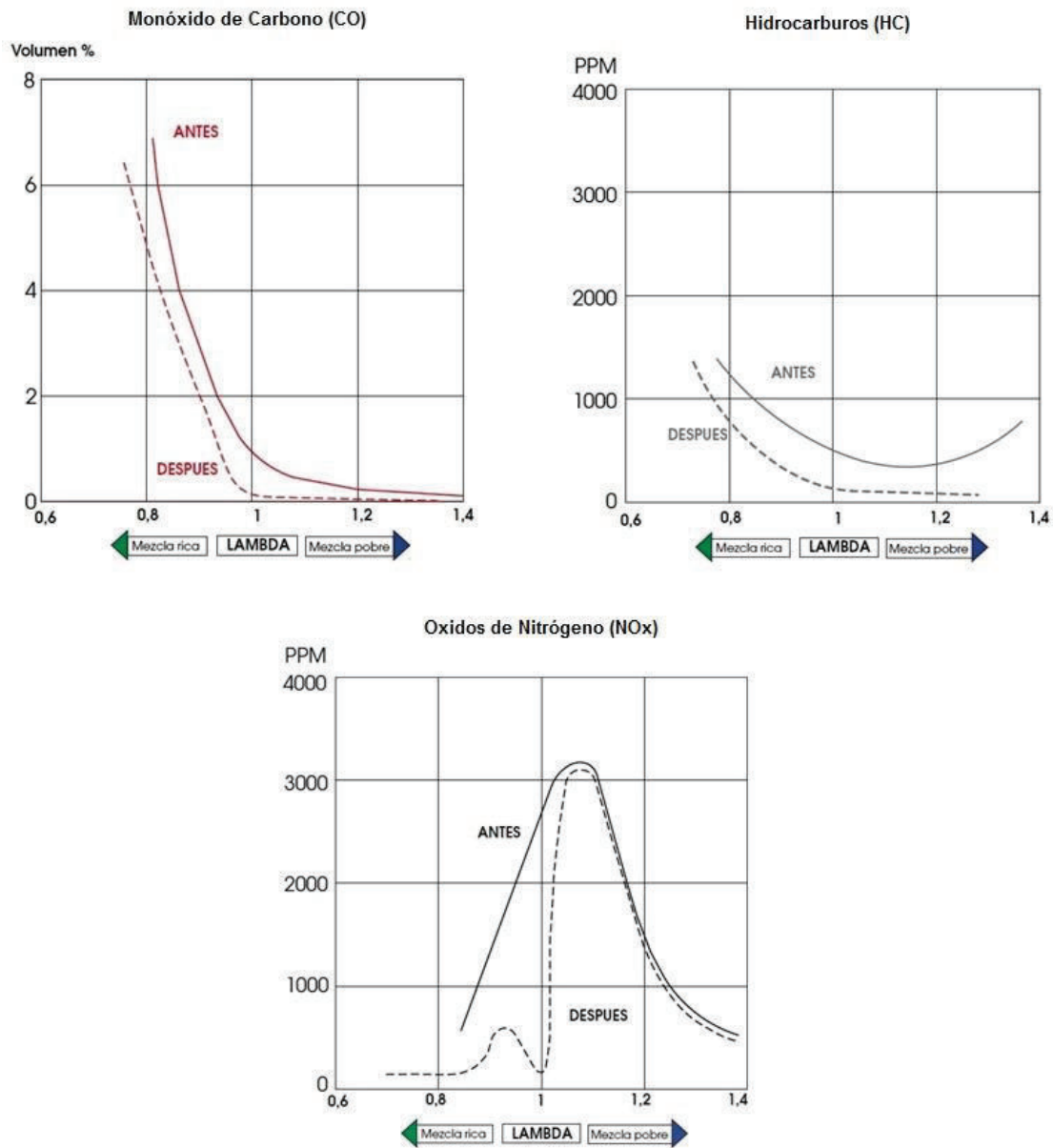


Fig.2.4. Emisiones de CO, HC y NOx, antes y después del convertidor catalítico.¹³

¹³ Disponible en: www.as-sl.com/pdf/en_que_consiste.pdf. Ingresado el 6 de octubre de 2015.

Un convertidor catalítico está constituido por un ingrediente activo (catalizador) depositado sobre un soporte y dispuesto en un envase metálico, similar al silenciador (Fig.2.5).

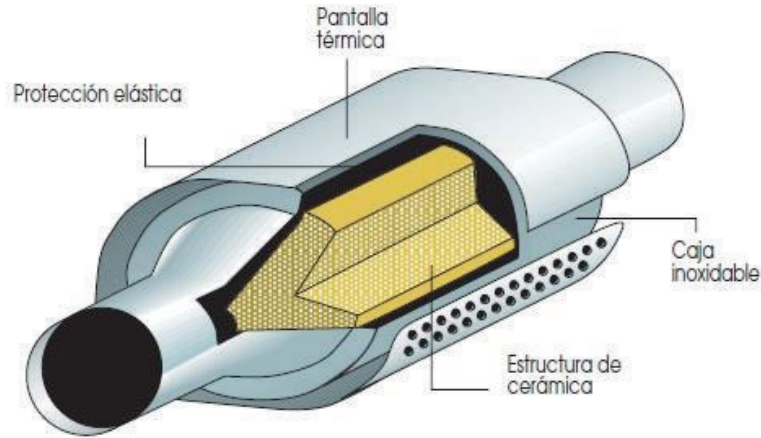


Fig.2.5. Constitución del convertidor catalítico.¹⁴

El soporte o monolito es la estructura del convertidor catalítico sobre la que se depositan los compuestos activos para las reacciones químicas. El material que lo compone debe poseer baja inercia térmica, resistencia mecánica, alta porosidad y baja pérdida de carga frente al flujo de los gases de escape, generalmente de cerámica o matriz metálica.

El monolito cerámico típico de los convertidores catalíticos se encuentra fabricado de cordierita porosa (2MgO , $2\text{Al}_2\text{O}_3$, 5SiO_2) dispuesto en canales cuadrados, triangulares o hexagonales, con una densidad de 60 a 70 canales por cm^2 (Fig.2.7). La superficie del monolito que se encuentra expuesta a los gases de escape es de 3 m^2 .

Los monolitos de matriz metálica consisten en estructuras de panal de abeja formadas por finas láminas de acero inoxidable corrugado de entre 0,04 y 0,05 mm de espesor, intercalados con láminas planas (Fig.2.6). El peso del monolito metálico es mayor que el cerámico, tiene menor inercia térmica y se enfrían en menos tiempo por lo que deben ser colocados lo más cerca posible del colector de escape.

¹⁴ Disponible en: www.as-sl.com/pdf/en_que_consiste.pdf. Ingresado el 7 de octubre de 2015.

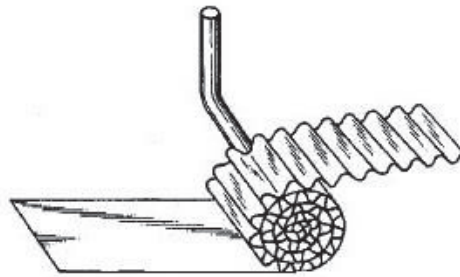


Fig.2.6. Formación de un monolito metálico de tipo espiral por enrollamiento de placas corrugada y lisa.¹⁵

Un recubrimiento de óxidos inorgánicos (óxido de aluminio u óxido de cerio) permite la deposición de las sustancias activas sobre la superficie de los canales del monolito (Fig.2.7).

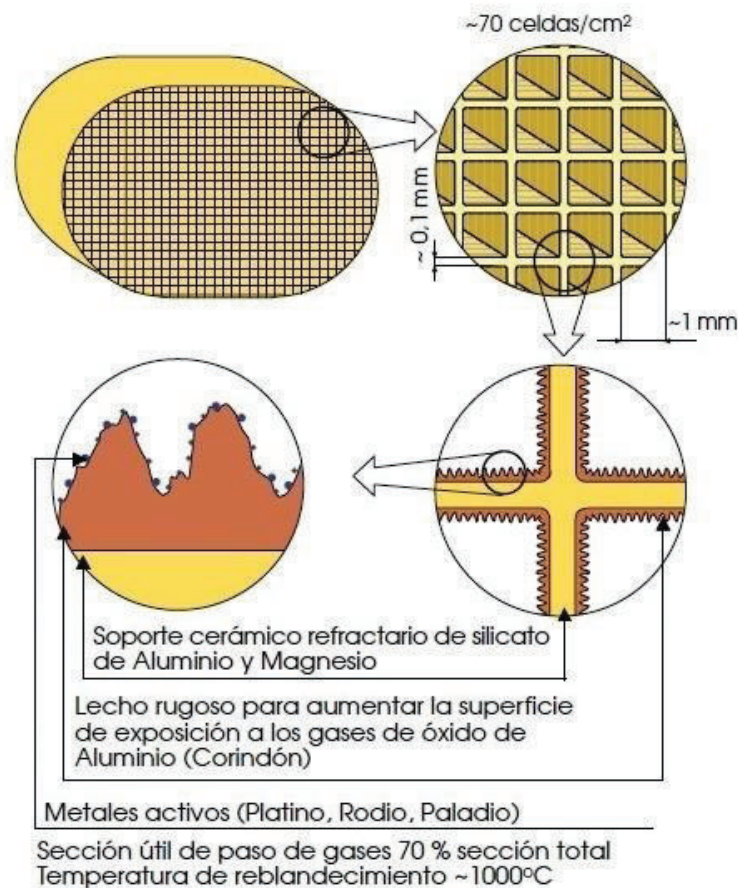


Fig.2.7. Detalle de los componentes del convertidor catalítico.¹⁶

¹⁵ Disponible en: www.icp.csic.es/cyted/Monografias/Monografias2001/A5-189.pdf. Ingresado el 9 de octubre de 2015.

¹⁶ Disponible en: www.as-sl.com/pdf/en_que_consiste.pdf. Ingresado el 7 de octubre de 2015.

El recubrimiento incrementa la superficie de contacto de los compuestos activos con los gases de escape, obteniendo superficies activas de 10.000 a 400.000 m²/dm³ de monolito.

Se utiliza metales preciosos como el Platino (Pt), Paladio (Pd), Rodio (Rh) y mezclas entre ellos como catalizador (Fig.2.7). El metal catalizador es entre el 0,1 y 0,15% del peso del sustrato, en partículas de tamaño de 50 a 100 nm.

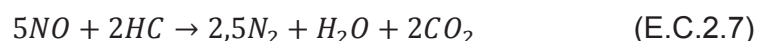
Para oxidar el monóxido de carbono y olefinas se utiliza el paladio. El platino es efectivo para la oxidación de compuestos aromáticos y parafinas. El rodio es efectivo en la reducción de óxidos de nitrógeno.

Los catalizadores de oxidación tienen como objetivo acelerar las siguientes reacciones:



Su función principal es oxidar, en presencia de oxígeno, el monóxido de carbono y los hidrocarburos de los gases de escape. Los catalizadores de oxidación empezaron a utilizarse en EE.UU. desde 1975, en motores de encendido provocado junto con otros dispositivos de reducción de NOx. Actualmente, se utilizan principalmente en motores de encendido por compresión y se denominan DOC (Diesel Oxidation Catalyst).

El catalizador de reducción tiene como objetivo acelerar la reacción de reducción de los NOx. Para que la reducción sea efectiva es necesario que los gases de escape provengan de una mezcla rica, sin oxígeno.



El catalizador de tres vías tiene como objetivo oxidar los CO y HC y reducir los NO_x de los gases de escape que provienen de la combustión de una mezcla estequiométrica, en un solo cuerpo (Fig.2.8).

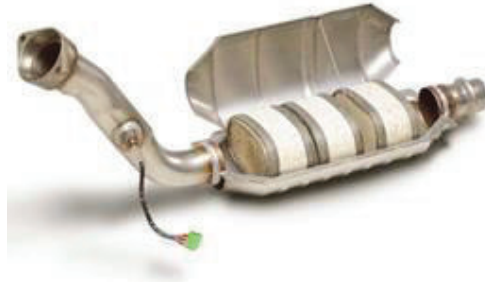


Fig.2.8. Convertidor catalítico de tres vías.¹⁷

Para la oxidación se utiliza una mezcla de Platino-Paladio (Pt + Pd) y para la reducción se utiliza Rodio (Rh), en proporciones entre 5:1 a 10:1.

La conversión de los tres contaminantes es superior al 80% cuando el dosado relativo se encuentra entre 0,998 y 1,007 (Fig. 2.9).

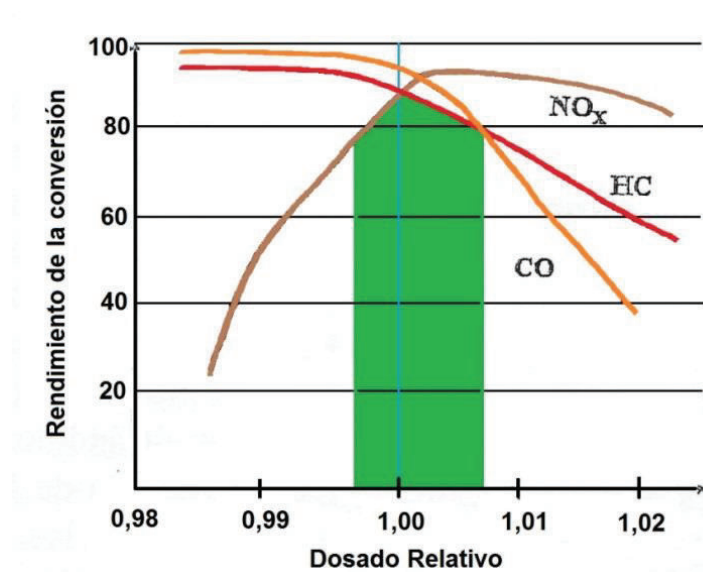


Fig.2.9. Rendimiento de la conversión de CO, HC y NO_x de un catalizador con mezcla homogénea.¹⁸

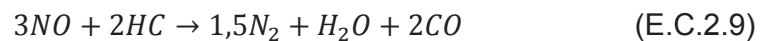
¹⁷ Disponible en: <http://image.made-in-china.com/2f0j10tBvEwDLGsukr/-Catalizador-de-tres-v-as.jpg>. Ingresado el 12 de octubre de 2015.

¹⁸ Fuente: Prof. F.Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 669.

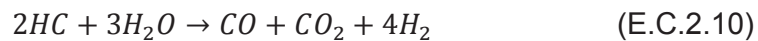
Durante el arranque en frío, el catalizador no es operativo debido a las bajas temperaturas en el escape. Para solucionar este inconveniente, se puede incorporar catalizadores precalentados con resistencias eléctricas, catalizadores de matriz metálica, catalizadores de arranque de baja inercia térmica o sistemas de retención de HC (adsorbente de silicalita o ceolita), que posteriormente se liberan al aumentar la temperatura en el escape.

Además de las principales reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar dentro del convertidor catalítico, se presentan otras reacciones químicas intermedias, de conversión, de reformado o menos probables, las cuales se indican a continuación.

Reacciones Intermedias:



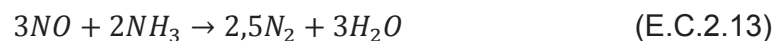
Reacción de Reformado de Hidrocarburos:



Reacción de Conversión:



Reacciones Menos Probables:



El convertidor catalítico es susceptible de impregnarse de impurezas provenientes de lubricantes del vehículo. Ciertos aditivos o componentes de lubricantes como azufre, zinc o fósforo se pueden depositar en la superficie del monolito impidiendo

la realización de las reacciones de oxidación y/o reducción. Además, aditivos de combustibles como plomo o arsénico envenenan el componente catalizador por lo que se reduce el rendimiento del mismo. Por lo tanto, es necesario mantener al convertidor catalítico libre de impurezas como lubricantes o combustibles de baja calidad y se deben comprobar fugas de aceite que puedan afectar el sistema de escape.

Para prevenir los daños causados por combustiones en mezclas ricas o pobres, es necesario comprobar el correcto funcionamiento del sensor de oxígeno, el sistema de inyección y el sistema de encendido.

Cuando el convertidor catalítico falla o reduce significativamente su rendimiento, la única solución es el cambio de este elemento. Dependiendo del fabricante, los materiales de constitución, la forma y su funcionamiento, el cambio del convertidor catalítico se lo realiza cada 80.000 Km o 100.000 millas¹⁹.

2.2.1.2 Diseño de la cámara de combustión

Las cámaras de combustión que tienen intersticios, ranuras y zonas estrechas son fuentes de hidrocarburos sin quemar, debido a que la mezcla se queda en los pequeños huecos donde no puede penetrar la llama.

Las cámaras de combustión compactas con menor relación superficie/volumen tienen menos volumen de mezcla en las zonas más alejadas del frente de llama, lo que lleva a menos emisiones de HC.

2.2.1.3 Sistema de formación de la mezcla

Los sistemas de inyección multipunto ofrecen mejor atomización y mezcla del combustible con el aire, mejor reparto del dosado entre los cilindros y una mayor precisión en el control de la mezcla. Se asegura un ajuste de la mezcla que reduce emisiones de HC y CO.

¹⁹ Disponible en:

https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1036430, pág.7. Ingresado el 13 de octubre de 2015.

Los sistemas de inyección directa en MEP tienen como objeto trabajar con mezclas pobres con alta dilución de aire que favorece la reducción de CO, HC y NOx en cargas parciales.

2.2.1.4 Sistema de distribución

El sistema de distribución, especialmente el cruce de válvulas, afecta al vaciado de los gases residuales del ciclo anterior. El sistema de distribución variable mantiene las emisiones de HC y NOx en valores razonablemente bajos al actuar sobre el ángulo de apertura y cierre de las válvulas.

2.2.1.5 Recirculación de gases de escape (EGR)

La recirculación de gases de escape (Engine Gas Recirculation) se utiliza para reducir la temperatura de la llama y la formación de NO, mediante el incremento de la cantidad de gases residuales retenidos en el cilindro y en el conducto de admisión a través de una válvula (Fig.2.10).

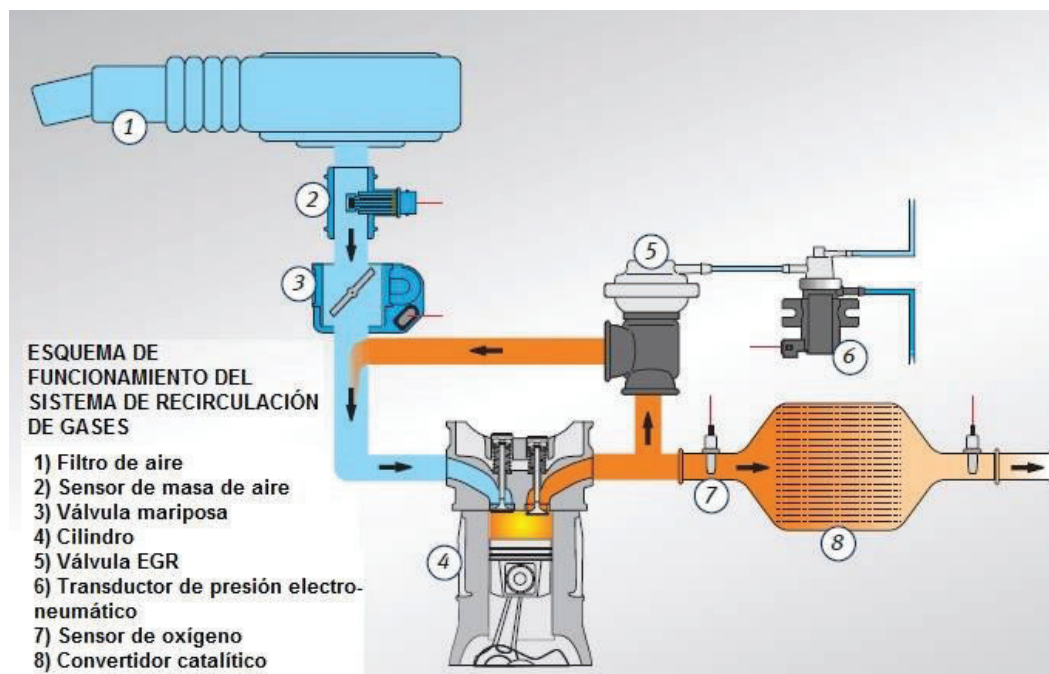


Fig.2.10. Esquema de funcionamiento de la recirculación de gases EGR.²⁰

²⁰ Disponible en: <http://www.repromotor.com/imagenes/EsquemaEGR.png>, Ingresado el 21 de septiembre de 2015.

Los efectos de la recirculación de gases, dentro del cilindro, son el aumento del calor específico debido a la concentración de CO₂ y vapor de agua, y la reducción de la velocidad de combustión por compuestos inertes.

2.2.2 REDUCCIÓN DE EMISIONES EVAPORATIVAS

Las emisiones de HC, producidas por la evaporación del combustible en el depósito y conductos por donde circula el mismo, se reducen utilizando ciertos dispositivos

2.2.2.1 Ventilación positiva del cárter (PCV)

Los gases provenientes del cárter del motor se eliminan dirigiéndolos a través de una válvula hacia el conducto de admisión. La válvula PCV se acciona debido al vacío del motor a altas revoluciones y permite que los gases de escape fluyan al conducto de admisión (Fig.2.11). Entre el cárter y la válvula PCV, se encuentra un decantador de aceite, el cual recupera las pequeñas gotas de aceite que hubiere en los gases.

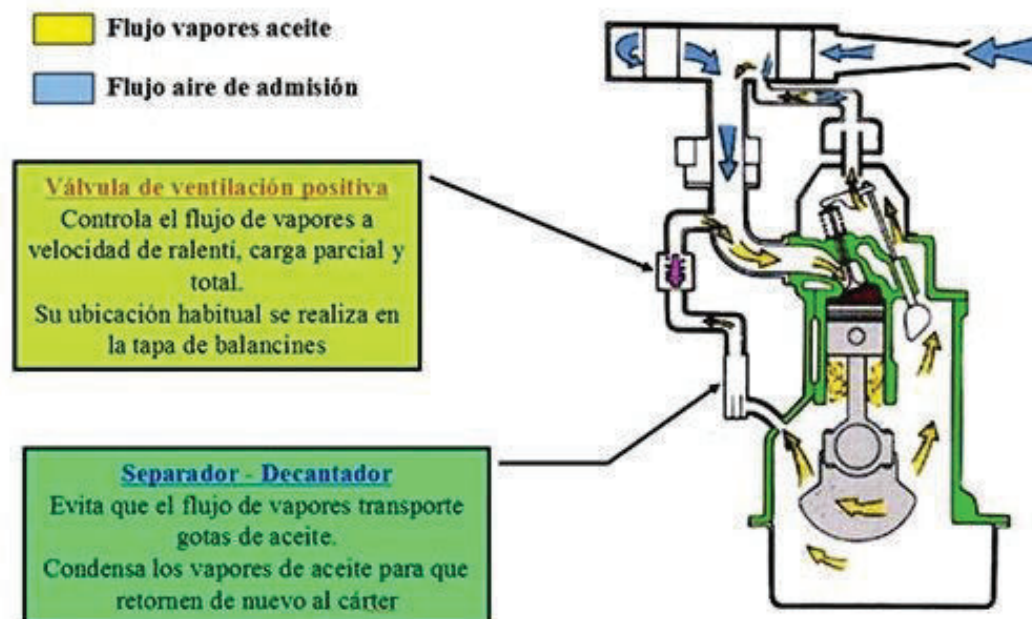


Fig.2.11. Esquema de funcionamiento de la válvula de ventilación positiva del cárter.²¹

²¹ Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-emisiones/ventilacion-positiva-carter.jpg>.
Ingresado el 21 de septiembre de 2015.

2.2.2.2 Sistema de control evaporativo de gases (EVAP)

En el depósito de combustible se generan vapores combustibles peligrosos mientras el vehículo se encuentra apagado. Estos vapores se almacenan en un depósito adyacente al motor (canister), el cual contiene carbón activado que los filtra y condensa.

El combustible acumulado en el canister, es utilizado cuando el vehículo arranca, enviándolo al colector de admisión. La unidad de control del motor regula la válvula del canister para dejar pasar el combustible acumulado, solo cuando sea necesario (Fig.2.12).

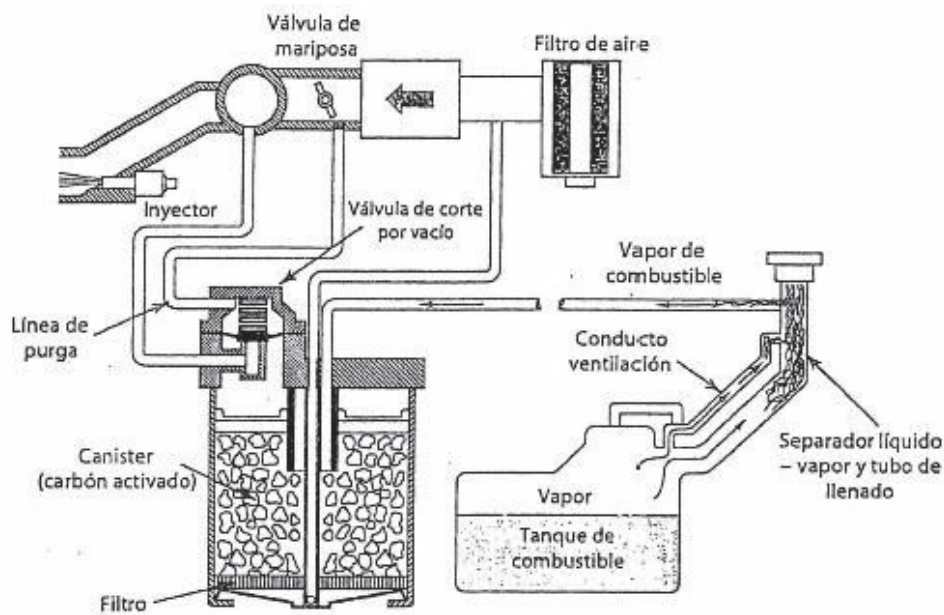


Fig.2.12. Esquema de funcionamiento del sistema de control evaporativo de gases.²²

²² Fuente: Prof. F.Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), Motores de combustión interna alternativos. Primera Edición. Editorial Reverté. Pág. 660.

CAPITULO III. NORMATIVA Y MEDICIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES VEHICULARES

La necesidad de regular la cantidad y calidad de emisiones de los vehículos, ha dado lugar a la creación de normas que regulen éstas emisiones. En este capítulo se darán a conocer las normas de emisiones vehiculares que se han implementado en varios países del mundo y los límites establecidos para el cumplimiento de las mismas.

Adicionalmente, se describirá el trabajo que realiza la Revisión Técnica Vehicular en la ciudad de Quito. Donde uno de sus propósitos es verificar el cumplimiento de los límites de emisiones establecidos.

Finalmente, se detallarán los ciclos de pruebas que se utilizan para simular el funcionamiento del vehículo en carretera y los equipos que miden las emisiones en estas condiciones.

3.1 NORMATIVA DE EMISIONES CONTAMINANTES VEHICULARES

Las normas de emisiones vehiculares establecen los límites de contaminantes que pueden emitir los vehículos como producto del proceso de combustión. Los contaminantes regulados en las normas de emisiones vehiculares a gasolina comprenden los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos.

En varios países del mundo se han establecido normas para el control de emisiones vehiculares. Las principales normativas provienen de la Unión Europea (normas EURO) y Estados Unidos (EPA); le siguen las normas regionales de México (NOMS), Chile (Decreto 211), Ecuador (INEN), entre otros.

3.1.1 NORMAS EURO

Las normas Euro definen los límites aceptables de emisiones contaminantes vehiculares dentro de los países miembros. Estas normas se han establecido a

través de la Directiva 70/220/CEE²³ emitida por la Unión Europea, desde 1992 con la norma Euro 1 hasta su última actualización la Euro 6 de 2014.

Las normas Euro se aplican a la mayoría de vehículos como automóviles livianos, camiones, trenes y tractores, excepto barcos y aviones. Para la aplicación de las normas, se ha catalogado a los vehículos livianos de la siguiente manera:

- M1: Para vehículos de transporte de pasajeros de máximo 8 asientos además del asiento del conductor.
- N1: Para vehículos de transporte de carga, que no exceda las 3,5 toneladas métricas de peso máximo.

En la Tabla 3.1 se muestra la cronología de los límites de emisiones contaminantes para vehículos a gasolina.

Tabla 3.1. Límites máximos de emisiones para vehículos a gasolina.²⁴

LÍMITES MÁXIMOS DE EMISIONES PARA VEHÍCULOS A GASOLINA							
NORMA TIPO	FECHA EMISIÓN	CATEGORIA VEHICULO	CO (en gr/Km)	HC (en gr/Km)	NOx (en gr/Km)	HC + NOx (en gr/Km)	PM (en gr/Km)
EURO 1	jul-92	M1	2,72			0,97	
EURO 1	jul-92	N1	6,9			1,7	
EURO 2	ene-96	M1	2,2			0,5	
EURO 2	ene-96	N1	5			0,8	
EURO 3	ene-00	M1	2,3	0,2	0,15		
EURO 3	ene-00	N1	5,22	0,29	0,21		
EURO 4	ene-05	M1	1	0,1	0,08		
EURO 4	ene-05	N1	2,27	0,16	0,11		
EURO 5	sep-09	M1	1	0,1	0,06		0,005
EURO 5	sep-09	N1	2,27	0,16	0,082		0,005
EURO 6	sep-14	M1	1	0,1	0,06		0,005
EURO 6	sep-14	N1					

3.1.2 NORMAS EPA

La Ley de Aire Limpio (CAA en inglés), establecida en 1970, regula las emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles. Esta ley autoriza a la Agencia de Protección Medioambiental (EPA en inglés) a establecer las normas que regulan las emisiones de contaminantes vehiculares peligrosos para la salud pública.

²³Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=ES>. Ingresado el 14 de septiembre de 2015.

²⁴ Adaptado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Normativa_europea_sobre_emisiones. Ingresado el 14 de septiembre de 2015.

Para la aplicación de las normas de regulación de emisiones, se ha clasificado a los vehículos según su peso en vehículos ligeros (LDV en inglés), camiones ligeros (LDT en inglés), entre otros más pesados. En la Tabla 3.2 se muestran los límites de emisiones contaminantes para éste tipo de vehículos, sin incluir los vehículos categorizados de baja emisión o híbridos.

Tabla 3.2. Límites máximos de emisiones para vehículos y camiones ligeros.²⁵

LIMITES MÁXIMOS DE EMISIONES PARA VEHÍCULOS Y CAMIONES LIGEROS							
TIPO VEHICULO	VIDA UTIL	NMOG (gr/mi)	NOx (gr/mi)	CO (gr/mi)	FORMALDEHÍ DOS (gr/mi)	PM (gr/mi)	
LDV	Intermedia	0,125	0,4	3,4	0,015		
	Completa	0,156	0,6	4,2	0,018		
LDT	LLDT	Intermedia	0,16	0,7	4,4	0,018	
		Completa	0,2	0,9	5,5	0,023	0,08
	HLDT	Intermedia	0,195	1,1	5	0,022	
		Completa	0,23	1	6,4	0,027	0,1
LLDT: Camión super ligero de 1 a 6000 libras de peso máximo HLDT: Camión ligero de 6000 a 8500 libras de peso máximo NMOG: Gas orgánico, no metano PM: Sólo se aplica a vehículos diésel							

3.1.3 NORMA INEN 2204:2002 LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE GASOLINA

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), ha establecido normas técnicas que regulan las emisiones contaminantes producidas por los vehículos automotores. La norma que aplica a los vehículos con motor de encendido provocado es la NTE INEN 2204:2002 Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina.

La norma NTE INEN 2204:2002 indica que toda fuente móvil con motor de gasolina, durante su funcionamiento en condición de marcha mínima o ralentí (prueba estática) y a temperatura normal de operación, no debe emitir al aire

²⁵ Disponible en: <http://www.epa.gov/otaq/standards/light-duty/ld-cff.htm>. Ingresado el 16 de septiembre de 2015.

monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) en cantidades superiores a las señaladas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralentí (prueba estática).²⁶

AÑO-MODELO	% de volumen de CO		ppm de volumen de HC	
	0 a 1500 msnm	1500 a 3000 msnm	0 a 1500 msnm	1500 a 3000 msnm
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

Para condiciones de prueba dinámica, aplicando el ciclo FTP-75 y transiente pesado (ciclos americanos), los límites de emisiones son los que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina (prueba dinámica)*, a partir del año modelo 2000 (ciclos americanos).²⁷

Categoría	Peso bruto del vehículo (Kg)	Peso del vehículo cargado (Kg)	CO (g/Km)	HC (g/Km)	NOx (g/km)	Ciclos de Prueba	Evaporativas (g/ensayo) SHED
Vehículos livianos			2,1	0,25	0,62	FTP-75	2
Vehículos medianos	=< 3860	=< 1700	6,2	0,5	0,75		2
		1700 - 3860	6,2	0,5	1,1		2
Vehículos pesados*	> 3860 =<6350		14,4	1,1	5	Transiente pesado	3
	> 6350		37,1	1,9	5		4

* en g/bHP-h (gramos/brake Horse Power-hora)

Para condiciones de prueba dinámica, aplicando el ciclo ECE-15+ EUDC (ciclos europeos), los límites de emisiones son los que se muestran en la Tabla 3.5.

²⁶ INEN (2002) Norma NTE INEN 2204:2002 (Primera Revisión) [Tabla], pág. 4. Disponible en: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/2204.pdf>. Ingresado el 15 de septiembre de 2015.

²⁷ INEN (2002) Norma NTE INEN 2204:2002 (Primera Revisión) [Tabla], pág. 5. Disponible en: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/2204.pdf>. Ingresado el 15 de septiembre de 2015.

Tabla 3.5. Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina (prueba dinámica) *, a partir del año modelo 2000 (ciclos europeos).²⁷

Categoría	Peso bruto del vehículo (Kg)	Peso de referencia (Kg)	CO (g/Km)	HC + NOx (g/Km)	Ciclos de Prueba	Evaporativas (g/ensayo) SHED
M1*	=< 3500		2,72	0,97	ECE 15 + EUDC	2
M1**, N1		< 1250	2,72	0,97		2
		> 1250 < 1700	5,17	1,4		2
		> 1700	6,9	1,7		2
* Vehículos que transportan hasta 5 pasajeros más el conductor y con un peso bruto del vehículo menor o igual a 2,5 toneladas.						
** Vehículos que transportan más de 5 pasajeros más el conductor o cuyo peso bruto del vehículo exceda de 2,5 toneladas.						

3.2 REVISIÓN TÉCNICA VEHICULAR

El objetivo de la Revisión Técnica Vehicular (RTV) es el de garantizar las condiciones mínimas de seguridad de los vehículos, basadas en los criterios de diseño y fabricación de los mismos verificando que cumplan con las normas técnicas y jurídicas, así como el de asegurar que se mantenga un nivel de emisiones contaminantes por debajo de los límites máximos establecidos en las regulaciones vigentes.

3.2.1 ANTECEDENTES

El Instituto Ecuatoriano de Normalización estableció, en 2003, la norma técnica NTE INEN 2349:2003 que regula los procedimientos de revisión técnica vehicular obligatoria. Sin embargo, en la actualidad solo existen centros de Revisión Técnica Vehicular en Quito, Cuenca y Guayaquil.

La Revisión Técnica Vehicular en la ciudad de Quito, estuvo a cargo de la Corporación Municipal para el Mejoramiento del Aire de Quito (Corpaire) desde el 2003. Se crearon centros de revisión en las administraciones zonales más representativas. A partir del 22 de abril de 2013, la Revisión Técnica Vehicular de Quito, se encuentra dentro de las competencias de la Agencia Metropolitana de Tránsito (AMT), la cual fue creada mediante Resolución Administrativa A0006

emitida por el Dr. Augusto Barrera G., Alcalde del DMQ.²⁸ La cual goza de plena autonomía administrativa, financiera y funcional, se encuentra adscrita a la Secretaría de Movilidad del MDMQ y tiene la potestad de controlar el transporte terrestre, tránsito y seguridad vial del Distrito Metropolitano de Quito.

3.2.2 PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN VEHICULAR (RTV)

La Revisión Técnica Vehicular, en la ciudad de Quito, se la puede realizar en cualquiera de los siguientes centros de revisión: Carapungo, Florida, San Isidro del Inca, Los Chillos, Guajaló, Guamaní.

El proceso de RTV inicia con la identificación del vehículo (marca, modelo, número de chasis o VIN, número motor, color y placa). La RTV se realiza sin la presencia del propietario o conductor del vehículo a excepción de casos especiales y siempre bajo la autorización y supervisión del Jefe de Centro de Revisión y Control Vehicular.

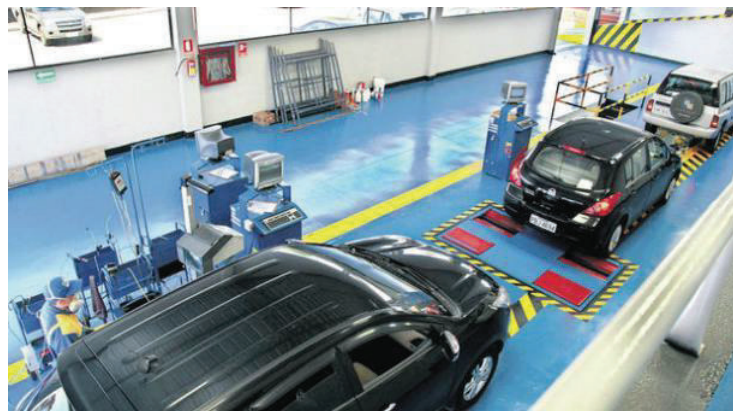


Fig.3.1. Centro de revisión vehicular en Quito.²⁹

3.2.2.1 Equipamiento de inspección

Los equipos necesarios para la revisión técnica vehicular de acuerdo a la norma NTE INEN 2349:2003 son:

A. *RTV vehículos livianos:*

- Regloscopio, luxómetro

²⁸ Disponible en: <http://www2.revisionquito.gob.ec/index.php/sample-sites-2/base-legal-3>. Ingresado el: 15 de septiembre de 2015.

²⁹ Disponible en: http://www.elcomercio.com/files/article_main/uploads//2014/05/21/537d0adead28a.jpg, Ingresado el 22 de septiembre de 2015.

- Alineador al paso
- Frenómetro de rodillos
- Foso de inspección
- Banco de suspensiones
- Sonómetro Integral ponderado
- Opacímetro y analizador de gases, según el tipo de motor

B. *RTV vehículos pesados:*

- Regloscopio
- Alineador al paso
- Frenómetro
- Foso de inspección
- Detector de holguras
- Sonómetro Integral ponderado
- Opacímetro y analizador de gases, según el tipo de motor

C. *Taxis:*

- Todo el equipo descrito en el punto A. más un verificador de taxímetros.

D. *Motos y bicimotos:*

- Regloscopio
- Analizador de gases
- Frenómetro

3.2.2.2 Métodos de inspección

Los métodos de inspección de vehículos utilizados en la RTV, son los siguientes:

- *Inspección visual:* En esta inspección se examina visualmente los elementos del vehículo (ruidos o vibraciones anormales, holguras o puntos de corrosión, soldaduras mal realizadas en determinados componentes, fisuras, roturas o adaptaciones anti técnicas, etc.) y se verifica su conformidad (Fig.3.2). Esta inspección da como resultado la introducción en el sistema de cómputo de los defectos visuales.



Fig.3.2. Inspección visual.³⁰

- *Inspección mecatrónica:* Esta inspección se realiza con la ayuda de instrumentos mecatrónicos, electromecánicos y electrónicos de acuerdo a la Norma INEN NTE 2349:2003. Estos instrumentos son: Opacímetro para medida de emisión de humo (motores de encendido por compresión), analizadores de gases de escape (motores de encendido provocado), tacómetro, sonómetro, frenómetro, luxómetro y alineación de las luces altas y bajas, alineador de dirección al paso, banco de suspensión y profundímetro para comprobar el labrado de los neumáticos (Fig.3.3). Las mediciones se comparan posteriormente con los rangos correspondientes y se convierten en defectos calificados.



Fig. 3.3. Inspección mecatrónica.³¹

³⁰ Disponible en: http://paper.elcomercio.com/uploads/edicio-062300011ADF40D5-41A5-4C3A-B8EC-968DAFD41825_07022015_/E8E7FB78-AF2E-4B12-AEF5-45E83E87A5F6.jpg, Ingresado el 22 de septiembre de 2015.

³¹ Disponible en: <http://www.notimundo.com.ec/uploads/cache/8/83/831/831e/dsc00837-1423095253-831ed6f98c16471b9ce033d627e0234e.jpg>, Ingresado el 22 de septiembre de 2015.

3.2.2.3 Calificación de inspección

Los defectos que presentaren los vehículos automotores son calificados según su nivel de peligrosidad, en las siguientes categorías:

- *Defectos tipo I:* Son aquellos que no involucran un riesgo inminente para la seguridad de los ocupantes del vehículo, para las demás personas y/o para el ambiente, pero que podrían, posteriormente, convertirse en defectos tipo II o tipo III, debido al deterioro natural o provocado. No son reconsiderados en las presentaciones subsecuentes del mismo período de revisión.
- *Defectos tipo II:* Son aquellos que implican un riesgo potencial para la seguridad de los ocupantes del vehículo, para las demás personas y/o para el ambiente, si es que están sumados a otros defectos de la misma especie. Serán reconsiderados en las presentaciones subsecuentes del mismo período de revisión pudiendo desaparecer o cambiar a tipo I o III.
- *Defectos tipo III:* Son aquellos que representan un riesgo inminente para la seguridad de los ocupantes del vehículo, para las demás personas y/o para el ambiente, lo que a su vez genera la obligación de llevar nuevamente el vehículo al centro de RTV para comprobar que el defecto ha sido corregido.

Una vez finalizada una inspección, tanto visual como mecatrónica, la aplicación de línea comunica los datos de la revisión (datos del vehículo, de la línea de inspección, código del defecto, valor de medida, calificación, posición del defecto encontrado) a una aplicación informática, la que califica las medidas, comparándolas con una tabla de rangos para defectos no visuales y con un sistema de valoración de defectos visuales. Una vez calificadas las medidas y generados los defectos, se procede a discriminar el estado de la revisión (aprobada, condicional o rechazada).

El resultado de una revisión vehicular puede ser:

- **APROBADA:** Con un conjunto de defectos con calificación menor al límite de rechazo.
- **CONDICIONAL:** Con un conjunto de defectos con calificación mayor al límite de rechazo. El vehículo debe regresar a cualquiera de los centros de

revisión y control vehicular, dentro de un lapso de tiempo perentorio determinado en las regulaciones vigentes, habiendo reparado al menos aquellos defectos que lo hicieron reprobar (defectos tipo III).

- **RECHAZADA:** Cuando se han calificado 4 (cuatro) revisiones sucesivas como condicional, y se presupone que el vehículo no puede ser reparado presentando gran riesgo para la seguridad pública, por lo que el mismo debe ser retirado de circulación.

3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES VEHICULARES

La medición de las emisiones vehiculares se las realiza mediante pruebas o ensayos que simulan el comportamiento del motor o del vehículo. Las pruebas se ejecutan durante el funcionamiento del motor en ciertas condiciones de funcionamiento estacionario o en un ciclo dinámico de variación continua de par motor y régimen de giro.

Los ciclos de pruebas dinámicos utilizan un dinamómetro de chasis y el sistema de muestreo de volumen constante para la medición de emisiones. Varias organizaciones en el mundo han desarrollado sus propios ciclos dinámicos, los cuales difieren en distancia, tiempo, velocidad promedio, velocidad máxima y otras condiciones ambientales.

3.3.1 TIPOS DE PRUEBAS DE EMISIONES

La medición de emisiones contaminantes se la realiza, generalmente, en diferentes condiciones de funcionamiento del motor y en diferentes puntos de la curva característica del motor. Los ensayos o pruebas para medir emisiones se realizan de dos formas: estacionarias o dinámicas.

3.3.1.1 Pruebas estacionarias

En las pruebas o ensayos estacionarios el motor se estabiliza en una condición de par motor – régimen de giro constante y se mide la concentración de emisiones y el caudal de los gases.

Se utiliza el procedimiento TSI (Two Speed Idle) para medir las emisiones de escape de hidrocarburos, monóxido de carbono y dióxido de carbono (Fig.3.4). El procedimiento se compone de dos fases:

- 1) Inspección o prueba a altas revoluciones del motor con valores de entre 2.200 a 2.800 rpm, por al menos 30s o hasta que el equipo de medición obtenga los datos requeridos.
- 2) Inspección o prueba en ralentí con valores de entre 350 a 1.200 rpm, por al menos 30s o hasta que el equipo de medición obtenga los datos requeridos.

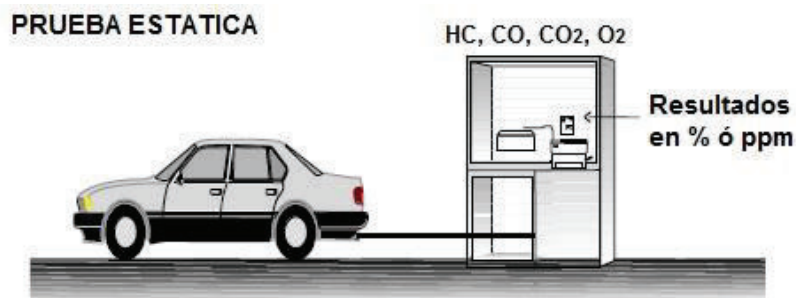


Fig.3.4. Prueba estática de emisiones.³²

La medición obtenida en las pruebas debe ser menor que los límites establecidos dependiendo del modelo, año y peso bruto del vehículo (GVWR: Gross Vehicle Weight Rating). El procedimiento TSI se aplica a los vehículos que no están equipados con el sistema de diagnóstico a bordo (OBD), generalmente son los vehículos de años 1994-1995 y anteriores.

3.3.1.2 Pruebas dinámicas

En las pruebas o ensayos dinámicos el motor se mantiene en condiciones variables de carga y régimen de giro, es decir, condiciones transitorias. Se miden las emisiones en bancos de rodillos con resistencia e inercia equivalente al vehículo y siguiendo un ciclo de conducción regulado (Fig.3.5). Se utiliza bancos de rodillos con frenos dinamométricos acoplados a inercias mecánicas o frenos dinámicos con inercia simulada de la masa del vehículo, los cuales actúan sobre las ruedas de tracción del vehículo simulando su conducción en carretera. Los frenos dinamométricos o dinámicos simulan la resistencia al avance

³² Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/2010_rep_fuentes_vehiculares.pdf, pg.3. Ingresado el 19 de octubre de 2015.

(aerodinámica y rodadura) y el peso del vehículo. De esta manera, el vehículo responde ante las variaciones de velocidad igual que su uso real en tráfico.

El resultado de la emisión total de gases se puede obtener acumulando un porcentaje del flujo de escape en una bolsa, utilizando el método de medición CVS. Los gases acumulados en la bolsa se analizan en composición y se calculan los g/ensayo y los g/km.

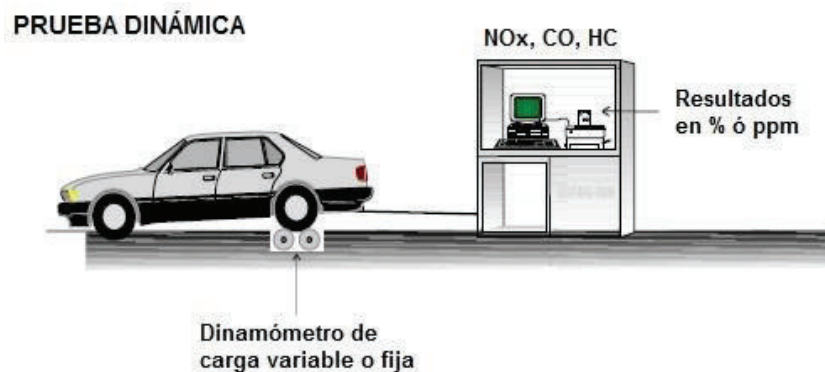


Fig.3.5. Prueba dinámica de emisiones.³³

3.3.2 EQUIPAMIENTO PARA CICLOS DE PRUEBAS DINÁMICAS

Las pruebas dinámicas requieren de equipamiento específico para simular el comportamiento del vehículo y analizar los gases de escape. Este equipamiento consiste en un dinamómetro de chasis, analizador de gases y otros equipos.

3.3.2.1 Dinamómetro de chasis

El dinamómetro de chasis es un equipo que permite medir la potencia y el par motor mediante el accionamiento de las ruedas motrices del vehículo a través de rodillos. Se lo utiliza para simular el funcionamiento en carretera del vehículo, incluyendo aceleraciones, desaceleraciones y paradas. Este equipo puede ser fijo o portátil.

³³ Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/2010_rep_fuentes_vehiculares.pdf, pg.3. Ingresado el 19 de octubre de 2015.

Un ventilador de flujo axial se utiliza para soplar aire al frente del vehículo con el objetivo de proporcionar refrigeración al motor y a los sistemas anticontaminación. El ventilador envía una corriente de aire sincronizada con la velocidad lineal del rodillo en contacto con las ruedas motrices.

3.3.2.2 Análisis de gases con muestreo de volumen constante (CVS)

El muestreo de volumen constante (CVS) se utiliza en los ciclos de pruebas dinámicos para obtener una muestra representativa de los gases de escape. Los gases de escape del vehículo son diluidos con el aire filtrado de la habitación de pruebas. Se utiliza una relación de dilución de los gases de escape con el aire de 10:1.

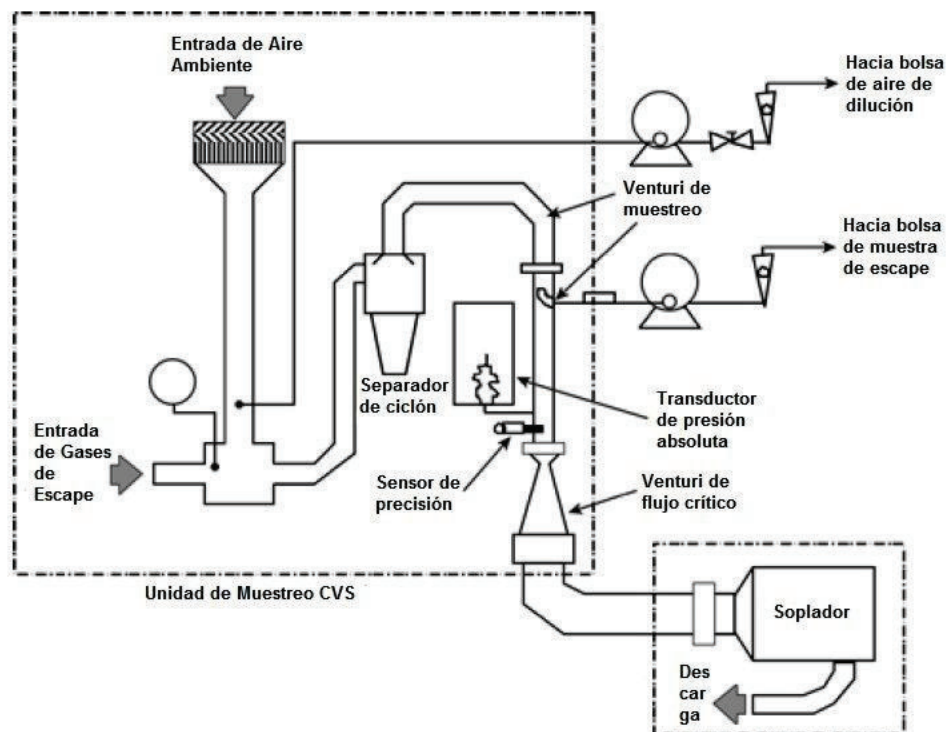


Fig.3.6. Esquema del sistema de muestreo de volumen constante utilizando un venturi de flujo crítico para la medición de la masa de emisiones.³⁴

³⁴ Adaptado de: http://nptel.ac.in/courses/112104033/pdf_lecture/lecture18.pdf, Figure 4.11, FID for HC measurement, page 12. Ingresado el 30 de septiembre de 2015.

Los gases de escape diluidos se extraen mediante un sistema de bomba de volumen constante, que emplea ya sea una bomba de desplazamiento positivo (PDP) o un tubo Venturi de flujo (CFV) y un ventilador (Fig.3.6).

Antes de que los gases de escape diluidos ingresen en el CFV o PDP, su temperatura es controlada dentro del $\pm 5^{\circ}\text{C}$ de la temperatura media de los gases durante la prueba, por un intercambiador de calor. De los gases diluidos, se retira continuamente una pequeña muestra que se van acumulando en bolsas de teflón. Este proceso integra la concentración de los contaminantes durante todo el ciclo de conducción. Las bolsas de muestras se analizan después de que se complete la prueba.

La masa de los contaminantes individuales se determina a partir de la concentración medida de la muestra en la bolsa, su densidad y el caudal de volumen total de gases de escape diluidos durante la prueba, obtenidos a través del CVS.

3.3.3 CICLOS DE PRUEBAS DINÁMICAS

Los ciclos de pruebas o de conducción consisten en simular las condiciones de velocidad, aceleración y carga del vehículo para evaluar el rendimiento del mismo, como las emisiones contaminantes, utilizando un dinamómetro de chasis. Los ciclos de conducción más comunes son probablemente el FTP-75, NEDC y el WLTP.

3.3.3.1 Ciclo FTP-75

El ciclo de pruebas FTP-75 o procedimiento de ensayo federal (FTP), ha sido desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y se utiliza para la certificación de emisiones y consumo de combustible en pruebas de conducción urbana de vehículos ligeros. El ciclo FTP-75 consta de las siguientes fases (Fig.3.7):

- 1) Fase transitoria de arranque en frío, a temperatura ambiente de 20°C a 30°C , por un tiempo de 0 a 505 segundos.
- 2) Fase de estabilizado, por un tiempo de 506 a 1372 segundos.

- 3) Parada en caliente, por un tiempo mínimo de 540 segundos y máximo de 660 segundos.
- 4) Fase transitoria de arranque en caliente, con una duración de 0 a 505 segundos.

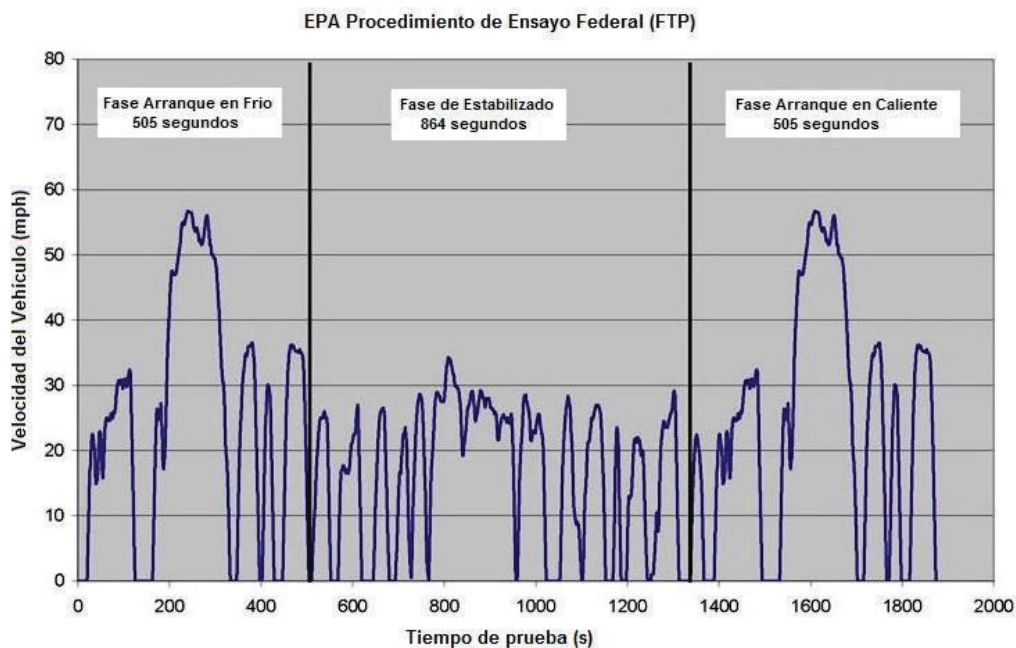


Fig.3.7. EPA procedimiento de ensayo federal (FTP).³⁵

El ciclo de pruebas FTP-75 tiene una duración de 1874 segundos, una distancia total recorrida de 11,04 millas (17,77 km), una velocidad promedio de 21,19 mph (34,12 km/h) y una velocidad máxima de 56,7 mph (91,25 km/h).

Las emisiones de gases de escape en cada fase se recogen en una bolsa de teflón independiente, se analizan y su medición se expresa en g / milla (g / km). En Estados Unidos, se aplican factores de ponderación a las emisiones para agregar una corrección a la frecuencia en la que se llevaría a cabo un ciclo de pruebas en el mundo real. Los factores de ponderación son 0,43 para la fase de arranque en frío, 1.0 para la fase de "estabilizado" y 0,57 para la fase de arranque en caliente.

³⁵ Adaptado de: <http://www3.epa.gov/otaq/standards/images/lightduty/emission-reference-guide-ftp.jpg>. Ingresado el 20 de octubre de 2015.

Además del ciclo FTP-75, los vehículos a partir de los modelos año 2000, deben ser examinados en dos Procedimientos de Ensayo Federal Suplementarios (SFTP) diseñados para abordar las deficiencias del FTP-75. Los procedimientos son: US06 y SC03.

US06

El Procedimiento de Ensayo Federal Suplementario (SFTP) US06 ha sido desarrollado para cubrir las falencias del ciclo FTP-75 en lo referente al comportamiento de conducción en alta aceleración, rápidas fluctuaciones de velocidad y comportamiento de conducción tras el arranque.

El SFTP US06 consiste en un ciclo de rápida aceleración y alta velocidad con una duración de 596 segundos, un recorrido de 8,01 millas (12,8 km), velocidad promedio de 48,4 mph (77,9 km/h) y velocidad máxima de 80,3 mph (129,2 km/h). Este ciclo incluye cuatro paradas a una temperatura ambiente de 20°C a 30°C (Fig. 3.8).

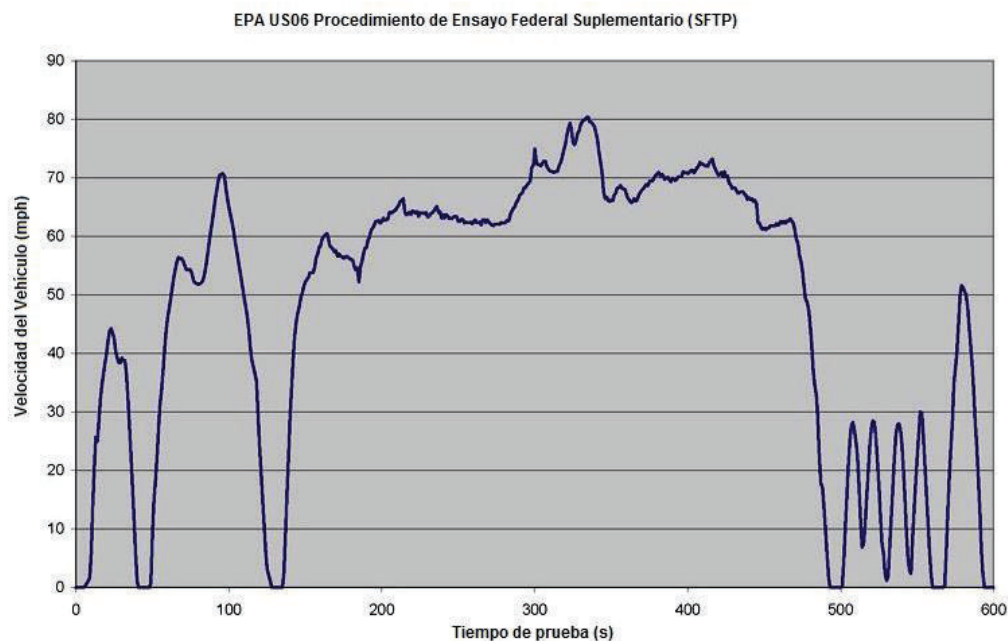


Fig.3.8. EPA procedimiento de ensayo federal suplementario (SFTP) US06.³⁶

³⁶ Adaptado de: <http://www3.epa.gov/otaq/standards/images/lightduty/emission-reference-guide-sftpus06.jpg>. Ingresado el 21 de octubre de 2015.

SC03

El procedimiento de ensayo federal suplementario (SFTP) SC03 ha sido desarrollado para representar la carga del motor y las emisiones asociadas con el uso de unidades de aire acondicionado en vehículos durante el ciclo de prueba FTP-75.

El SFTP SC03 predispone condiciones de temperatura ambientales de 35°C, con lo que se pone en funcionamiento el sistema de aire acondicionado del vehículo durante el ciclo de prueba. Tiene una duración de 596 segundos, un recorrido de 3,6 millas (5,8 km), velocidad promedio de 21,6 mph (34,8 km/h) y velocidad máxima de 54,8 mph (88,2 km/h). Este ciclo incluye cinco paradas con una temperatura alta del motor al inicio de la prueba (Fig. 3.9).

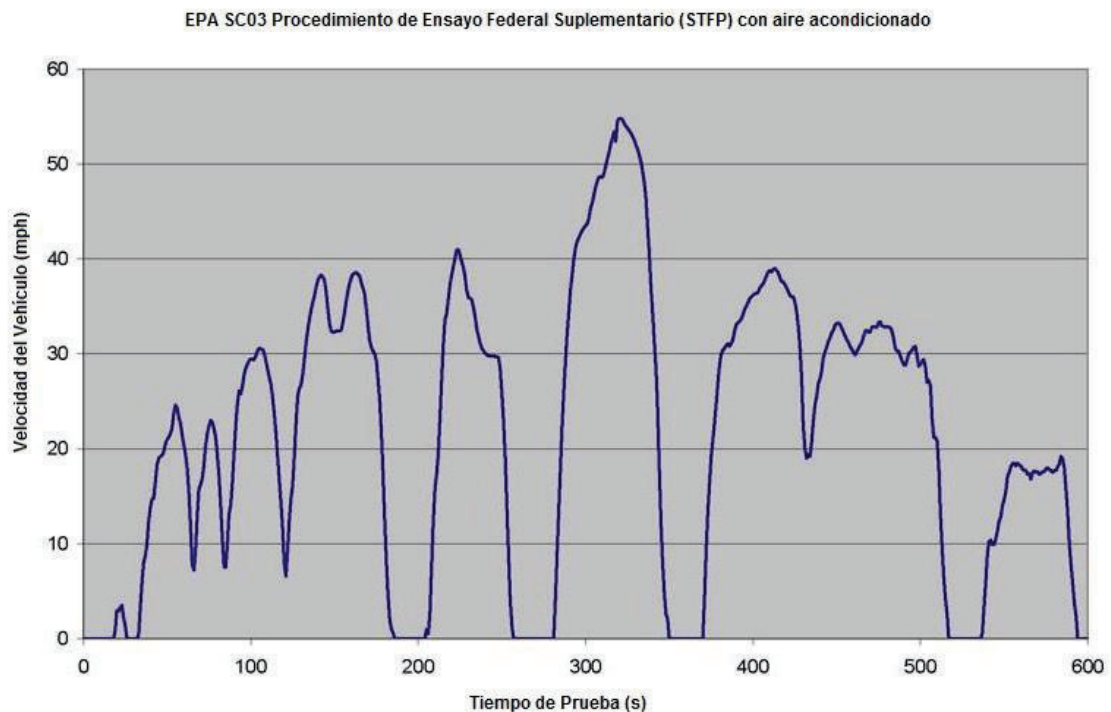


Fig.3.9. EPA procedimiento de ensayo federal Suplementario (SFTP) SC03.³⁷

³⁷ Adaptado de: <http://www3.epa.gov/otaq/standards/images/lightduty/emission-reference-guide-sftp03.jpg>. Ingresado el 21 de octubre de 2015.

3.3.3.2 Ciclo IM240

El ciclo de pruebas IM240 ha sido desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental del Estados Unidos (EPA) para asegurar que los sistemas de control de emisiones vehiculares funcionen correctamente y que las emisiones se mantengan debajo de los límites permitidos.

La prueba IM240 está diseñada para parecerse a la conducción típica de la ciudad e incluye modos de conducción, tales como aceleración y desaceleración. Se caracteriza por su duración de 240 segundos, recorre una distancia de 1,96 millas (3,1 km), a una velocidad promedio de 29,4 mi/h (47,3 km/h) y una velocidad máxima de 56,7 mi/h (91,2 km/h) (Fig.3.10).

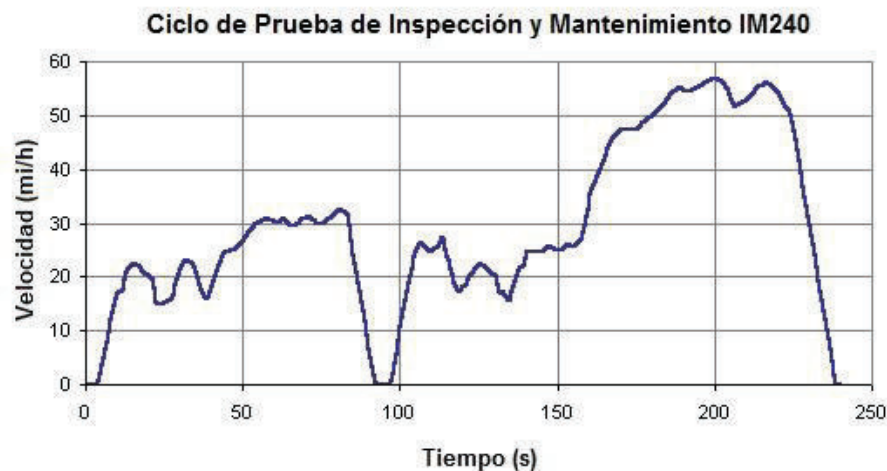


Fig.3.10. EPA ciclo de prueba de inspección y mantenimiento IM240.³⁸

La prueba IM240 se diferencia de la prueba FTP en la manera en que se mide las emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Durante la prueba, se capta toda la corriente de escape y se mide la masa total de las emisiones del vehículo (gramos de contaminante por millas conducidas). La medición de la masa es una de forma más precisa de medir el rendimiento de las emisiones de grandes y pequeños motores y están más directamente relacionados con la contribución que cada vehículo hace a la contaminación del aire. La IM240 también puede medir el ahorro de combustible.

³⁸ Adaptado de: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/images/im240.gif>. Ingresado el 26 de octubre de 2015.

3.3.3.3 Ciclo NEDC

El Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC) ha sido diseñado para evaluar los niveles de emisión de motores de automóviles y el ahorro de combustible en los vehículos de pasajeros. Se basa en la Directiva 98/69/CE que modifica a la Directiva 70/220/CE desarrolladas por el Parlamento Europeo y el Consejo del 13 de octubre de 1998.³⁹ El procedimiento de pruebas se encuentra definido en los Reglamentos 101⁴⁰ y 83⁴¹ de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE). Representa el uso típico de un vehículo en Europa.

El ciclo NEDC consiste en cuatro ciclos de conducción ECE-15 y un ciclo de conducción extra-urbano EUDC. Se la realiza en condiciones ambientales de temperatura (de 20°C a 30°C), en un dinamómetro de rodillos y con todas las cargas auxiliares apagadas.

ECE-15

El ciclo de conducción urbana ECE-15 (también conocido como UDC) se ha diseñado para representar las condiciones de conducción típicas de las ciudades de Europa. Se caracteriza por la baja carga del motor, baja temperatura de los gases de escape y una velocidad máxima de 50 km/h. El ciclo ECE-15 dura 195 segundos después de una distancia teórica de 994,03 metros, el cual se repite cuatro veces consecutivas (Fig. 3.11). La duración total es de 780 segundos (13 minutos) sobre una distancia teórica de 3976,1 metros y una velocidad promedio de 18,35 km/h.

EUDC

El ciclo de conducción extra-urbano EUDC se ha diseñado para representar un modo de conducción agresivo y de alta velocidad, generalmente, el modo de conducción en carretera. Se caracteriza por su velocidad máxima de 120 km/h,

³⁹ Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0069:19981228:ES:PDF>. Ingresado el 22 de octubre de 2015.

⁴⁰ Disponible en: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/updates/R101r3e.pdf>. Ingresado el 22 de octubre de 2015.

⁴¹ Disponible en: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R083r5e.pdf>. Ingresado el 22 de octubre de 2015.

aunque los vehículos de baja potencia están limitados a una velocidad máxima de 90 km/h. El ciclo EUDC dura 400 segundos (6 minutos y 40 segundos), la distancia teórica recorrida es de 6956 metros y una velocidad promedio de 62,6 km/h (Fig.3.11).

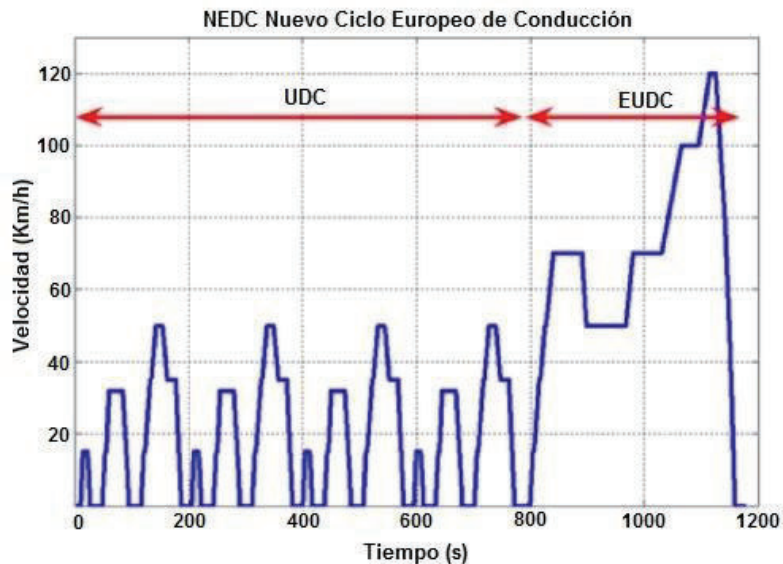


Fig.3.11. NEDC nuevo ciclo europeo de conducción.⁴²

El tiempo total de la prueba asciende a 1180 segundos con una velocidad promedio de 33,6 km/h. Algunas veces, el tiempo total del NEDC comprende los 1220 segundos, los que comprenden unos primeros 40 segundos con el vehículo parado y el motor apagado.

3.3.3.4 Ciclo WLTP

El procedimiento de pruebas de vehículos ligeros armonizado globalmente (WLTP) define una norma armonizada global que determina los límites de emisiones vehiculares, el consumo de combustible o energía y la autonomía eléctrica de vehículos ligeros. Está siendo desarrollado por el grupo de trabajo sobre contaminación y energía (GRPE) de la UNECE, además de expertos de Japón e India. Cuando esté finalizado, se espera que el ciclo WLTP reemplace al ciclo NEDC para las pruebas de homologación de vehículos ligeros.

⁴² Adaptado de: <http://www.libralato.co.uk/images/fig51.jpg>. Ingresado el 22 de octubre de 2015.

El procedimiento de pruebas proporciona una orientación estricta en cuanto a las condiciones de las pruebas en el dinamómetro y de carga en carretera (resistencia al movimiento), el cambio de marchas, peso total del vehículo (incluyendo equipamiento opcional, carga y pasajeros), la calidad del combustible, la temperatura ambiente y la selección de los neumáticos.

El procedimiento WLTP incluye tres ciclos de prueba aplicables a las categorías de vehículos de diferente relación potencia-masa (PWR). El parámetro PWR se define como la relación de la potencia nominal (W) / masa en vacío (kg). Los tres ciclos del procedimiento WLTP son los siguientes:

- 1) Clase 1: Vehículos de baja potencia con $PWR \leq 22$.
- 2) Clase 2: Vehículos con $PWR > 22$ y $PWR \leq 34$.
- 3) Clase 3: Vehículos de alta potencia con $PWR > 34$.

La mayoría de los vehículos actuales tienen relaciones potencia-masa de 40 a 70 PWR, por lo que pertenecen a la clase 3. Ciertos autobuses y furgonetas pueden pertenecer a la clase 2.

En cada clase, hay varias pruebas de conducción diseñadas para representar el funcionamiento real del vehículo en las carreteras urbanas y extra-urbanas. Las curvas de aceleración y de velocidad tienen una forma diferente en cada ciclo. La secuencia de las pruebas se encuentra restringida por la velocidad máxima del vehículo en cada ciclo.

Clase 1

El ciclo de pruebas de clase 1 (WLTC class 1) tiene periodos de baja y media velocidad, los cuales se realizan en secuencia de baja-media-baja (Fig.3.12). Si la velocidad máxima es < 70 km/h, la parte de velocidad media es reemplazada la de baja velocidad.

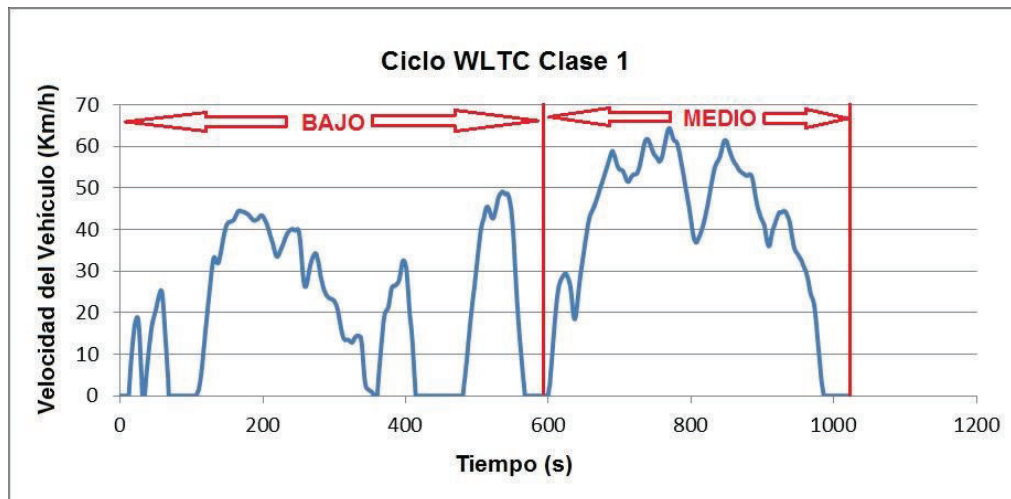


Fig.3.12. Ciclo WLTC clase 1.⁴³

Tabla 3.6. Parámetros del ciclo WLTC clase 1.⁴⁴

PARÁMETROS DEL CICLO WLTC CLASE 1			
	BAJO	MEDIO	TOTAL
Duración (s)	589	433	1022
Duración parada (s)	155	48	203
Distancia (m)	3324	4767	8091
% de paradas	26.3%	11.1%	19.9%
Velocidad máxima (km/h)	49.1	64.4	
Velocidad promedio sin paradas (km/h)	27.6	44.6	35.6
Velocidad promedio con paradas (km/h)	20.3	39.6	28.5
Aceleración mínima (m/s ²)	-1.0	-0.6	
Aceleración máxima (m/s ²)	0.8	0.6	

⁴³ Adaptado de: <http://www.car-engineer.com/wp-content/uploads/2012/12/WLTC-class1.png?46ac1a>. Ingresado el 23 de octubre de 2015.

⁴⁴ Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedures. Ingresado el 23 de octubre de 2015.

Clase 2

El ciclo de pruebas de clase 2 (WLTC Class 2) tiene tres periodos de baja, media y alta velocidad (Fig.3.13). Si la velocidad máxima es < 90 km/h, la parte de alta velocidad se sustituye con la parte baja velocidad.

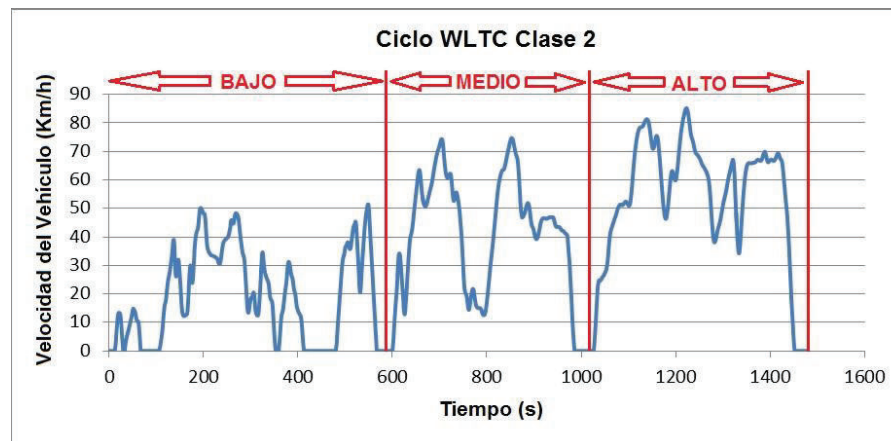


Fig.3.13. Ciclo WLTC clase 2.⁴⁵

Tabla 3.7. Parámetros del ciclo WLTC clase 2.¹⁰

PARÁMETROS DEL CICLO WLTC CLASE 2				
	BAJO	MEDIO	ALTO	TOTAL
Duración (s)	589	433	455	1477
Duración parada (s)	155	48	30	233
Distancia (m)	3132	4712	6820	14664
% de paradas	26.3%	11.1%	6.6%	15.8%
Velocidad máxima (km/h)	51.4	74.7	85.2	
Velocidad promedio sin paradas (km/h)	26	44.1	57.8	42.4
Velocidad promedio con paradas (km/h)	19.1	39.2	54	35.7
Aceleración mínima (m/s ²)	-1.1	-1.0	-1.1	
Aceleración máxima (m/s ²)	0.9	1.0	0.8	

⁴⁵ Adaptado de: <http://www.car-engineer.com/wp-content/uploads/2012/12/WLTC-class2.png?46ac1a>. Ingresado el 23 de octubre de 2015.

Clase 3

El ciclo de pruebas de clase 3 (WLTC Class 3) se divide en cuatro periodos de baja, media, alta y extra alta velocidad (Fig.3.14). Si la velocidad máxima es < 135 km/h, la parte de extra de alta velocidad se sustituye con la parte de baja velocidad.

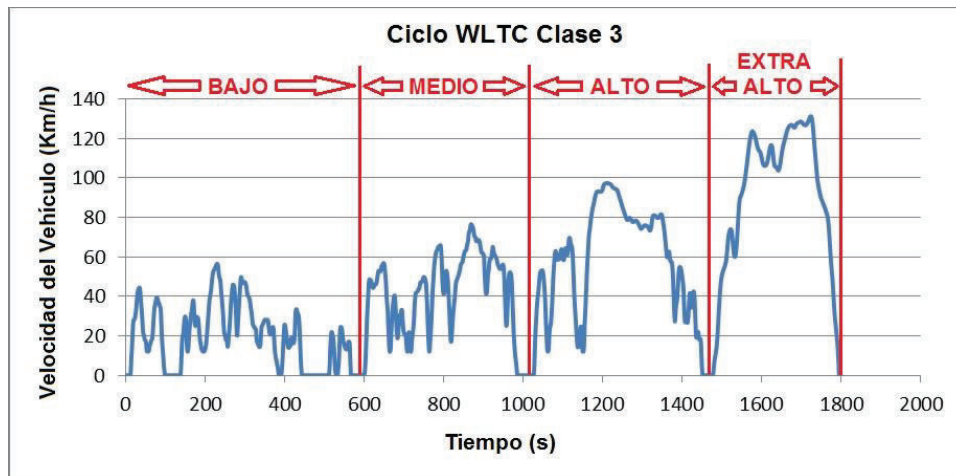


Fig.3.14. Ciclo WLTC clase 3.⁴⁶

Tabla 3.8. Parámetros del ciclo WLTC clase 3.¹⁰

PARÁMETROS DEL CICLO WLTC CLASE 3					
	BAJO	MEDIO	ALTO	EXTRA-ALTO	TOTAL
Duración (s)	589	433	455	323	1800
Duración parada (s)	156	48	31	7	242
Distancia (m)	3095	4756	7158	8254	23262
% de paradas	26.5%	11.1%	6.8%	2.2%	13.4%
Velocidad máxima (km/h)	56.5	76.6	97.4	131.3	
Velocidad promedio sin paradas (km/h)	25.7	44.5	60.8	94	53.8
Velocidad promedio con paradas (km/h)	18.9	39.5	56.6	92	46.5
Aceleración mínima (m/s ²)	-1.5	-1.5	-1.5	-1.2	
Aceleración máxima (m/s ²)	1.5	1.6	1.6	1.0	

⁴⁶ Adaptado de: <http://www.car-engineer.com/wp-content/uploads/2012/12/WLTC-class3.png?46ac1a>.
Ingresado el 23 de octubre de 2015.

CAPITULO IV. METODOLOGÍA DE PRUEBAS

En este capítulo se dará a conocer el ciclo de pruebas ASM, sus valores límite de emisiones y el procedimiento de cada ciclo de pruebas. Se determinará la metodología de pruebas, para el diagnóstico de convertidores catalíticos, en base al procedimiento de pruebas ASM (ANEXO 1) que se utiliza para la homologación vehicular en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV).

4.1 CICLO DE PRUEBAS ASM

La prueba en modo de simulación de aceleración (ASM), es una inspección de emisiones vehiculares para los contaminantes: óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, hidrocarburos y monóxido de carbono, para los vehículos del año 1995 en adelante, en la mayoría de los casos.

La prueba ASM utiliza un dinamómetro, el que simula el movimiento y aceleración del vehículo, al cual se le aplica una carga o resistencia según el ciclo. De esta manera, se obtiene un aproximado de las emisiones reales en el tubo de escape del vehículo. Se compone de dos ciclos de prueba:

- *Modo 5015*: El vehículo se prueba en el dinamómetro simulando el uso del 50% de la potencia disponible, a una velocidad constante de 15 mph (24,14 km/h).
- *Modo 2525*: El vehículo se prueba en el dinamómetro simulando el uso del 25% de la potencia disponible, a una velocidad constante de 25 mph (40,23 km/h).

4.1.1 VALORES ESTÁNDAR DE EMISIONES PARA PRUEBAS ASM

Los valores estándar de emisiones para pruebas ASM se aplican a las emisiones presentadas durante:

- El ciclo de puesta en marcha del vehículo (primer ciclo de prueba inmediatamente después del arranque en frío del vehículo).
- Los ciclos de pruebas ASM durante condiciones normales de funcionamiento del vehículo.

4.1.1.1 Límites de emisiones ASM durante la puesta en marcha del vehículo

Estos valores de emisiones se utilizan como referencia durante el primer ciclo de pruebas, inmediatamente después del arranque en frío del vehículo. Los valores para cada vehículo, según su año de fabricación, se describen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores estándar de emisiones de puesta en marcha de LDV para pruebas ASM.⁴⁷

VEHÍCULOS LIGEROS (LDV)			
AÑO VEHICULO	HC en ppm	CO en %	NO en %
1994 + sucesivos	1	21	41
1991- 1995	2	22	42
1983 - 1990	4	23	43
1981- 1982	4	26	43
1980	4	26	48
1977 - 1979	11	30	48
1975 - 1976	11	30	50

4.1.1.2 Límites de emisiones ASM en condiciones normales de funcionamiento del vehículo

Estos valores de emisiones se utilizan como referencia durante los ciclos de pruebas en donde el motor del vehículo se encuentre a temperatura normal de funcionamiento. Los valores para cada vehículo se describen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores estándar en condiciones normales de emisiones de LDV para pruebas ASM.⁴⁷

VEHÍCULOS LIGEROS (LDV)			
AÑO VEHICULO	HC en ppm	CO en %	NO en %
1994 + sucesivos	1	21	41
1983 -1995	1	21	41
1981 - 1982	1	23	41
1980	1	23	45
1977 - 1979	6	27	45
1975 - 1976	6	27	48
1973 - 1974	10	32	48

⁴⁷ Adaptado de: Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications. Technical Guidance. EPA, 1996. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/regs/im/asmfinal.pdf>. Ingresado el 8 de Agosto de 2015.

4.1.2 PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS ASM

La secuencia de prueba consistirá en un único modo ASM o ambos modos ASM (5015 o 2525) y se pueden realizar en cualquier orden. La secuencia de prueba tendrá un tiempo de prueba máxima global de 290 segundos. La prueba se dará por terminada o abortada si se excede el tiempo máximo de prueba.

4.1.2.1 Modo ASM 5015

El tiempo de ciclo (tiempo de medición: $mt=0$) comenzará cuando la velocidad del vehículo en el dinamómetro se mantenga dentro de 15 ± 1.0 mph ($24,24 \pm 1,6$ km/h) durante 5 segundos continuos. El dinamómetro aplicará la potencia correcta para una velocidad de operación de 15 mph, siempre que se mantenga dentro de la tolerancia de 15 ± 1.0 mph. La tolerancia de la potencia es de $\pm 5\%$ de la potencia aplicada a la velocidad de 15 mph. El dinamómetro seleccionará automáticamente un valor de potencia de las Tablas 4.3 y 4.4, según los datos de identificación del vehículo.

Tabla 4.3. Configuración de potencia para ASM 5015, en dinamómetro de 8,6".⁴⁸

Configuración de potencia para dinamómetro de 8,6"					
Valores predeterminados en HP para prueba ASM 5015					
Tipo de vehículo	Número de cilindros				
	3	4	5 & 6	8	> 8
Sedan	7,9	11,4	13,8	16,4	16
Station Wagon	8,1	11,7	13,8	16,1	16,1
Mini-Vans	10,2	14,1	15,8	17,9	18,2
Pickup Trucks	9,6	13,1	16,4	19,2	21,1
Sport/Utility	10,1	13,4	15,5	19,4	21,1
Full Vans	10,3	13,9	17,7	19,6	20,5

⁴⁸ Adaptado de: Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications. Technical Guidance. EPA, 1996. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/regs/im/asmfinal.pdf>. Ingresado el 8 de Agosto de 2015.

Tabla 4.4. Configuración de potencia para ASM 5015, en dinamómetro de 20".⁴⁸

Configuración de potencia para dinamómetro de 20"					
Valores predeterminados en HP para prueba ASM 5015					
Tipo de vehículo	Número de cilindros				
	3	4	5 & 6	8	>8
Sedan	8,1	11,8	14,3	16,9	16,6
Station Wagon	8,3	12,1	14,2	16,6	16,6
Mini-Vans	10,4	14,5	16,3	18,5	18,7
Pickup Trucks	9,8	13,4	16,8	19,8	21,7
Sport/Utility	10,5	13,8	15,9	19,9	21,7
Full Vans	10,8	14,4	18,2	20,2	21,1

Si la velocidad del dinamómetro o la potencia asignada, se desvían de sus valores por más de 2 segundos consecutivos o por más de 5 segundos en total, se deberá reiniciar el conteo (tiempo de medición: $mt=0$). El tiempo máximo de prueba será de 90 segundos transcurridos (tiempo de medición: $mt=90$).

Durante un periodo de 10 segundos, la velocidad no deberá variar más de 0,5 mph. Si la velocidad al final del periodo de 10 segundos es $\pm 0,5$ mph que al inicio del periodo, la prueba continuará hasta que la velocidad se establezca lo suficiente para satisfacer este criterio. La medición de emisiones durante estos 10 segundos deberá coincidir con el rango de velocidad observado durante este tiempo.

La prueba oficialmente comenzará después de haber transcurrido 25 segundos (tiempo de medición: $mt=25$). El vehículo pasará la prueba ASM 5015, si en cualquier punto entre el tiempo transcurrido entre los 25 segundos (tiempo de medición: $mt=25$) y los 90 segundos (tiempo de medición: $mt=90$), los valores de emisiones medidos en un periodo de 10 segundos es menor o equivalente a los valores de referencia indicados en las tablas 4.3 y 4.4

Al terminar la prueba en ciclo ASM 5015, el vehículo deberá inmediatamente comenzar la aceleración para alcanzar la velocidad requerida para la prueba ASM 2525. La carga aplicada por el dinamómetro hará la transición sin problemas durante la aceleración y automáticamente aplicará la carga requerida para la prueba ASM 2525, una vez que haya alcanzado la velocidad de prueba.

4.1.2.2 Modo ASM 2525

El tiempo de ciclo (tiempo de medición: $mt=0$) comenzará cuando la velocidad del vehículo en el dinamómetro se mantenga dentro de 25 ± 1.0 mph ($24,24 \pm 1,6$ km/h) durante 5 segundos continuos. El dinamómetro aplicará la potencia correcta para una velocidad de operación de 25 mph, siempre que se mantenga dentro de la tolerancia de 25 ± 1.0 mph. La tolerancia de la potencia es de $\pm 5\%$ de la potencia aplicada a la velocidad de 25 mph. El dinamómetro seleccionará automáticamente un valor de potencia de las Tablas 4.5 y 4.6, según los datos de identificación del vehículo.

Tabla 4.5. Configuración de potencia para ASM 2525, en dinamómetro de 8,6".⁴⁹

Configuración de potencia para dinamómetro de 8,6"					
Valores predeterminados en HP para prueba ASM 2525					
Tipo de vehículo	Número de cilindros				
	3	4	5 & 6	8	> 8
Sedan	6,7	9,5	11,5	13,7	13,3
Station Wagon	6,8	9,7	11,5	13,4	13,3
Mini-Vans	8,8	11,7	13,2	14,9	15,3
Pickup Trucks	8	10,9	13,6	16	17,8
Sport/Utility	8,8	11,2	12,9	16,1	17,8
Full Vans	9	11,6	14,7	16,3	17,2

Tabla 4.6. Configuración de potencia para ASM 2525, en dinamómetro de 20".⁴⁹

Configuración de potencia para dinamómetro de 20"					
Valores predeterminados en HP para prueba ASM 2525					
Tipo de vehículo	Número de cilindros				
	3	4	5 & 6	8	> 8
Sedan	6,9	10,1	12,3	14,5	14,3
Station Wagon	7	10,4	12,2	14,2	14,4
Mini-Vans	8,9	12,5	14	15,9	16,3
Pickup Trucks	8,1	11,4	14,4	16,9	18,8
Sport/Utility	8,9	11,8	13,6	17,1	18,8
Full Vans	9,1	12,5	15,5	17,3	18,3

⁴⁹ Adaptado de: Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications. Technical Guidance. EPA, 1996. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/regs/im/asmfinal.pdf>. Ingresado el 8 de Agosto de 2015.

Si la velocidad del dinamómetro o la potencia asignada, se desvían de sus valores por más de 2 segundos consecutivos o por más de 5 segundos en total, se deberá reiniciar el conteo (tiempo de medición: $mt=0$). El tiempo máximo de prueba será de 90 segundos transcurridos (tiempo de medición: $mt=90$).

Durante un periodo de 10 segundos, la velocidad no deberá variar más de 0,5 mph. Si la velocidad al final del periodo de 10 segundos es $\pm 0,5$ mph que al inicio del periodo, la prueba continuará hasta que la velocidad se establezca lo suficiente para satisfacer este criterio. La medición de emisiones durante estos 10 segundos deberá coincidir con el rango de velocidad observado durante este tiempo.

La prueba oficialmente comenzará después de haber transcurrido 25 segundos (tiempo de medición: $mt=25$). El vehículo pasará la prueba ASM 2525, si en cualquier punto entre el tiempo transcurrido entre los 25 segundos (tiempo de medición: $mt=25$) y los 90 segundos (tiempo de medición: $mt=90$), los valores de emisiones medidos en un periodo de 10 segundos es menor o equivalente a los valores de referencia indicados en las tablas 4.5 y 4.6.

4.2 METODOLOGIA DE PRUEBAS

Esta metodología de pruebas establecerá el procedimiento de medición para diagnosticar el funcionamiento del convertidor catalítico de vehículos con motores de encendido provocado, en condiciones de prueba dinámica de aceleración simulada ASM.

4.2.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento de medición para determinar la concentración de las emisiones provenientes del sistema de escape de vehículos con motores de encendido provocado y diagnosticar el funcionamiento del convertidor catalítico, en condiciones de prueba dinámica de aceleración simulada ASM.

4.2.2 ALCANCE

Este procedimiento se aplica a vehículos de más de tres ruedas con motores de encendido provocado cuyo combustible sea gasolina, cuenten con el convertidor catalítico y se encuentren en circulación.

4.2.3 DISPOSICIONES GENERALES

Para la ejecución de este procedimiento se requiere de los siguientes ciclos de prueba:

- *Ciclo ASM 5015*: Ciclo de prueba de un vehículo en dinamómetro utilizando la prueba de aceleración simulada (ASM), en donde a una velocidad constante de 15 millas/h (24 km/h), se aplica una carga externa al motor equivalente al 50% de la potencia requerida para acelerar al vehículo a una tasa de aceleración de 3.3 millas/h (5.3 km/h) por segundo.
- *Ciclo ASM 2525*: Ciclo de prueba de un vehículo en dinamómetro utilizando la prueba de aceleración simulada (ASM), en donde a una velocidad constante de 25 millas/h (40 km/h), se aplica una carga externa al motor equivalente al 25% de la potencia requerida para acelerar al vehículo a una tasa de aceleración de 3.3 millas/h (5.3 km/h) por segundo.

El equipo de medición (dinamómetro y sistema de medición de emisiones) debe cumplir con las especificaciones de la EPA Environment Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos de Norteamérica, en el documento “Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emisión Standards, Quality Control Requirements and Equipment Specifications, Technical Guidance” (ANEXO 2).

4.2.4 METODO DE ENSAYO

El método de ensayo indicará los pasos a seguir para la ejecución del procedimiento de pruebas.

4.2.4.1 Revisión visual del vehículo

Se deberá revisar los componentes de control de emisiones y elementos como: filtro de aire, tapón del depósito de aceite, tapón del depósito del combustible, bayoneta de medición del nivel de aceite en el cárter, sistema de ventilación del

mismo, filtro de carbón activado (cánister), mangueras de conexión al motor y al tanque de combustible cuando así estén equipados de origen y los componentes sean de fácil acceso. Específicamente, deberá revisar que el sistema de escape del vehículo no tenga fugas que puedan provocar dilución de los gases de escape o fuga de los mismos.

4.2.4.2 Preparación del vehículo para las pruebas

Se deberá revisar que los sistemas del vehículo estén apagados. Esto incluye las luces y el aire acondicionado; existen algunos modelos de vehículos automotores que por las especificaciones de su fabricante, siempre tienen las luces prendidas, en estos vehículos se deberá realizar la prueba con las luces prendidas. Asegurarse que el motor del vehículo funcione a su temperatura normal de operación.

Para la toma de mediciones antes del convertidor catalítico, se procede a desacoplar el conducto de escape del catalizador en un lugar después del sensor de oxígeno y antes del mismo. En la abertura provocada se introduce la sonda de muestreo. Luego de realizadas las pruebas se vuelve a acoplar el sistema de escape a su posición original.

4.2.4.3 Preparación para la prueba dinámica

Antes de la prueba, es importante realizar las siguientes acciones:

- Se deberá posicionar las llantas motrices del vehículo en los rodillos del dinamómetro de chasis y asegurar el vehículo de tal forma que impida su movimiento de acuerdo con las instrucciones del fabricante del dinamómetro.
- Se puede colocar un ventilador frente al radiador del vehículo, cuando este sea necesario, para asegurar que el vehículo no se sobrecaliente durante el desarrollo de las pruebas.
- El programa informático o software del dinamómetro de chasis deberá seleccionar la carga a aplicar para cada módulo de prueba de aceleración simulada, de acuerdo con el peso equivalente de prueba, el mismo que consta en la base de datos denominada tabla maestra (ANEXO 3).

- Se deberá introducir la sonda de muestreo en el escape del vehículo a una profundidad mínima de 25 centímetros. Si el diseño del escape del vehículo no permite que sea instalada a esta profundidad, se requerirá el uso de una extensión al tubo de escape.
- El analizador de gases debe realizar un ajuste a cero sobre cada uno de los gases (HC, CO, y NOx) antes de cada secuencia de pruebas funcionales. El proceso de ajuste a cero debe incluir una revisión de los residuales de contaminantes de pruebas anteriores vía la sonda.

4.2.4.4 Procedimiento de medición del ciclo ASM 5015

Este ciclo dinámico consiste en una prueba a 24 km/h (ASM 5015) con el eje de tracción del vehículo en movimiento con aplicación externa de carga.

La potencia aplicada al vehículo durante la prueba ASM 5015, será calculada por el software con base al peso inercial del vehículo (PI), en donde:

$$PI = (\text{Peso vehicular sin carga} + 136 \text{ kilogramos}) / 0.4536$$

$$\text{Potencia aplicada al vehículo en caballos de fuerza HP} = PI / 250$$

Para el vehículo equipado con transmisión manual, se lo pone en marcha y se procede a acelerar siguiendo la secuencia normal de engranes que permita una operación del motor en condiciones estables y sin forzar durante un intervalo de 15 segundos, hasta que el vehículo alcance la velocidad en el rodillo de 24 kilómetros por hora \pm 2.4 kilómetros por hora. La velocidad angular del motor deberá estar comprendida en un rango de entre 1000 y 3000 revoluciones por minuto. Si el vehículo está equipado con transmisión automática, la prueba se efectuará en "DRIVE" (D).

Se debe mantener la velocidad durante 15 segundos que corresponde al "tiempo de estabilización". Se debe mantener la velocidad durante 10 segundos que corresponde al "tiempo de medición" en el cual el equipo debe determinar las lecturas promedio que aparezcan en el analizador.

4.2.4.5 Procedimiento de medición del ciclo ASM 2525

Al finalizar la prueba ASM 5015, se deberá acelerar el vehículo en tercer o cuarto engrane, seleccionando aquel que permita una operación del motor en condiciones estables y sin forzarse durante un intervalo de 15 segundos, hasta

que el vehículo alcance la velocidad en el rodillo de 40 kilómetros por hora \pm 4 kilómetros por hora. Si el vehículo tiene transmisión manual, las revoluciones por minuto del motor nunca deberán estar por debajo de 1000 revoluciones por minuto o por arriba de las 4000 revoluciones por minuto. Si el vehículo está equipado con transmisión automática la prueba se efectuará en “DRIVE” (D).

Se debe mantener la velocidad durante 15 segundos que corresponde al “Tiempo de estabilización”. Se debe mantener la velocidad durante 10 segundos que corresponde al “tiempo de medición” en el cual el equipo debe determinar las lecturas promedio que aparezcan en el analizador.

4.2.5 CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

Para determinar el número de lecturas que se deberían tomar de cada convertidor catalítico, se utiliza la siguiente fórmula para calcular el tamaño de la muestra⁵⁰:

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{E^2} \quad (\text{EC.4.1})$$

Dónde:

n = Tamaño de la muestra

Z = Valor del nivel de confianza (Tabla 4.7), es el porcentaje de seguridad que existe para generalizar los resultados obtenidos desde la muestra hacia la población total.

Tabla 4.7. Valores de niveles de confianza.⁵¹

Valor de Z	1,15	1,28	1,44	1,65	1,96	2,24	2,58
Nivel de confianza	75%	80%	85%	90%	95%	97,5%	99%

p = Variabilidad positiva, representa la probabilidad de éxito de la hipótesis.

q = Variabilidad negativa, representa la probabilidad de fracaso de la hipótesis.

⁵⁰ Disponible en: <http://www.surveystsoftware.net/ssformue.htm>. Ingresado el: 18 de noviembre de 2015.

⁵¹ Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos60/tamano-muestra-archivistica/tamano-muestra-archivistica2.shtml>. Ingresado el 18 de noviembre de 2015.

Hay que considerar que p y q son complementarios, es decir, su suma es igual a la unidad $p+q=1$. Cuando existe la probabilidad de máxima variabilidad (no existen antecedentes sobre la investigación), el valor que toman p y q es 0,5.⁵⁰

E = Error máximo admisible, cuyo valor representa el porcentaje de error que se admite en el estudio y que queda a criterio del evaluador.

Por lo tanto, para el cálculo de esta muestra, se utiliza un nivel de confianza de 90% cuyo valor es de 1,65 y un porcentaje de error de 10%.

$$n = \frac{1,65^2 * 0,5 * 0,5}{0,10^2} = 68,06$$

El cálculo de la muestra indica que el número de lecturas que se debería obtener de cada convertidor catalítico es de 68. Sin embargo, por cuestiones de disponibilidad de las instalaciones y el personal técnico del CCICEV, la disponibilidad de los vehículos de prueba, costos y el tipo de prueba dinámica, se determinó que el número de mediciones necesarias en cada convertidor catalítico es de 5, manteniendo el porcentaje de error calculado. Tomando en cuenta que, para este tipo de prueba dinámica, la verificación de la metodología se la realiza en un solo vehículo, como pruebas ejecutadas según organizaciones como CARB (California, EUA), 3CV (Chile), CONAMA (Chile).

4.2.6 GRÁFICOS DE CONTROL PARA EVALUAR VARIACIONES EN LAS MEDICIONES

Los gráficos de control identifican lo antes posible cualquier variación de un parámetro o característica importante. Para estimar el valor verdadero de una variable se debe calcular dos parámetros: una medida de tendencia central μ (promedio, mediana o moda) y una medida de dispersión σ (rango, varianza, desviación estándar).

Las medidas de tendencia central sirven para estimar el valor central (o representativo) de las mediciones y las medidas de dispersión dan una idea de la

variación entre una medición y otra, y como éstas se agrupan en torno al valor central.

Para detectar la variación de una medida se construyen dos tipos de gráficos de control: para la media (X) y para la dispersión o rango (R).

4.2.6.1 Gráfico de control para media

Se toman k muestras del mismo tamaño n , en cada muestra se calcula el promedio X y el rango R . Se calcula el promedio de los promedios muestrales o la media general Xg :

$$Xg = \frac{\sum X}{k} \quad (\text{EC.4.2})$$

Se calcula el promedio de los rangos o rango medio Rm :

$$Rm = \frac{\sum R}{k} \quad (\text{EC.4.3})$$

Se establecen los límites superior UCL_x e inferior LCL_x de los gráficos de control para medias. Los cuales incluyen tres desviaciones estándar por debajo y por encima del valor central Xg , que representan el 99,7% de las observaciones de una distribución normal.

$$UCL_x = Xg + 3\sigma_x \quad (\text{EC.4.4})$$

$$LCL_x = Xg - 3\sigma_x \quad (\text{EC.4.5})$$

En la práctica, el factor $3\sigma_x$ se reemplaza por A_2Rm , donde A_2 es una constante basada en el tamaño muestral n (ANEXO 4) y Rm es el promedio de los rangos de cada muestra.

$$UCL_x = Xg + A_2Rm \quad (\text{EC.4.6})$$

$$LCL_x = Xg - A_2Rm \quad (\text{EC.4.7})$$

Se realiza el gráfico en donde se representan los límites superior UCL_x e inferior LCL_x , así como el valor central de la media Xg .

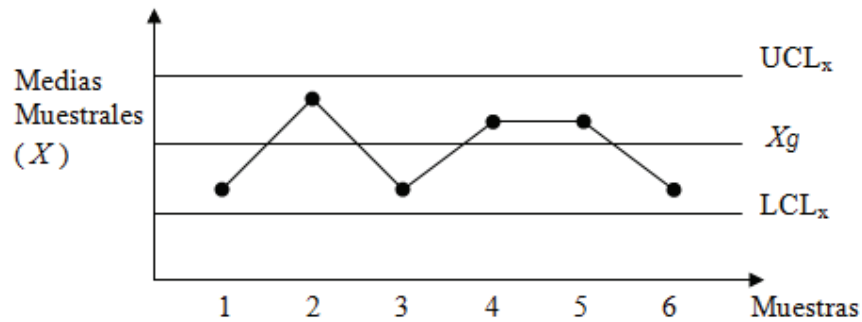


Fig.4.1. Gráfico del intervalo de media μ .

El intervalo entre los límites superior e inferior es el recorrido aceptable que deben tener los valores promedio muestrales. Todos los promedios deben estar dentro de este intervalo experimental, si uno de estos sobrepasa a alguno de los límites, entonces podemos determinar claramente que en esa muestra existe un error que debe ser identificado y corregido.

4.2.6.2 Gráfico de control para dispersión

Similar al proceso del gráfico anterior, se calcula el rango R de las muestras y el promedio de los rangos Rm . Se establecen los límites superior UCL_R e inferior LCL_R con respecto al valor de Rm :

$$UCL_R = D_4 Rm \quad (\text{EC.4.8})$$

$$LCL_R = D_3 Rm \quad (\text{EC.4.9})$$

Los valores D_3 y D_4 son constantes y dependen del tamaño muestral n . Se obtienen de la misma tabla que A_2 (ANEXO 4).

Se realiza el gráfico en donde se representan los límites superior UCL_x e inferior LCL_x , así como el valor central Rm .

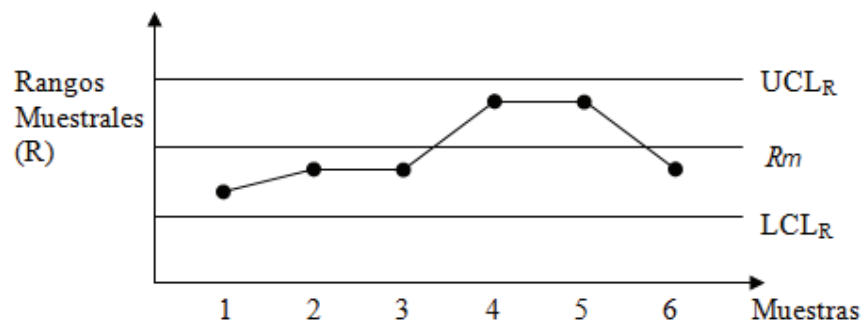


Fig.4.2. Gráfico del intervalo de rango σ .

Como el 99.7% de todas las observaciones deben estar dentro de este intervalo, si algún rango se encuentra fuera de este intervalo, entonces éste determina que en la muestra correspondiente existe un error.

4.2.7 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Al poner en práctica la metodología de pruebas antes descrita, se obtienen resultados de emisiones de CO, CO₂, HC, O₂ y NO_x, en cada ciclo de prueba ASM (5015 y 2525).

La evaluación de los resultados obtenidos inicia con el cálculo del tamaño de la muestra. Ésta indica el número de mediciones necesarias para obtener un resultado razonable de las emisiones. Se determinó que las mediciones necesarias son 5 de cada ciclo de prueba ASM (5015 y 2525).

Para determinar el valor verdadero de los resultados obtenidos durante las 5 mediciones se procede a calcular la medida de tendencia central o el promedio. Adicionalmente, se realizan los gráficos de control de dispersión de las mediciones para un mejor análisis.

El promedio de las mediciones obtenidas en las pruebas realizadas a los vehículos, antes y después del convertidor catalítico, sirven para evaluar la eficiencia del mismo.

Para calcular la eficiencia se utiliza la fórmula del porcentaje de la diferencia entre los promedios obtenidos de los valores medidos:

$$Eficiencia(\%) = \frac{P_{AC} - P_{DC}}{P_{AC}} * 100 \quad (E.C.4.10)$$

Dónde:

P_{AC} = Promedio de mediciones tomadas antes del convertidor catalítico.

P_{DC} = Promedio de mediciones tomadas después del convertidor catalítico.

CAPITULO V. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados de emisiones obtenidos al aplicar la metodología de pruebas descrita en el capítulo anterior. Se utilizarán gráficos de control de media y dispersión para determinar el valor promedio de los resultados. Se calculará la eficiencia del convertidor catalítico, de cada vehículo de pruebas, con los valores promedio calculados.

5.1 PRUEBAS ASM EN VEHÍCULOS EN USO

Se ejecutaron las pruebas, en ciclo ASM, a vehículos en uso que cuentan con convertidor catalítico. Se utilizaron 2 vehículos marca Chevrolet, modelo Grand Vitara, de distinto recorrido y año de fabricación (fotografías en ANEXO 5). Se denominará al vehículo de placa PCF 1335 como vehículo A y al de placa PBK 7145 como vehículo B, para el análisis de resultados.

A cada vehículo se realizaron 5 mediciones antes del convertidor catalítico y 5 mediciones después del mismo. De estas pruebas se obtuvieron resultados de CO, CO₂, HC, O₂ y NO_x, los cuales se registraron en las tablas A6 y A7 del ANEXO 6.

5.1.1 GRÁFICO DE CONTROL DE LOS RESULTADOS DEL VEHÍCULO A

Los resultados obtenidos mediante los ciclos de prueba ASM 2525 y 5015, se disponen en gráficos de control para evaluar las variaciones en las mediciones. A continuación se describe un ejemplo de los pasos seguidos para el cálculo de la media general y el rango medio, incluidos sus límites, de un gas durante un ciclo de prueba ASM del vehículo A.

5.1.1.1 Gráfico de control del CO en ciclo ASM 2525, tomado antes del convertidor catalítico

Se obtuvo 5 mediciones de CO en ciclo ASM 2525 según el tamaño de la muestra $n=5$, calculado anteriormente. El número de muestras, en este caso es de $k=1$, ya que solo existe un grupo de mediciones realizadas en ciclo ASM 2525, antes del convertidor catalítico.

Tabla 5.1. Mediciones de CO en ciclo ASM 2525, antes del convertidor catalítico.

PARÁMETRO	MEDICIONES EN ASM 2525 ANTES DEL C.C.						
	1	2	3	4	5	<i>X</i>	<i>R</i>
CO (% V)	0,914	0,45	0,447	0,4702	0,4435	0,5449	0,4705

Se calcula la media *X* de las 5 mediciones y el rango *R* como se muestra en la tabla 5.1. Se calcula la media general *Xg*:

$$Xg = \frac{\sum X}{k} = \frac{0,5449}{1} = 0,5449$$

Se calcula el rango medio *Rm*:

$$Rm = \frac{\sum R}{k} = \frac{0,4705}{1} = 0,4705$$

Para el cálculo de los límites de media y rango, se utilizan los valores constantes de los factores críticos de las gráficas. Para $n=5$ los valores de las constantes, según la tabla A4 (ANEXO 4), son:

$$A_2 = 0,577$$

$$D_3 = 0$$

$$D_4 = 2,114$$

Primero se calcula los límites de rangos, debido a que si existiese algún error de medición, se lo detectaría en esta instancia:

$$UCL_R = D_4 * Rm = 2,114 * 0,4705 = 0,9946$$

$$LCL_R = D_3 * Rm = 0 * 0,4705 = 0$$

En base al cálculo de los límites de rangos, podemos concluir que el rango *R* no sobrepasa del intervalo calculado. Por lo tanto, no existen errores que sobrepasen la diferencia natural entre las mediciones.

Con el cumplimiento de esta condición, se procede a calcular los límites de media:

$$UCL_X = Xg + A_2 * Rm$$

$$UCL_X = 0,5449 + 0,577 * 0,4705 = 0,8164$$

$$LCL_X = Xg - A_2 * Rm$$

$$LCL_X = 0,5449 - 0,577 * 0,4705 = 0,2734$$

Luego se realiza el gráfico control (Fig.5.1.) de media utilizando los valores de Xg , $UCLx$ y $LCLx$ en comparación con las mediciones realizadas.

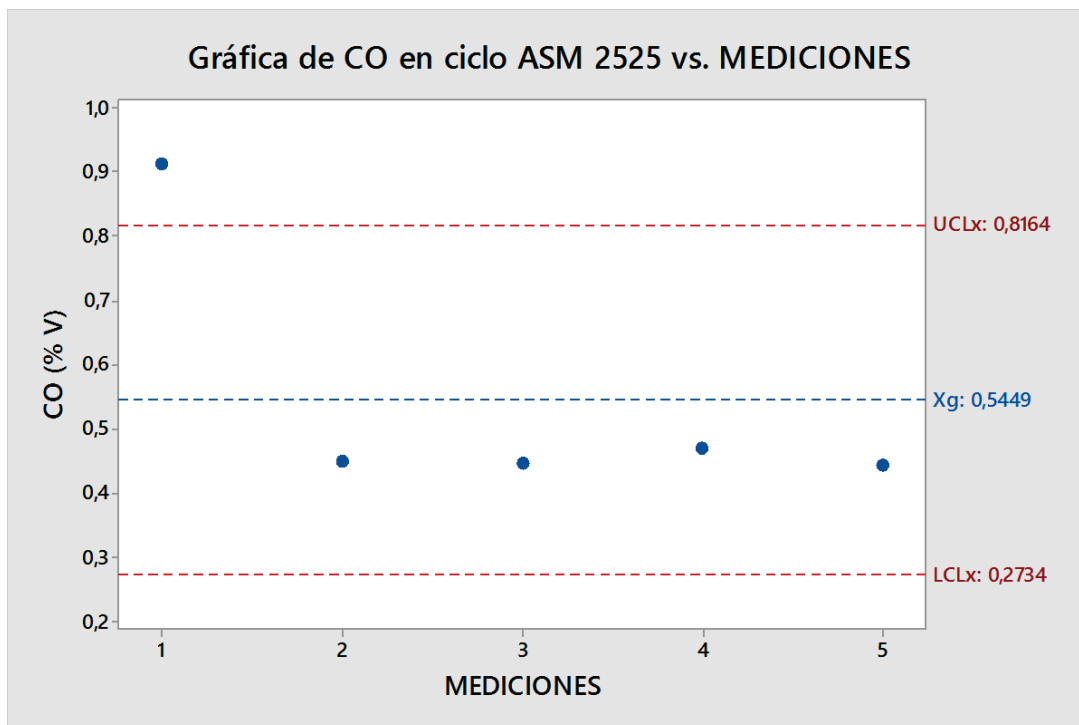


Fig.5.1. Gráfico de control de media de CO en ciclo ASM 2525, antes del convertidor catalítico.

Como se muestra en el gráfico Fig.5.1, de las mediciones realizadas, la número 1 se encuentra fuera de los límites de media calculados. Por lo tanto, para el cálculo del promedio de las mediciones que se utilizarán en el análisis de eficiencia, se utilizarán las mediciones del 2 al 4.

El valor promedio es:

$$X_{CO} = \frac{\sum X}{K} = \frac{1,8107}{4} = 0,4527$$

5.1.1.2 Promedio de las mediciones del vehículo A

Siguiendo el ejemplo del apartado 5.1.1.1, se procede al cálculo del promedio de todas las mediciones realizadas durante las pruebas en ciclo ASM, tanto antes como después del convertidor catalítico. Los valores de media general, rango medio y de los límites de media y de rango se describen en las tablas A7 y A8 del ANEXO 7. Los valores promedio finales se describen en las tablas 5.2 y 5.3.

Tabla 5.2. Promedio de mediciones antes del convertidor catalítico.

PROMEDIO DE MEDICIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO		
PARÁMETROS	ASM 25/25	ASM 50/15
CO (% V)	0,453	0,425
CO₂ (% V)	8,834	10,253
HC (ppm)	241,308	102,435
O₂ (% V)	6,246	3,450
NOx (ppm)	711,078	798,590

Tabla 5.3 Promedio de mediciones después del convertidor catalítico.

PROMEDIO DE MEDICIONES DESPUÉS DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO		
PARÁMETROS	ASM 25/25	ASM 50/15
CO (% V)	0,097	0,030
CO₂ (% V)	12,902	12,917
HC (ppm)	0,000	0,000
O₂ (% V)	0,060	0,150
NOx (ppm)	76,415	14,163

5.1.2 GRÁFICO DE CONTROL DE LOS RESULTADOS DEL VEHÍCULO B

Los resultados obtenidos al realizar las pruebas en los ciclos ASM 2525 y 5015, se ubican en gráficos de control para evaluar las desviaciones en las mediciones. A continuación se describe un ejemplo de los pasos seguidos para el cálculo de la media general, el rango medio y sus límites superiores e inferiores, de un gas durante un ciclo de prueba ASM del vehículo B.

5.1.2.1 Gráfico de control del NOx en ciclo ASM 5015, tomado después del convertidor catalítico

En base al cálculo del tamaño de la muestra, donde $n=5$, se obtuvo 5 mediciones de NOx en ciclo ASM 5015. Como solo existe un grupo de mediciones realizadas después del convertidor catalítico, el número de muestras es de $k=1$.

En la tabla 5.4 se muestran las mediciones realizadas junto con la media X y el rango R .

Tabla 5.4. Mediciones de NOx en ciclo ASM 5015, después del convertidor catalítico.

PARÁMETRO	MEDICIONES EN ASM 5015 DESPUÉS DEL C.C.						
	1	2	3	4	5	X	R
NOx (ppm)	6,437	0,422	4,609	14,719	1,502	5,5378	14,297

Se procede con el cálculo de la media general Xg :

$$Xg = \frac{\sum X}{k} = \frac{5,5378}{1} = 5,5378$$

Se calcula el rango medio Rm :

$$Rm = \frac{\sum R}{k} = \frac{14,297}{1} = 14,297$$

Los límites de media y rango se calculan con los valores constantes de los factores críticos de las gráficas. Los cuales, para $n=5$ (tabla A4, Anexo 4) son:

$$A_2 = 0,577$$

$$D_3 = 0$$

$$D_4 = 2,114$$

Primero se calcula los límites de rangos para verificar que no existan errores que sobrepasen la diferencia normal de las mediciones. Se procede al cálculo de los límites de rangos:

$$UCL_R = D_4 * Rm = 2,114 * 14,297 = 30,224$$

$$LCL_R = D_3 * Rm = 0 * 14,297 = 0$$

Según los resultados obtenidos de UCL_R y LCL_R , se concluye que el rango R no sobrepasa del intervalo calculado. Luego se calcula los límites de media:

$$UCL_X = Xg + A_2 * Rm$$

$$UCL_X = 5,538 + 0,577 * 14,297 = 13,787$$

$$LCL_X = Xg - A_2 * Rm$$

$$LCL_X = 5,538 - 0,577 * 14,297 = -2,711$$

Finalmente se realiza el gráfico control de media (Fig.5.2.) utilizando los límites de media en comparación con la media general Xg y las mediciones realizadas.

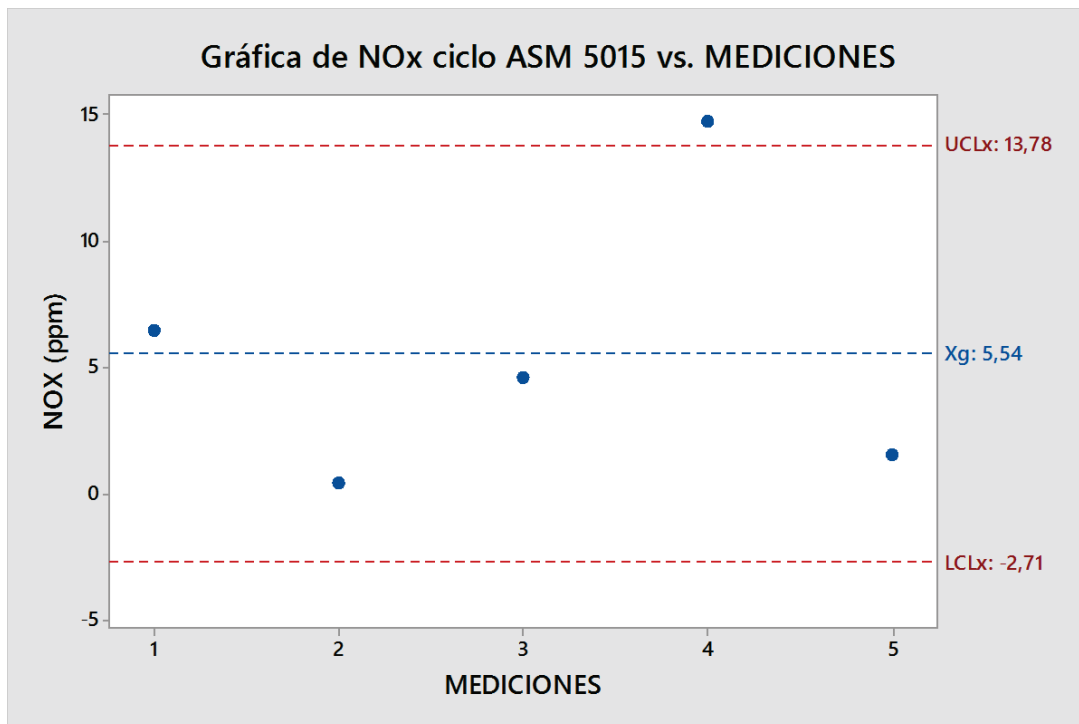


Fig.5.2. Gráfico de control de media de NOx en ciclo ASM 5015, después del convertidor catalítico.

En el gráfico Fig.5.2 se muestran las mediciones realizadas, donde la número 4 se encuentra fuera de los límites de media calculados. Consecuentemente, para

el cálculo del promedio de las mediciones que se utilizarán en el análisis de eficiencia, se utilizarán las mediciones 1, 2, 3 y 5.

El valor promedio es:

$$X_{CO} = \frac{\sum X}{K} = \frac{12,97}{4} = 3,2425$$

5.1.2.2 Promedio de las mediciones del vehículo B

Según el ejemplo del apartado 5.1.2.1, se calcula del promedio de todas las mediciones obtenidas durante las pruebas en ciclo ASM, tanto antes como después del convertidor catalítico. Los valores de media general, rango medio y sus límites se describen en las tablas A9 y A10 del ANEXO 7. Los valores promedio finales se muestran en las tablas 5.5 y 5.6.

Tabla 5.5. Promedio de mediciones antes del convertidor catalítico.

PROMEDIO DE MEDICIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO		
PARÁMETROS	ASM 25/25	ASM 50/15
CO (% V)	0,452	0,422
CO₂ (% V)	8,930	10,173
HC (ppm)	237,775	102,488
O₂ (% V)	6,050	3,358
NOx (ppm)	152,595	219,713

Tabla 5.6 Promedio de mediciones después del convertidor catalítico.

PROMEDIO DE MEDICIONES DESPUÉS DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO		
PARÁMETROS	ASM 25/25	ASM 50/15
CO (% V)	0,089	0,050
CO₂ (% V)	12,385	12,476
HC (ppm)	10,401	2,356
O₂ (% V)	0,034	0,042
NOx (ppm)	13,275	3,243

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores promedio calculados de las emisiones obtenidas en los vehículos de prueba, servirán para determinar el cumplimiento de los límites de emisiones y evaluar la eficiencia del convertidor catalítico y, por consiguiente, realizar el diagnóstico del mismo.

La norma utilizada para fijar los límites de emisiones en pruebas en ciclo dinámico ASM, es la norma chilena D.S. No. 149 de 2006: *Norma de emisión de NO, HC y CO para el control de NOx en vehículos en uso, de encendido por chispa (ciclo Otto)*, debido a que en el país no existe una norma que fije los límites de emisiones vehiculares en pruebas en ciclo dinámico ASM.

Según la norma chilena, los límites de emisiones para los vehículos de prueba A y B son los descritos en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Límites de emisiones en pruebas dinámicas ASM.⁵²

LIMITES DE EMISIONES EN PRUEBA DINÁMICA ASM			
Tipo de vehículo	ASM	Parámetro	Cilindrada 1001 a 2000 cc
Furgón, camioneta, todo terreno, jeep o similares; año 1999 y posteriores	MODO 2525	HC (ppm)	260
		CO (%)	2,23
		NO (ppm)	1847
	MODO 5015	HC (ppm)	254
		CO (%)	2,91
		NO (ppm)	1685

5.2.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL VEHÍCULO A CON LA NORMA CHILENA

Los valores promedio calculados de emisiones, de las tablas 5.2 y 5.3, se utilizan para compararlos con los límites de emisiones en pruebas dinámicas de la tabla 5.7. En la Fig. 5.3 se muestra las emisiones de CO de los valores promedio en comparación con los límites de la norma chilena. De manera similar, se muestra en la Fig. 5.4 las emisiones de HC y en la Fig. 5.5 las emisiones de NOx.

⁵² Tomado de: D.S. No. 149 de 2006, Norma de emisión de NO, HC y CO para el control de NOx en vehículos en uso, de encendido por chispa (ciclo Otto). Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=260350>. Ingresado el: 11 de enero de 2016.

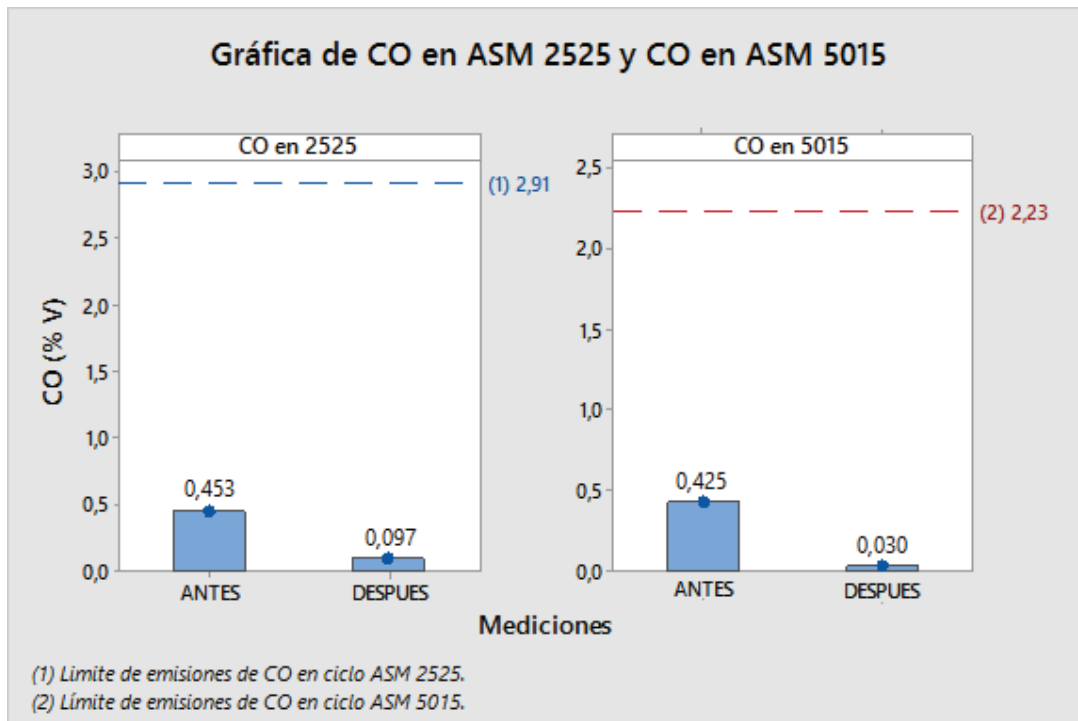


Fig.5.3. Gráfico de comparación de CO y los límites de emisiones de la norma chilena.

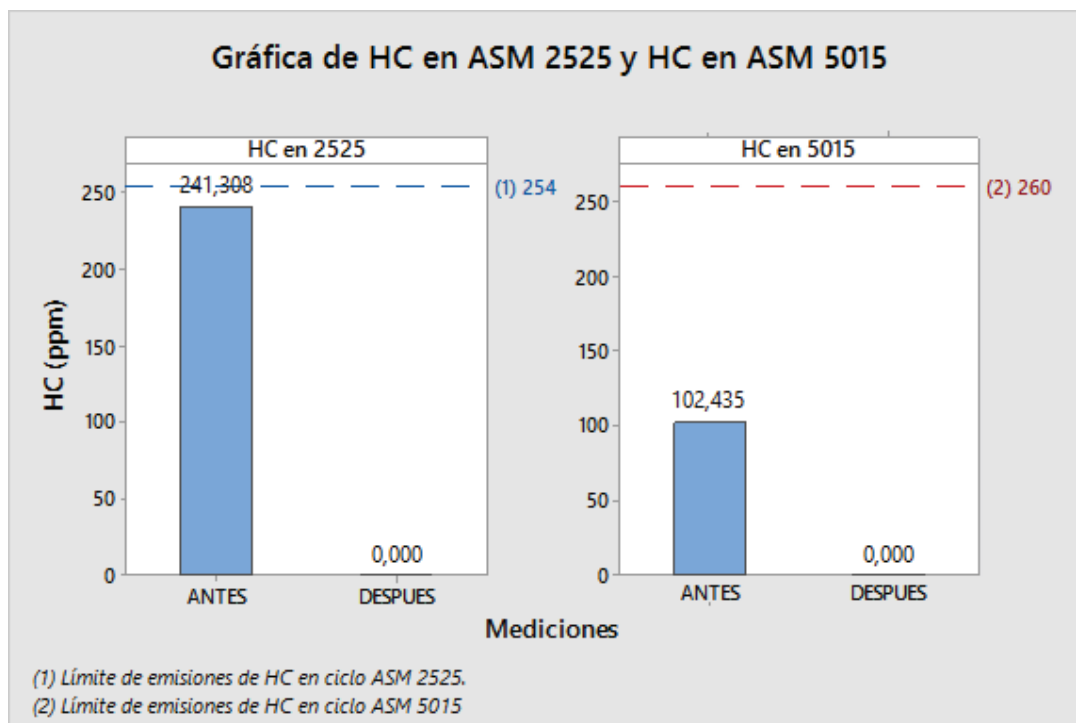


Fig.5.4. Gráfico de comparación de HC y los límites de emisiones de la norma chilena.

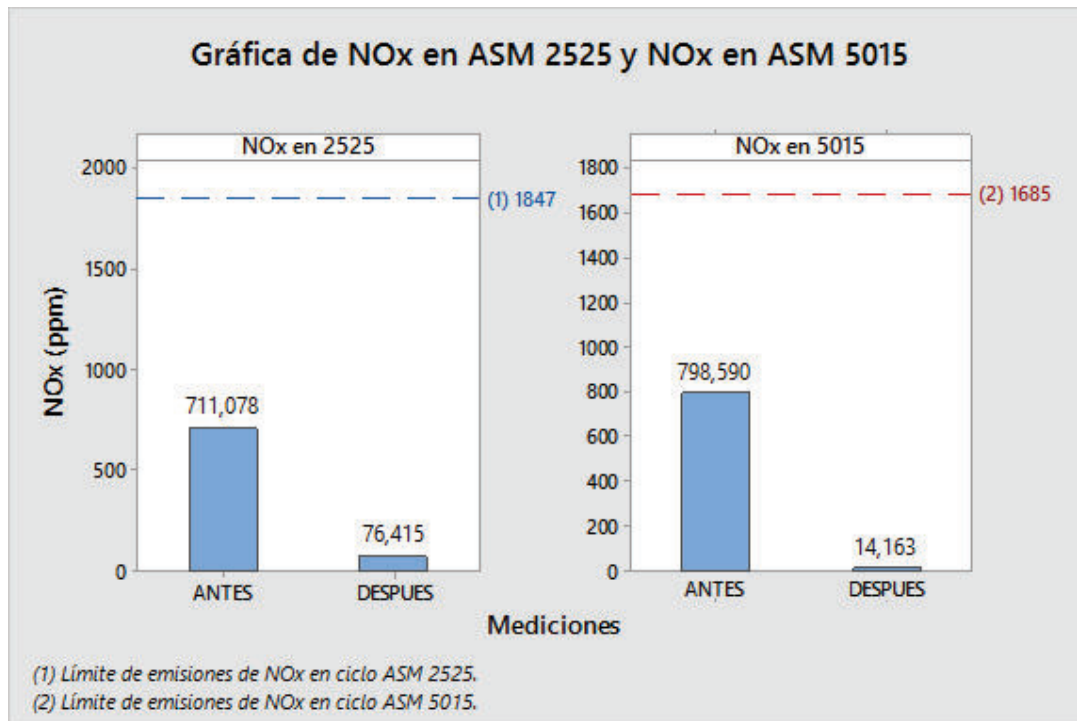


Fig.5.5. Gráfico de comparación de NOx y los límites de emisiones de la norma chilena.

En base a los gráficos anteriores, se muestra que las emisiones obtenidas del vehículo A no sobrepasan los límites de la norma chilena, tanto antes como después del convertidor catalítico. Sin embargo, tomando en cuenta el porcentaje de error de 10%, las emisiones de HC antes del convertidor catalítico sobrepasarían en teoría la norma chilena. Para la aplicación de la norma solo se toman en cuenta las emisiones después del convertidor catalítico.

5.2.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE VEHÍCULO B CON LA NORMA CHILENA

Los promedios calculados de las emisiones, de las tablas 5.5 y 5.6, se emplean para compararlos con los límites de emisiones en pruebas dinámicas de la tabla 5.7. En la Fig. 5.6 se representan las emisiones de CO de los promedios en comparación con los límites de la norma chilena. De igual manera, se muestra las emisiones de HC en la Fig. 5.7 y las emisiones de NOx en la Fig. 5.8.

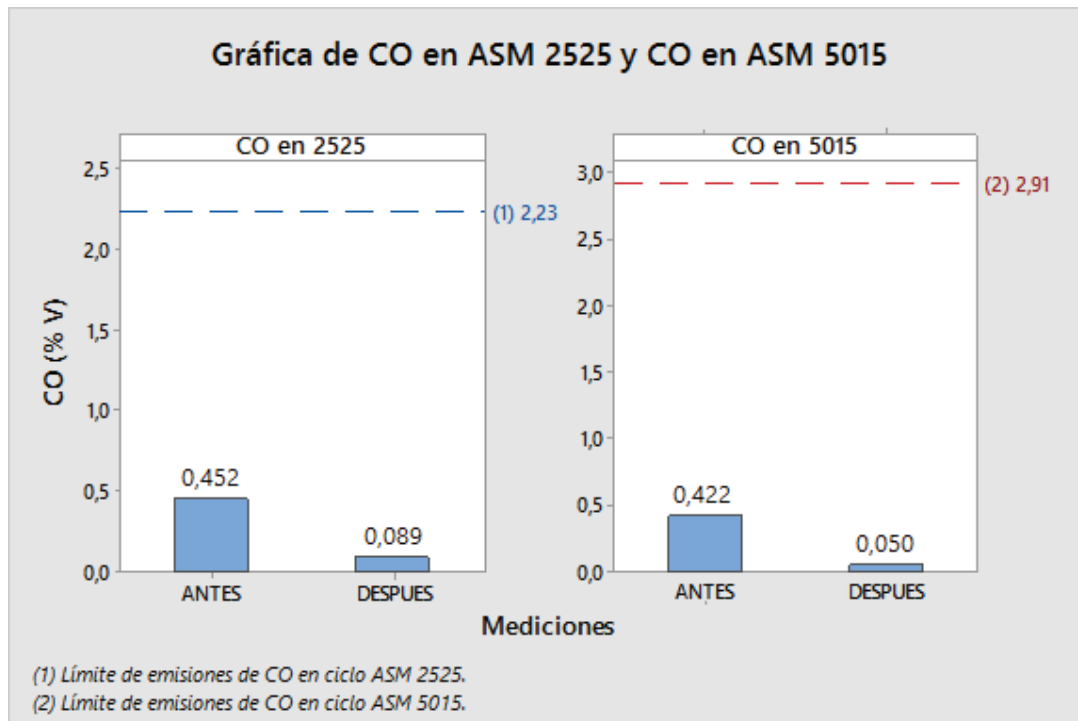


Fig.5.6. Gráfico de comparación de CO y los límites de emisiones de la norma chilena.

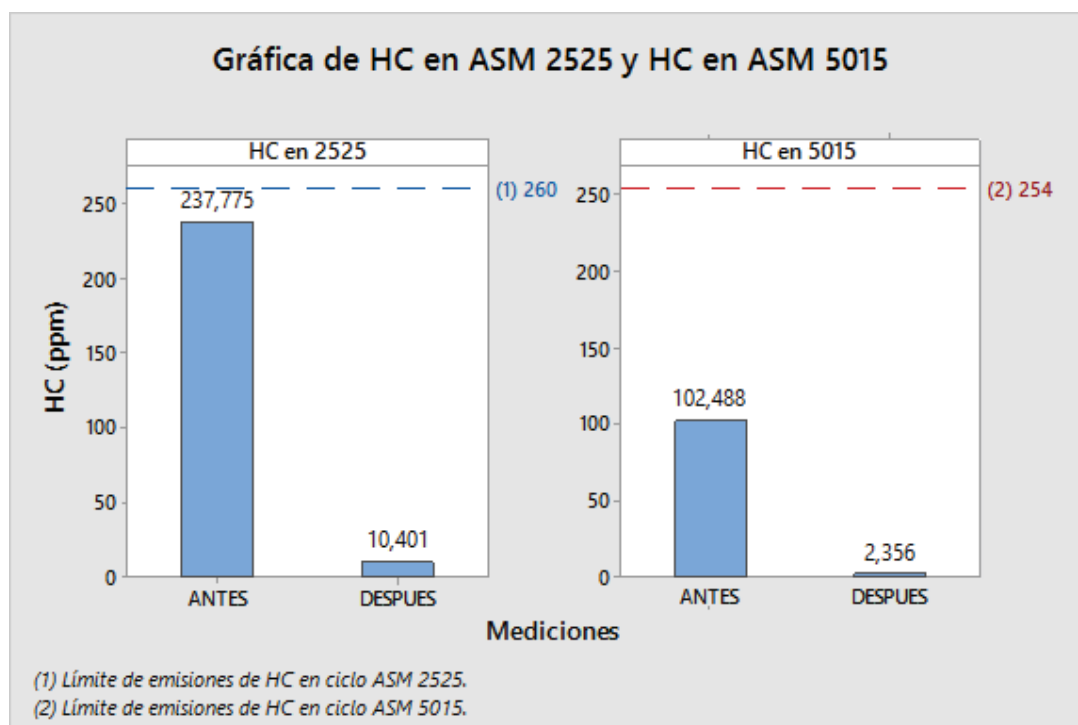


Fig.5.7. Gráfico de comparación de HC y los límites de emisiones de la norma chilena.

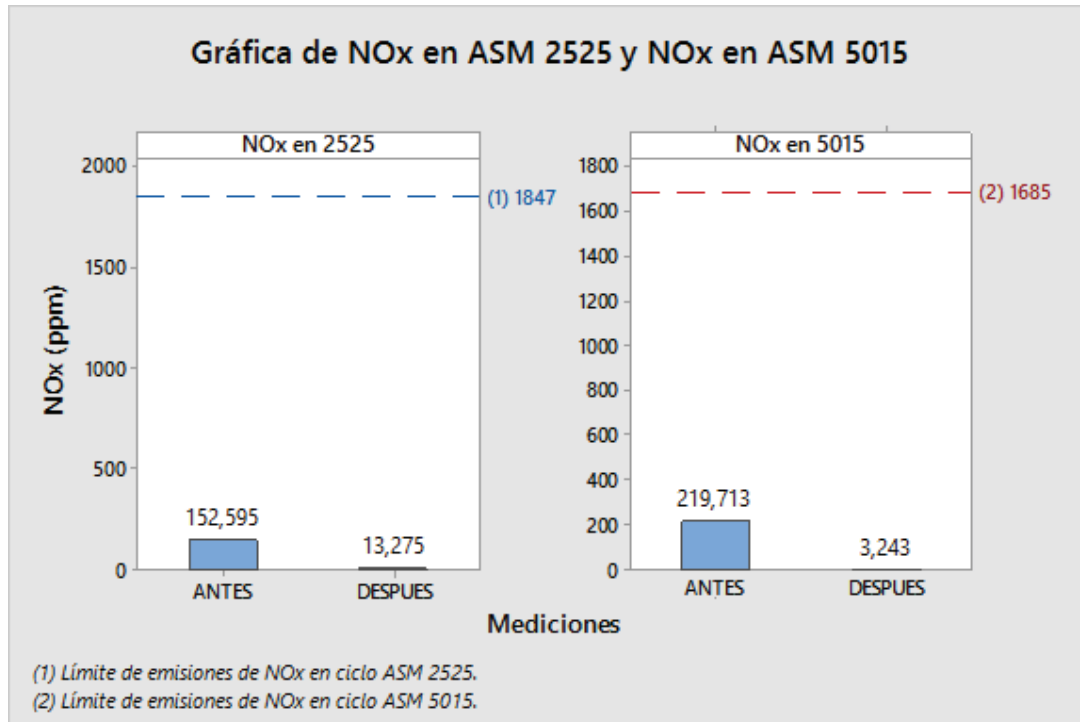


Fig.5.8. Gráfico de comparación de NOx y los límites de emisiones de la norma chilena.

Según los anteriores gráficos, se expresa que las emisiones obtenidas del vehículo B no exceden los límites de la norma chilena, tanto antes como después del convertidor catalítico. Sin embargo, teniendo en cuenta el 10% de porcentaje de error, las mediciones de HC antes del convertidor catalítico excederían en teoría la norma chilena. Para aplicar la norma solo se toma en cuenta las emisiones después del convertidor catalítico.

5.2.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA

Para evaluar la eficiencia del convertidor catalítico se utilizan los promedios calculados de las mediciones realizadas antes y después del mismo. Utilizando la ecuación E.C.4.10 se calcula el porcentaje de eficiencia de cada gas emitido por el vehículo.

La eficiencia calculada se utiliza para diagnosticar el funcionamiento del convertidor catalítico. Mientras menor sea la eficiencia calculada, mayor será el desgaste del convertidor catalítico, por lo tanto, será necesario su recambio.

Los resultados finales del análisis de eficiencia del convertidor catalítico y su diagnóstico se pueden presentar en un informe, cuyo formato se detalla en el ANEXO 8.

5.2.3.1 Evaluación de resultados del vehículo A

Los promedios de emisiones obtenidas en los ciclos ASM 2525 y 5015, tanto antes como después del convertidor catalítico, se promediaron entre sí para realizar el análisis de la eficiencia del convertidor catalítico del vehículo A. En la tabla 5.8 se expresan los resultados del análisis de la eficiencia de cada gas.

Tabla 5.8. Eficiencia del convertidor catalítico en el vehículo A.

CONVERTIDOR CATALÍTICO EN VEHICULO A			
PARÁMETRO	PROMEDIO DE EMISIONES EN CICLOS ASM 2525 Y 5015		EFICIENCIA (%)
	ANTES	DESPUES	
CO (% V)	0,438	0,063	85,62
HC (ppm)	171,871	0,000	100,00
NOx (ppm)	754,833	45,288	94,00

Como se puede apreciar en la tabla 5.8, la eficiencia del convertidor catalítico del vehículo A, en los tres gases contaminantes, es excelente. Especialmente en la emisión de hidrocarburos (HC) cuya eficiencia es del 100%. Por lo tanto, no es necesario el recambio del convertidor catalítico.

5.2.3.2 Evaluación de resultados del vehículo B

En la tabla 5.9 se muestran los resultados del análisis de la eficiencia del convertidor catalítico del vehículo B. Se realizó un promedio de las emisiones

obtenidas en los ciclos ASM 2525 y 5015, tanto antes como después del convertidor catalítico. De esta manera se obtuvo la eficiencia de cada gas.

Tabla 5.9. Eficiencia del convertidor catalítico en el vehículo B.

CONVERTIDOR CATALÍTICO EN VEHICULO B			
PARÁMETRO	PROMEDIO DE EMISIONES EN CICLOS ASM 2525 Y 5015		EFICIENCIA (%)
	ANTES	DESPUES	
CO (% V)	0,436	0,069	84,17
HC (ppm)	170,131	6,378	96,25
NOx (ppm)	186,154	8,259	95,56

En la tabla 5.9 se muestra la eficiencia del convertidor catalítico del vehículo B. Los porcentajes en los tres gases contaminantes son superiores al 84%, lo que indica un excelente rendimiento. En consecuencia, no es necesario el recambio del convertidor catalítico.

5.2.4 CRITERIO DE DIAGNÓSTICO

En base a los límites de emisiones de la norma chilena, descritos en la tabla 5.7, se realiza el diagnóstico del convertidor catalítico verificando si las mediciones realizadas al final del tubo de escape, sobrepasan o no dichos límites.

Según el análisis de resultados del vehículo A, en el apartado 5.2.1, ninguna de las mediciones de CO, HC y NOx tomadas después del convertidor catalítico, sobrepasa los límites de la norma chilena, por lo tanto, dicho convertidor catalítico no necesita recambio.

De igual manera, en el análisis de resultados del vehículo B en el apartado 5.2.2, ninguna de las mediciones de CO, HC y NOx obtenidas después del convertidor catalítico, sobrepasó la norma chilena, consecuentemente, el convertidor catalítico no requiere cambio.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se pudo desarrollar la metodología de pruebas, en ciclo ASM, en base al procedimiento de EPA y se la aplicó en la ejecución de las pruebas a dos vehículos en uso, de la misma marca y modelo, con diferente año de fabricación y recorrido. Cada prueba consiste en mantener al vehículo en aceleración simulada a 15mph con el 50% de la potencia disponible durante 90s e inmediatamente después aumentar la aceleración a 25mph con el 25% de la potencia disponible durante 90s.
- Con la metodología de pruebas desarrollada se puede evaluar y diagnosticar los convertidores catalíticos de vehículos en uso, mediante el ciclo dinámico ASM. Los resultados obtenidos del vehículo A, muestran que la eficiencia del convertidor catalítico varía del 85% al 100%, lo cual indica que el convertidor catalítico se encuentra en pleno funcionamiento y no necesita recambio. Los resultados obtenidos del vehículo B, indican que la eficiencia del convertidor catalítico varía del 84% al 96%, esto sugiere que el convertidor catalítico se encuentra dentro del su rango óptimo de funcionamiento y no necesita recambio.
- Los resultados obtenidos durante los ciclos de prueba ASM, tomados antes del convertidor catalítico, permitieron visualizar el control de emisiones mediante los sistemas propios del motor. Los sistemas de inyección de combustible, distribución variable, encendido, sobrealimentación, electrónica de control y diseño de válvulas y colectores, por sí solos mantienen al motor en funcionamiento cercano a $\lambda = 1$. El convertidor catalítico es un refuerzo al control logrado en el motor.

- Se determinó que el convertidor catalítico más nuevo (vehículo A) tiene un porcentaje de reducción de HC del 100%, el cual es mayor que el convertidor catalítico más viejo (vehículo B), de misma marca y modelo de vehículo. Por lo tanto, no solo pesa la distancia recorrida por el vehículo, sino también la tecnología aplicada al funcionamiento del motor y sus sistemas.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda extender el análisis de convertidores catalíticos a más vehículos en uso, con mayor recorrido, distintos años de fabricación y diferente tecnología de los sistemas del motor.
- Se recomienda realizar, adicionalmente a las pruebas dinámicas, mediciones de emisiones contaminantes mediante pruebas estacionarias. Los resultados obtenidos se analizarán y relacionarán con las mediciones tomadas en las pruebas dinámicas.
- Se recomienda la utilización de esta metodología y su aplicación, al diagnóstico de convertidores catalíticos. En las instituciones que cuenten con el equipamiento necesario para la ejecución de las pruebas en ciclo ASM.
- Previo a la ejecución de las pruebas en ciclo ASM, se deberá verificar la posibilidad de realizar las mediciones antes del convertidor catalítico. Ciertos diseños del sistema de escape de algunos modelos de vehículos, no presentan la facilidad de desacoplar el convertidor catalítico, ya que se ubican inmediatamente después del múltiple de escape con uniones no desenroscables. Para realizar las mediciones se deberá fabricar un orificio para la entrada de la sonda, el cual se cubrirá con un tapón desenroscable

manteniendo la hermeticidad del sistema de escape. Por otro lado, para los motores en V que cuentan con doble múltiple de escape, se deberá fabricar una tubería en Y que acople a las dos salidas en una sola para la medición con la sonda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Prof. F. Payri, Prof. J.M.Desantes (eds) (2011), *Motores de combustión interna alternativos*. Primera Edición. Editorial Reverté.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), *Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications. Technical Guidance*. EPA-AA-RSPD-IM-96-2, July 1996. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/regs/im/asmfinal.pdf>
- CORPAIRE, *Proyecto de Norma Técnica. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Procedimiento de medición de la concentración de emisiones de escape de vehículos automotores en prueba dinámica de aceleración simulada ASM (Acceleration Simulated Modes)*. 2007-08-15.
- Guevara Hidalgo, M.G. (2010), *Metodología de pruebas para la evaluación de convertidores catalíticos en motores a gasolina*. Tesis de Ingeniería. Escuela Politécnica Nacional. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2255/1/CD-2998.pdf>
- Inecc, *Los vehículos automotores como fuentes de emisión*. pág. 26. Disponible en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/618/vehiculos.pdf.
- Martínez. J, *Esquema de funcionamiento del Sensor de Oxígeno*. [Texto ppt]. Electrónica Automotriz y Control, EPN, Agosto 2012.
- AS Fabricante de Catalizadores y Filtros de Partículas (2015) *Información técnica sobre catalizadores*. Disponible en: http://www.as-sl.com/pdf/info_catalizador.pdf
- Directiva del Consejo de la Unión Europea, *Directiva del Consejo de 20 de marzo de 1970 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de medidas que deben adoptarse contra la contaminación del aire causada por los gases procedentes de los motores de explosión con los que están equipados los vehículos a motor (70/220/CEE)*. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=ES>.

- Wikipedia (2015) *Normativa Europea sobre Emisiones*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Normativa_europea_sobre_emisiones.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2015) *Light-Duty Vehicle and Light-Duty Truck -- Clean Fuel Fleet Exhaust Emission Standards*. Disponible en: <http://www.epa.gov/otaq/standards/light-duty/ld-cff.htm>
- INEN (2002) *Norma NTE INEN 2204:2002 (Primera Revisión)*. Disponible en: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/2204.pdf>.
- Agencia Metropolitana de Tránsito (2014) *Revisión Técnica Vehicular. Instructivo de Revisión Vehicular 2014*. Disponible en: <http://www2.revisionquito.gob.ec/images/pdf/instructivoRTV2014.pdf>
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2015) *EPA Federal Test Procedure (FTP)*. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/standards/light-duty/ftp.htm>
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2015) *EPA US06 or Supplemental Federal Test Procedure (SFTP)*. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/standards/light-duty/sc06-sftp.htm>
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2015) *EPA SC03 Supplemental Federal Test Procedure (SFTP) with Air Conditioning*. Disponible en: <http://www3.epa.gov/otaq/standards/light-duty/sc03-sftp.htm>
- DieselNet (2015) *FTP-75*. Disponible en: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php>
- DieselNet (2015) *Inspection & Maintenance Driving Cycle IM240*. Disponible en: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/im240.php>
- Wikipedia (2015) *New European Driving Cycle*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle
- Wikipedia (2015) *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedures
- DieselNet (2015) *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*. Disponible en: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>

- Rodríguez Solís Salvador Elías (2008) *Cómo determinar el tamaño de una Muestra aplicada a la investigación Archivística*. Monografías.com. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos60/tamano-muestra-archivistica/tamano-muestra-archivistica2.shtml>
- Zucker Hank (2006) *Sample Size Formulas*. The Survey System. Disponible en: <http://www.surveysystem.net/ssformue.htm>
- Castillo Páez, S. *Propuesta de Control Estadístico de Calidad para la Fiscalización de los Centros de Revisión*. UNEMI – CCICEV.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN (2015) *Norma de emisión de NO, HC y CO para el control de NOx en vehículos en uso, de encendido por chispa (ciclo Otto), que cumplen con las normas de emisión establecidas en el DS. No. 211 de 1991 y DS. No. 54 de 1994*. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=260350>.
- International Council on Clean Transportation, *Inertia Classes Proposal (Rangos de peso inercial vehicular en Estados Unidos)*. June 3, 2011. Disponible en: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/WLTP_inertia_workingpaper_2011.pdf
- Suárez Ibujes Mario Orlando, *Gráficas de control de la calidad para variables*. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos91/graficas-control-calidad-variables/graficas-control-calidad-variables.shtml>.

ANEXOS

ANEXO I: Proyecto de Norma Técnica. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Procedimiento de medición de la concentración de emisiones de escape de vehículos automotores en prueba dinámica de aceleración simulada ASM (Acceleration Simulated Mode).

1. OBJETO

1.1. Esta norma establece el procedimiento de medición y las características del equipo para determinar la concentración de las emisiones provenientes del sistema de escape de vehículos equipados con motor de ciclo Otto, en condiciones de prueba dinámica de aceleración simulada ASM.

2. ALCANCE

2.1. Esta norma se aplica a los vehículos automotores cuyo combustible es gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.

2.2. Esta norma se aplica a las fuentes móviles terrestres de más de tres ruedas.

2.3. Esta norma se aplica a los vehículos en circulación en la vía pública

3. DEFINICIONES

Para los efectos de esta norma se adoptan las siguientes definiciones:

3.1. *Año modelo* El año asignado por el fabricante para hacer referencia a un determinado modelo, siguiendo la nomenclatura establecida en la norma NTE ISO 3779.

3.2. *ASM* Acrónimo del idioma inglés Acceleration Simulation Modes en español Modos de Aceleración Simulada.

3.3. *Ciclo de Prueba*. Es una secuencia de operaciones estándar a las que es sometido el vehículo automotor o un motor para determinar el nivel de emisiones que produce.

3.4. *Dinamómetro de chasis*. Aparato utilizado para medir la potencia generada por un vehículo automotor, a través de aplicaciones de velocidad y torque.

3.5. *Emisión de escape*. Es la descarga al aire de una o más sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso o, de alguna combinación de estos, proveniente el sistema de escape de un vehículo.

3.6. *Equipo de medición.* Es el conjunto completo de dispositivos, incluyendo todos los accesorios, para la medición de las emisiones de escape.

3.7. *Exactitud.* Grado de concordancia (la mayor o menor cercanía) entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

3.8. *Fuente móvil.* Es la fuente de emisión que por razón de su uso o propósito es susceptible de desplazarse propulsando por su propia fuente motriz. Para propósitos de esta norma, son fuentes móviles todos los vehículos automotores.

3.9. *Informe técnico.* Documento que contiene los resultados de la medición de las emisiones del motor, operando en las condiciones contempladas en esta norma.

3.10. *Motor de Ciclo Otto.* Es aquel en el cual la reacción de la mezcla aire/combustible se produce a partir de un punto caliente, generalmente una chispa eléctrica.

3.11. *Peso bruto del vehículo.* Es el peso neto del vehículo más la capacidad de carga útil o de pasajeros, definida en kilogramos.

3.12. *Peso neto del vehículo.* Es el peso real solo del vehículo en condiciones de operación normal con todo el equipo estándar de fábrica, más el combustible a la capacidad nominal del tanque.

3.13. *Prueba dinámica.* Es la medición de emisiones que se realiza con el vehículo sobre un dinamómetro de chasis, aplicando los ciclos de prueba descritos en la presente norma.

3.14. *Repetibilidad.* Grado de concordancia de resultados de sucesivas mediciones de la misma variable, realizadas en iguales condiciones de medida.

3.15. *Sistema informático de control.* Software de control del equipo que va desde el sistema de administración y gestión del Centro de Revisión y Control Vehicular a través de los mecanismos y protocolos actualmente definidos para el equipamiento de Revisión Técnica Vehicular Integral instalado en el Distrito Metropolitano de Quito.

3.16. *Sonda de prueba.* Tubo o manguera que se introduce a la salida del sistema de escape del vehículo automotor para tomar una muestra de las emisiones.

3.17. *Tabla Maestra.* Archivo digital en donde constan las características de los vehículos como: marca, modelo, peso, peso equivalente de prueba, tamaño de neumático, tipo de transmisión, tracción, potencia al freno para las dos ensayos (5015 y 2525), pérdida rueda-rodillo para las dos ensayos (5015 y 2525), que se utilizarán durante las pruebas de aceleración simulada.

3.18. *Técnico.* Persona capacitada en la operación de equipos y procedimientos para la ejecución de pruebas de aceleración simulada ASM.

3.19. *Temperatura normal de operación.* Es aquella que alcanza el motor después de operar un mínimo de 10 minutos en marcha mínima (ralentí), o cuando en estas mismas condiciones la temperatura del aceite en el cárter del motor alcance

75°C o más. En las fuentes móviles equipadas con electroventilador esta condición es confirmada después de operar un ciclo.

3.20. *Tiempo de respuesta del equipo de medición.* Es el período en segundos que el equipo requiere para medir y entregar los resultados de los ensayos realizados.

3.21. *Tiempo de calentamiento del equipo de ensayo.* Es el período en segundos entre el momento en que el equipo es energizado o encendido y el momento en que cumple con los requerimientos de estabilidad, para realizar la lectura de la variable.

3.22. *Vehículo automotor.* Vehículo de transporte terrestre, de carga o de pasajeros, que se utiliza en la vía pública, propulsado por su propia fuente motriz.

4. CLASIFICACIÓN

4.1. Esta norma se aplica a los vehículos que sean de exclusivamente de tracción delantera o posterior con un diámetro de neumáticos superior o igual a 13" (R13) y peso máximo por eje de 2700 kilogramos.

5. DISPOSICIONES GENERALES

Para los propósitos de esta norma, se establecen los siguientes ciclos de prueba de los vehículos automotores:

5.1. *ASM 5015.* Ciclo de prueba de un vehículo en dinamómetro utilizando la prueba de aceleración simulada (ASM), en donde a una velocidad constante de 15 millas/h (24 km/h), se aplica una carga externa al motor equivalente al 50% de la potencia requerida para acelerar al vehículo a una tasa de aceleración de 3.3 millas/h (5.3 km/h) por segundo.

5.2. *ASM 2525.* Ciclo de prueba de un vehículo en dinamómetro utilizando la prueba de aceleración simulada (ASM), en donde a una velocidad constante de 25 millas/h (40 km/h), se aplica una carga externa al motor equivalente al 25% de la potencia requerida para acelerar al vehículo a una tasa de aceleración de 3.3 millas/h (5.3 km/h) por segundo.

5.3. El equipo de medición debe cumplir con las especificaciones de la Environment Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos de Norteamérica, en el documento "Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements and Equipment Specifications, Technical Guidance".

6. MÉTODO DE ENSAYO

6.1. Revisión visual del vehículo

El técnico deberá realizar una revisión visual del vehículo para asegurar que éste reúne las condiciones necesarias para someterlo al procedimiento de medición previsto en esta norma.

El técnico debe revisar los componentes de control de emisiones y elementos como: filtro de aire, tapón del depósito de aceite, tapón del depósito del combustible, bayoneta de medición del nivel de aceite en el cárter, sistema de ventilación del mismo, filtro de carbón activado (cánister), mangueras de conexión al motor y al tanque de combustible cuando así estén equipados de origen y los componentes sean de fácil acceso. Específicamente, deberá revisar que el sistema de escape del vehículo no tenga fugas que puedan provocar dilución de los gases de escape o fuga de los mismos.

Si el técnico observa la ausencia de algún componente o que se encuentre desconectado algún componente de los antes citados, será motivo de rechazo inmediato.

6.2. Preparación del vehículo para las pruebas

Se deberá llevar a cabo la preparación del vehículo antes de iniciar la prueba de medición, referente al vehículo, el técnico deberá:

6.2.1 Revisar que el control del ahogador no se encuentre en operación.

6.2.2 Revisar que los accesorios del vehículo estén apagados. Esto incluye las luces y el aire acondicionado; existen algunos modelos de los vehículos automotores que por las especificaciones de su fabricante, siempre tienen las luces prendidas, en estos vehículos se deberá realizar la prueba con las luces prendidas.

6.2.3 Asegurarse que el motor del vehículo funcione a su temperatura normal de operación.

6.3. Procedimiento de medición

La prueba dinámica consiste en el procedimiento de medición y las mediciones de los gases (hidrocarburos, monóxido de carbón, oxígeno, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno) en el tubo de escape de los vehículos de motores en circulación equipados con motores de Ciclo Otto bajo condiciones de aceleración simulada con la aplicación externa de carga al motor.

La prueba dinámica se deberá utilizar para todos los vehículos, salvo aquellos que han sido identificados por sus fabricantes como inoperables en el dinamómetro.

Si al inicio de la aplicación de las pruebas se verifica emisión de humo azul o negro se debe suspender el procedimiento de medición considerando superados los límites de emisión y el consecuente rechazo del vehículo ya que se encuentra fuera de las especificaciones del fabricante.

La emisión del humo azul es indicativa de la presencia de aceite en el sistema de combustión y la emisión de humo negro es indicativa de exceso de combustible no quemado; por lo tanto, cualquiera de las dos indica altos niveles de emisiones de hidrocarburos entre otros contaminantes.

La prueba dinámica consiste en dos etapas: Una prueba a 24 kilómetros por hora (ASM 5015) con el eje de tracción del vehículo en movimiento con aplicación externa de carga y una prueba a 40 kilómetros por hora (ASM 2525) con el eje de tracción de vehículo en movimiento con la aplicación externa de carga. Para alcanzar dichas velocidades se deberá acelerar en forma gradual en un intervalo de 10 segundos.

6.3.1 Preparación para la prueba dinámica:

Antes de la prueba, es importante realizar las siguientes acciones:

6.3.1.1 Se deberá posicionar las llantas motrices del vehículo en los rodillos del dinamómetro de chasis y asegurar el vehículo de tal forma que impida su movimiento de acuerdo con las instrucciones del fabricante del dinamómetro.

6.3.1.2 El técnico opcionalmente puede colocar un ventilador enfrente del radiador del vehículo, cuando este sea necesario para asegurar que el vehículo no se sobrecaliente durante el desarrollo de las pruebas

6.3.1.3 El técnico debe avisarle al conductor del vehículo que se realizarán pruebas dinámicas a su vehículo con la aplicación de carga externa vía dinamómetro, siendo a su cuenta y riesgo cualquier daño causado por desperfecto del mismo vehículo. Los daños causados por negligencia, operación incorrecta, descuido o falta de sujeción del vehículo, será responsabilidad del técnico responsable.

6.3.1.4 El técnico debe determinar la carga y velocidad a aplicar al vehículo de acuerdo con el Peso Equivalente de Prueba que consta en la tabla maestra.

6.4. Se deberá introducir la sonda de muestreo al escape del vehículo o a una profundidad mínima de 25 centímetros. Si el diseño del escape del vehículo no permite que sea instalada a esta profundidad, se requerirá el uso de una extensión al tubo de escape.

6.5. El programa informático o software debe seleccionar la carga a aplicar por el dinamómetro para cada módulo de prueba de aceleración simulada, de acuerdo con el Peso Equivalente de Prueba, el mismo que consta en la base de datos denominada tabla maestra.

6.5.1 Para la prueba ASM 5015:

I. La potencia aplicada al vehículo durante la prueba ASM 5015, será calculada por el software con base al peso inercial del vehículo (PI), en donde:

$$PI = (\text{Peso vehicular sin carga} + 136 \text{ kilogramos}) / 0.4536$$

$$\text{Potencia aplicada al vehículo en caballos de fuerza HP} = PI / 250$$

El peso vehicular sin carga se tomará de la base de datos denominada tabla maestra.

II. En el caso de que el software del programa no cuente con los datos del peso vehicular sin carga, se deberá colocar en Peso Equivalente de Prueba de un vehículo de similares condiciones geométricas que el vehículo al cual se le realiza la prueba ASM.

6.5.2 El analizador de gases debe realizar un ajuste a cero sobre cada uno de los gases (HC, CO, CO₂ y NO_x) y un autospan sobre O₂ antes de cada secuencia de pruebas funcionales. El proceso de ajuste a cero debe incluir una revisión de los residuales de contaminantes de pruebas anteriores vía la sonda.

6.6 Prueba ASM 5015

Para el vehículo equipado con transmisión manual, se pone en marcha, se procede a acelerar siguiendo la secuencia normal de engranes que permita una operación del motor en condiciones estables y sin forzar durante un intervalo de 15 segundos, hasta que el vehículo alcance la velocidad en el rodillo de 24 kilómetros por hora + 2.4 kilómetros por hora. La velocidad angular del motor deberá estar comprendida en un rango de entre 1000 y 3000 revoluciones por minuto.

Si el vehículo está equipado con transmisión automática, la prueba se efectuará en "DRIVE" (D).

6.7 Prueba ASM 2525

Al finalizar la prueba ASM 5015, el técnico debe acelerar el vehículo en tercer o cuarto engrane, seleccionando aquel que permita una operación del motor en condiciones estables y sin forzarse durante un intervalo de 15 segundos, hasta que el vehículo alcance la velocidad en el rodillo de 40 kilómetros por hora + 4 kilómetros por hora. Si el vehículo tiene transmisión manual, las revoluciones por minuto del motor nunca deberán estar por debajo de 1000 revoluciones por minuto o por arriba de las 4000 revoluciones por minuto.

Si el vehículo está equipado con transmisión automática la prueba se efectuará en "DRIVE" (D).

En el caso de que un vehículo no pueda alcanzar la velocidad o mantener la carga especificada en la tabla maestra ó que por su diseño no pueda instalarse en el dinamómetro, se deberá aplicar el método de prueba estática.

7. INFORME DE RESULTADOS

7.1. Se considera que un vehículo pasa la prueba cuando ninguno de los valores registrados en las lecturas obtenidas de las pruebas ASM 5015 y ASM 2525 rebasen los límites máximos permisibles especificados en la Norma Técnica Ecuatoriana respectiva y que no se haya registrado humo visible, sin que haya concluido en su totalidad la prueba.

Bases de Estudio*SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES*

NORMA Oficial Mexicana NOM-041-SERMANAT-2006. Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

NORMA OFICIAL MEXICANA DE EMERGENCIA NOM-EM-132-ECOL-1998, Que establece las características del equipo y procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.

Documento Soporte de Norma de Fuentes Móviles Subdirección de Estudios Ambientales IDEAM Bogotá, Febrero de 2006.

ANEXO II: Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications. Technical Guidance.

En este anexo se describen las especificaciones del equipo de medición (dinamómetro y sistema de medición de emisiones) para las pruebas ASM. Se realizó la traducción al español en base al documento original en inglés.

85.3 Especificaciones del Equipamiento de Pruebas

(a) Especificaciones del Dinamómetro.

(1) Requerimientos Generales.

- (i) Se debe utilizar solo un diámetro de dinamómetro en todas las pruebas.
- (ii) El banco de pruebas del dinamómetro deberá dar cabida a todos los vehículos livianos y camiones ligeros hasta 8500 libras GVWR (3855,5 Kg).
- (iii) La carga del dinamómetro en modo ASM (HP5015 o HP2525) debe ser seleccionada automáticamente según los parámetros del vehículo en los registros de la prueba.
- (iv) Todo dinamómetro deberá contar con una placa de identificación que contenga como mínimo el nombre del fabricante, el nombre del proveedor del Sistema, fecha de producción, número de modelo, número de serie, tipo de dinamómetro, peso máximo de eje, máximo HP absorbido, diámetro del rodillo, ancho del rodillo, carga de inercia base y requerimientos eléctricos.

(2) Absorción de Potencia.

- (i) Carga del Vehículo. La carga aplicada al vehículo durante las pruebas ASM 5015 y 2525 seguirá la ecuación en §85.3(a)(2)(ii) a 15 y 25 mph. Cualquier potencia mostrada en el dinamómetro está expresada en HP.

(ii) $IHP = THP - PLHP - GTRL$

$HP = IHP + PLHP$

Donde:

HP: La potencia actual del vehículo en el dinamómetro. Es la suma de la potencia indicada (IHP) y las pérdidas parásitas (PLHP).

$$HP = IHP + PLHP$$

IHP: Valor de potencia indicada en el dinamómetro.

THP: Potencia total para la prueba ASM, incluye las pérdidas parásitas y de los neumáticos. Este valor es independiente del tamaño de los rodillos.

GTRL: Pérdidas genéricas en la interfaz Neumáticos/Rodillos.

PLHP: Pérdidas parásitas de potencia, debidas a la fricción interna del dinamómetro.

(iii) Rango de Absorción de Potencia. La absorción de potencia del dinamómetro deberá ser suficiente para simular la carga necesaria para llevar a cabo las pruebas ASM 5015 y 2525, en todos los vehículos ligeros y camiones ligeros hasta 8500 libras GVWR. Deberá contar con una tasa de absorción de 25 HP a 14 mph (22,53 Km/h), durante 5 minutos, con 3 minutos entre cada prueba.

(iv) Pérdidas Parásitas. Las perdidas parasitas se determinaran a 15 y 25 mph (al inicio de ciclo) y durante la calibración del dinamómetro.

(v) Amortiguador de Potencia. Solo amortiguadores de potencia eléctricos se deben utilizar. El amortiguador de potencia debe ser ajustable en incrementos de 0.1 hp a 15 MPH y 25 MPH. La exactitud debe ser de ± 0.25 HP o $\pm 2\%$ de la potencia requerida, la que sea mayor, en cualquier dirección de rotación.

(vii) Exactitud sobre el Rango de Operación. La precisión del dinamómetro durante la operación será de $\pm 0,5$ HP, en una temperatura ambiente entre 35°F y 110°F (1,67°C y 43,33°C). A cualquier temperatura constante, la precisión debe ser de ± 0.5 HP en 15 segundos en iniciada la prueba.

(3) Rodillos.

(i) Tamaño y Tipo. El dinamómetro deberá estar equipado con dos rodillos. Pueden ser eléctricos o mecánicos acoplados lado a lado y de adelante hacia atrás. El diámetro de los rodillos deberá ser entre 8,5 y 21 pulgadas. El espacio entre centros de los rodillos se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Espacio de rodillos} = (24.375 + \text{diámetro del rodillo}) * \text{Sin } 31.5153$$

Los rodillos fijos del dinamómetro deberán tener un ancho de vía interior de 30 pulgadas (76,2 cm) y exterior de 100 pulgadas (254 cm).

(iii) Diseño. El tamaño, el acabado superficial y la dureza de los rodillos debe ser de tal manera que los neumáticos no patinen en todas las condiciones meteorológicas.

(4) Inercia.

(i) Inercia Base. El dinamómetro deberá estar equipado con un volante de inercia mecánico o un simulador de inercia con un peso total de 2000 libras (907,19 Kg) \pm 40 libras (18,14 Kg). Cualquier desviación de las 2000 libras deberá ser cuantificada y el tiempo de prueba deberá ser corregido.

(ii) Simulación de Inercia. El dinamómetro deberá ser capaz de llevar a cabo como mínimo, simulaciones de inercia transitorios con una tasa de aceleración de 0 a 3.3 millas por hora por segundo (5,3 Km/h.s), con una carga mínima (potencia) de 25 HP a 14 mph (22,53 Km/h) sobre el rango de peso de inercia de 2000 a 6000 libras (907,19 a 2721,56 Kg). Para el diagnóstico de simulación parcial de inercia, el criterio de los 25 HP es un requerimiento solo para la aceleración, para la simulación completa de inercia, el requerimiento de 25 HP es para aceleración y desaceleración. La simulación de inercia mecánica será proporcionada en incrementos de 500 libras (226,8 Kg), la simulación de inercia eléctrica será proporcionada en incrementos de 1 libra (0,45 Kg). Cualquier desviación de la inercia inicial deberá ser cuantificada y la simulación de inercia deberá ser corregida.

(5) Otros Requerimientos.

(i) Velocidad del Vehículo. La medición de la velocidad del rodillo deberá tener una precisión de 0,1 mph (0,16 Km/h) sobre el rango de operación plena. El dinamómetro deberá acomodar la velocidad de los vehículos hasta 60 mph (96,56 Km/h).

(ii) Retención del Vehículo. El vehículo deberá estar restringido durante el ciclo de pruebas. El sistema de retención deberá estar diseñado para asegurar que la

fuerza vertical y horizontal en las ruedas motrices no afecte de manera significativa los niveles de emisión. El sistema de retención debe ser capaz de retener el vehículo durante todas las condiciones razonables de operación sin dañar el sistema de suspensión.

(iii) Refrigeración del Vehículo. Se debe proveer un método de prevenir el recalentamiento del vehículo. La prueba se llevará a cabo con el capó abierto y el sistema de refrigeración (ventilador) activado cuando la temperatura ambiente exceda los 72°F (22,22°C). El método de refrigeración debe infundir aire directo al sistema de refrigeración del vehículo. La capacidad del sistema de refrigeración debe ser, de al menos de 3000 SCFM, dentro de 12 pulgadas de la entrada del sistema de refrigeración del vehículo. Debe evitar refrigerar de manera incorrecta al convertidor catalítico.

(b) Sistema de Toma de Muestra de Emisiones.

(1) El sistema de toma de muestras deberá ser diseñado para asegurar durabilidad, fácil mantenimiento y mantenerse libre de fugas. Los materiales que están en contacto con los gases de la muestra no deberán contaminar o cambiar el carácter de los gases a ser analizados, incluyendo los gases de los vehículos no alimentados por gasolina (excepto motores diesel). El Sistema deberá ser resistente a la corrosión y ser capaz de soportar las temperaturas típicas del escape del vehículo, cuando el vehículo se encuentre en un ciclo de prueba ASM por 290 segundos.

(2) El sistema de muestreo establecerá los gases de escape del vehículo, deberá remover partículas y aerosoles de los gases de la muestra, deberá drenar el agua condensada de la muestra si es necesario, y entregará la muestra de gas resultante a los analizadores/sensores para el análisis y luego entregará la muestra analizada directamente. El sistema de muestreo deberá, como mínimo, constar de una sonda de tubo de escape, una línea de muestra flexible, sistema de extracción de agua, un filtro de partículas, bomba de muestreo, y los componentes de control de flujo.

(3) Sonda de Muestreo.

(i) Inserción. La sonda de muestreo deberá permitir al menos una profundidad de inserción de 16 pulgadas de la punta de la sonda dentro del escape del vehículo. Además, la sonda se insertará por lo menos 10 pulgadas dentro de escape del vehículo. El uso de una extensión del tubo de escape está permitida, siempre y cuando la extensión no cambie la contrapresión de escape en más de $\pm 1,0$ pulgadas de presión de agua.

(ii) Retención. La sonda deberá incorporar un medio de retención positivo para evitar que se salga del tubo de escape durante el uso.

(iii) Flexibilidad. La sonda deberá estar diseñada de manera que la punta se extienda 16 pulgadas en el tubo de escape. La punta de la sonda se protegerá de manera que los desechos no se recojan por la sonda cuando se inserte en el tubo de escape

(iv) Punta de la sonda. Puntas de las sondas deberán estar diseñadas y construidas para evitar la dilución de la muestra.

(v) Materiales. Todos los materiales en contacto con los gases de escape antes y durante la parte de medición del sistema no se verán afectados por el y no afectarán la muestra (es decir, los materiales no deberán reaccionar con la muestra, y no deberán contaminar la muestra). Los materiales aceptables incluyen el acero inoxidable, teflón, caucho de silicona, y Tedlar. Metales diferentes con factores de expansión térmica de más de 5% no se utilizarán, ya sea en la construcción de sondas o conectores. La sonda de muestreo será de acero inoxidable o de otro material no corrosivo, no reactivo que pueda soportar temperaturas de los gases de escape en la punta de la sonda de hasta 1,100°F durante 10 minutos.

(vi) Mangueras y Conexiones del Sistema. Mangueras y todos los demás componentes de manipulación de muestras deben estar contruidos de un material no reactivo, no corrosivo, que no afecte la alta temperatura, o se vean afectadas por los componentes de escape y gases trazadores.

(vii) Escape Doble. El sistema de toma de muestra deberá estar equipado para la prueba de vehículos de doble escape. Al probar un vehículo con tubos de escape duales funcionales, una sonda de muestreo doble de un diseño certificado por el

fabricante del analizador se utilizará para proporcionar igualdad de flujo en cada muestra. El requisito de flujo igual se considera que se cumple si el caudal en cada etapa de la sonda se ha medido en dos caudales de muestreo (la tasa normal y una tasa igual a la aparición de bajo flujo), y si los caudales en cada uno de los tubos se encuentran iguales entre sí (a menos de 15% de la velocidad de flujo en el tubo que tiene flujo inferior).

(4) Filtro de Partículas. El filtro de partículas deberá ser capaz de atrapar 97% de todas las partículas y aerosoles de 5 micras o más grandes. El elemento del filtro no deberá absorber hidrocarburos. La carcasa del filtro deberá ser transparente o translúcida para permitir al operador observar los elementos de filtro sin quitar la carcasa. El elemento filtrante debe ser fácilmente reemplazable y deberá proveer un sellado fiable después de los cambios de elementos de filtro.

(5) Trampa de Agua. La trampa de agua deberá estar dimensionada para eliminar el agua de la muestra de escape de los vehículos alimentados con gasolina, propano, gas natural comprimido, gasolina reformulada, mezclas de alcohol o puro, y los combustibles oxigenados. . El elemento del filtro, el envase y mangueras deberán ser resistentes, tanto a los combustibles como a sus gases de escape. El agua producto de la condensación, se drena desde el envase del separador de agua, ya sea de forma continua o como parte de un mantenimiento programado.

(6) Indicador de Baja Presión. El analizador deberá bloquear la realización de pruebas oficiales, cuando el flujo de la muestra esté por debajo del nivel aceptable. El sistema de muestreo deberá estar equipado con un medidor de flujo (o equivalente) que debe indicar la degradación de flujo de la muestra cuando el error de medida supere el 3% del valor del gas utilizado para la comprobación, o cuando el tiempo de respuesta del sistema sea superior a los 13 segundos al 90 por ciento de un cambio en la entrada (excluyendo NO), el que sea menor.

(7) Sistema de Ventilación del Escape. Las altas cantidades de emisiones vehiculares generadas durante la prueba en modo de carga deberán ser ventiladas adecuadamente para evitar la acumulación de concentraciones peligrosas de HC, CO, CO₂ y NO_x. Ventilación suficiente se facilitará en la

estación para mantener los niveles de HC, CO, CO₂ y NO por debajo de las normas de OSHA.

(i) El sistema de ventilación deberá descargar el escape del vehículo fuera del edificio.

(ii) El flujo del sistema de toma de gases de escape no deberá causar dilución de los gases de escape en la punta de la sonda de muestra.

(iii) El flujo del sistema de toma de gases de escape no deberá provocar un cambio de más de $\pm 1,0$ pulgadas de presión de agua en el sistema de escape del vehículo a la salida del sistema de escape.

ANEXO III: International Council on Clean Transportation, Inertia Classes Proposal (Rangos de peso inercial vehicular en Estados Unidos).

El peso equivalente de prueba del vehículo (ETW) o masa de referencia define el rango de peso inercial utilizado en el dinamómetro para la simulación de los ciclos de prueba ASM.

En el software del dinamómetro de chasis se incluye una tabla maestra con los valores de ETW y su valor correspondiente de peso inercial. Los valores se describen en las tablas A1, A2 y A3.

Tabla A1. Rangos de peso inercial vehicular en Estados Unidos.

Masa de Referencia, RW				Rango de Inercia, IC		Rango de Peso Inercial, IWC	
(Libras)		(Kilogramos)		(Libras)	(Kilogramos)	(Libras)	(Kilogramos)
1,063	< RW ≤	1,062	481	1,031	468	1,000	454
1,125	< RW ≤	1,124	510	1,093	496	1,000	454
1,188	< RW ≤	1,187	538	1,156	524	1,000	454
1,250	< RW ≤	1,249	567	1,218	553	1,250	567
1,313	< RW ≤	1,312	595	1,281	581	1,250	567
1,375	< RW ≤	1,374	623	1,343	609	1,250	567
1,438	< RW ≤	1,437	652	1,406	638	1,250	567
1,499	< RW ≤	1,499	680	1,468	666	1,500	680
1,562	< RW ≤	1,562	708	1,531	694	1,500	680
1,624	< RW ≤	1,624	737	1,593	723	1,500	680
1,687	< RW ≤	1,687	765	1,656	751	1,500	680
1,749	< RW ≤	1,749	793	1,718	779	1,750	794
1,812	< RW ≤	1,812	822	1,781	808	1,750	794
1,874	< RW ≤	1,874	850	1,843	836	1,750	794
1,937	< RW ≤	1,937	878	1,906	864	1,750	794
1,999	< RW ≤	1,999	907	1,968	893	2,000	907
2,062	< RW ≤	2,062	935	2,031	921	2,000	907
2,124	< RW ≤	2,124	964	2,093	950	2,000	907
2,187	< RW ≤	2,187	992	2,156	978	2,000	907
2,249	< RW ≤	2,249	1020	2,218	1,006	2,250	1,021
2,312	< RW ≤	2,312	1049	2,281	1,035	2,250	1,021
2,374	< RW ≤	2,374	1077	2,343	1,063	2,250	1,021
2,437	< RW ≤	2,437	1105	2,406	1,091	2,250	1,021
2,499	< RW ≤	2,499	1134	2,468	1,120	2,500	1,134
2,562	< RW ≤	2,562	1162	2,531	1,148	2,500	1,134
2,624	< RW ≤	2,624	1190	2,594	1,176	2,500	1,134
2,687	< RW ≤	2,687	1219	2,656	1,205	2,500	1,134
2,749	< RW ≤	2,749	1247	2,719	1,233	2,750	1,247
2,812	< RW ≤	2,812	1275	2,781	1,261	2,750	1,247
2,874	< RW ≤	2,874	1304	2,844	1,290	2,750	1,247
2,937	< RW ≤	2,937	1332	2,906	1,318	2,750	1,247

Tabla A2. Rangos de peso inercial vehicular en Estados Unidos.
(continuación)

Masa de Referencia, RW				Rango de Inercia, IC		Rango de Peso Inercial, IWC			
(Libras)		(Kilogramos)		(Libras)	(Kilogramos)	(Libras)	(Kilogramos)		
2,938	< RW ≤	2,999	1333	< RW ≤	1360	2,969	1,347	3,000	1,361
3,000	< RW ≤	3,062	1361	< RW ≤	1389	3,031	1,375	3,000	1,361
3,063	< RW ≤	3,124	1389	< RW ≤	1417	3,094	1,403	3,000	1,361
3,125	< RW ≤	3,187	1418	< RW ≤	1446	3,156	1,432	3,000	1,361
3,188	< RW ≤	3,249	1446	< RW ≤	1474	3,219	1,460	3,000	1,361
3,250	< RW ≤	3,312	1474	< RW ≤	1502	3,281	1,488	3,000	1,361
3,313	< RW ≤	3,374	1503	< RW ≤	1531	3,344	1,517	3,500	1,588
3,375	< RW ≤	3,437	1531	< RW ≤	1559	3,406	1,545	3,500	1,588
3,438	< RW ≤	3,499	1559	< RW ≤	1587	3,469	1,573	3,500	1,588
3,500	< RW ≤	3,562	1588	< RW ≤	1616	3,531	1,602	3,500	1,588
3,563	< RW ≤	3,624	1616	< RW ≤	1644	3,594	1,630	3,500	1,588
3,625	< RW ≤	3,687	1644	< RW ≤	1672	3,656	1,658	3,500	1,588
3,688	< RW ≤	3,749	1673	< RW ≤	1701	3,719	1,687	3,500	1,588
3,750	< RW ≤	3,812	1701	< RW ≤	1729	3,781	1,715	3,500	1,588
3,813	< RW ≤	3,874	1730	< RW ≤	1757	3,844	1,743	4,000	1,814
3,875	< RW ≤	3,937	1758	< RW ≤	1786	3,906	1,772	4,000	1,814
3,938	< RW ≤	3,999	1786	< RW ≤	1814	3,969	1,800	4,000	1,814
4,000	< RW ≤	4,062	1815	< RW ≤	1842	4,031	1,829	4,000	1,814
4,063	< RW ≤	4,125	1843	< RW ≤	1871	4,094	1,857	4,000	1,814
4,126	< RW ≤	4,187	1871	< RW ≤	1899	4,156	1,885	4,000	1,814
4,188	< RW ≤	4,250	1900	< RW ≤	1928	4,219	1,914	4,000	1,814
4,251	< RW ≤	4,312	1928	< RW ≤	1956	4,281	1,942	4,000	1,814
4,313	< RW ≤	4,375	1956	< RW ≤	1984	4,344	1,970	4,000	1,814
4,376	< RW ≤	4,437	1985	< RW ≤	2013	4,406	1,999	4,500	2,041
4,438	< RW ≤	4,500	2013	< RW ≤	2041	4,469	2,027	4,500	2,041
4,501	< RW ≤	4,562	2041	< RW ≤	2069	4,531	2,055	4,500	2,041
4,563	< RW ≤	4,625	2070	< RW ≤	2098	4,594	2,084	4,500	2,041
4,626	< RW ≤	4,687	2098	< RW ≤	2126	4,656	2,112	4,500	2,041
4,688	< RW ≤	4,750	2126	< RW ≤	2154	4,719	2,140	4,500	2,041

Tabla A3. Rangos de peso inercial vehicular en Estados Unidos.
(continuación)

Masa de Referencia, RW				Rango de Inercia, IC		Rango de Peso Inercial, IWC			
(Libras)		(Kilogramos)		(Libras)	(Kilogramos)	(Libras)	(Kilogramos)		
4,688	< RW ≤	4,750	2126	< RW ≤	2154	4,719	2,140	4,500	2,041
4,751	< RW ≤	4,812	2155	< RW ≤	2183	4,781	2,169	4,500	2,041
4,813	< RW ≤	4,875	2183	< RW ≤	2211	4,844	2,197	4,500	2,041
4,876	< RW ≤	4,937	2212	< RW ≤	2239	4,906	2,225	5,000	2,268
4,938	< RW ≤	5,000	2240	< RW ≤	2268	4,969	2,254	5,000	2,268
5,001	< RW ≤	5,062	2268	< RW ≤	2296	5,031	2,282	5,000	2,268
5,063	< RW ≤	5,125	2297	< RW ≤	2325	5,094	2,311	5,000	2,268
5,126	< RW ≤	5,187	2325	< RW ≤	2353	5,156	2,339	5,000	2,268
5,188	< RW ≤	5,250	2353	< RW ≤	2381	5,219	2,367	5,000	2,268
5,251	< RW ≤	5,312	2382	< RW ≤	2410	5,281	2,396	5,000	2,268
5,313	< RW ≤	5,375	2410	< RW ≤	2438	5,344	2,424	5,000	2,268
5,376	< RW ≤	5,437	2438	< RW ≤	2466	5,406	2,452	5,500	2,495
5,438	< RW ≤	5,500	2467	< RW ≤	2495	5,469	2,481	5,500	2,495
5,501	< RW ≤	5,562	2495	< RW ≤	2523	5,531	2,509	5,500	2,495
5,563	< RW ≤	5,625	2523	< RW ≤	2551	5,594	2,537	5,500	2,495
5,626	< RW ≤	5,687	2552	< RW ≤	2580	5,656	2,566	5,500	2,495
5,688	< RW ≤	5,750	2580	< RW ≤	2608	5,719	2,594	5,500	2,495
				Continue in increments of 62.5 pounds		Continue in increments of 500 pounds			

ANEXO IV: Gráficas de control de la calidad para variables: Factores críticos de las gráficas o cartas de control.

Los gráficos de control para evaluar las variaciones en las mediciones necesitan de los factores críticos de las gráficas (Tabla A4) para el cálculo de la media y los límites.

Tabla A4. Factores críticos de las gráficas

TABLA Factores críticos de las gráficas o cartas de control					
n	Gráfica para medias	Gráfica para rangos	Factores de los límites de control		
	Factor para el límite de control $A_2 = 3/(d_{2n})$	Factor para la recta central d_2	$D_3 = 1-3(d_3/d_2)$	$D_4 = 1+3(d_3/d_2)$	d_3
2	1,881	1,128	-1,267=0	3,267	0,8525
3	1,023	1,693	-0,574=0	2,574	0,8884
4	0,729	2,059	-0,282=0	2,282	0,8798
5	0,577	2,326	-0,114=0	2,114	0,8641
6	0,483	2,534	-0,004=0	2,004	0,8480
7	0,419	2,704	0,076	1,924	0,8330
8	0,373	2,847	0,136	1,864	0,8200
9	0,337	2,970	0,184	1,816	0,8080
10	0,308	3,078	0,223	1,777	0,7970
11	0,285	3,173	0,256	1,744	0,7870
12	0,266	3,258	0,284	1,716	0,7780
13	0,249	3,336	0,308	1,692	0,7700
14	0,235	3,407	0,329	1,671	0,7620
15	0,223	3,472	0,348	1,652	0,7550
16	0,212	3,532	0,364	1,636	0,7490
17	0,203	3,588	0,379	1,621	0,7430
18	0,194	3,640	0,392	1,608	0,7380
19	0,187	3,689	0,404	1,596	0,7330
20	0,180	3,735	0,414	1,586	0,7290
21	0,173	3,778	0,425	1,575	0,7240
22	0,167	3,819	0,434	1,566	0,7200
23	0,162	3,858	0,443	1,557	0,7160
24	0,157	3,895	0,452	1,548	0,7120
25	0,153	3,931	0,459	1,541	0,7090

ANEXO V: Ejecución de pruebas ASM en vehículos de prueba

Las siguientes fotografías muestran la ejecución de las pruebas ASM en los vehículos de prueba A y B, tanto antes como después del convertidor catalítico.



Fig. A1. Dinamómetro de chasis



Fig. A2. Vehículos A y B ubicados y sujetos en el dinamómetro antes de las pruebas.



Fig. A3. Vehículo A con la sonda de toma de muestra de emisiones, durante las mediciones tomadas después del convertidor catalítico.



Fig. A4. Vista inferior del vehículo B durante las pruebas.



Fig. A5. Sonda de toma de muestra de emisiones, en el vehículo B, para la toma de mediciones antes del convertidor catalítico.

ANEXO VI: Registro de resultados de las pruebas en ciclo ASM 2525 y 5015.

El registro de los resultados obtenidos mediante las mediciones en ciclo ASM de las emisiones de los vehículos de prueba A y B, se lo realizó en las tablas A5 y A6 respectivamente.

Tabla A5. Registro de mediciones del vehículo A.

DATOS DEL VEHÍCULO DE PRUEBA										
Marca: Chevrolet				Año: 2013			Kilometraje: 92750			
Modelo: Grand Vitara STD TM 2.0L 5P 4X2				Placa: PCF 1335			Combustible: Extra			
RESULTADOS DE EMISIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALITICO										
PRUEBAS DINÁMICAS - CICLO ASM	PARÁMETROS									
	CO (% V)		CO ₂ (% V)		HC (ppm)		O ₂ (% V)		NOx (ppm)	
	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15
MEDICIÓN 1	0,914	0,367	8,119	9,532	331,6	112,08	7,109	4,7	532,99	691,17
MEDICIÓN 2	0,45	0,401	8,8	9,92	249,26	105,15	6,328	4,086	694,72	745,41
MEDICIÓN 3	0,447	0,436	8,87	10,279	237,78	103,44	6,245	3,403	709,03	809,88
MEDICIÓN 4	0,4702	0,428	9,58	10,361	236,38	101,94	5,181	3,25	735,4	813,24
MEDICIÓN 5	0,4435	0,435	8,8	10,451	241,81	99,21	6,369	3,062	705,16	825,83
PROMEDIO (X)	0,5449	0,4134	8,8338	10,109	259,37	104,36	6,2464	3,7002	675,46	777,11
RANGO (R)	0,4705	0,069	1,461	0,919	95,22	12,87	1,928	1,638	202,41	134,66
RESULTADOS DE EMISIONES DESPUES DEL CONVERTIDOR CATALITICO										
PRUEBAS DINÁMICAS - CICLO ASM	PARÁMETROS									
	CO (% V)		CO ₂ (% V)		HC (ppm)		O ₂ (% V)		NOx (ppm)	
	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15
MEDICIÓN 1	0,095	0,03	12,91	12,92	0,00	0,00	0,06	0,154	56,41	11,46
MEDICIÓN 2	0,086	0,03	12,9	12,93	0,00	0,00	0,06	0,15	69,48	14,54
MEDICIÓN 3	0,11	0,031	12,9	12,89	0,00	0,00	0,06	0,147	73,68	33,73
MEDICIÓN 4	0,09	0,023	12,9	12,86	0,00	0,00	0,06	0,14	79,63	21,25
MEDICIÓN 5	0,1056	0,02	12,9	12,9	0,00	0,00	0,06	0,131	82,871	9,4
PROMEDIO (X)	0,0973	0,0268	12,902	12,9	0,00	0,00	0,06	0,1444	72,414	18,076
RANGO (R)	0,024	0,011	0,01	0,07	0,00	0,00	0	0,023	26,461	24,33

Tabla A6. Registro de mediciones del vehículo B.

DATOS DEL VEHÍCULO DE PRUEBA										
Marca: Chevrolet				Año: 2011			Kilometraje: 46004			
Modelo: Grand Vitara STD TM 2.0L 5P 4X2				Placa: PBK 7145			Combustible: Super			
RESULTADOS DE EMISIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALITICO										
PRUEBAS DINÁMICAS - CICLO ASM	PARÁMETROS									
	CO (% V)		CO ₂ (% V)		HC (ppm)		O ₂ (% V)		NOx (ppm)	
	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15
MEDICIÓN 1	0,582	0,392	8,541	9,872	270,43	108,52	6,719	4,393	103,86	168,29
MEDICIÓN 2	0,4485	0,4185	8,835	10,109	234,52	103,4	6,207	3,236	150,88	227,43
MEDICIÓN 3	0,4586	0,423	9,225	10,23	237,08	102,69	5,87	3,575	152,12	211,56
MEDICIÓN 4	0,4538	0,4315	9,188	10,164	239,1	101,68	5,975	3,165	150,28	224,32
MEDICIÓN 5	0,4467	0,414	8,8595	10,19	240,4	102,18	6,149	3,457	157,1	215,54
PROMEDIO (X)	0,4779	0,4158	8,9297	10,113	244,31	103,69	6,184	3,5652	142,85	209,43
RANGO (R)	0,135	0,0395	0,684	0,358	35,91	6,84	0,849	1,228	53,24	59,14
RESULTADOS DE EMISIONES DESPUES DEL CONVERTIDOR CATALITICO										
PRUEBAS DINÁMICAS - CICLO ASM	PARÁMETROS									
	CO (% V)		CO ₂ (% V)		HC (ppm)		O ₂ (% V)		NOx (ppm)	
	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15
MEDICIÓN 1	0,054	0,081	12,354	12,468	3,967	5,662	0,04	0,063	4	6,437
MEDICIÓN 2	0,062	0,045	12,487	12,479	5,44	0,346	0,033	0,046	6,351	0,422
MEDICIÓN 3	0,123	0,049	12,389	12,485	4,921	1,858	0,033	0,04	18,123	4,609
MEDICIÓN 4	0,117	0,065	12,402	12,47	18,45	15,851	0,03	0,04	24,629	14,719
MEDICIÓN 5	0,341	0,042	12,295	12,504	12,791	1,558	0,076	0,04	41,444	1,502
PROMEDIO (X)	0,1394	0,0564	12,385	12,481	9,1138	5,055	0,0424	0,0458	18,909	5,5378
RANGO (R)	0,287	0,039	0,192	0,036	8,824	15,505	0,046	0,023	37,444	14,297

ANEXO VII: Registro de cálculo de media, rango y límites de media y rango para el análisis de resultados.

Los cálculos de media, rango y sus límites, necesarios para los gráficos de control estadístico, se describen en las tablas A7 y A8 para el vehículo A y en las tablas A9 y A10 para el vehículo B.

Tabla A7. Valores de media, rango y límites del vehículo A.

MEDIA GENERAL Y RANGO MEDIO DE MEDICIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO						
PARÁMETROS	ASM 25/25					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL_R	LCL_R
CO (% V)	0,54	0,82	0,27	0,47	0,99	0,00
CO₂ (% V)	8,83	9,68	7,99	1,46	3,09	0,00
HC (ppm)	259,37	314,31	204,42	95,22	201,30	0,00
O₂ (% V)	6,25	7,36	5,13	1,93	4,08	0,00
NOx (ppm)	675,46	792,25	558,67	202,41	427,89	0,00
PARÁMETROS	ASM 50/15					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL_R	LCL_R
CO (% V)	0,41	0,45	0,37	0,07	0,15	0,00
CO₂ (% V)	10,11	10,64	9,58	0,92	1,94	0,00
HC (ppm)	104,36	111,79	96,94	12,87	27,21	0,00
O₂ (% V)	3,70	4,65	2,76	1,64	3,46	0,00
NOx (ppm)	777,11	854,80	699,41	134,66	284,67	0,00

Tabla A8. Valores de media, rango y límites del vehículo A.

MEDIA GENERAL Y RANGO MEDIO DE MEDICIONES DESPUES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO						
PARÁMETROS	ASM 25/25					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL _R	LCL _R
CO (% V)	0,10	0,11	0,08	0,02	0,05	0,00
CO ₂ (% V)	12,90	12,91	12,90	0,01	0,02	0,00
HC (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O ₂ (% V)	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00
NOx (ppm)	72,41	87,68	57,15	26,46	55,94	0,00
PARÁMETROS	ASM 50/15					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL _R	LCL _R
CO (% V)	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,00
CO ₂ (% V)	12,90	12,94	12,90	0,07	0,15	0,00
HC (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O ₂ (% V)	0,14	0,16	0,14	0,02	0,05	0,00
NOx (ppm)	18,08	32,11	18,08	24,33	51,43	0,00

Tabla A9. Valores de media, rango y límites del vehículo B.

MEDIA GENERAL Y RANGO MEDIO DE MEDICIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO						
PARÁMETROS	ASM 25/25					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL _R	LCL _R
CO (% V)	0,48	0,56	0,40	0,14	0,29	0,00
CO ₂ (% V)	8,93	9,32	8,54	0,68	1,45	0,00
HC (ppm)	244,31	265,03	223,59	35,91	75,91	0,00
O ₂ (% V)	6,18	6,67	5,69	0,85	1,79	0,00
NOx (ppm)	142,85	173,57	112,13	53,24	112,55	0,00
PARÁMETROS	ASM 50/15					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL _R	LCL _R
CO (% V)	0,42	0,44	0,39	0,04	0,08	0,00
CO ₂ (% V)	10,11	10,32	9,91	0,36	0,76	0,00
HC (ppm)	103,69	107,64	99,75	6,84	14,46	0,00
O ₂ (% V)	3,57	4,27	2,86	1,23	2,60	0,00
NOx (ppm)	209,43	243,55	175,30	59,14	125,02	0,00

Tabla A10. Valores de media, rango y límites del vehículo B.

MEDIA GENERAL Y RANGO MEDIO DE MEDICIONES DESPUES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO						
PARÁMETROS	ASM 25/25					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL_R	LCL_R
CO (% V)	0,14	0,30	-0,03	0,29	0,61	0,00
CO₂ (% V)	12,39	12,50	12,27	0,19	0,41	0,00
HC (ppm)	9,11	14,21	4,02	8,82	18,65	0,00
O₂ (% V)	0,04	0,07	0,02	0,05	0,10	0,00
NOx (ppm)	18,91	40,51	-2,70	37,44	79,16	0,00
PARÁMETROS	ASM 50/15					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL_R	LCL_R
CO (% V)	0,06	0,08	0,03	0,04	0,08	0,00
CO₂ (% V)	12,48	12,50	12,46	0,04	0,08	0,00
HC (ppm)	5,06	14,00	-3,89	15,51	32,78	0,00
O₂ (% V)	0,05	0,06	0,03	0,02	0,05	0,00
NOx (ppm)	5,54	13,79	-2,71	14,30	30,22	0,00

ANEXO VIII: Formato de informe de resultados

El siguiente informe es el resultado de la puesta en práctica del procedimiento de pruebas en ciclo ASM para el diagnóstico de convertidores catalíticos, descrito en la tesis.

INFORME TÉCNICO

Diagnóstico de convertidores catalíticos mediante pruebas en ciclo ASM

- 1) Objetivo General: Diagnosticar el convertidor catalítico de un vehículo con motor de encendido provocado, mediante la realización de pruebas en ciclo ASM.
- 2) Objetivos Específicos:
 - Ejecutar pruebas de emisiones contaminantes, antes y después del convertidor catalítico.
 - Determinar la eficiencia del convertidor catalítico del vehículo.
- 3) Alcance: El diagnóstico de convertidores catalíticos solo puede ser ejecutado en vehículos con motores de encendido provocado, que no presenten ninguna falla o fuga visible en el motor.
- 4) Justificación: En la actualidad es obligatorio vigilar la calidad de las emisiones vehiculares. El principal elemento de control en los vehículos con motores de encendido provocado es el convertidor catalítico. Por lo que es necesario realizar pruebas dinámicas en ciclo ASM para que se evalúe a los convertidores catalíticos, siguiendo un procedimiento que permita determinar la eficiencia de los mismos.
- 5) Metodología de Pruebas: Se realizará la preparación y ejecución de pruebas en vehículos con motores de encendido provocado, según la metodología de pruebas expuesta en el apartado 4.2. de la presente tesis.
- 6) Registro de Datos: Los resultados obtenidos en las pruebas en ciclo ASM realizadas se registran en la tabla I1:

Tabla I1. Registro de resultados de pruebas

DATOS DEL VEHÍCULO DE PRUEBA											
Marca:				Año:				Kilometraje:			
Modelo:				Placa:				Combustible:			
RESULTADOS DE EMISIONES ANTES DEL CONVERTIDOR CATALITICO											
PRUEBAS DINÁMICAS - CICLO ASM	PARÁMETROS										
	CO (% V)		CO ₂ (% V)		HC (ppm)		O ₂ (% V)		NOx (ppm)		
	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	
MEDICIÓN 1											
MEDICIÓN 2											
MEDICIÓN 3											
MEDICIÓN 4											
MEDICIÓN 5											
PROMEDIO (X)											
RANGO (R)											
RESULTADOS DE EMISIONES DESPUES DEL CONVERTIDOR CATALITICO											
PRUEBAS DINÁMICAS - CICLO ASM	PARÁMETROS										
	CO (% V)		CO ₂ (% V)		HC (ppm)		O ₂ (% V)		NOx (ppm)		
	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	25/25	50/15	
MEDICIÓN 1											
MEDICIÓN 2											
MEDICIÓN 3											
MEDICIÓN 4											
MEDICIÓN 5											
PROMEDIO (X)											
RANGO (R)											

El Promedio (X) es el promedio de las mediciones realizadas de cada gas en un ciclo ASM. El Rango (R) es el rango entre la mayor y la menor de las mediciones de cada gas en un ciclo ASM.

7) Control Estadístico:

Para determinar la variación de un parámetro o medición se realizan gráficos de control. Se calcula la media general, el rango medio y sus límites superior e inferior. En base a estos cálculos, se establecen las mediciones que se encuentren dentro de los rangos calculados y se calculan los promedios finales.

Primero se determina el número de muestras k y el tamaño muestral n . Se calcula la media general en base al promedio (X):

$$Xg = \frac{\sum X}{k}$$

Se calcula el rango medio en base al rango (R):

$$Rm = \frac{\sum R}{k}$$

Se determinan los valores de las constantes A_2 , D_3 y D_4 (ANEXO 4) según el tamaño muestral n .

Se calculan los límites de rangos:

$$UCL_R = D_4 * Rm$$

$$LCL_R = D_3 * Rm$$

Se calculan los límites de media:

$$UCL_X = Xg + A_2 * Rm$$

$$LCL_X = Xg - A_2 * Rm$$

Se realizan los gráficos de control de media y rango. Con base en el gráfico de media, se establecen las mediciones que se encuentren dentro de los límites superior e inferior, las cuales se utilizarán para el cálculo del promedio final de cada gas en un ciclo ASM.

Se calcula el promedio final:

$$X_{gas} = \frac{\sum \text{mediciones válidas}}{\# \text{ de mediciones válidas}}$$

Los cálculos de control estadístico pueden registrarse en la tabla I2 para una mejor observación.

Tabla I2. Registro de cálculos de control estadístico.

MEDIA GENERAL Y RANGO MEDIO DE MEDICIONES DESPUES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO						
PARÁMETROS	ASM 25/25					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL _R	LCL _R
CO (% V)						
CO ₂ (% V)						
HC (ppm)						
O ₂ (% V)						
NOx (ppm)						
PARÁMETROS	ASM 50/15					
	Xg	UCLx	LCLx	Rm	UCL _R	LCL _R
CO (% V)						
CO ₂ (% V)						
HC (ppm)						
O ₂ (% V)						
NOx (ppm)						

8) Análisis de Resultados:

Los gases contaminantes que se analizan son CO, HC y NOx. Los promedios finales antes calculados se registran en la tabla I3. Luego se calcula un promedio global entre los dos promedios de cada ciclo ASM. Finalmente se calcula la eficiencia con la fórmula:

$$\%Eficiencia = \frac{P_{AC} - P_{DC}}{P_{AC}} * 100$$

Dónde:

P_{AC} = Promedio global de mediciones tomadas antes del convertidor catalítico.

P_{DC} = Promedio global de mediciones tomadas después del convertidor catalítico.

Tabla I3. Eficiencia del convertidor catalítico.

EFICIENCIA DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO							
PARÁMETRO	PROMEDIO FINAL EN ASM 2525		PROMEDIO FINAL EN ASM 5015		PROMEDIO GLOBAL DE ASM 2525 Y 5015		EFICIENCIA (%)
	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES	
CO							
HC							
NOx							

9) Conclusiones:

Después de haber calculado la eficiencia del convertidor catalítico en los tres gases contaminantes y comparando las emisiones obtenidas con los límites de la norma chilena, se concluye que el mismo (SI/NO) necesita recambio.