

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“COMPARACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR AL
UTILIZAR CICLOS DE CONDUCCIÓN IM240 Y ON BOARD EN LA
CIUDAD DE QUITO”**

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

ANDRÉS JACINTO URBINA GUZMÁN

pelt_n@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. ÁNGEL PORTILLA AGUILAR Msc.

angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, marzo de 2016

DECLARACIÓN

Yo, Andrés Jacinto Urbina Guzmán, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Andrés Jacinto Urbina Guzmán

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el ingeniero Andrés Jacinto Urbina Guzmán, bajo mi supervisión.

Ing. Ángel Adalberto Portilla Aguilar Msc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Dios, por haberme guiado por el camino del bien, brindándome sabiduría e inteligencia para culminar con éxito una etapa más de mi vida, y de esta manera servir a la humanidad con mis conocimientos para el mejoramiento del país, de mi familia y el mío.

A mi familia, que con su apoyo absoluto, me han inculcado que nunca se debe dejar de luchar por lo que se desea conseguir.

Al Ing. Ángel Portilla Aguilar, por sus instrucciones, orientaciones, su manera de trabajar, constancia, paciencia y estimulación, que han sido imprescindibles para mi formación como profesional.

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo mi amor a mi amada esposa, Jazmín Pozo, quien me brindo su cariño, apoyo incondicional, comprensión y paciencia para que pudiera culminar mi maestría, son la demostración de su gran amor.

A mis hijos Joseph, Julián y mi último que está en camino, quienes me ofrecieron el tiempo que les pertenecía, ustedes me estimulan cada día a superarme, para entregarles siempre lo mejor y son mi motivo más grande para concluir con éxito este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
RESUMEN	XX
PRESENTACIÓN	XXI
CAPÍTULO 1.....	1
FUNDAMENTOS	1
1.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN DE CICLO OTTO	1
1.1.1 CICLO OTTO	1
1.1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	3
1.2 LA COMBUSTIÓN	5
1.2.1 TERMODINÁMICA DE LA COMBUSTIÓN	5
1.2.1.1 Propiedades y composición del aire	5
1.2.1.2 Estequiometría.....	6
1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN.....	8
1.2.2.1 Combustión completa	8
1.2.2.2 Combustión incompleta	8
1.2.2.3 Combustión estequiométrica o teórica	9
1.2.2.4 Combustión pobre	9
1.2.2.5 Combustión rica	9
1.3 EMISIONES CONTAMINANTES	9
1.3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES.....	10

1.3.1.1 Emisiones contaminantes inofensivas	10
1.3.1.1.1 Nitrógeno (N_2).....	10
1.3.1.1.2 Oxígeno (O_2)	10
1.3.1.1.3 Agua (H_2O)	11
1.3.1.1.4 Dióxido de carbono (CO_2).....	11
1.3.1.2 Emisiones contaminantes tóxicas	11
1.3.1.2.1 Monóxido de carbono (CO).....	11
1.3.1.2.2 Óxidos de nitrógeno (NO_x)	11
1.3.1.2.3 Hidrocarburo (HC)	11
1.3.2 CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES	12
1.3.2.1 Ignición electrónica	12
1.3.2.2 Control de la combustión (Sensor de oxígeno)	12
1.3.2.3 Sistema de inyección de combustible	13
1.3.2.4 Unidad electrónica de control	13
1.3.2.5 Sistema de inyección adicional de aire en el escape	14
1.3.2.6 Sistema de ventilación positiva del Cárter (PCV).....	14
1.3.2.7 Sistema de emisiones evaporativas (EVAP).....	15
1.3.2.8 Sistema de recirculación de gases de escape (EGR)	15
1.3.2.9 El convertidor catalítico.....	16
1.4 FACTORES DE EMISIÓN.....	16
1.4.1 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN.....	16
1.4.1.1 Método directo.....	16
1.4.1.2 Método indirecto	17
1.4.2 MODELO SIMPLIFICADO DE LA COMBUSTIÓN	17
CAPÍTULO 2.....	22
MÉTODOS PARA MEDIR EMISIONES CONTAMINANTES	22
2.1 MÉTODO ESTÁTICO.....	22
2.1.1 MARCHA RALENTÍ MÍNIMO / RALENTÍ ELEVADO	22
2.1.2 PRUEBA INCOLL / AUTONAT	23

2.2 MÉTODO DINÁMICO.....	24
2.2.1 PRUEBAS DINÁMICAS ESTABLES	25
2.2.1.1 Prueba US Federal 3	25
2.2.1.2 Prueba Clayton Key	26
2.2.1.3 Prueba CalVIP	27
2.2.1.4 Prueba con simulación de la aceleración (ASM)	28
2.2.1 PRUEBAS DINÁMICAS TRANSITORIAS	29
2.2.1.1 Ciclo de ensayo FTP 75	30
2.2.1.1.1 Ciclos SFTP	31
2.2.1.1.2 Ciclos de ensayo para determinar el consumo de flota	32
2.2.1.2 Ciclo de ensayo FTP 72	32
2.2.1.3 New York City Cycle (NYCC).....	33
2.2.1.4 Prueba CDH 226	34
2.2.1.5 Prueba IM 240	34
2.2.1.6 Prueba con equipos de medición On-Board	36
2.2.1.7 Ciclo de ensayo UE/ECE	37
2.2.1.8 Ciclo de 11, 10-15 modos	38
 CAPÍTULO 3.....	 40
 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR FACTORES DE EMISIÓN	
 VEHICULAR	 40
 3.1 MUESTREO	 40
3.1.1. MUESTREO PROBABILÍSTICO	40
3.1.2. MUESTREO NO PROBABILÍSTICO	41
 3.2 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL	 41
3.2.1 MEDIA	41
3.2.2 MEDIANA	42
3.2.3 MODA	42
 3.3 MEDIDAS DE DISPERSIÓN	 42
3.3.1 RANGO.....	42

3.3.2 VARIANZA.....	43
3.3.3 DESVIACIÓN ESTÁNDAR	43
3.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA	43
3.4.1 PORCENTAJE DE CONFIANZA (z)	44
3.4.2 PORCENTAJE DE ERROR (ϵ)	45
3.4.3 LA VARIABILIDAD (p)	45
3.4.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ESTIMAR PROPORCIONES	45
3.4.5 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	46
3.5 SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS DE MUESTRA	48
3.5.1 NÚMERO DE CILINDROS	48
3.5.2 TIPO DE TRANSMISIÓN	49
3.5.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE	49
3.5.4 SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES (CATALIZADOR)	49
3.5.5 MARCA DE VEHÍCULO	49
3.6 PRUEBA DE EMISIONES DE GASES CON EL CICLO IM-240	50
3.6.1 EQUIPOS UTILIZADOS.....	51
3.6.1.1 Equipo LPS 300.....	51
3.6.1.2 Analizador de gases MGT5	52
3.6.1.3 Caja de interfaces.....	53
3.6.1.4 Pinza trigger	53
3.6.1.5 Sonda de temperatura de aceite.....	54
3.6.1.6 Sonda de gases de combustión.....	54
3.6.1.7 Ventilador de aire refrigerante	55
3.6.1.8 Extractor de gases.....	55
3.6.1.9 Tanque de presión de combustible	56
3.6.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS CON EL CICLO IM-240	56
3.7 PRUEBA DE EMISIONES DE GASES CON EL CICLO ON BOARD	61
3.7.1 CICLO DE RUTA	61
3.7.2 EQUIPOS UTILIZADOS.....	63
3.7.1.1 Analizador de gases on board	63

3.7.2.2 Conector de datos OBD 2.....	64
3.7.2.3 GPS.....	64
3.7.3 PROTOCOLO DE PRUEBAS CON EL CICLO ON BOARD	65
CAPÍTULO 4.....	68
PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
4.1 RESULTADOS DE PRUEBAS CON CICLO IM240	68
4.1.1 EMISIONES DE GASES DINÁMICOS.....	68
4.1.1.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO	68
4.1.1.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC	69
4.1.1.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO _x	70
4.1.1.4 Análisis de resultados de las concentraciones de emisiones de CO, HC y NO _x en el ciclo IM240.....	72
4.1.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE	74
4.1.3 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR	75
4.1.3.1 Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo IM240 y los límites máximos permitidos según NTE INEN 2204	77
4.1.3.2 Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo IM240 y resultados con pruebas de laboratorio acreditado.....	79
4.2 RESULTADOS DE PRUEBAS CON CICLO ON BOARD	82
4.2.1 EMISIONES DE GASES DINÁMICOS.....	82
4.2.1.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO	82
4.2.1.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC	83
4.2.1.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO _x	85
4.2.1.4 Análisis de resultados de las concentraciones de emisiones de CO, HC y NO _x en el ciclo on board.....	86
4.2.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE	87
4.2.3 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR.....	88

4.2.3.1	Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo on board y los límites máximos permitidos según NTE INEN 2204	89
4.2.3.2	Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo on board y resultados con pruebas de laboratorio acreditado	91
4.3	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR CON CICLOS DE CONDUCCIÓN IM240 Y ON BOARD	94
4.3.1	FACTORES DE CORRELACIÓN LINEAL	96
4.3.2	CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CORRELACIÓN LINEAL	98
4.3.3	CORRECCIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR CON CICLOS DE CONDUCCIÓN IM 240 Y ON BOARD.....	102
CAPÍTULO 5		107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		107
5.1 CONCLUSIONES		107
5.2 RECOMENDACIONES		108
5.3 BIBLIOGRAFÍA		108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición molar del aire atmosférico considerado seco o húmedo. ..5	5
Tabla 1.2 Composición másica del aire atmosférico considerado seco o húmedo. 6	6
Tabla 1.3 Composición simplificada del aire seco y húmedo.6	6
Tabla 1.4 Fórmula molecular equivalente.18	18
Tabla 2.1 Variación de carga de acuerdo al peso inercial del vehículo.25	25
Tabla 2.2 Variación de carga de acuerdo al peso inercial del vehículo26	26
Tabla 2.3 Variación de carga de acuerdo al número de cilindros del vehículo.27	27
Tabla 2.4 Características de los ciclos: FTP 75, SC03 y US0631	31
Tabla 3.1 Valores de nivel e intervalos de confianza44	44
Tabla 3.2 Composición de ventas en el Ecuador / 2002-201446	46
Tabla 3.3 Ventas y participación de mercado por tipo de segmento.47	47
Tabla 3.4 Número de cilindros del motor de los vehículos en porcentaje.....49	49
Tabla 3.5 Tipo de transmisión de los vehículos en porcentaje.49	49
Tabla 3.6 Sistema de alimentación de combustible de los vehículos en porcentaje.....49	49
Tabla 3.8 Marca de los vehículos en porcentaje.50	50
Tabla 3.9 Vehículos de prueba.50	50
Tabla 3.10 Datos técnicos del equipo LPS 3000.....52	52
Tabla 3.11 Datos técnicos del analizador de gases MGT553	53
Tabla 3.12 Distancias del ciclo de ruta combinado (ciudad-carretera).61	61
Tabla 3.13 Características técnicas del equipo on board63	63
Tabla 4.1 Valores promedios de pruebas de emisiones de gases dinámicos con ciclo IM240.....68	68
Tabla 4.2 Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240.....69	69
Tabla 4.3 Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240.....70	70
Tabla 4.4 Comportamiento de concentración de NOx en el transcurso del ciclo IM240.....71	71
Tabla 4.5 Participación de la disminución de concentración de emisiones de gases en el ciclo IM240 del vehículo de ítem 1.73	73

Tabla 4.6 Participación del aumento de concentración de emisiones de gases en el ciclo IM240 del vehículo de ítem 1.....	73
Tabla 4.7 Valores promedios de pruebas de consumo de combustible en el ciclo IM240.	74
Tabla 4.8 Especificaciones de la gasolina extra	75
Tabla 4.9 Factores de emisión del CO, HC y NO _x al utilizar el ciclo IM240.	77
Tabla 4.10 Factores de emisión del CO, HC y NO _x del laboratorio acreditado RDW	79
Tabla 4.11 Comparación entre factores de emisión de CO y Laboratorio acreditado RDW.	79
Tabla 4.12 Comparación entre Factores de emisión de HC y Laboratorio acreditado RDW.	80
Tabla 4.13 Comparación entre Factores de emisión de NO _x y Laboratorio acreditado RDW.	80
Tabla 4.14 Valores promedios de pruebas de emisiones de gases dinámicas con ciclo on board.	82
Tabla 4.15 Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo on board.	83
Tabla 4.16 Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo on board.	84
Tabla 4.17 Comportamiento de concentración de NO _x en el transcurso del ciclo on board.	85
Tabla 4.18 Participación de la disminución de concentración de emisiones de gases en el ciclo on board del vehículo de ítem 1.....	87
Tabla 4.19 Participación del aumento de concentración de emisiones de gases en el ciclo on board del vehículo de ítem 1.	87
Tabla 4.20 Valores promedios de pruebas de consumo de combustible en el ciclo on board.	88
Tabla 4.21 Factores de emisión del CO, HC y NO _x al utilizar el ciclo on board.	89
Tabla 4.22 Factores de emisión del CO, HC y NO _x del Laboratorio acreditado RDW	91
Tabla 4.23 Comparación entre Factores de emisión de CO y Laboratorio acreditado RDW.	91

Tabla 4.24 Comparación entre Factores de emisión de HC y Laboratorio acreditado RDW.	92
Tabla 4.25 Comparación entre Factores de emisión de NO _x y Laboratorio acreditado RDW.	92
Tabla 4.26 Factor de correlación del CO.	100
Tabla 4.27 Factor de correlación del HC.	100
Tabla 4.28 Factor de correlación del NO _x	101
Tabla 4.29 Valor promedio de diferencia entre factores de emisión de CO con ciclos IM 240 y on board.	103
Tabla 4.30 Valor promedio de diferencia entre factores de emisión de HC con ciclos IM 240 y on board.	103
Tabla 4.31 Valor promedio de diferencia entre factores de emisión de NO _x con ciclos IM 240 y on board.	103
Tabla 4.32 Factor de correlación del CO (Corregido).	104
Tabla 4.33 Factor de correlación del HC (Corregido).	104
Tabla 4.34 Factor de correlación del NO _x (Corregido).	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Motor de combustión de ciclo Otto.	1
Figura 1.2 Fases de un motor de 4T.	1
Figura 1.3 Diagrama de ciclo indicado.....	2
Figura 1.4 Ciclo indicado vs teórico.....	3
Figura 1.5 Fases de un motor de ciclo Otto.....	4
Figura 1.6 Composición de los gases de escape.	10
Figura 1.7 Ignición electrónica tipo Hall.	12
Figura 1.8 Sensor de oxígeno.	13
Figura 1.9 Sistema de inyección de combustible.....	13
Figura 1.10 Unidad electrónica de control.	14
Figura 1.11 Sistema de inyección de aire en el escape.....	14
Figura 1.12 Sistema de ventilación positiva del cárter (PCV).	15
Figura 1.13 Sistema de recirculación de gases de escape.....	15
Figura 1.14 Corte de un convertidor catalítico.	16
Figura 2.1 Método estático.....	22
Figura 2.2 Prueba estática en ralentí a 900 rpm y 2500 rpm.	23
Figura 2.3 Ciclo de prueba INCOLL-AUTONAT.	24
Figura 2.4 Método dinámico.....	24
Figura 2.5 Diagrama de la prueba US Federal 3.	26
Figura 2.6 Diagrama de la prueba Clayton Key.....	27
Figura 2.7 Diagrama de la prueba CalVIP.....	28
Figura 2.8 Diagrama de las pruebas ASM 5015 y 2525.....	29
Figura 2.9 Diagramas de los ciclos: FTP 75, SC03, US06 y Highway.	32
Figura 2.10 Diagrama del ciclo de ensayo FTP 72.	33
Figura 2.11 Diagrama de New York City Cycle.....	33
Figura 2.12 Diagrama de manejo de la prueba CDH 226.	34
Figura 2.13 Ciclo de prueba IM 240.....	35
Figura 2.14 Diagrama de manejo de la prueba IM 240.....	36
Figura 2.15 Instalación del equipo on-board.....	37
Figura 2.16 Diagrama del ciclo de ensayo UE/ECE.....	38
Figura 2.17 Diagrama de los ciclos de 11 y 10-15 modos.	39

Figura 3.1 Distribución normalizada.	44
Figura 3.2 Equipo LPS 3000.	51
Figura 3.3 Analizador de gases MGT5.	52
Figura 3.4 Caja de interfaces.	53
Figura 3.5 Pinza trigger.	54
Figura 3.6 Sonda de temperatura de aceite.	54
Figura 3.7 Sonda de gases de combustión.	55
Figura 3.8 Ventilador de aire refrigerante.	55
Figura 3.9 Ventilador de aire refrigerante.	56
Figura 3.10 Tanque de presión de combustible.	56
Figura 3.11 Vehículo sobre el equipo LPS 3000.	57
Figura 3.12 Instalación de correas de tensión al vehículo.	57
Figura 3.13 Pinza trigger en el cable de la bobina de encendido.	57
Figura 3.14 Sonda de aceite en el motor.	57
Figura 3.15 Sonda de gases al final del tubo de escape.	58
Figura 3.16 Extractor de gases en la terminación del sistema de escape.	58
Figura 3.17 Ventilador de aire refrigerante delante del vehículo.	58
Figura 3.18 Instalación de tanque de presión de combustible al vehículo.	59
Figura 3.19 Activación del analizador de gases en el LPS 3000.	59
Figura 3.20 Cargar al equipo en ciclo de ruta IM-240.	59
Figura 3.21 Temperatura normal de funcionamiento del motor.	59
Figura 3.22 Inicio de ciclo IM-240.	60
Figura 3.23 Conducción del vehículo en el ciclo IM-240.	60
Figura 3.24 Medición del consumo de combustible.	60
Figura 3.25 Ciclo carretera.	62
Figura 3.26 Ciclo ciudad.	62
Figura 3.27 Equipo on board.	64
Figura 3.28 Conector OBD 2.	64
Figura 3.29 GPS.	64
Figura 3.30 Instalación del equipo on board.	65
Figura 3.31 Conexión del conector OBD 2.	65
Figura 3.32 Instalación de la sonda de gases.	66
Figura 3.33 Colocación del tanque de presión de combustible.	66

Figura 3.34 Calentamiento del equipo on board.....	66
Figura 3.35 Calentamiento del motor del vehículo.....	67
Figura 3.36 Registro de mediciones con los equipos on board.....	67
Figura 4.1 Gráfica de concentración de CO con ciclo IM240, del vehículo de ítem 1.....	69
Figura 4.2 Gráfica de concentración de HC con ciclo IM240, del vehículo de ítem 1.....	70
Figura 4.3 Gráfica de concentración de NO _x con ciclo IM240, del vehículo de ítem 1.....	71
Figura 4.4 Gráfica de relaciones de aumento y disminución entre las emisiones de gases de CO, HC y NO _x , del vehículo de ítem 1.....	72
Figura 4.5 Tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las relaciones de disminución de concentración de gases.....	72
Figura 4.6 Tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las relaciones de aumento de concentración de gases.....	73
Figura 4.7 Resultado de pruebas de consumo de combustible por modelo/año de vehículo.....	74
Figura 4.8 Resultado de factores de emisión por año/modelo de vehículo con ciclo IM240.....	77
Figura 4.9 Comparación entre resultados de factores de emisión de CO y NTE INEN 2204.....	78
Figura 4.10 Comparación entre resultados de factores de emisión de HC y NTE INEN 2204.....	78
Figura 4.11 Comparación entre resultados de factores de emisión de NO _x y NTE INEN 2204.....	78
Figura 4.12 Comparación entre factores de emisión del CO, con los del Laboratorio acreditado RDW.....	80
Figura 4.13 Comparación entre factores de emisión del HC, con los del Laboratorio acreditado RDW.....	81
Figura 4.14 Comparación entre factores de emisión del NO _x , con los del Laboratorio acreditado RDW.....	81
Figura 4.15 Gráfica de concentraciones de CO con ciclo on board, del vehículo de ítem 1.....	83

Figura 4.16 Gráfica de concentración de HC con ciclo on board del vehículo de ítem 1.....	84
Figura 4.17 Gráfica de concentración de NO _x con ciclo on board del vehículo de ítem 1.....	85
Figura 4.18 Tiempos de duración durante el ciclo on board, de las relaciones de disminución de concentración de gases.....	86
Figura 4.19 Tiempos de duración durante el ciclo on board, de las relaciones de aumento de concentración de gases.....	86
Figura 4.20 Resultado de pruebas de consumo de combustible por modelo/año de vehículo.....	88
Figura 4.21 Resultado de factores de emisión por año/modelo de vehículo con ciclo on board.....	89
Figura 4.22 Comparación entre resultados de factores de emisión de CO y NTE INEN 2204.	90
Figura 4.23 Comparación entre resultados de factores de emisión de HC y NTE INEN 2204.	90
Figura 4.24 Comparación entre resultados de factores de emisión de NO _x y NTE INEN 2204.	90
Figura 4.25 Comparación entre factores de emisión del CO, con los del Laboratorio acreditado RDW.....	92
Figura 4.26 Comparación entre factores de emisión del HC, con los del Laboratorio acreditado RDW.....	93
Figura 4.27 Comparación entre factores de emisión del NO _x , con los del Laboratorio acreditado RDW.....	93
Figura 4.28 Comparación entre factores de emisión de CO, con los ciclos de conducción IM240 y on board.	95
Figura 4.29 Comparación entre factores de emisión de HC, con los ciclos de conducción IM240 y on board.	95
Figura 4.30 Comparación entre factores de emisión de NO _x , con los ciclos de conducción IM240 y on board.	96
Figura 4.31 Tipos de correlación entre dos variables.	97
Figura 4.32 Diagrama de dispersión del CO.....	100
Figura 4.33 Diagrama de dispersión del HC.....	101

Figura 4.34 Diagrama de dispersión del NO _x	101
Figura 4.35 Diagrama de dispersión del CO (Corregido).....	105
Figura 4.36 Diagrama de dispersión del HC (Corregido).....	105
Figura 4.37 Diagrama de dispersión del NO _x (Corregido).....	105

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A 1: VALORES DE PRUEBAS DE EMISIONES DE GASES	
DINÁMICOS	112
ANEXO A 2: RESULTADOS DE PRUEBAS.....	114

RESUMEN

La presente tesis inicia con las definiciones básicas de principio de funcionamiento de los motores de ciclo Otto, clasificación de los procesos de combustión, control de emisiones contaminantes y métodos de obtención de factores de emisión con la aplicación del modelo simplificado de la combustión.

A continuación, se indican los métodos para medir las emisiones contaminantes en vehículos con motores de ciclo Otto, clasificándose en estáticos y dinámicos, los cuales se diferencian, de acuerdo al país donde fueron desarrollados.

Posteriormente se realiza la determinación de los factores de emisión vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito, al utilizar dos tipos de ciclos: IM240 (simulación de un ciclo de ruta que se efectúa en un dinamómetro) y on board (ciclo de ruta real con tramos en ciudad y carretera), se analiza el tamaño de la muestra óptimo para este estudio, se seleccionan los tipos de vehículos y se desarrollan los protocolos de prueba para cada ciclo.

Luego se analizan los resultados de las pruebas de emisiones de gases dinámicos y el consumo de combustible, al utilizar los ciclos IM240 y on board, con estos valores se calculan los factores de emisión contaminante para el CO, HC y NO_x, luego se determinan los factores de correlación lineal entre estos dos ciclos, y por último se calculan los factores de ajuste entre los factores de emisión de los dos ciclos IM240 y on board.

Llegando a la conclusión de que este método de evaluación, es fiable en la estimación de los factores reales de emisión con ciclo on board, con una muestra de 5 vehículos, por medio de pruebas en Laboratorio al reproducir el ciclo IM240 en un dinamómetro LPS 3000.

PRESENTACIÓN

El ciclo IM240 es una prueba de 240 segundos en la cual los vehículos deben cumplir un ciclo de conducción simulado e interpretar la conducta o patrón de manejo en el tránsito urbano y en carretera. El IM240 es una parte del ciclo FTP-75 que es una prueba dinámica establecida por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), para los vehículos livianos y medianos de gasolina o diesel. Este ciclo se lo puede realizar en un dinamómetro, el cual tiene instalado un software que permite simular un perfil de velocidad.

El ciclo on board permite realizar pruebas en ruta en condiciones reales de operación del vehículo, logrando medir la concentración de emisiones y el flujo de gases de escape en tiempo real para obtener resultados en masa de cada contaminante en función del tiempo, la distancia recorrida y el consumo de combustible y de esta manera conseguir factores de emisión reales. Este ciclo es más complejo, riesgoso y con mayor tiempo de duración, aproximadamente 3 horas, en comparación con el ciclo IM240. El ciclo real depende de las condiciones climáticas, tráfico vehicular, experiencia de manejo del conductor, instalación de equipos, etc.

En este estudio se establecieron las semejanzas o diferencias que tienen las emisiones vehiculares al efectuarlas en un dinamómetro (ciclo IM240) y en ruta (ciclo on board), a través de un factor de ajuste. Esta información permitirá realizar pruebas a un mayor número de vehículos en un dinamómetro en menor tiempo, obteniendo factores de emisión semejantes con los obtenidos en un ciclo real. Estos factores de emisión son importantes para ciertas entidades como Ministerios y Municipios, los cuales están encargados de establecer políticas y estrategias para mitigar el impacto ambiental y controlar el equilibrio ecológico de la ciudad. Esto se puede realizar a través de una regulación del tránsito vehicular tomando en cuenta las emisiones producidas ,implementando nuevas medidas tecnológicas al parque automotor como vehículos eléctricos e híbridos, pico y placa, masificación del transporte público, entre otros.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS

1.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN DE CICLO OTTO

Un motor de combustión de ciclo Otto es una máquina que proporciona energía mecánica por medio de la energía química generada por un combustible que se quema dentro de la cámara de combustión.

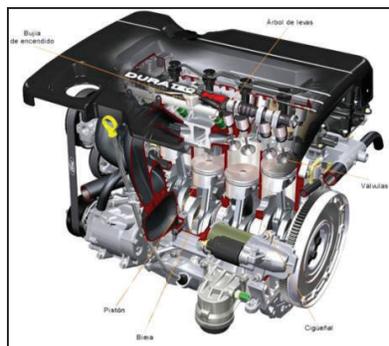


Figura 1.1 Motor de combustión de ciclo Otto¹.

1.1.1 CICLO OTTO

El ciclo Otto teórico indica el comportamiento de un motor de combustión interna, se lo representa mediante un diagrama p-v (presión-volumen), como se indica en la figura 1.2:

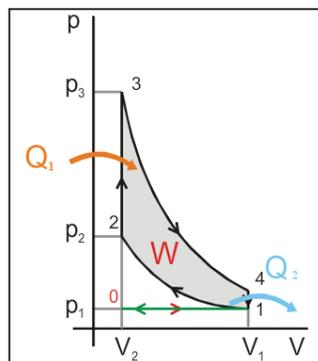


Figura 1.2 Fases de un motor de 4T².

¹Mecánica de motores, 2015. Consultado de: <http://www.ro-des.com/mecanica/motores-gasolina/>
²Termodinámica segundo principio, Luis Gómez, 2011. Consultado de: <http://acer.foresta.les.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo2p/otto.html>

Los procesos termodinámicos que se producen en el ciclo Otto teórico son:

- *Adiabático o isentrópico (1-2)*: sin transferencia de calor con el exterior, compresión del fluido de trabajo.
- *A volumen constante (2-3)*: introducción instantánea del calor (Q_1).
- *Adiabático (3-4)*: expansión.
- *A volumen constante (4-1)*: extracción instantánea del calor (Q_2).

En la realidad, los procesos adiabáticos en el ciclo teórico no se realizan a volumen constante, la comparación entre los diagramas del ciclo teórico e indicado o real se indican en la figura 1.3.

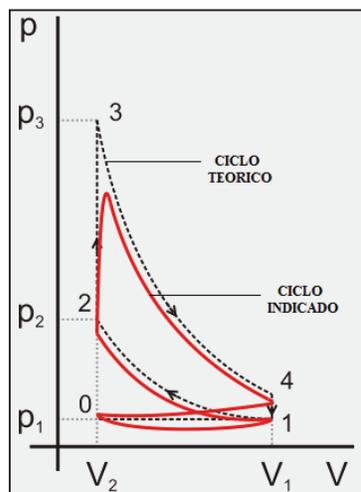


Figura 1.3 Diagrama de ciclo indicado³.

La diferencia entre los ciclos teórico e indicado o real de un motor de combustión interna es debido a las siguientes condiciones:

- *Retraso al cierre de la admisión (RCA)*: La válvula de admisión permanece abierta más tiempo hasta que el pistón comience a descender, permitiendo ingresar mayor cantidad de aire.
- *Adelanto en la apertura de escape (AAE)*: La válvula de escape se adelanta en la apertura, para que los gases de la combustión salgan antes de que el

³Termodinámica segundo principio, Luis Gómez, 2011. Consultado de: <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo2p/otto.html>

pistón llegue al PMI (punto muerto inferior), permitiendo salir la mayor cantidad posible de gases combustionados.

- ***El proceso de ignición del combustible no es instantáneo***: la chispa salta antes de que el pistón alcance el PMS (punto muerto superior) para optimizar el proceso de combustión.

Estas condiciones provocan que en el diagrama (p-v), el ciclo indicado difiera del teórico, como se ilustra en la figura 1.4.

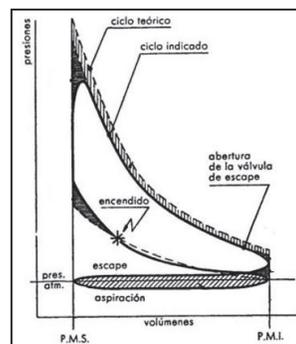


Figura 1.4 Ciclo indicado vs teórico⁴.

1.1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un motor de combustión interna, se basa en la quema de una mezcla comprimida de aire y combustible dentro de una cámara de combustión, con la finalidad de incrementar la presión y generar un movimiento lineal alternativo del pistón. Este movimiento es transmitido por medio de la biela al eje principal del motor o cigüeñal, donde se transforma en movimiento rotativo, el cual se transmite a los mecanismos de transmisión de potencia (caja de velocidades, ejes, diferencial, etc.) y finalmente a las ruedas.

Mediante el proceso de la combustión generado en el cilindro, la energía química contenida en el combustible es transformada en energía calorífica, parte de la cual se convierte en energía cinética (movimiento), la que a su vez genera el trabajo útil aplicable a las ruedas propulsoras. La otra parte de energía se disipa en: sistemas de refrigeración-escape, accionamiento de accesorios y en pérdidas por fricción.

⁴Termodinámica de los gases, 2014. Consultado de: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=2775>

En estos motores el ciclo de trabajo se completa en dos vueltas de cigüeñal o en cuatro carreras del émbolo para los motores de cuatro tiempos, las fases se muestran en la figura 1.5:

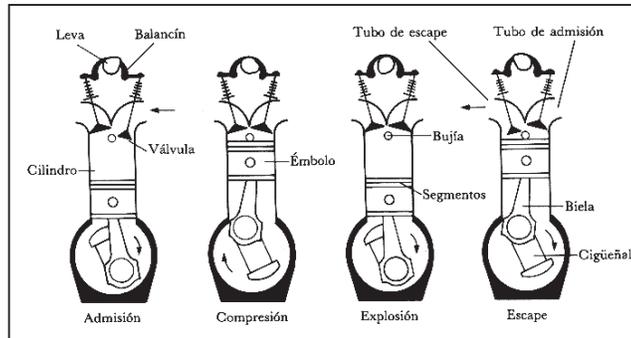


Figura 1.5 Fases de un motor de ciclo Otto⁵.

Las fases son las siguientes:

- **Fase de admisión (1ª carrera):** con las válvulas de admisión abiertas y las de escape cerradas, el émbolo se desplaza desde el PMS hacia el PMI. Creándose en el interior del cilindro una pequeña depresión, suficiente para inducir la entrada de gases a través del conducto de admisión. Cuando el émbolo llega al PMI las válvulas de admisión se cierran y comienza la siguiente fase.
- **Fase de compresión (2ª carrera):** con las válvulas de admisión y escape cerradas el émbolo se desplaza desde el PMI hacia el PMS comprimiendo los gases contenidos en el cilindro. En las cercanías del PMS se produce el salto de chispa, produciéndose la combustión.
- **Fase de explosión (3ª carrera):** la combustión, produce un aumento de presión de los gases contenidos en el cilindro, empujando al émbolo, que se desplaza desde el PMS hacia el PMI. Este desplazamiento es el único en el que se obtiene trabajo.
- **Fase de escape (4ª carrera):** en el PMI se abre la válvula de escape y el émbolo comienza a desplazarse hacia el PMS expulsando los gases combustionados hacia el exterior del cilindro. Cuando el émbolo llega al PMS se cierra la válvula de escape y se inicia un nuevo ciclo.

⁵Motor a explosión cuatro tiempos, 2011. Consultado de: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/14157889/Motor-a-explosion-cuatro-tiempos-ciclo-Otto-4-T.html>

1.2 LA COMBUSTIÓN

1.2.1 TERMODINÁMICA DE LA COMBUSTIÓN⁶

1.2.1.1 Propiedades y composición del aire

El aire está compuesto fundamentalmente de nitrógeno molecular (N_2), oxígeno molecular (O_2), vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y argón (Ar). La cantidad exacta de cada uno de estos componentes en el aire cambia según la situación geográfica y las condiciones meteorológicas.

Para las especies (i) que componen el aire, se puede definir su fracción molar (X_i) y su fracción másica (Y_i), como se indica en la ecuación (1.1) para la humedad contenida en el aire, o la ecuación (1.2) si se considera el aire seco:

$$X_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad Y_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

$$(X_i)_s = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (i \neq H_2O) \quad (Y_i)_s = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (i \neq H_2O) \quad \text{Ec. (1.2)}$$

En la Tabla 1.1 se indican los valores de la composición molar del aire seco y húmedo.

Tabla 1.1 Composición molar del aire atmosférico considerado seco o húmedo.

Especie	Seco	Húmedo
X_{N_2}	0,78082	0,78082 (1- X_{H_2O})
X_{O_2}	0,20945	0,20945 (1- X_{H_2O})
X_{Ar}	0,00934	0,00934 (1- X_{H_2O})
X_{CO_2}	0,00039	0,00039 (1- X_{H_2O})
X_{H_2O}	0	X_{H_2O}

Las fracciones molares representadas por el aire húmedo de cada una de las especies y de sus respectivos pesos moleculares, se puede calcular el peso molecular del aire, como:

$$PM_a = X_{O_2} PM_{O_2} + X_{N_2} PM_{N_2} + X_{Ar} PM_{Ar} + X_{CO_2} PM_{CO_2} + X_{H_2O} PM_{H_2O} \quad \text{Ec. (1.3)}$$

⁶F. PAYRI, Motores de combustión interna alternativos, España, 2011

Si anulamos el último término, el peso molecular del aire seco tiene un valor aproximado de 28,9 kg/kmol y para el aire húmedo el valor que suele tomarse como referencia es de 28,6 kg/kmol.

Las fracciones másicas para cada una de las especies se pueden calcular por medio de la ecuación (1.4), como se presentan en la Tabla 1.2.

$$Y_i = X_i \frac{PM_i}{PM_a} \quad \text{Ec. (1.4)}$$

Tabla 1.2. Composición másica del aire atmosférico considerado seco o húmedo.

Especie	Seco	Húmedo
Y_{N_2}	0,75514	0,75514 (1- Y_{H_2O})
Y_{O_2}	0,23138	0,23138 (1- Y_{H_2O})
Y_{Ar}	0,01288	0,01288 (1- Y_{H_2O})
Y_{CO_2}	0,00059	0,00059 (1- Y_{H_2O})
Y_{H_2O}	0	Y_{H_2O}

Para simplificar los cálculos, se asume al aire como una mezcla de oxígeno y nitrógeno, considerando el contenido de argón, dióxido de carbono y agua como si fuera nitrógeno. De esta manera la composición simplificada del aire se muestra en la Tabla 1.3 tanto en términos molares como másicos.

Tabla 1.3 Composición simplificada del aire seco y húmedo.

Especie	Seco		Húmedo*	
	Molar	Másico	Molar	Másico
N_2	0,7905	0,7686	0,7960	0,7724
O_2	0,2095	0,2314	0,2040	0,2276
N_2/O_2	3,76	3,32	3,90	3,39

* Para el cálculo se ha supuesto una humedad relativa del 50% a 25°C y 1 atmósfera.

1.2.1.2 Estequiometria

En un proceso de combustión ideal de un hidrocarburo, si hay suficiente oxígeno disponible, el carbono y el hidrógeno que componen el combustible pueden ser completamente oxidados en dióxido de carbono y agua. Para un Kmol de un hidrocarburo genérico formado únicamente por carbono e hidrógeno, el balance de la reacción de combustión completa puede expresarse de acuerdo con la

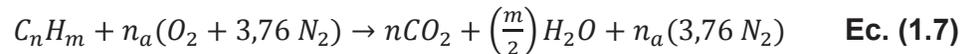
reacción (1.5), donde se supone que reacciona un Kmol de C_nH_m con n_a Kmoles de O_2 :



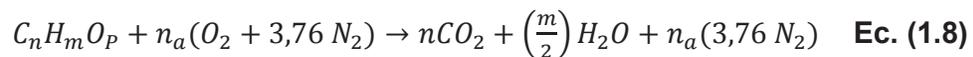
El número de moles de oxígeno necesario para oxidar completamente el combustible se obtiene mediante:

$$n_a = n + m/4 \quad \text{Ec. (1.6)}$$

Considerando que el oxígeno utilizado en el proceso de combustión en los motores de ciclo Otto es en general el contenido en el aire atmosférico, utilizando la composición simplificada para el aire seco en términos molares (Tabla 1.3), la ecuación (1.5) se puede expresar como:



La ecuación (1.7) define la proporción exacta entre el aire y el combustible que es necesaria, teóricamente, para que todo el combustible se oxide hasta los productos finales de la combustión, la ecuación (1.7) se puede generalizar de la siguiente forma:



Dónde:

$$n_a = \left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}\right)$$

Para obtener la relación estequiométrica en términos másicos es necesario multiplicar cada uno de los términos de la ecuación (1.8) por sus respectivos pesos moleculares (PM_i). La relación existente entre la masa de combustible y la masa de aire necesario para oxidarlo completamente se denomina dosado estequiométrico.

De manera general, la relación combustible-aire estequiométrica se puede expresar como:

$$F_e = \frac{m_f}{m_a} = \frac{nPM_c + mPM_H + pPM_o}{\left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}\right)(PM_{O_2} + 3,76PM_{N_2})} \quad \text{Ec. (1.9)}$$

1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN

Los procesos de combustión se clasifican en: completo, incompleto, estequiométrica o teórica, pobre y rica.

1.2.2.1 Combustión completa⁷

Esto se produce cuando existe una oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. Para el caso de los hidrocarburos se tiene:

Carbono → CO₂

Hidrógeno → H₂O

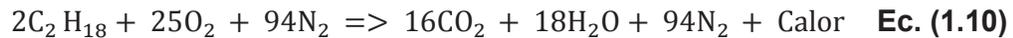
Azufre → SO₂

Nitrógeno → N₂

Oxígeno → Participa como oxidante

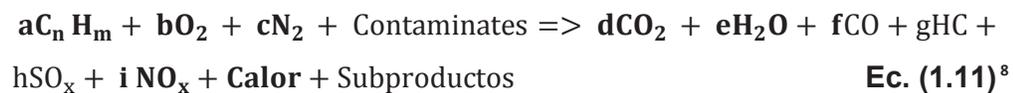
El nitrógeno se considera como masa inerte, aunque a temperaturas altas en los gases se pueden formar óxidos de nitrógeno por disociación.

La reacción ideal del Octano se indica en la ecuación 1.10:



1.2.2.2 Combustión incompleta

La combustión incompleta no permite oxidar totalmente el combustible, formándose sustancias como por ejemplo el CO, que es un producto que podría seguir oxidándose en la combustión del motor de un vehículo. Por lo tanto, los productos de la combustión incompleta cambian según la cantidad de oxígeno existente, en la ecuación 1.11 se muestra este tipo de combustión:



⁷CAIZA P., PORTILLA A.; Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto de inyección electrónica de gasolina, EPN, 2010.

⁸ALBAN, E., LOPEZ, J.; Desarrollo y validación de un método para determinación de factores de emisión vehicular mediante pruebas a bordo en la ciudad de Quito, EPN, 2010.

1.2.2.3 Combustión estequiométrica o teórica

La combustión estequiométrica es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactantes (oxígeno y combustible) y los productos de la combustión. El balance de estas reacciones depende exclusivamente de la conservación de la masa de cada una de las especies químicas que intervienen en la reacción. En la ecuación 1.12 se indica un ejemplo de este tipo de combustión.



1.2.2.4 Combustión pobre

Es la reacción que se genera con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción y es común la presencia de oxígeno en los mismos. Es decir, existe una menor cantidad de combustible en comparación a la cantidad de aire necesaria para la combustión.

1.2.2.5 Combustión rica

Es la reacción que se produce con cantidad de aire inferior al mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases de reacción. Hay una mayor cantidad de combustible en relación al aire necesario para la combustión.

1.3 EMISIONES CONTAMINANTES

El motor de combustión de ciclo Otto no es capaz de quemar en su totalidad la mezcla de aire-combustible dentro de los cilindros, es decir se produce una combustión incompleta. Entre las sustancias expulsadas en los gases de escape encontramos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), entre otros, los cuales representan

⁹CAIZA P., PORTILLA A.; Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto de inyección electrónica de gasolina, EPN, 2010.

una fracción del total de la cantidad de gases combustionados. En la figura 1.6 se representan las cantidades aproximadas de los gases de escape en los motores de ciclo Otto.

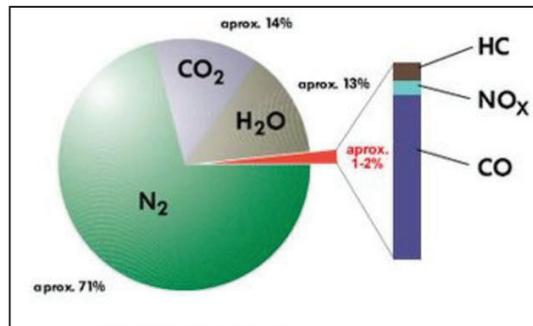


Figura 1.6 Composición de los gases de escape¹⁰.

1.3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES

Los gases generados en la combustión se clasifican en:

- Inofensivos
- Tóxicos

1.3.1.1 Emisiones contaminantes inofensivas

1.3.1.1.1 Nitrógeno (N₂)

El nitrógeno es indispensable en el proceso de la combustión conjuntamente con el aire de admisión. La mayor parte del nitrógeno aspirado vuelve a salir puro en los gases de escape; sólo una pequeña cantidad se combina con el oxígeno O₂ formando los óxidos de nitrógeno (NO_x).

1.3.1.1.2 Oxígeno (O₂)

Es un gas fundamental para el proceso de combustión, con una mezcla ideal el consumo de combustible debería ser total, pero en el caso de la combustión incompleta, el oxígeno restante es expulsado por el sistema de escape.

¹⁰Gases de Escape y Sistemas Anticontaminación 1er Parte, 2012. Consultado de: <http://www.taringa.net/post/autos-motos/16136191/Gases-de-Escape-y-Sistemas-Anticontaminacion-1er-Parte.html>

1.3.1.1.3 Agua (H_2O)

Se produce en la combustión inicial (calentamiento del motor). Es un subproducto de la combustión y es expulsado por el sistema de escape del vehículo, es un componente inofensivo de los gases de escape.

1.3.1.1.4 Dióxido de carbono (CO_2)

Es producto de una combustión eficiente, se genera al quemar los combustibles que contienen carbono al combinarse con el oxígeno aspirado. Es un gas incoloro, no combustible.

1.3.1.2 Emisiones contaminantes tóxicas

1.3.1.2.1 Monóxido de carbono (CO)

Se produce en la combustión incompleta, es un gas incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico. Aumenta con mezclas ricas (factor lambda menor a 1), el oxígeno existente no es suficiente para completar la combustión, por lo cual el contenido de CO en los gases de escape es alto. En cambio el CO disminuye con mezclas pobres (factor lambda mayor a 1), el oxígeno presente es elevado y la combustión tiende a completarse, por lo cual el contenido de CO en los gases de escape es bajo.

1.3.1.2.2 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Son combinaciones de nitrógeno N_2 y oxígeno O_2 como por ejemplo: NO, NO_2 , N_2O , etc. Los óxidos de nitrógeno se producen al existir altas presiones y temperaturas con exceso de oxígeno durante la combustión en el motor. El monóxido de nitrógeno (NO), es un gas incoloro, inodoro e insípido.

1.3.1.2.3 Hidrocarburo (HC)

Son residuos no combustionados del combustible, aparecen en los gases de escape luego de una combustión incompleta. La combustión ineficiente es debido a la falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica) o también por una baja

velocidad de inflamación (mezcla pobre). La concentración de hidrocarburos sin combustionar se reduce a valores mínimos para relaciones aire-combustible ligeramente superiores a la estequiométrica, es decir, para mezclas pobres (λ mayor a 1). Con mezclas ricas es imposible quemar por completo los hidrocarburos por falta de oxígeno.

1.3.2 CONTROL DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES

Los sistemas de control de emisiones de escape han sido desarrollados para minimizar los elementos contaminantes producidos por el vehículo en el proceso de la combustión y estos son los siguientes:

1.3.2.1 Ignición electrónica

Es un sistema de encendido para motores de ciclo Otto tanto de dos tiempos (2T) como cuatro tiempos (4T) en el cual la función de interrumpir la corriente del primario de la bobina para generar por autoinducción la alta tensión necesaria en la bujía no se hace por medios mecánicos como en el sistema de ruptor o platinos, sino mediante uno o varios transistores.

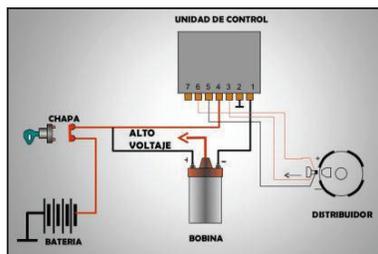


Figura 1.7 Ignición electrónica tipo Hall¹¹.

1.3.2.2 Control de la combustión (Sensor de oxígeno)

El sensor de oxígeno se encuentra a la salida del colector de escape del motor, censa los gases de combustión, y envía información constantemente a la unidad electrónica de control del motor que adecua la mezcla aire-combustible en función de las circunstancias de funcionamiento del vehículo.

¹¹Sistemas de encendido electrónico, 2013. Consultado de: <http://es.slideshare.net/celinpadilla/sistema-de-encendido-electrnico-de-efecto-hall>

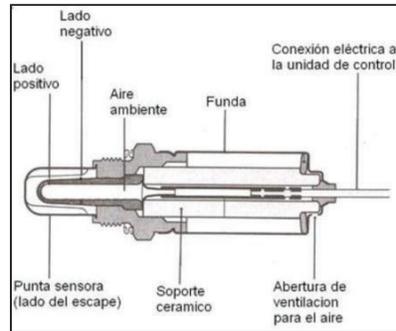


Figura 1.8 Sensor de oxígeno¹².

1.3.2.3 Sistema de inyección de combustible

Tienen la característica de permitir que el motor reciba solamente el volumen de combustible que necesita. Con eso se garantiza: menos contaminación, más economía, mejor rendimiento, arranque más rápido, no utiliza ahogador (choque) y mejor aprovechamiento del combustible.

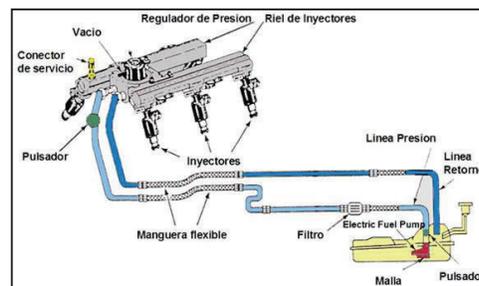


Figura 1.9 Sistema de inyección de combustible¹³.

1.3.2.4 Unidad electrónica de control

La unidad de control del motor determina la cantidad de combustible, el punto de ignición y otros parámetros monitorizando el motor a través de sensores. Estos incluyen: sensor MAP, sensor de posición del acelerador, sensor de temperatura del aire, sensor de oxígeno y muchos otros.

¹²Sensor de oxígeno, 2012. Consultado de: <http://www.fullmecanica.com/definiciones/s/960-sensor-de-oxigeno-o-sonda-lambda>

¹³Sistemas de inyección, 2014. Consultado de: <http://wwwsistemampfidaniel.blogspot.com/p/introduccion.html>

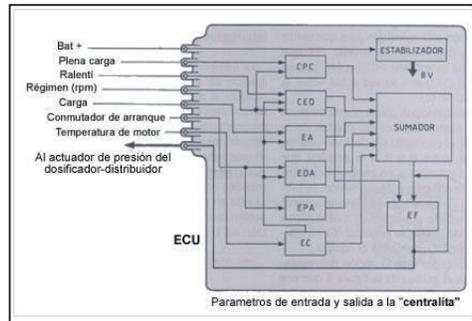


Figura 1.10 Unidad electrónica de control¹⁴.

1.3.2.5 Sistema de inyección adicional de aire en el escape

Este sistema reduce los productos incompletos de la combustión (hidrocarburos y monóxido de carbono) por medio de la inyección de aire fresco dentro del múltiple de escape del motor. Con esto se pretende que la combustión ocurra también en la tubería de escape, para lo cual el aire es llevado a través de un "smog pump" manejado por el motor y dirigido hacia los colectores. Su uso va siendo reemplazado por motores de combustión más eficientes y mejores convertidores catalíticos.

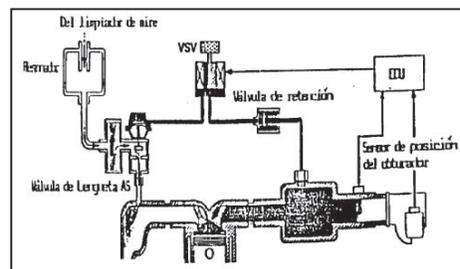


Figura 1.11 Sistema de inyección de aire en el escape¹⁵.

1.3.2.6 Sistema de ventilación positiva del Cáster (PCV)

Este sistema está compuesto por una válvula PCV, que permite extraer los vapores del cárter. Se localiza en la tapa de las válvulas y se comunica directamente con el múltiple de admisión, la válvula trabaja de acuerdo a la carga y/o el vacío del múltiple, de tal forma que una cantidad de los gases que fluyen hacia el múltiple de admisión son parte de los gases del cárter del motor, los

¹⁴Sistema electrónico, 2014. Consultado de: <http://www.padminivna.com/electronics.html>

¹⁵Manual de servicio Ford, 1994. Diagnóstico de Control del Tren de Fuerza y de las Emisiones. E:E:U:U, 1993

cuales son utilizados para la combustión, minimizando las emisiones nocivas de los gases.

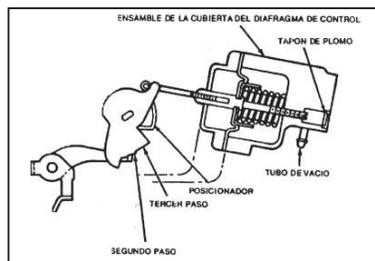


Figura 1.12 Sistema de ventilación positiva del cárter (PCV)¹⁶.

1.3.2.7 Sistema de emisiones evaporativas (EVAP)

Este sistema tiene como finalidad reunir los vapores que se forman cuando el combustible está almacenado en el tanque. Los vapores son conducidos a través de un conjunto de válvulas hacia el canister de carbono para su almacenamiento hasta que sean purgados hacia el motor para su combustión.

1.3.2.8 Sistema de recirculación de gases de escape (EGR)

Muchos motores tienen una válvula de recirculación de los gases entre el escape y el múltiple de admisión; su propósito es la reducción de las emisiones del Óxido de Nitrógeno, introduciendo los gases del escape dentro de la cámara de combustión, disminuyendo los picos de temperatura de combustión.

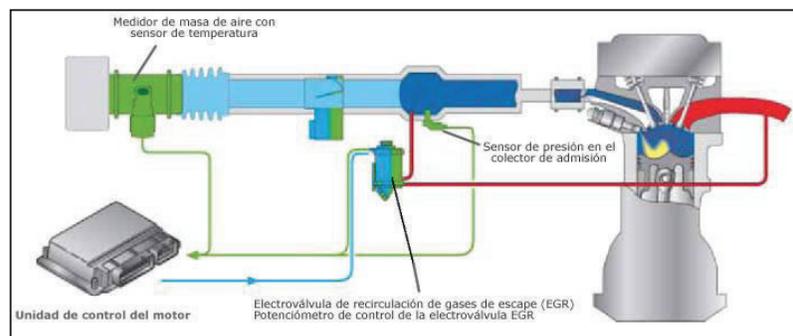


Figura 1.13 Sistema de recirculación de gases de escape¹⁶.

¹⁶Sistemas de inyección, 2013. Consultado de: http://www.aficionadosalamecanica.net/inyeccion_directa2.htm

1.3.2.9 El convertidor catalítico

El convertidor catalítico está encargado de transformar los gases contaminantes en inertes y reducir los elementos contaminantes contenidos en los mismos mediante la técnica de la catálisis. La temperatura ideal de funcionamiento está entre los 400 y 700 °C.

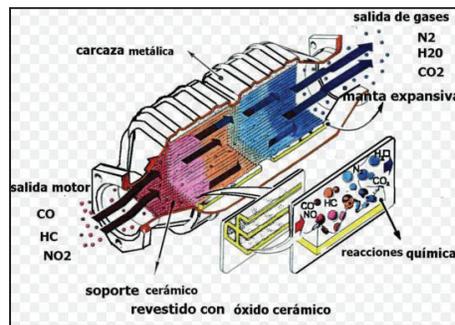


Figura 1.14 Corte de un convertidor catalítico¹⁷.

1.4 FACTORES DE EMISIÓN

Un factor de emisión es considerado una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad o proceso (consumo de energía, unidades de producción, kilómetros recorridos, etc.)¹⁸. En fuentes móviles los factores de emisión se expresan en masa de contaminante por (distancia recorrida o volumen de combustible quemado).

1.4.1 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN¹⁹

Los métodos de obtención de factores de emisión son los siguientes:

1.4.1.1 Método directo

Permite calcular las emisiones contaminantes de un vehículo en condiciones reales de funcionamiento, sin embargo, el costo asociado a los equipos

¹⁷Sistemas de inyección, 2013. Consultado de: http://www.aficionadosalamecanica.net/inyeccion_directa2.htm

¹⁸TORRES L, URVINA H; Determinación de los factores reales de emisión de los motores ciclo Otto en la ciudad de Quito; EPN; Quito; 2008.

¹⁹Clean Air Institute; Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano; Washington; 2013.

necesarios para las pruebas es elevado lo cual lo puede generar una desventaja. Los métodos directos más comunes son los siguientes:

- Sensor remoto
- Medición a bordo
- Prueba en dinamómetro.

1.4.1.2 Método indirecto

Se basa en modelos internacionales que utilizan información de los métodos directos ajustada a las condiciones teóricas de cada modelo. Los métodos más comunes son:

- MOBILE 6
- MOVES
- IVE
- COPERT.

1.4.2 MODELO SIMPLIFICADO DE LA COMBUSTIÓN ²⁰

El modelo simplificado de combustión representa la conversión de la mezcla aire-combustible en sus principales productos. En vista que el CO₂, CO y HC son resultados de la combustión que contienen carbono es posible desarrollar un balance de masa respecto a la cantidad de carbono presente en el combustible y en estos 3 productos de la combustión. Por lo tanto, el número total de átomos de carbono en cada caso debería ser igual, ya que se deben conservar.

Posteriormente, con el conocimiento del peso molecular y la densidad del combustible utilizado es posible calcular la cantidad de CO, HC y NO emitidos por galón de combustible quemado. Sin embargo, la mayoría de los inventarios de emisiones se presenta en gramos de contaminante por kilómetro recorrido, para lo cual es necesario introducir el consumo de combustible promedio del vehículo de prueba.

²⁰RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

Para llegar a la composición de los productos de combustión, se asume los siguientes puntos:

- Completo consumo del combustible.
- El carbono del combustible es emitido como CO_2 , CO o como un hidrocarburo no quemado equivalente al propano (C_3H_6).
- El cálculo es basado en cantidades estequiométricas de aire. Si una cantidad de oxígeno adicional es quemado, el único efecto en el balance de masa sería que se presente oxígeno en los productos de combustión.
- Se consideran adicionalmente como productos de combustión al N_2 y NO .

El punto de partida para el cálculo del modelo de combustión es desarrollar una fórmula molecular equivalente para el combustible. Por ejemplo, se asume que el combustible consiste principalmente de carbono e hidrógeno con cantidades despreciables de otros elementos para el propósito del balance de masa.

En la tabla 1.4 se observa el desarrollo de una fórmula molecular equivalente para un combustible que contiene 80% peso carbono y 20% peso hidrogeno, obteniéndose en este ejemplo la fórmula CH_3 .

Tabla 1.4 Fórmula molecular equivalente.

Componente	Lb por 100 lb de combustible	Peso molecular	Lb mol por 100 lb de combustible	Lb mol por lb mol de carbono
Carbono	80.0	12.0	6.7	1.0
Hidrógeno	20.0	1.0	20.0	3.0

Del ejemplo anterior, se puede deducir que el peso molecular del combustible está dado por la fórmula molecular equivalente CH_y , de la cual se tiene:

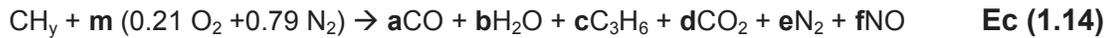
$$y = \left(\frac{\% \text{ peso H}}{\% \text{ peso C}} \right) \left(\frac{\text{MW}_C}{\text{MW}_H} \right) \quad \text{Ec (1.13)}$$

Dónde:

MW_C : peso molecular del carbono

MW_H : peso molecular del hidrógeno

Se consideran como productos de combustión los siguientes: CO, H₂O, C₃H₆, CO₂ y adicionalmente los productos N₂ y NO que son en la actualidad de gran importancia en la contaminación atmosférica. En definitiva, el balance de masa para la combustión, despreciando el exceso de oxígeno, está dado por:



Donde las variables **a**, **b**, **c**, **d**, **e**, **f** y **m** son coeficientes estequiométricos desconocidos y definidos como:

m = moles de aire consumido por mol de combustible consumido

a = moles formados de CO por mol de combustible consumido

b = moles formados de H₂O por mol de combustible consumido

c = moles formados de C₃H₆ por mol de combustible consumido

d = moles formados de CO₂ por mol de combustible consumido

e = moles formados de N₂ por mol de combustible consumido

f = moles formados de NO por mol de combustible consumido

En vista que los átomos contenidos en la combustión no pueden ser creados ni destruidos, las ecuaciones del balance de masa se pueden escribir como:

Elemento	Reactantes	=	Productos	
Carbono	1	=	a + 3c + d	Ec.(1.15)
Hidrógeno	y	=	2b + 6c	Ec. (1.16)
Oxígeno	0.42 m	=	a + b + 2d + f	Ec. (1.17)
Nitrógeno	1.58 m	=	2e + f	Ec. (1.18)

Con el objetivo de resolver este sistema de ecuaciones, se realiza la medición de gases (concentraciones volumétricas) en pruebas dinámicas para obtener datos adicionales que nos permitan determinar las incógnitas.

$$R_{\text{CO}} = \left(\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2} \right) = \frac{a}{d} \quad \text{Ec. (1.19)}$$

$$R_{\text{HC}} = \left(\frac{\text{HC}}{\text{CO}_2} \right) = \frac{c}{d} \quad \text{Ec. (1.20)}$$

$$R_{\text{NO}} = \left(\frac{\text{NO}}{\text{CO}_2} \right) = \frac{f}{d} \quad \text{Ec. (1.21)}$$

Dónde:

R_{CO} , R_{HC} y R_{NO} son las razones de %CO a %CO₂; %HC a %CO₂ y %NO a %CO₂, respectivamente; obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$a = R_{\text{CO}} d \quad \text{Ec. (1.22)}$$

$$c = R_{\text{HC}} d \quad \text{Ec. (1.23)}$$

Reemplazando estas relaciones en la ecuación (1.15) se obtiene:

$$d = \frac{1}{R_{\text{CO}} + 3R_{\text{HC}} + 1} \quad \text{Ec. (1.24)}$$

Con los valores de a, c y f, se puede obtener los factores de emisión (EF') en gramos de contaminante por gramo de combustible consumido, dado por:

$$EF'_{\text{CO}} = a * \frac{MW_{\text{CO}}}{MW_{\text{Fuel}}} = \frac{R_{\text{CO}}}{R_{\text{CO}} + 3R_{\text{HC}} + 1} * \frac{MW_{\text{CO}}}{MW_{\text{Fuel}}} \quad \text{Ec. (1.25)}$$

$$EF'_{\text{HC}} = c * \frac{MW_{\text{HC}}}{MW_{\text{Fuel}}} = \frac{R_{\text{HC}}}{R_{\text{CO}} + 3R_{\text{HC}} + 1} * \frac{MW_{\text{HC}}}{MW_{\text{Fuel}}} \quad \text{Ec. (1.26)}$$

$$EF'_{\text{NO}} = f * \frac{MW_{\text{NO}}}{MW_{\text{Fuel}}} = \frac{R_{\text{NO}}}{R_{\text{CO}} + 3R_{\text{HC}} + 1} * \frac{MW_{\text{NO}}}{MW_{\text{Fuel}}} \quad \text{Ec. (1.27)}$$

Considerando como base principal del combustible al octano C₈H₁₈ (equivalente CH_{2,25}), se procede a determinar el peso molecular del combustible:

$$\begin{aligned}
 MW_{\text{Fuel}} &= \frac{12 \text{ g C}}{\text{mol C}} * \left(\frac{1 \text{ mol C}}{\text{mol Fuel}} \right) + \frac{1 \text{ g H}}{\text{mol H}} * \left(\frac{2.25 \text{ mol H}}{\text{mol Fuel}} \right) \\
 &= 14.25 \frac{\text{g Fuel}}{\text{mol Fuel}}
 \end{aligned}$$

Finalmente, introduciendo la densidad del combustible δ_F (Kg/m³) y el consumo de combustible por distancia recorrida FC (m³/Km), se puede obtener el factor de emisión en gramos de cada contaminante por kilómetro recorrido.²¹

$$EF = EF' * \delta_{\text{Fuel}} * FC \quad \text{Ec. (1.28)}$$

$$EF_{\text{CO}} = \frac{\text{gCO}}{\text{Km}} = \frac{28 \frac{\% \text{CO}}{\% \text{CO}_2}}{\frac{\% \text{CO}}{\% \text{CO}_2} + \left(3 \frac{\% \text{HC}}{\% \text{CO}_2} \right) + 1} * \frac{\delta_{\text{Fuel}} * FC}{0.01425} \quad \text{Ec. (1.29)}$$

$$EF_{\text{HC}} = \frac{\text{gHC}}{\text{Km}} = \frac{42 \frac{\% \text{HC}}{\% \text{CO}_2}}{\frac{\% \text{CO}}{\% \text{CO}_2} + \left(3 \frac{\% \text{HC}}{\% \text{CO}_2} \right) + 1} * \frac{\delta_{\text{Fuel}} * FC}{0.01425} \quad \text{Ec. (1.30)}$$

$$EF_{\text{NO}} = \frac{\text{gNO}}{\text{Km}} = \frac{30 \frac{\% \text{NO}}{\% \text{CO}_2}}{\frac{\% \text{CO}}{\% \text{CO}_2} + \left(3 \frac{\% \text{HC}}{\% \text{CO}_2} \right) + 1} * \frac{\delta_{\text{Fuel}} * FC}{0.01425} \quad \text{Ec. (1.31)}$$

Finalmente, las ecuaciones 1.29, 1.30 y 1.31 servirán para calcular los factores de emisión de los vehículos de prueba, permitiendo realizar la correlación entre los factores de emisión obtenidos al utilizar ciclos de conducción IM-240 y ON BOARD.

²¹CAIZA, P., PORTILLA, A.; Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto de inyección electrónica de gasolina, Tesis EPN; diciembre 2010.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS PARA MEDIR EMISIONES CONTAMINANTES

Para efectuar la medición de las emisiones contaminantes en vehículos con motores de ciclo OTTO, se utilizan los siguientes métodos:

- Estático
- Dinámico

2.1 MÉTODO ESTÁTICO

Las mediciones se realizan sin la aplicación de carga externa al motor, es decir se efectúa la prueba en el vehículo en marcha neutral. Este método utiliza un analizador de gases para realizar las mediciones de CO, CO₂ y HC a través del principio NDIR y por medio de sensores se obtiene lecturas de NO_x y O₂.

Este método se clasifica en dos tipos:

- Marcha ralentí mínimo / ralentí elevado
- Prueba INCOLL / AUTONAT.



Figura 2.1 Método estático²².

2.1.1 MARCHA RALENTÍ MÍNIMO / RALENTÍ ELEVADO

Esta prueba se efectúa con los siguientes modos de operación del motor:

- Velocidad normal de Ralentí a 900 r.p.m.
- Velocidad mayor, entre 2000 y 3000 r.p.m.

²²Emisiones vehiculares, 2014. Consultado de: <http://www.elcomercio.com/deportes/carburando-autos-automoviles-emisiones-europa.html>

Para realizar este ensayo se debe acelerar el motor entre 2000 y 3000 rpm durante 30 segundos y tomar las lecturas de emisiones de CO, HC y CO₂, luego mantener el vehículo en marcha lenta (ralentí) a 900 r.p.m, en vacío sin acelerar por 30 segundos y finalmente se toman las mediciones de emisiones de CO, HC, CO₂ . En la figura 2.2 se muestra el procedimiento de una prueba estática, considerando el motor en ralentí a 900 rpm y 2.500 rpm.

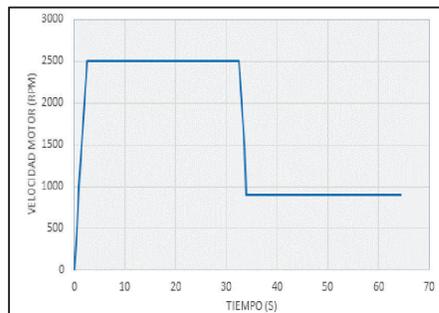


Figura 2.2 Prueba estática en ralentí a 900 rpm y 2500 rpm²³.

2.1.2 PRUEBA INCOLL / AUTONAT²⁴

Las pruebas INCOLL y AUTONAT fueron desarrolladas en Suecia (1985) y en Francia (1994) respectivamente, funcionan con el mismo principio, el motor del vehículo opera con la transmisión en neutro y es acelerado y desacelerado rápidamente, de manera que la carga del motor permite acelerar sus partes rotativas y reciprocantes (incluyendo el volante y caja de cambios) se aproxime a su carga durante un ciclo normal de manejo. De este modo sería posible realizar una prueba dinámica en estado transitorio sin ninguna carga externa.

Un ciclo de aceleración, carga constante, desaceleración y ralentí, demora cerca de 10 milisegundos y es repetido continuamente varias veces como se indica en la figura 2.3.

²³RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

²⁴Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

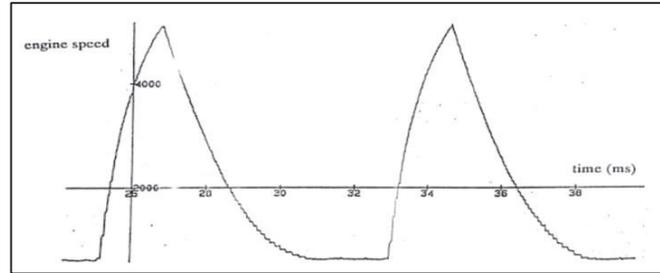


Figura 2.3 Ciclo de prueba INCOLL-AUTONAT²⁵.

El pedal del acelerador es movido de acuerdo al correspondiente ciclo de manejo por medio de un dispositivo controlado electrónicamente, las emisiones dado que el motor no es operado en condiciones de estado estable, cambiarán con el tiempo; por lo tanto, existen dos opciones: medir la concentración directamente en los gases de escape (donde tendría que aplicarse un análisis modal) y recolectar los gases diluidos analizando la concentración de contaminantes hasta el final de la prueba.

2.2 MÉTODO DINÁMICO

Este método se realiza con la generación de carga externa al vehículo y se clasifica en dos tipos de pruebas dinámicas:

- Estables
- Transitorias



Figura 2.4 Método dinámico²⁶.

²⁵Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

²⁶Equipos MAHA, 2015. Consultado de: http://www.maha.de/cps/rde/xbcr/SID-D30930BA-D6B8C15B/maha/BRO_MAHA_alle_LPS_ES.pdf

2.2.1 PRUEBAS DINÁMICAS ESTABLES²⁷

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de un motor de ciclo OTTO sin la aplicación de carga son despreciables; por lo tanto, es necesario realizar una prueba con carga para medir los niveles de emisiones de NO_x, que constituye un factor importante en la contaminación del aire urbano y que no puede ser calculado directamente a partir de las mediciones de CO y HC.

La prueba en estado estable se efectúa mediante el uso de un dinamómetro con absorción de energía en estado estable. Por otra parte, no se necesita una simulación del peso inercial del vehículo ya que no existe una fase transitoria durante la prueba: el automotor se conduce a velocidad y carga constante, y las concentraciones de contaminantes (CO, HC, NO_x y CO₂) se miden durante la fase de carga. Entre las pruebas dinámicas estables se pueden anotar las siguientes:

- US Federal 3
- Clayton Key
- CALVIP
- ASM

2.2.1.1 Prueba US Federal 3

Esta prueba consiste en tres fases: alta velocidad, baja velocidad y ralentí. Durante las dos primeras fases, el vehículo es operado en relación directa de la transmisión (o en “D” para los vehículos con transmisión automática). La carga varía de acuerdo al peso inercial del automotor como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Variación de carga de acuerdo al peso inercial del vehículo²⁷.

Peso inercial	Fase de alta velocidad		Fase de baja velocidad	
	Velocidad [mph]	Carga [HP]	Velocidad [mph]	Carga [HP]
≤ 2500 lbs	50	21	30	9
2501 - 3500 lbs	50	26	30	12
3501 - 4500 lbs	50	31	30	15
≥ 4500 lbs	50	36	30	18

²⁷Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-Límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

Esta prueba nunca se implementó debido al alto costo de los dinamómetros y analizadores de NOx. Además, tenía una mala reproducibilidad, aun cuando era efectuada en estaciones de prueba con personal de nivel técnico elevado. En la figura 2.5 se indica el diagrama de la prueba US Federal 3.

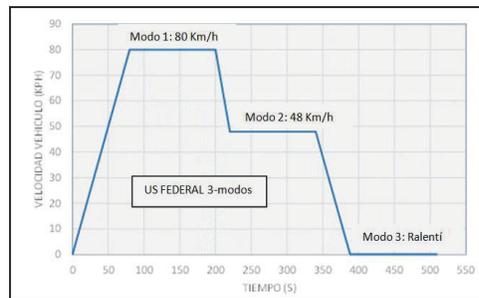


Figura 2.5 Diagrama de la prueba US Federal 3²⁸.

2.2.1.2 Prueba Clayton Key

Su procedimiento es similar al de la prueba US Federal 3, la diferencia es en la aplicación del peso inercial del vehículo como se indica en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Variación de carga de acuerdo al peso inercial del vehículo²⁹.

Peso inercial	Fase de alta velocidad		Fase de baja velocidad	
	Velocidad [mph]	Carga [HP]	Velocidad [mph]	Carga [HP]
≤ 2800 lbs	36-38	21	22-35	5
2801 - 3800 lbs	44-46	22.5	29-32	9
≥ 3800 lbs	48-50	28.5	32-35	11

En esta prueba se mide la concentración de los contaminantes CO, HC y NOx directamente de los gases de escape, se recomienda un período de pre-acondicionamiento de 15 a 30 segundos a 2500 rpm, la duración de la prueba es aproximadamente de 10 minutos (2 minutos como máximo en cada fase de

²⁸RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

²⁹Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-Límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

operación, en la cual la concentración registrada de cada contaminante haya sido la más alta de las concentraciones medidas en los últimos 30 segundos). Los equipos necesarios para realizar esta medición son: analizadores NDIR para CO y HC, analizadores quimiluminicentes para NO_x y dinamómetros sin ruedas volantes. En la figura 2.6 se tiene un ejemplo del diagrama de la prueba Clayton Key.



Figura 2.6 Diagrama de la prueba Clayton Key³⁰.

2.2.1.3 Prueba CalVIP

En esta prueba el vehículo es conducido en un dinamómetro bajo las siguientes condiciones independientes del peso inercial como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Variación de carga de acuerdo al número de cilindros del vehículo³¹.

Número de cilindros	Velocidad [mph]	Carga [HP]
≤ 4 cilindros	40	10
5 - 6 cilindros	40	15
≥ 7 cilindros, ≤ 3250 lbs	40	17.5
≥ 7 cilindros, > 3250 lbs	40	20.5

Se mide la concentración de los contaminantes CO, HC y NO_x directamente de los gases de escape, el pre-acondicionamiento se efectúa en un período de 3 minutos en condiciones de carga en estado estable en un dinamómetro. La

³⁰RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

³¹Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

duración de la prueba es aproximadamente de 10 minutos. En la figura 2.7 se detalla el diagrama de la prueba CalVIP.

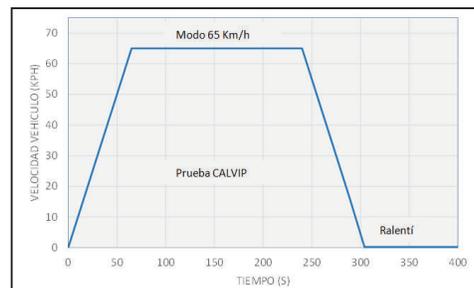


Figura 2.7 Diagrama de la prueba CalVIP³².

2.2.1.4 Prueba con simulación de la aceleración (ASM)

El vehículo es conducido sobre un dinamómetro de chasis de volante fijo para simulación del peso inercial, a una velocidad constante y con una absorción de energía en estado estable igual a la carga real de la carretera que experimentaría durante una aceleración. La prueba con simulación de aceleración se debe realizar en dos etapas distintas de potencia y velocidad, siendo estas las que mejor se correlacionan con el ciclo de la FTP (Federal Test Procedure), estas etapas son las siguientes:

- **ASM 5015³²**

Ciclo de prueba de un vehículo en dinamómetro utilizando la prueba de aceleración simulada (ASM), en donde a una velocidad constante de 15 mph (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 1.47 m/s^2 .

- **ASM 2525³²**

Ciclo de prueba de un vehículo en dinamómetro utilizando la prueba de aceleración simulada (ASM), en donde a una velocidad constante de 25 mph (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 1.47 m/s^2 .

En la figura 2.8 se indica el diagrama de las pruebas ASM 5015 y 2525.

³²RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

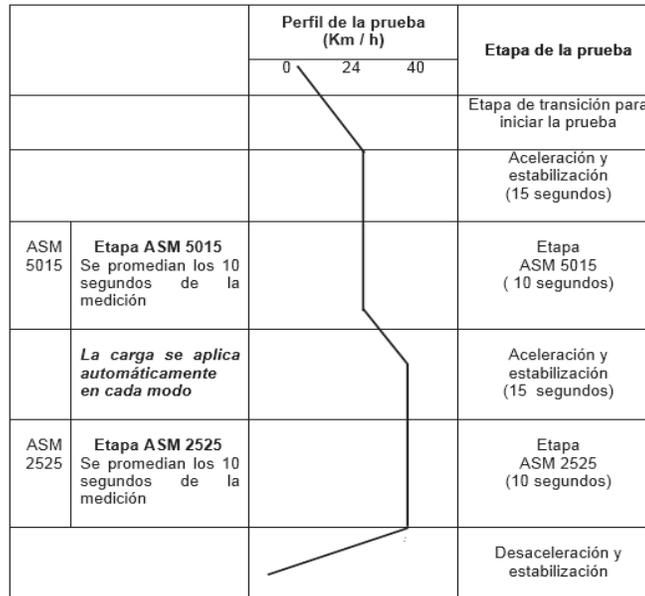


Figura 2.8 Diagrama de las pruebas ASM 5015 y 2525 ³³.

2.2.1 PRUEBAS DINÁMICAS TRANSITORIAS

En las pruebas dinámicas transitorias, los vehículos se conducen en el dinamómetro de acuerdo a un programa de manejo específico, siendo la duración del ciclo su principal diferencia con las pruebas estables. Dado que las muestras de gases de escape son recolectadas continuamente a lo largo de la duración de la prueba, estas tienen que ser expresadas en unidades de masa y por consiguiente es necesario un sistema de recolección de volumen constante. También se requieren analizadores de laboratorio con el fin de detectar bajas concentraciones de contaminantes en la muestra diluida de gases. Por otra parte, se necesitan dinamómetros con carga variable para simular la carga instantánea que da la carretera y la potencia necesaria para acelerar la masa inercial de cada automotor. ³⁴

Entre las pruebas dinámicas transitorias se analizan las siguientes:

- FTP 75
- FTP 72
- NYCC

³³RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

³⁴Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-Límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

- CDH 226
- IM-240
- ON BOARD
- UE/ECE
- 11 modos
- 10-15 modos

2.2.1.1 Ciclo de ensayo FTP 75³⁵

La curva de recorrido del ciclo de ensayo FPT 75 (Federal Test Procedure), con tres partes de ensayo, se componen de evoluciones de velocidad que se midieron realmente en las calles de Los Ángeles durante las horas pico del tráfico por la mañana. Después del respectivo acondicionamiento (vehículo parado durante 12 horas a una temperatura ambiente de entre 20 y 30°C), se arranca el vehículo a comprobar y se ejecuta la curva de recorrido prescrita.

Las sustancias nocivas emitidas se acumulan por separado durante tres diferentes fases como son:

- *Fase de transición:* se acumulan los gases de escape de baja densidad durante la fase fría de transición en la bolsa 1 del equipo de comprobación.
- *Fase estabilizada:* cambio de la toma de muestra a la bolsa 2 al comienzo de la fase estabilizada (después de 505 segundos), sin interrumpir el programa de marcha. Al finalizar esta fase, luego de 1365 segundos, se apaga el motor durante 600 segundos.
- *Fase en caliente:* se vuelve a encender el motor para el ensayo en caliente, cuya evolución de velocidad coincide con la fase fría de transición, mientras que los gases de escape se recogen en una tercera bolsa.

Las muestras de las bolsas de las fases anteriores se analizan antes del ensayo en caliente, ya que las muestras no deben permanecer más de 20 minutos en las bolsas. Una vez concluido el ciclo de marcha, se analiza también la muestra de gases de la tercera bolsa.

³⁵Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

Para el resultado total, se ponderan los resultados individuales de las tres fases con los factores: 0,43 (fase de transición), 1 (fase estabilizada) y 0,57 (fase en caliente). Las masas de sustancia nocivas (HC, CO Y NO_x) de las tres bolsas sumadas y ponderadas se relacionan con la distancia recorrida y se expresan como emisión de sustancias nocivas por milla.

2.2.1.1.1 Ciclos SFTP

Las comprobaciones según la norma SFTP (Supplemental Federal Test Procedure), se introdujeron por etapas entre 2001 y 2004, se componen de los siguientes ciclos de marcha: FTP 75, SC03 y US06.

Con los ensayos ampliados, deberán comprobarse los siguientes estados de marcha adicionales: conducción agresiva, fuertes cambios de velocidad, arranque del motor, trayectos con cambios pequeños pero frecuentes de la velocidad, tiempos de reposo y funcionamiento con aire acondicionado.

En los ciclos SC03 y US06 se ejecuta, después del acondicionamiento previo, la fase de transición del ciclo FTP 75, sin acumular los gases de escape. El ciclo SC03 se realiza a 35°C y 40% de humedad relativa del aire (solo vehículos con aire acondicionado).

Los diferentes ciclos de marcha se ponderan de la siguiente manera:

- Vehículos con aire acondicionado: 35% FTP 75 + 37% SC03 + 28% US06
- Vehículos sin aire acondicionado: 72% FTP 75 + 28% US06

Los ciclo de ensayo SFTP y FTP 75 deben aprobarse independientemente uno del otro, en la tabla 2.4 se detallan las características de los ciclos: FTP 75, SC03 y US06.

Tabla 2.4 Características de los ciclos: FTP 75, SC03 y US06 ³⁶.

CICLO DE ENSAYO	DISTANCIA RECORRIDA [Km]	DURACIÓN [s]	VELOCIDAD MEDIA [Km/h]	VELOCIDAD MÁXIMA [Km/h]
FTP 75	17,87	1877 + 600 (Pausa)	34,1	91,2
SC03	5,76	594	34,9	88,2
US06	12,87	600	77,3	129,2

³⁶Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

2.2.1.1.2 Ciclos de ensayo para determinar el consumo de flota

El consumo de combustible se determina a partir de los gases de escape de dos ciclos de ensayo:

- Ciclo de ensayo FPT 75 (55%)
- Ciclo de ensayo en carretera (Highway 45%)

En la figura 2.9 se muestran los diagramas de los ciclos: FTP 75, SC03, US06 y Highway.

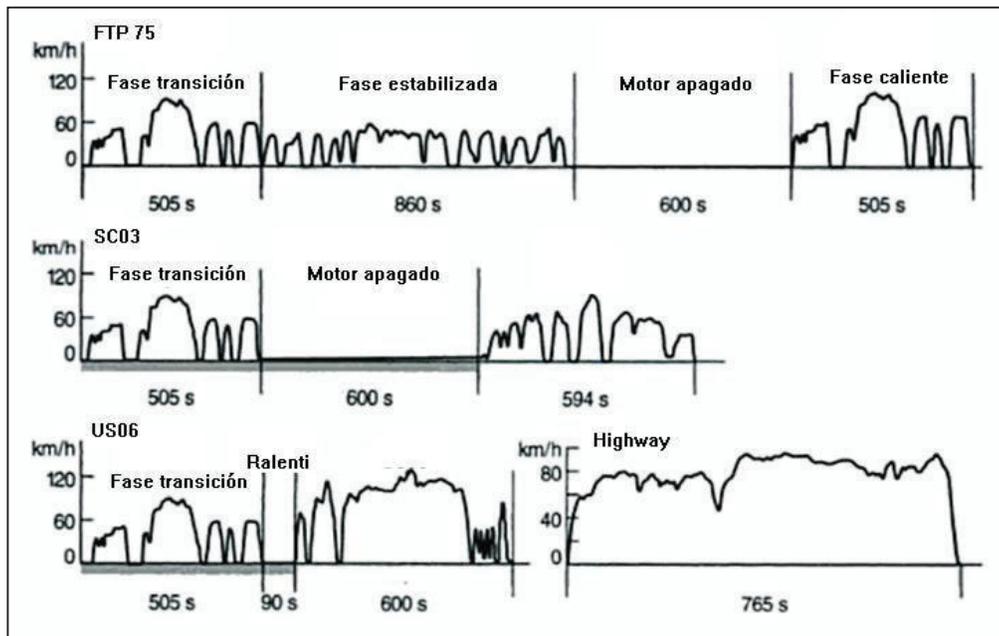


Figura 2.9 Diagramas de los ciclos: FTP 75, SC03, US06 y Highway³⁷.

El ciclo de ensayo Highway se ejecuta una vez, sin medición, tras el acondicionamiento previo (vehículo parado durante 12 horas de 20 a 30°C). A continuación se recogen los gases de escape, y a partir de las emisiones se calcula el consumo de combustible.

2.2.1.2 Ciclo de ensayo FTP 72

El ensayo FPT 72, también conocido como UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), corresponde al ensayo FPT 75 sin la fase de calentamiento, este ciclo se ejecuta en el Running Loss Test para vehículos con motor Otto, en la figura 2.10 se indica el diagrama del ciclo de ensayo FTP 72.

³⁷Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

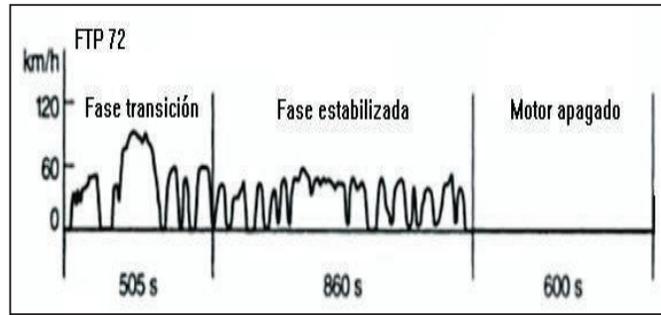


Figura 2.10 Diagrama del ciclo de ensayo FTP 72³⁸.

2.2.1.3 New York City Cycle (NYCC)

La prueba NYCC (New York City Cycle) simula la conducción urbana a velocidades bajas y paradas frecuentes, este ciclo tiene los siguientes parámetros básicos:

- Distancia recorrida: 1.18 millas (1.89 Km)
- Duración: 598 segundos
- Velocidad promedio: 7.1 mph (11.4 Km/h)
- Velocidad máxima: 27.7 mph (44.6 Km/h)

La correlación de la prueba NYCC con la FTP fue mejor que la obtenida con las pruebas anteriores (coeficientes entre 0.82 y 0.95) aún en el caso de las emisiones para NOx. En la figura 2.11 se detalla el diagrama de este ciclo³⁹.

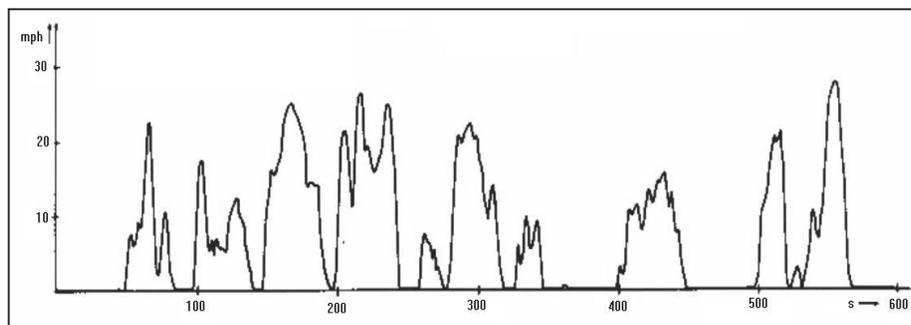


Figura 2.11 Diagrama de New York City Cycle⁴⁰.

³⁸Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

³⁹RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

⁴⁰Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-Límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

2.2.1.4 Prueba CDH 226

Las características de manejo promedio de esta prueba son las siguientes:

- Tiempo total en ralentí: 45 [s]
- Porcentaje de tiempo en ralentí del tiempo total de la prueba: 19,9 [%]
- Velocidad promedio total: 36 Km/h
- Velocidad promedio en movimiento: 45 Km/h
- Velocidad máxima: 82 Km/h

En el preconditionamiento de esta prueba se conduce el vehículo en el dinamómetro a 50 mph durante 3 minutos, el ciclo de manejo dura 226 segundos y la duración total de la prueba es de cerca de 10 minutos. Esta prueba fue desarrollada por el Departamento de Salud de Colorado y buscaba alcanzar una alta correlación con la FTP, especialmente para autos con catalizador de tres vías.

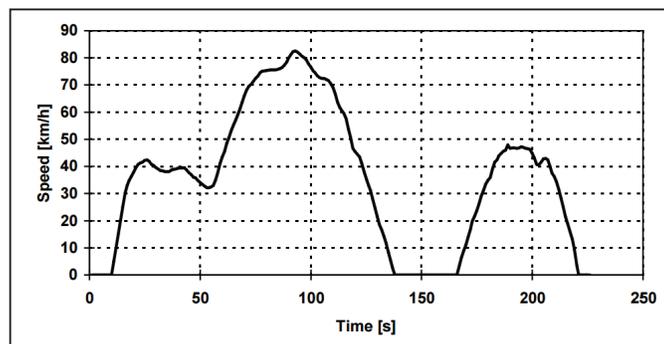


Figura 2.12 Diagrama de manejo de la prueba CDH 226⁴¹.

2.2.1.5 Prueba IM 240

La prueba IM 240 consta de las siguientes características de manejo:

- Tiempo total en ralentí: 9 [s]
- Porcentaje de tiempo en ralentí del tiempo total de la prueba: 3,8 [%]
- Velocidad promedio total: 48 [Km/h]
- Velocidad promedio en movimiento: 49 [Km/h]
- Velocidad máxima: 91 [Km/h]

⁴¹Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-Límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

Es una prueba sobre dinamómetros, utilizada para la medición de emisiones en vehículos livianos en los programas de Inspección y Mantenimiento implementados en varios estados.⁴²

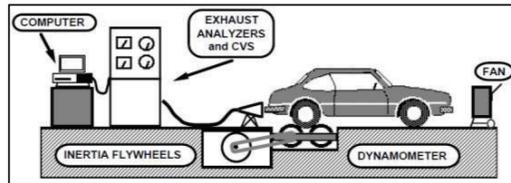


Figura 2.13 Ciclo de prueba IM 240⁴³.

La operación sin carga se realiza aproximadamente a 2500 rpm hasta un máximo de 4 minutos, en estado estable a 30 mph en un dinamómetro hasta un máximo de 4 minutos, la duración de la prueba es de alrededor de 10 minutos en total.

Para efectuar esta prueba se necesita un dinamómetro de carga variable con ruedas volantes, un CVS (muestreador de volumen constante), y analizadores de laboratorio (alta precisión). Comparada con una prueba en estado estable ASM, la IM 240 demostró una mejor habilidad para:

- Identificar correctamente a los vehículos que necesitan reparación.
- Distinguir entre los vehículos suficientemente reparados y los insuficientemente reparados.
- Distinguir entre un sistema de control de vapores en buen funcionamiento y uno en mal estado.

A fin de cumplir con las enmiendas a la ley Clean Air Act de 1990, la EPA propone a los estados o regiones que implementen IM 240 al menos para los vehículos de modelos más nuevos, en la figura 2.14 se observa el diagrama de ciclo IM240.

⁴²Julián Soriano, Límites máximos permisibles para vehículos nuevos y usados, importados o fabricados para circular en el Perú, 2001, Lima-Perú.

⁴³RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

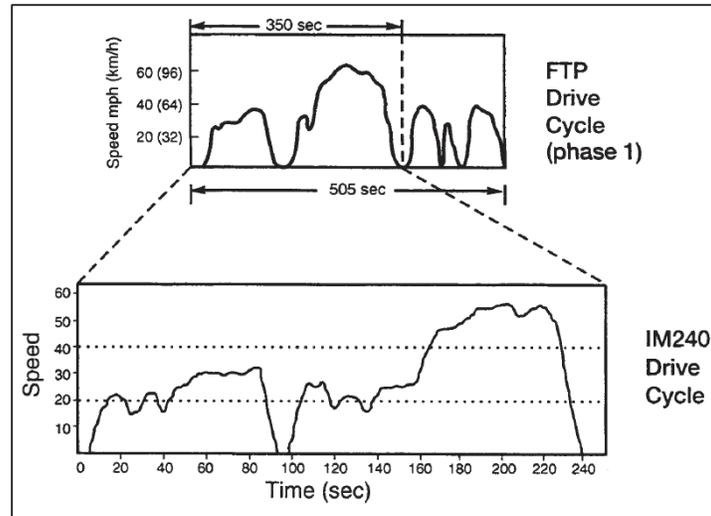


Figura 2.14 Diagrama de manejo de la prueba IM 240⁴⁴.

2.2.1.6 Prueba con equipos de medición On-Board⁴⁵

Esta prueba de medición a bordo es una aproximación deseable de la cuantificación en lo que respecta a emisiones vehiculares en condiciones reales. La tecnología utilizada en este tipo de equipos, varía en función de la aplicación y precisión de los resultados.

El mayor reto es medir de manera confiable la concentración de emisiones y el flujo de gases de escape en tiempo real para obtener resultados en masa de cada contaminante en función del tiempo, distancia recorrida y el consumo de combustible.

La ventaja de esta prueba es realizar rutas en condiciones reales de operación del vehículo, por lo que son utilizados en la determinación de factores de emisión.

Su desventaja radica en la necesidad de mayor tiempo para su instalación, espacio dentro del vehículo y disponibilidad de vehículos de prueba.

En el caso de la experimentación de este tipo, se necesita un equipo analizador de gases on-board conectado al vehículo, selección de un ciclo estándar de manejo simulado en la carretera y el conductor capacitado, en la figura 2.15 se muestra el equipo on-board instalado en el interior de un vehículo.

⁴⁴RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

⁴⁵ALBAN, E., LOPEZ, J.; Desarrollo y validación de un método para la determinación de factores de emisión vehicular mediante pruebas a bordo en la ciudad de Quito, Tesis EPN; octubre 2010.

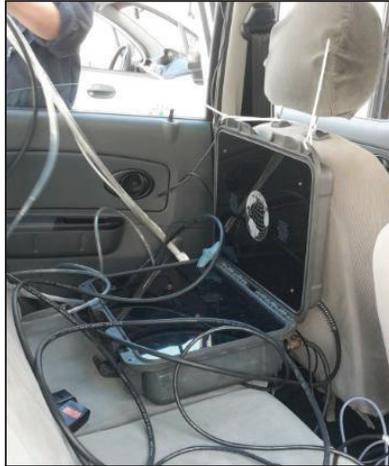


Figura 2.15 Instalación del equipo on-board.

2.2.1.7 Ciclo de ensayo UE/ECE⁴⁶

El ciclo de ensayo UE/ECE (Economic Commission for Europe), también denominado ciclo Europeo de ensayo, se ejecuta con una curva de recorrido que simula el tránsito dentro de las ciudades (UDC, Urban Driving Cycle). En 1993 se amplió este ciclo con una parte no urbana con velocidades de hasta 120 Km/h (EUDC, Extra Urban Driving Cycle). El ciclo de ensayo compuesto por estos ciclos se denomina también NEDC (New European Driving Cycle).

Con el nivel Euro 3 (2000) se eliminó la marcha previa de 40 segundos antes de comenzar la medición de gases de escape (nuevo ciclo Europeo de marcha modificado, NEDC modificado). Así en la medición se incluye también el arranque en frío. Para la comprobación de los gases de escape, el vehículo debe estar parado a una temperatura definida durante 6 horas. La temperatura está actualmente entre 20 y 30°C.

⁴⁶Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

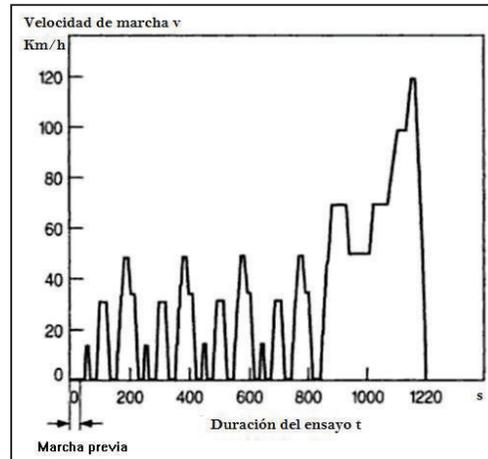


Figura 2.16 Diagrama del ciclo de ensayo UE/ECE ⁴⁷.

El ciclo urbano consta de cuatro partes iguales, cada una de 195 segundos, que se ejecutan sin pausa. El recorrido es de 4,052 Km y se alcanza una velocidad máxima de 50 Km/h, en cambio, el ciclo no urbano tiene velocidades de hasta 120 Km/h, esto dura 400 segundos y un recorrido de 6,955 Km.

Durante la medición se recogen gases de escape en una bolsa, según el método CVS (muestreador de volumen constante). La masa de sustancias nocivas, determinadas mediante el análisis del contenido de la bolsa, se calcula en relación con la distancia recorrida.

2.2.1.8 Ciclo de 11, 10-15 modos⁴⁷

Esta prueba para vehículos con motor Otto se compone de dos ciclos de ensayo con curvas de recorrido diferentes, generadas artificialmente.

El ciclo de 11 modos (solo para vehículos con motor Otto) se ejecuta cuatro veces después del arranque en frío y se evalúan los cuatro ciclos. El ensayo de 10-15 modos (para motores Otto y Diesel) se ejecuta una vez con arranque en caliente, este ciclo simula el comportamiento de conducción característico en Tokio y fue completado con una parte de alta velocidad, en todo caso, la alta velocidad es menor que en el ciclo de ensayo Europeo, ya que en Japón, debido a la mayor

⁴⁷Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

densidad del tráfico, se conduce a velocidades menores. En la figura 2.17 se indican los diagramas de los ciclo de 11 y 10-15 modos.

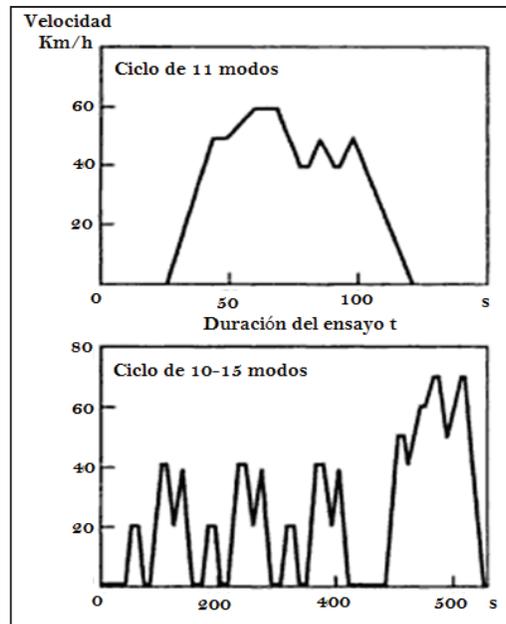


Figura 2.17 Diagrama de los ciclos de 11 y 10-15 modos⁴⁸.

El preconditionamiento para el ensayo en caliente incluye el ensayo de gases de escape en ralentí y transcurre mediante el siguiente proceso: tras calentar el vehículo durante 15 minutos a 60 Km/h, se miden las concentraciones de HC, CO y CO₂ en el tubo de escape. Después de otra fase de calentamiento de 5 minutos a 60 Km/h, comienza el ensayo en caliente de 10-15 modos.

Tanto en el ensayo de 11 modos, como en de 10-15 modos, el análisis de los gases de escape se hace mediante un equipo CVS. Los gases de escape diluidos se recogen en una bolsa. En el ensayo en frío, las sustancias nocivas se expresan en gramos/ensayo, mientras que en el ensayo en caliente se calculan en relación con la distancia recorrida, o sea en gramos/km.

⁴⁸Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR

Para realizar la determinación de los factores de emisión vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito, al utilizar dos tipos de ciclos: IM240 (simulación de un ciclo de ruta que se efectúa en un dinamómetro) y on board (ciclo de ruta real con tramos en ciudad y carretera), se debe analizar el tamaño de la muestra óptimo para este estudio, selección del tipo de vehículos y protocolos de prueba para cada ciclo.

3.1 MUESTREO⁴⁹

El muestreo es una manera de obtener información deseada de una población basada en ciertos criterios. El investigador realiza muestreo porque no se puede medir la totalidad de la población (censo), debido a que los recursos financieros, laborales, temporales, estructurales, etc., son limitados. El muestreo se clasifica en:

- Probabilístico
- No probabilístico

3.1.1. MUESTREO PROBABILÍSTICO

En el muestreo probabilístico se diseña un plan de muestreo en donde:

- Cada elemento tiene una probabilidad de estar incluido en la muestra.
- La selección de los datos de la muestra están basados en un proceso aleatorio.

El muestreo probabilístico provee fórmulas para estimar el error estándar, el sesgo, la precisión, la exactitud y los límites del intervalo de confianza.

⁴⁹BADII M., GUILLEN A.; Nociones introductorias de muestreo estadístico; International Journal; México; Junio 2011.

3.1.2. MUESTREO NO PROBABILÍSTICO

El muestreo no probabilístico consiste en conseguir información sobre la población por medio de preguntas hacia las personas. En realidad, cuando la población es muy variable (alto nivel de varianza), y la muestra por cualquier razón, debe ser de tamaño pequeño, el muestreo no probabilístico es frecuentemente la forma más apropiada de seleccionar datos de la población. Sin embargo, en este muestreo no se puede estimar el sesgo, la precisión, etc., es decir, las ecuaciones para estimar el error estándar de la media, la proporción total e intervalos de confianza no se aplican. Por lo tanto, uno debe utilizar el muestreo probabilístico al menos que:

- El muestreo no sea factible.
- El muestreo sea demasiado costoso.

3.2 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL⁵⁰

La tendencia central se refiere al punto medio de una distribución y sus mediciones se conocen como medidas de posición. Entre las cuales se tiene:

3.2.1 MEDIA

La media es la suma de todos los valores de una variable dividido para el número total de datos que se analiza. La media puede recibir distintos nombres según las operaciones analizadas para calcularla: media aritmética, media geométrica, media armónica, etc.

$$(\bar{X}) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Dónde:

\bar{X} : Media

n: Número total de datos

⁵⁰RODRIGUEZ, LUIS; Probabilidad y estadística básica para ingenieros; Escuela Superior Politécnica del Litoral; Guayaquil; 2007.

3.2.2 MEDIANA

La mediana es el valor que se encuentra en el centro de una secuencia ordenada de datos. La mediana no se ve afectada por observaciones extremas en un conjunto de datos, por ello cuando se presenta alguna información extrema, resulta apropiado utilizar la mediana y no la media para describir el conjunto de datos.

3.2.3 MODA

La moda es el valor de un conjunto de datos que aparece con mayor frecuencia. Se obtiene fácilmente a partir de un arreglo ordenado. A diferencia de la media aritmética, la moda no se afecta al utilizar valores extremos. Sin embargo, sólo se utiliza la moda para propósitos descriptivos porque es más variable para distintas muestras, que las demás medidas de tendencia central.

3.3 MEDIDAS DE DISPERSIÓN⁵¹

Estudia la distribución de los valores de la serie, analizando si estos se encuentran más o menos concentrados o dispersos. Entre estas se tiene:

3.3.1 RANGO

El rango (R) es la diferencia entre el valor máximo ($X_{\text{máx}}$) y el valor mínimo ($X_{\text{mín}}$) de un conjunto de datos. Aunque el rango es una medida de dispersión simple y que se calcula con facilidad, su debilidad preponderante es que no toma en consideración la forma en que se distribuyen los datos entre los valores más pequeños y grandes.

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Dónde:

R: Rango

$X_{\text{máx}}$: Valor máximo de un conjunto de datos

$X_{\text{mín}}$: Valor mínimo de un conjunto de datos

⁵¹RODRIGUEZ, LUIS; Probabilidad y estadística básica para ingenieros; Escuela Superior Politécnica del Litoral; Guayaquil; 2007.

3.3.2 VARIANZA

La varianza (σ^2), es una medida que se basa en la cuantificación de las distancias de los datos con respecto al valor de la media, se representa de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Dónde:

σ^2 : Varianza

X_i : Datos de la muestra

\bar{X} : Media

n : Número total de datos

3.3.3 DESVIACIÓN ESTÁNDAR

La desviación estándar (σ), es la raíz cuadrada positiva de la variancia, también conocida como desviación típica o error muestral, esta expresada en la misma unidad de medición que los datos de la muestra, y se expresa como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Dónde:

σ : Desviación estándar

X_i : Datos de la muestra

\bar{X} : Media

n : Número total de datos

3.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA⁵²

El tamaño óptimo de la muestra, es aquel que permite un balance adecuado entre el costo del muestreo y la precisión obtenida, y además evita la sobreestimación (sobregasto de recursos) o subestimación (precisión no adecuada), depende de tres factores:

⁵²CARDENAS E., KASLIN J.; Caracterización tecnológica del parque automotor del DMQ y propuesta para la reforma de la normativa ecuatoriana de emisiones en fuentes móviles terrestres; EPN; Quito; 2006.

- El porcentaje de confianza con el cual se quiere generalizar los datos desde la muestra hacia la población total.
- El porcentaje de error que se pretende aceptar al momento de hacer la generalización.
- El nivel de variabilidad que se calcula para comprobar la hipótesis.

3.4.1 PORCENTAJE DE CONFIANZA (z)⁵³

Se considera como el porcentaje de seguridad con el que se puede obtener los resultados del estudio, es decir, si se tiene un porcentaje del 100% se consigue una confianza total de generalizar resultados.

Para reducir tantos gastos económicos como el tiempo, la búsqueda de buenos resultados se realiza con una muestra que posea un porcentaje de confianza menor. En la tabla 3.1 se detallan los valores de nivel de confianza.

Tabla 3.1 Valores de nivel e intervalos de confianza⁵⁴

Nivel de confianza	80,0	85,0	90,0	95,0	97,5	99,0
Valor de z	1,28	1,44	1,65	1,96	2,24	2,58

Para englobar los valores que cubren el 99% de los casos, se tiene un margen de error entre -2,58 y +2,58 de la media, como se muestra en la distribución normalizada de la figura 3.1.

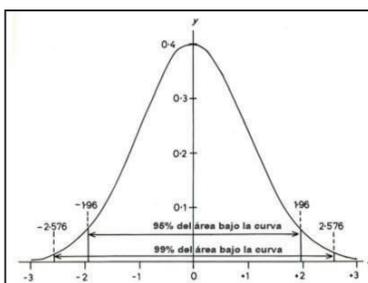


Figura 3.0.1 Distribución normalizada⁵⁵.

⁵³CARDENAS E., KASLIN J.; Caracterización tecnológica del parque automotor del DMQ y propuesta para la reforma de la normativa ecuatoriana de emisiones en fuentes móviles terrestres; EPN; Quito; 2006.

⁵⁴RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

⁵⁵Distribución normalizada, 2014. Consultado de: <http://www.netquest.com/blog/es/que-tamano-de-muestra-necesito/>

3.4.2 PORCENTAJE DE ERROR (ϵ)⁵⁶

Equivale aceptar una hipótesis que sea falsa como si fuera verdadera, o la inversa, rechazar una hipótesis verdadera por considerarla falsa. Al igual que en el caso de la confianza, si se quiere eliminar el riesgo del error y considerarlo como 0%, entonces la muestra es del mismo tamaño que la población, por lo que conviene correr un cierto riesgo de equivocarse. En definitiva cuanto menor es el error muestral de la estimación mayor es su nivel de precisión, normalmente se aceptan errores entre el 5% y 10% que evitan una subestimación o precisión no adecuada.

3.4.3 LA VARIABILIDAD (p)⁵⁶

Es la probabilidad o porcentaje con el que se aceptó y rechazo la hipótesis que se quiere indagar en alguna investigación anterior o en un ensayo previo a la investigación actual. El porcentaje con que se aceptó tal hipótesis se denomina variabilidad positiva (p), y el porcentaje con la que se rechazó la hipótesis es la variabilidad negativa (q). Hay que considerar que p y q son complementarios, es decir, que su suma es igual a la unidad ($p + q = 1$). Además, cuando se habla de la máxima variabilidad, en el caso de no existir antecedentes sobre la investigación (no se puede aplicar una prueba previa), entonces los valores de variabilidad es $p=q=0.5$, es decir en la fórmula proporciona el máximo valor de n .

3.4.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ESTIMAR PROPORCIONES⁵⁷

Si se supone que el muestreo ha sido tomado de manera aleatoria y que existen condiciones que garanticen que la distribución de p (variabilidad) sea aproximadamente normal, se obtiene las siguientes expresiones:

- Muestra infinita ($\geq 100\ 000$)

$$n = \frac{z^2 * p (1-p)}{\epsilon^2} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

⁵⁶CARDENAS E., KASLIN J.; Caracterización tecnológica del parque automotor del DMQ y propuesta para la reforma de la normativa ecuatoriana de emisiones en fuentes móviles terrestres; EPN; Quito; 2006.

⁵⁷RODRIGUEZ, LUIS; Probabilidad y estadística básica para ingenieros; Escuela Superior Politécnica del Litoral; Guayaquil; 2007.

- Muestra finita (< 100 000)

$$n = \frac{z^2 * p(1-p) * N}{(N-1) \varepsilon^2 + z^2 * p(1-p)} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

En donde:

n : Tamaño de la muestra

z : Intervalo de confianza

σ : Desviación estándar

p : Variabilidad positiva

ε : Porcentaje de error

N : Tamaño de la población

3.4.5 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

Para el cálculo del tamaño de la muestra, se hizo en referencia a los vehículos comercializados en el parque automotor del Ecuador, y de esta manera identificar el segmento de vehículos más vendidos en el país, el cual será utilizado en este estudio. En la tabla 3.2 se indica la composición de ventas de vehículos en el Ecuador desde el año 2002 al 2014.

Tabla 3.2 Composición de ventas en el Ecuador / 2002-2014⁵⁸.

AÑO	AUTOMÓVILES	CAMIONETAS	SUV'S	VAN'S	CAMIONES	BUSES	TOTAL
2002	29.296	16.103	12.910	2.664	7.290	1.109	69.372
2003	27.565	14.113	9.050	2.947	3.837	583	58.095
2004	28.474	14.198	10.009	2.372	3.557	541	59.151
2005	41.695	17.734	12.647	2.054	5.264	1.016	80.410
2006	42.932	19.251	15.968	1.563	8.669	1.175	89.558
2007	38.565	20.660	19.769	1.917	9.570	1.297	91.778
2008	46.846	27.963	22.710	2.207	11.521	1.437	112.684
2009	35.869	21.336	24.727	1.895	7.919	1.018	92.764
2010	57.278	27.808	32.972	3.702	9.180	1.232	132.172
2011	62.585	27.469	31.712	5.678	10.788	1.661	139.893
2012	53.526	23.922	27.118	4.463	10.954	1.463	121.446
2013	47.102	22.047	27.067	5.159	11.085	1.352	113.812
2014	47.851	23.244	30.634	5.355	11.673	1.303	120.060
CANTIDAD TOTAL DE VEHÍCULOS VENDIDOS EN ECUADOR (2002-2014)							1'281.195

⁵⁸AEADE, 2016. Consultado de: http://www.aeade.net/web/index.php?option=com_content&view=article&id=145&Itemid=80

La cantidad total de vehículos vendidos desde el año 2002 al 2014 es de 1'281.195 unidades, de las cuales 559.584 unidades corresponden al segmento de automóviles, en la tabla 3.3 se muestra las ventas totales por segmento.

Tabla 3.3 Ventas y participación de mercado por tipo de segmento ⁵⁹.

TIPO DE SEGMENTO	VENTAS TOTALES [UNIDADES]	PARTICIPACIÓN DE MERCADO [%]
AUTOMÓVILES	559.584	43,68
SUV'S	277.293	21,64
CAMIONETAS	275.848	21,53
CAMIONES	111.307	8,69
VAN'S	41.976	3,28
BUSES	15.187	1,19

La mayor tendencia en ventas a nivel nacional esta direccionado al segmento de automóviles con el 46,78% de participación de mercado, por lo tanto el tamaño de muestra para nuestro estudio será orientado a este tipo de segmento.

Para seleccionar el tipo de ecuación correcta para el cálculo del tamaño de muestra vehicular, se toma en cuenta la cantidad total de automóviles vendidos desde el año 2002 al 2014, siendo esta la población de 559.584 unidades, con este valor de referencia y la teoría del tamaño de muestra para estimar proporciones, se seleccionó la ecuación 3.5 para este cálculo, al considerar una muestra infinita mayor a 100.000 unidades de población.

Una vez seleccionado la ecuación idónea para determinar el tamaño de la muestra, hay que considerar los siguientes puntos:

- Entre los valores más utilizados de porcentajes de confianza está el 95% con un valor de z de 1,96.⁶⁰
- La variabilidad positiva en este estudio no puede ser la máxima con un valor de $p=0.5$, debido a que no existen antecedentes sobre la investigación, por tal motivo y para reducir costos del muestreo y evitar la

⁵⁹AEADE, 2016. Consultado de: http://www.aeade.net/web/index.php?option=com_content&view=article&id=145&Itemid=80

⁶⁰ARRIAZA, MANUEL; Guía práctica de análisis de datos; Córdoba, 2006.

sobreestimación (sobre-gasto de recursos), se utilizara una variabilidad positiva $p = 0.99$.⁶¹

- Normalmente se aceptan errores entre el 5% y 10% que evitan una subestimación o precisión no adecuada, en este cálculo se utilizó un porcentaje de error del 9%.⁶²

Entonces al reemplazar estos valores en la ecuación 3.5 se obtiene lo siguiente:

Datos:

$$z = 1,96 \quad ; \quad p = 0,99 \quad ; \quad \varepsilon = 0,09$$

$$n = \frac{z^2 * p (1 - p)}{\varepsilon^2}$$

$$n = \frac{1,96^2 * 0,99 (1 - 0,99)}{0,009^2}$$

$$n = 4,8 \cong 5$$

Por lo tanto el tamaño de muestra vehicular para este estudio es de 5 vehículos.

3.5 SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS DE MUESTRA

La selección de esta muestra se realiza en base a las características tecnológicas de los vehículos del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), considerado como el más denso en cantidad de automotores del país⁶², cuyos parámetros de análisis son los siguientes:

3.5.1 NÚMERO DE CILINDROS

Los vehículos con motor de cuatro cilindros son los de mayor cantidad en el parque automotor del DMQ. En la tabla 3.4 se visualiza el número de cilindros del motor de los vehículos en porcentaje.

⁶¹BADII M., GUILLEN A.; Nociones introductorias de muestreo estadístico; International Journal; México; Junio 2011.

⁶²CARDENAS E., KASLIN J.; Caracterización tecnológica del parque automotor del DMQ y propuesta para la reforma de la normativa ecuatoriana de emisiones en fuentes móviles terrestres; EPN; Quito; 2006.

Tabla 3.4 Número de cilindros del motor de los vehículos en porcentaje⁶³.

NÚMERO DE CILINDROS	3	4	5	6	8
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO [%]	5	83	0,12	10	2

3.5.2 TIPO DE TRANSMISIÓN

La mayor cantidad de automóviles en el DMQ posee transmisión manual como se observa en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Tipo de transmisión de los vehículos en porcentaje⁶³.

TIPO DE TRANSMISIÓN	MANUAL	AUTOMÁTICA	SECUENCIAL
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO [%]	95	5	0,5

3.5.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE

El sistema de alimentación de combustible de inyección electrónica es el de mayor representación en el mercado del DMQ, como se visualiza en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Sistema de alimentación de combustible de los vehículos en porcentaje⁶³.

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE	INYECCIÓN ELECTRONICA	INYECCIÓN MECÁNICA	CARBURADOR
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO [%]	56	0,4	44

3.5.4 SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES (CATALIZADOR)

Los vehículos con un solo catalizador para el control de emisiones son los que predominan a nivel del DMQ, como se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Número de catalizadores de los vehículos en porcentaje⁶³.

SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES (NÚMERO DE CATALIZADORES)	1	2	3	4
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO [%]	94,5	4	1	0,5

3.5.5 MARCA DE VEHÍCULO

La marca de vehículo Chevrolet es la más vendida en el país con el 44,62% de participación en el mercado nacional, como se observa en la tabla 3.8.

⁶³CARDENAS E., KASLIN J.; Caracterización tecnológica del parque automotor del DMQ y propuesta para la reforma de la normativa ecuatoriana de emisiones en fuentes móviles terrestres; EPN; Quito; 2006.

Tabla 3.8 Marca de los vehículos en porcentaje⁶⁴.

MARCA DE VEHÍCULOS	CHEVROLET	KIA	HYUNDAI	MAZDA	TOYOTA	NISSAN
PARTICIPACIÓN EN EL MERCADO [%]	44,62	10,03	8,85	5,76	5,39	5,01

El análisis de la selección de las características de los vehículos de muestra se resume en lo siguiente:

- Número de cilindros : 4
- Tipo de transmisión : manual
- Sistema de alimentación de combustible : inyección electrónica
- Sistema de control de emisiones : un catalizador
- Marca de vehículo : Chevrolet

Por lo tanto la selección de los vehículos de muestra mediante las características tecnológicas y el tamaño de muestra citado anteriormente en este capítulo se obtienen los siguientes vehículos, como se indica en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Vehículos de prueba.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	PLACA
1	CHEVROLET	AVEO	2011	1600	PEI7229
2	CHEVROLET	SPARK	2015	1000	PCN3494
3	CHEVROLET	SPARK	2015	1000	PCN8573
4	CHEVROLET	GRAND VITARA	2011	2000	PBR6590
5	CHEVROLET	GRAND VITARA	2012	2000	IBB3779

3.6 PRUEBA DE EMISIONES DE GASES CON EL CICLO IM-240

Esta prueba se realiza aplicando una carga externa al vehículo por medio de un dinamómetro, el cual permite simular un ciclo de ruta (IM-240) preestablecido en el software del equipo de medición. Además este equipo dispone de un analizador de gases, el mismo que se utiliza para censar las emisiones de gases: CO, CO₂,

⁶⁴AEADE, 2016. Consultado de: http://www.aeade.net/web/index.php?option=com_content&view=article&id=145&Itemid=80, 2016

HC y NO_x. A continuación se detallaran los equipos utilizados y el protocolo de pruebas.

3.6.1 EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos que se utilizaron para realizar la prueba de emisiones de gases con el ciclo IM-240 son los siguientes:

- Equipo LPS 3000
- Analizador de gases MGT5
- Caja de interfaces
- Pinza trigger
- Sonda de temperatura de aceite
- Sonda de gases
- Ventilador de aire refrigerante
- Extractor de gases
- Tanque de presión de combustible

3.6.1.1 Equipo LPS 300

Este equipo permite simular un perfil de velocidad en función del tiempo como por ejemplo el ciclo IM-240, en la figura 3.2 se indica este equipo de prueba.



Figura 3.2 Equipo LPS 3000.

Las características técnicas de este equipo se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Datos técnicos del equipo LPS 3000⁶⁵.

JUEGO DE RODILLOS	
Carga sobre el eje [Tonelada]	15
Longitud [mm]	4550
Ancho [mm]	1100
Altura [mm]	625
Peso [Kg]	2410
Longitud de rodillo [mm]	900
Vía min. [mm]	820
Vía max. [mm]	2620
Diámetro mínimo de rueda para ensayar [plg]	12
Diámetro de rodillo [mm]	318
Distancia entre rodillos [mm]	565
Sobreelevación rodillo [mm]	45
SISTEMA DE ELEVACIÓN CON BLOQUEO DE RODILLOS	
Hidráulico	
DATOS ELÉCTRICOS	
Datos corriente parasita [Kw]	2x200
Potencia rueda [Kw]	30-max. 660
Fuerza de tracción [KN]	Max. 25
Numero de revoluciones [rpm]	10-10000
Precisión de medición [%]	± 2 del valor

3.6.1.2 Analizador de gases MGT5

El analizador MGT5 permite medir las emisiones de gases en concentración de volumen (CO, CO₂ y O₂) y ppm (HC y NO_x), en la figura 3.3 se observa este tipo de analizador.



Figura 3.3 Analizador de gases MGT5.

Las características técnicas de este analizador se detallan en la tabla 3.11.

⁶⁵Manual del usuario MAHA equipo LPS 3000, Alemania, 2003.

Tabla 3.11 Datos técnicos del analizador de gases MGT5⁶⁶.

Gases analizables	CO	CO ₂	HC	O ₂	NO _x
Rango de medición	0 - 15,00 Vol %	0 - 20,0 Vol %	0 - 2000 Vol %	0 - 25,00 Vol %	0 - 5000 ppm Vol
Precisión	0,06 Vol %	0,5 Vol %	12 ppm Vol	0,1 Vol %	32 - 120 ppm
Principio de medida	infrarrojo	infrarrojo	infrarrojo	Electro - químico	Electro - químico
Resolución valores de medida	0,001 Vol %	0,5 Vol %	12 ppm vol	0,1 Vol %	32 - 120 ppm vol
Deriva del rango de medidas	Inferior a $\pm 0,6\%$ del valor final del rango de medición				
Fase de precalentamiento	Mínimo 30 minutos, máximo 10 minutos (regulado por temperatura)				
Nivel de electricidad	Automática, continuada aproximadamente 1l/min				
Presión de servicio	750 - 1100 mbar				
Variación de la presión	Máximo Error 0,2% para variaciones de 5 KPascal				
Alimentación de corriente	Cable de alimentación con conexión a 10 - 42 V CC con pinzas de apriete y diodo como protección contra polarización				

3.6.1.3 Caja de interfaces

La caja de interfaces sirve para registrar el número de revoluciones y temperatura de aceite del motor, este proceso de registro se realiza mediante módulos. En la figura 3.4 se indica este equipo.



Figura 3.4 Caja de interfaces.

3.6.1.4 Pinza trigger

La pinza trigger registra la señal del número de revoluciones del motor en el cable de encendido (bujía o bobina de encendido del distribuidor), esta pinza capta de

⁶⁶Manual de servicio MAHA analizado de gases MGT5, Alemania, 2003

forma inductiva la señal de alta tensión que se transmite del distribuidor a cualquier cilindro, los impulsos se transmiten desde las pinzas trigger hacia la caja de interfaces donde son convertidos en una señal de rpm. En la figura 3.5 se observa este tipo de pinza.



Figura 3.5 Pinza trigger.

3.6.1.5 Sonda de temperatura de aceite

Las pruebas de marcha en el LPS3000 únicamente deben efectuarse cuando el motor haya alcanzado la temperatura de servicio, esta sonda sirve para determinar y controlar la temperatura del aceite durante la prueba.



Figura 3.6 Sonda de temperatura de aceite.

3.6.1.6 Sonda de gases de combustión

La sonda de gases permite recolectar las emisiones producidas por el motor y direccionarlas hacia el analizador de gases, en la figura 3.7 se observa este elemento.



Figura 3.7 Sonda de gases de combustión.

3.6.1.7 Ventilador de aire refrigerante

El aire refrigerante es de especial importancia, porque los sistemas modernos de regulación del motor disponen de dispositivos de control que reduce la potencia del motor si las temperaturas de aspiración son demasiado altas.⁶⁷



Figura 3.8 Ventilador de aire refrigerante.

3.6.1.8 Extractor de gases

Este equipo permite evacuar los gases de combustión del motor, desde la toma final del tubo de escape hacia el medio exterior, permitiendo realizar las pruebas en un ambiente libre de gases tóxicos.

⁶⁷Manual MAHA equipo LPS 3000, Alemania, 2003



Figura 3.9 Ventilador de aire refrigerante.

3.6.1.9 Tanque de presión de combustible

Este equipo permite medir la cantidad de combustible consumida por el vehículo al realizar la prueba del ciclo IM-240, consta de un par de mangueras que se utilizan para el ingreso y retorno de la gasolina al motor, también dispone de una bomba manual que sirve para producir presión en el interior del tanque y con ello simular la presión producida por la bomba de combustible del automotor. En la figura 3.10 se indica este equipo.



Figura 3.10 Tanque de presión de combustible.

3.6.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS CON EL CICLO IM-240

Las pruebas se realizan a una muestra de cinco vehículos con motor de ciclo Otto a gasolina, y se utiliza el combustible extra para efectuar los ensayos. El procedimiento de esta prueba es el siguiente:

1. Posicionar las ruedas motrices del vehículo sobre los rodillos del dinamómetro de forma recta en dirección de marcha.



Figura 3.11 Vehículo sobre el equipo LPS 3000.

2. Fijar el vehículo al dinamómetro por medio de correas de tensión al gancho de remolque o al eje trasero del automotor.



Figura 3.12 Instalación de correas de tensión al vehículo.

3. Conectar la pinza trigger al cable de la bobina de encendido del distribuidor.

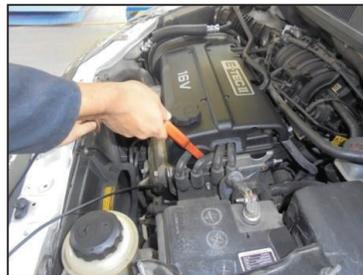


Figura 3.13 Pinza trigger en el cable de la bobina de encendido.

4. Colocar la sonda de temperatura de aceite en el lugar donde se encuentra la varilla del nivel de lubricante del motor.



Figura 3.14 Sonda de aceite en el motor.

5. Instalar la sonda de gases al final del tubo de escape.



Figura 3.15 Sonda de gases al final del tubo de escape.

6. Poner el extractor de gases a la salida de las emisiones contaminantes del motor.



Figura 3.16 Extractor de gases en la terminación del sistema de escape.

7. Posicionar el ventilador de aire refrigerante delante del radiador del vehículo.



Figura 3.17 Ventilador de aire refrigerante delante del vehículo.

8. Conectar el tanque de presión de combustible en las tomas de ingreso y retorno de gasolina del motor, este equipo debe instalarse a una presión similar a la del funcionamiento de la bomba de combustible, que en la muestra de vehículos de prueba es de 50 PSI. Además se debe llenar este recipiente con cinco litros de gasolina, que al finalizar la prueba serán medidos, y la diferencia entre el combustible gastado y la base de cinco litros, será la cantidad de combustible consumida por el automotor.



Figura 3.18 Instalación de tanque de presión de combustible al vehículo.

9. Activar el analizador de gases en el equipo LPS 3000.

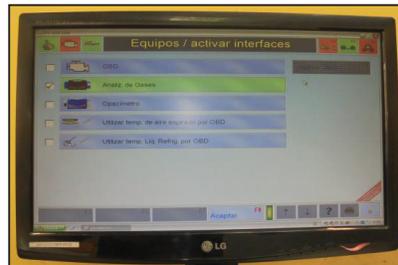


Figura 3.19 Activación del analizador de gases en el LPS 3000.

10. Seleccionar y cargar el ciclo de ruta IM-240 en el equipo LPS 3000.



Figura 3.20 Cargar al equipo en ciclo de ruta IM-240.

11. Antes de iniciar la medición de gases, llevar el motor a la temperatura normal de funcionamiento de 94 °C.



Figura 3.21 Temperatura normal de funcionamiento del motor.

12. Dar inicio al ciclo IM-240 y medición de gases en el equipo LPS 3000.



Figura 3.22 Inicio de ciclo IM-240.

13. Conducir el vehículo siguiendo la ruta preestablecida por el equipo, procurando estar dentro de la zona de tolerancia de la prueba y evitar que esta sea cancelada por el equipo.



Figura 3.23 Conducción del vehículo en el ciclo IM-240.

14. Parar el ciclo IM-240 conjuntamente con el vehículo y registrar los mediciones de gases contaminantes producidas en el ciclo.

15. Medir y registrar la cantidad de combustible consumido en el tanque de presión.



Figura 3.24 Medición del consumo de combustible.

16. Repetir el procedimiento anterior dos veces más.

17. Desinstalar los equipos.

3.7 PRUEBA DE EMISIONES DE GASES CON EL CICLO ON BOARD

Esta prueba se realiza con un equipo de medición de gases on board, el mismo que va instalado en el interior del vehículo, permitiendo obtener mediciones de CO, CO₂, O₂, HC y NO_x, en condiciones reales de funcionamiento, además se utiliza un ciclo de ruta que consta de dos tramos: uno en ciudad y otro en carretera, como se explica a continuación.

3.7.1 CICLO DE RUTA

La ruta seleccionada en el Distrito Metropolitana de Quito tiene una combinación de 2 tramos, tanto en ciudad como autopista, además consta de una variedad de pendientes y tráfico vehicular. Tiene una longitud de 30 kilómetros, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- 16 kilómetros de carretera desde el CCICEV hasta la subida a Guápulo de la Av. Simón Bolívar.
- 14 kilómetros de ciudad desde Guápulo hasta el CCICEV.

Las distancias del ciclo de ruta se establecen en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Distancias del ciclo de ruta combinado (ciudad-carretera) .

TRAMO	DISTANCIA [Km]	CICLO
CCICEV- Autopista General Rumiñahui (ingreso Intercambiador)	7.13	Carretera
Av. Simón Bolívar - subida a Guápulo	8.87	Carretera
Subida a Guápulo - Hotel Quito	7.79	Ciudad
Hotel Quito - Av. 10 de Agosto	1.83	Ciudad
Av. 10 de Agosto - Av. Mariana de Jesus	0.81	Ciudad
Av. Mariana de Jesús- Av. Amazonas- Av.Veintimilla	2.32	Ciudad
Av. Veintimilla - CCICEV	1.25	Ciudad

En la figura 3.25 se puede apreciar el ciclo carretera.

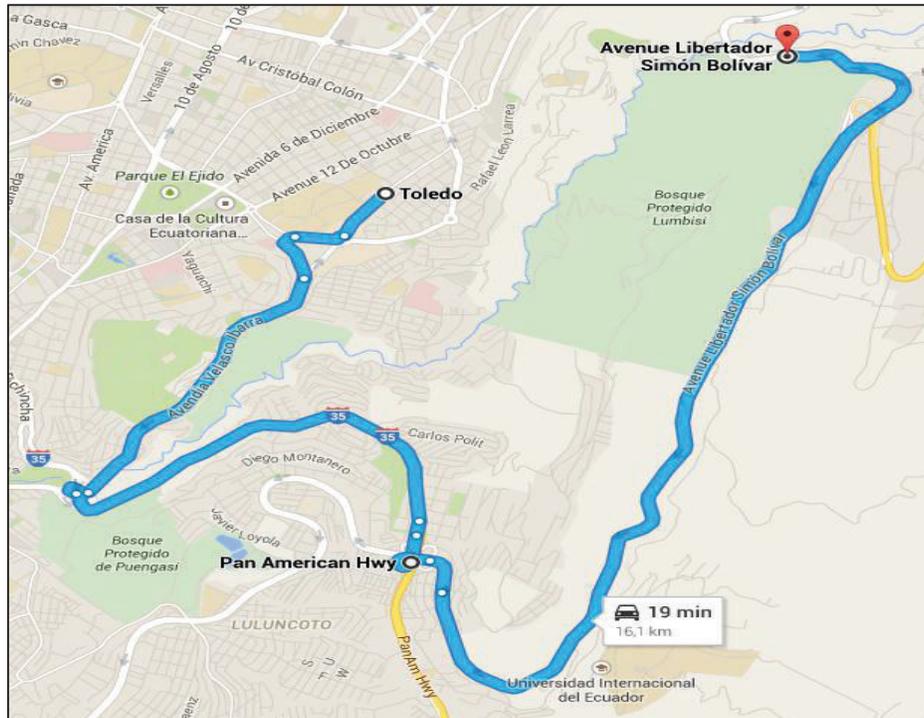


Figura 3.25 Ciclo carretera⁶⁸.

En la Figura 3.26 se muestra el ciclo ciudad.

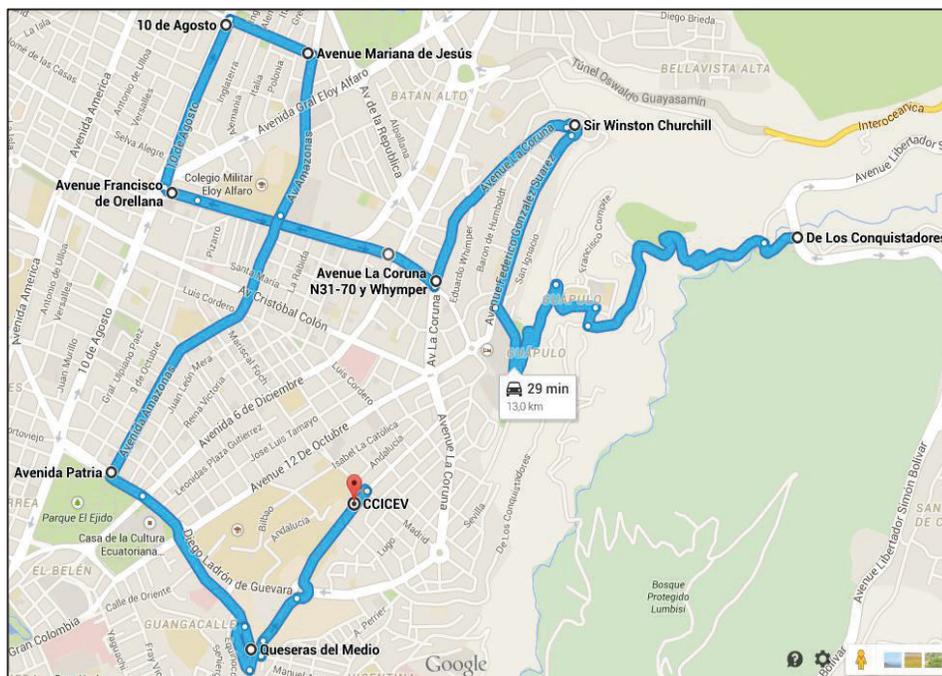


Figura 3.26 Ciclo ciudad⁶⁸.

⁶⁸Google maps, 2016. Consultado de: <https://www.google.com.ec/maps/dir>

3.7.2 EQUIPOS UTILIZADOS

En la prueba de emisiones de gases con el ciclo on board, se utilizaron los siguientes equipos:

- Analizador de gases on board
- Conector de datos OBD 2
- GPS
- Sonda de gases
- Tanque de presión de combustible

La sonda de gases y el tanque de presión de combustible son los mismos que se utilizaron en la prueba de emisiones de gases con el ciclo IM-240.

3.7.1.1 Analizador de gases on board

Este equipo permite medir las emisiones de gases (CO, CO₂, O₂, HC y NO_x) en tiempo real de funcionamiento del vehículo, cuyas características técnicas se indican en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Características técnicas del equipo on board ⁶⁹.

TIPO	RANGO DE MEDICIÓN	PRECISIÓN	RESOLUCIÓN
Medición de O ₂ (Sensor)	Mayor o igual de (0.01 a 25% Vol.)	Mayor o igual a ±0.1% abs.	Mayor o igual a 0.01% Vol.
Medición de CO (NDIR)	Mayor o igual de (0.001 a 10% Vol.)	Mayor o igual a ±0.02% abs.	Mayor o igual a 0.001% Vol.
Medición de NO _x (Sensor)	Mayor o igual de (0 a 4000 ppm)	Mayor o igual a ±25 ppm abs.	Mayor o igual a 1 ppm
Medición de CO ₂ (NDIR)	Mayor o igual de (0.01- 16% Vol.)	Mayor o igual a ±0.30% abs.	Mayor o igual a 0.01% Vol.
Medición de HC (NDIR)	Mayor o igual de (1 a 15000 ppm)	Mayor o igual a ±4 ppm abs.	Mayor o igual a 1 ppm

En la figura 3.27 se observa este equipo.

⁶⁹Manual del usuario, analizador de gases on board, Estados Unidos, 2016.



Figura 3.27 Equipo on board.

3.7.2.2 Conector de datos OBD 2

Este elemento permite realizar una conexión entre el equipo on board y el vehículo, las medidas registradas a través de este conector son las concentraciones volumétricas de las emisiones producidas, revoluciones y temperatura de aceite del motor.



Figura 3.28 Conector OBD 2.

3.7.2.3 GPS

El GPS (sistema de posicionamiento global), determina la posición del vehículo al realizar la prueba de ruta utilizada en este estudio, permitiendo medir la distancia recorrida, las velocidades máximas, medias, y los tiempos en movimiento y reposo. En la figura 3.29 se indica este equipo.



Figura 3.29 GPS.

3.7.3 PROTOCOLO DE PRUEBAS CON EL CICLO ON BOARD

Esta prueba se realiza en un ciclo real de ruta en el Distrito Metropolitano de Quito, con la utilización de un equipo a bordo, el mismo que mide las concentraciones de gases CO, CO₂, HC, O₂ y NO_x. Además se efectúa la medición del consumo de combustible por medio de un tanque de combustible a presión instalado en el vehículo. El procedimiento para desarrollar este ciclo es el siguiente:

1. Instalar el equipo on board en el interior del vehículo, la fuente de energía de este analizador es de 12 voltios.



Figura 3.30 Instalación del equipo on board.

2. Conectar el cable de conexión de datos OBD 2, desde el equipo on board al conector del vehículo, para registrar información de las concentraciones volumétricas de emisiones de gases, revoluciones y temperatura del motor.



Figura 3.31 Conexión del conector OBD 2.

3. Colocar la sonda de gases al final del tubo de escape, con un ajuste adecuado entre los dos elementos para evitar la caída de la sonda durante la prueba.



Figura 3.32 Instalación de la sonda de gases.

4. Instalar el tanque de presión de combustible en el vehículo, se debe utilizar una presión de 50 PSI en este tanque para poder simular el funcionamiento de la bomba de combustible del automotor. Este equipo debe tener 5 litros de combustible como medida base.



Figura 3.33 Colocación del tanque de presión de combustible.

5. Encender el equipo on board para iniciar el proceso de calentamiento de 30 minutos, antes de comenzar la prueba.



Figura 3.34 Calentamiento del equipo on board.

6. Después de haber terminado el calentamiento del equipo on board, se debe llegar a la temperatura normal de funcionamiento del motor (94°C), para iniciar la prueba.



Figura 3.35 Calentamiento del motor del vehículo.

7. Para comenzar la prueba se debe iniciar el registro de mediciones de gases y distancias recorridas a través de los equipos on board y GPS respectivamente.

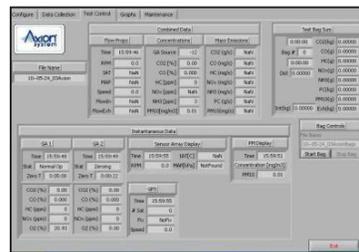


Figura 3.36 Registro de mediciones con los equipos on board.

8. Realizar el recorrido con el vehículo en la ruta del ciclo on board indicada anteriormente. Para lograr mediciones homogéneas en cada prueba, se debe evitar las salidas bruscas cuando el vehículo está detenido, mantener los mismos límites de velocidad tanto en carretera como en ciudad, suspender las mediciones al existir indicios de lluvia y efectuar todas las pruebas con el mismo conductor capacitado para evitar distintas formas de conducción.
9. Al completar el recorrido de la ruta se debe registrar los siguientes datos: distancia, velocidad y tiempo por medio del GPS; concentraciones de emisiones de gases a través del equipo on board y cantidad de gasolina consumido por prueba con el tanque de presión de combustible.
10. Repetir el procedimiento anterior dos veces más.
11. Desinstalar los equipos.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados de las pruebas de emisiones de gases dinámicos y el consumo de combustible al utilizar los ciclos IM240 y on board, con estos valores se calculan los factores de emisión contaminante para el CO, HC y NO_x, y por último se determinan los factores de correlación lineal entre estos dos ciclos.

4.1 RESULTADOS DE PRUEBAS CON CICLO IM240

4.1.1 EMISIONES DE GASES DINÁMICOS

Los valores promedio obtenidos al realizar las pruebas de emisiones de gases dinámicos con ciclo IM240, se indican en la tabla 4.1, según el protocolo de pruebas del numeral 3.6.2 citado en el capítulo 3. Los valores de estas pruebas de gases se encuentran en el anexo 1.

Tabla 4.1 Valores promedios de pruebas de emisiones de gases dinámicos con ciclo IM240.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	CO [%Vol]	HC [ppm]	NO _x [ppm]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.004	48.031	217.174
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.099	27.997	20.368
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.074	30.938	29.508
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.110	27.465	184.406
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.104	67.839	99.336

A continuación se realiza un análisis de las gráficas de concentraciones de gases de CO, HC y NO_x, para el vehículo de ítem 1, como ejemplo de muestra y el análisis de los demás vehículos se detallan en el anexo 2.

4.1.1.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura 4.1 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 1.

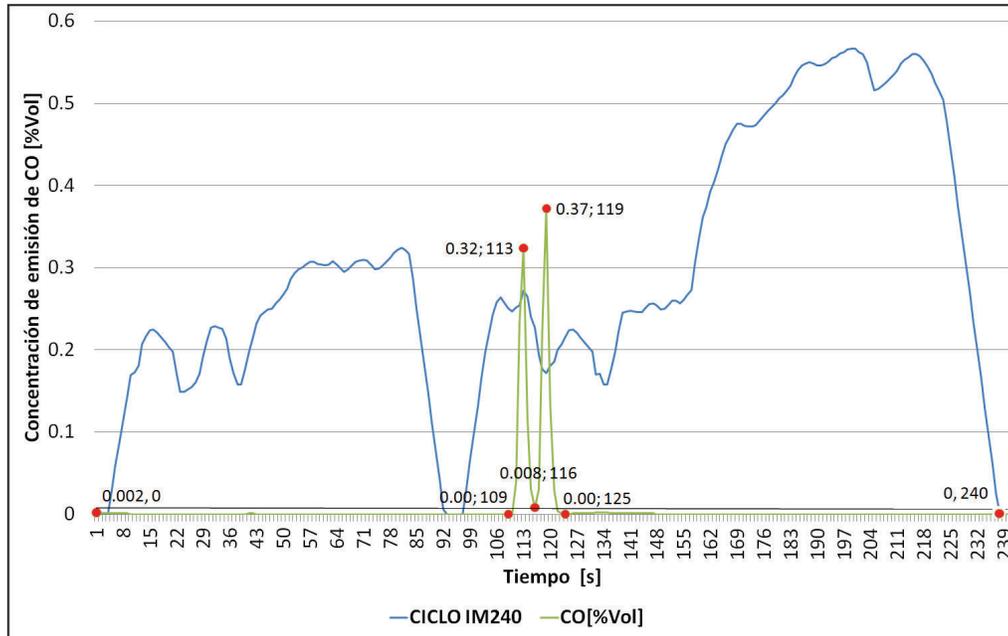


Figura 4.1 Gráfica de concentración de CO con ciclo IM240, del vehículo de ítem 1.

El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 109$	$V_0 = 0 ; V_{109} = 25,1$	Constante=0
2	$109 \leq t < 113$	$V_{109} = 25,1 ; V_{113} = 27,2$	Incremento de 0 a 0,32
3	$113 \leq t < 116$	$V_{113} = 27,2 ; V_{116} = 22,7$	Decremento 0,32 a 0,08
4	$116 \leq t < 119$	$V_{116} = 22,7 ; V_{119} = 17,2$	Incremento de 0,08 a 0,37
5	$119 \leq t < 125$	$V_{119} = 17,2 ; V_{125} = 22,4$	Decremento 0,37 a 0
6	$125 \leq t < 240$	$V_{125} = 22,4 ; V_{240} = 0$	Constante=0

4.1.1.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura 4.2 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 1.

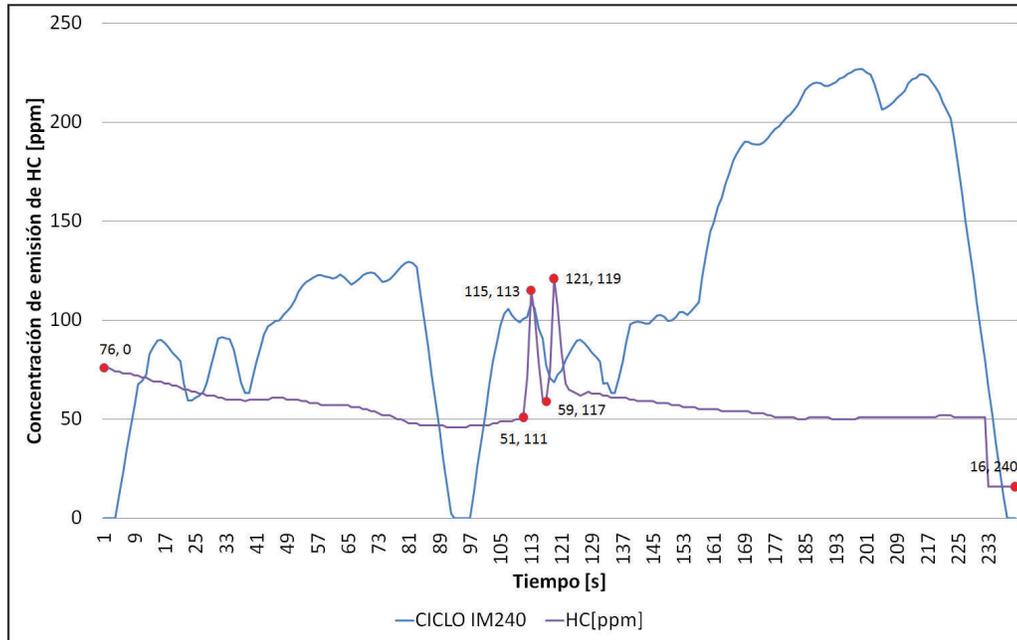


Figura 4.2 Gráfica de concentración de HC con ciclo IM240, del vehículo de ítem 1.

El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 111$	$V_0 = 0 ; V_{111} = 25,2$	Decremento de 76 a 51
2	$111 \leq t < 113$	$V_{111} = 25,2 ; V_{113} = 27,2$	Incremento de 51 a 115
3	$113 \leq t < 117$	$V_{113} = 27,2 ; V_{117} = 19,4$	Decremento 115 a 59
4	$117 \leq t < 121$	$V_{117} = 19,4 ; V_{121} = 18,6$	Incremento 59 a 121
5	$121 \leq t < 240$	$V_{121} = 18,6 ; V_{240} = 0$	Decremento de 121 a 0

4.1.1.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura 4.3 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 1.

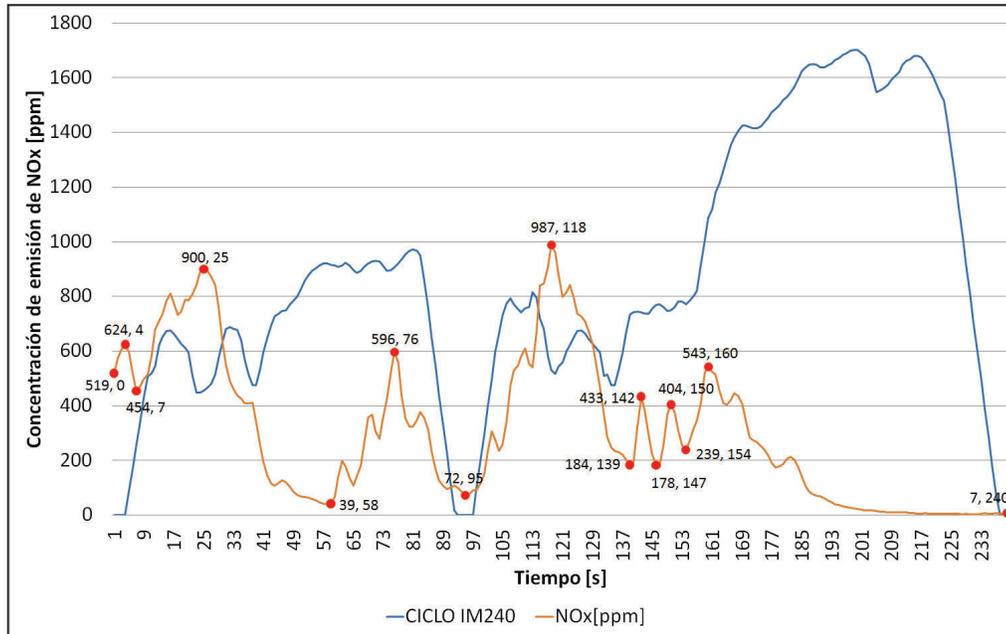


Figura 4.3 Gráfica de concentración de NO_x con ciclo IM240, del vehículo de ítem 1.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Comportamiento de concentración de NO_x en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
1	$0 \leq t < 4$	$V_0 = 0 ; V_4 = 3$	Incremento de 519 a 624
2	$4 \leq t < 7$	$V_4 = 3 ; V_7 = 8,6$	Decremento 624 a 454
3	$7 \leq t < 25$	$V_7 = 8,6 ; V_{25} = 15,2$	Incremento de 454 a 900
4	$25 \leq t < 58$	$V_{25} = 15,2 ; V_{58} = 30,7$	Decremento de 900 a 39
5	$58 \leq t < 76$	$V_{58} = 30,7 ; V_{76} = 30,2$	Incremento de 39 a 596
6	$76 \leq t < 95$	$V_{76} = 30,2 ; V_{95} = 0$	Decremento de 596 a 72
7	$95 \leq t < 118$	$V_{95} = 0 ; V_{118} = 17,7$	Incremento de 72 a 987
8	$118 \leq t < 139$	$V_{118} = 17,7 ; V_{139} = 22,2$	Decremento de 987 a 184
9	$139 \leq t < 142$	$V_{139} = 22,2 ; V_{142} = 24,8$	Incremento de 184 a 433
10	$142 \leq t < 147$	$V_{142} = 24,8 ; V_{147} = 25,6$	Decremento de 433 a 178
11	$147 \leq t < 150$	$V_{147} = 25,6 ; V_{150} = 24,9$	Incremento de 178 a 404
12	$150 \leq t < 154$	$V_{150} = 24,9 ; V_{154} = 26$	Decremento de 404 a 239
13	$154 \leq t < 160$	$V_{154} = 26 ; V_{160} = 33,5$	Incremento de 239 a 543
14	$160 \leq t < 240$	$V_{160} = 33,5 ; V_{240} = 0$	Decremento de 543 a 7

4.1.1.4 Análisis de resultados de las concentraciones de emisiones de CO, HC y NO_x en el ciclo IM240

En la figura 4.4 se indican los intervalos de tiempo en donde existen las relaciones de aumento y disminución entre las emisiones de gases de CO, HC y NO_x, del vehículo de ítem 1, en el transcurso del ciclo de conducción IM240.

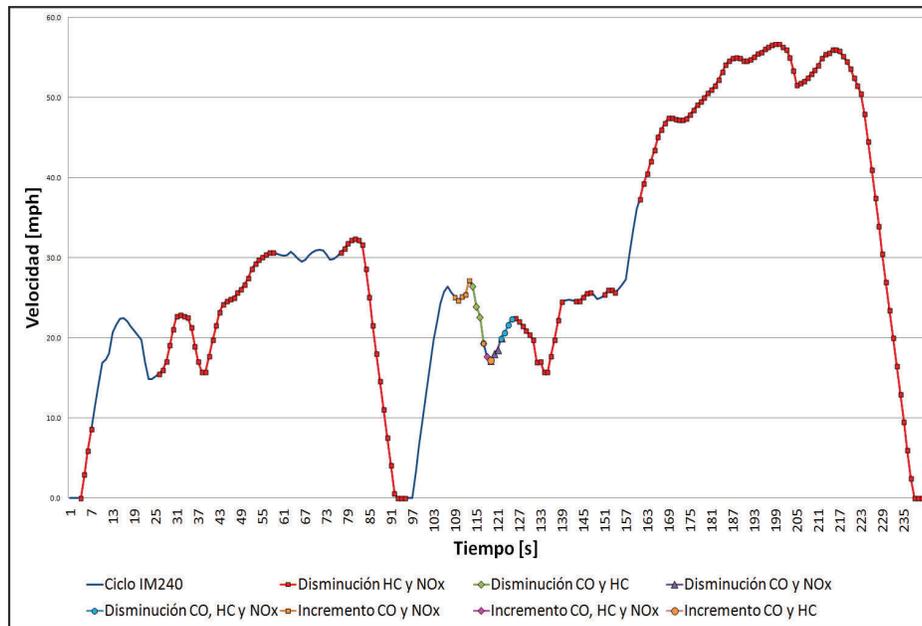


Figura 4.4 Gráfica de relaciones de aumento y disminución entre las emisiones de gases de CO, HC y NO_x, del vehículo de ítem 1.

A continuación en las figuras 4.5 y 4.6 se muestran los tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las diferentes relaciones de disminución y aumento de las concentraciones de gases de CO, HC y NO_x.

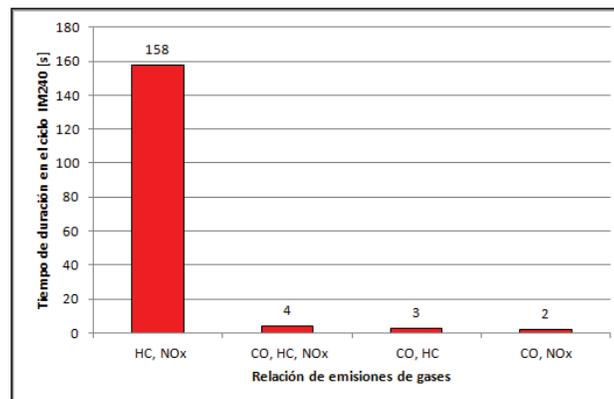


Figura 4.5 Tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las relaciones de disminución de concentración de gases.

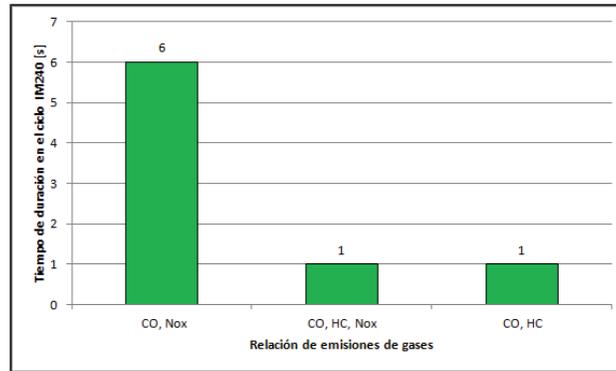


Figura 4.6 Tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las relaciones de aumento de concentración de gases.

En las tablas 4.5 y 4.6 se indican las participaciones en porcentaje, de las relaciones de emisiones de gases respecto al tiempo de duración total de la prueba en el ciclo IM240 (240 segundos).

Tabla 4.5 Participación de la disminución de concentración de emisiones de gases en el ciclo IM240 del vehículo de ítem 1.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
HC, NOx	65.8
CO, HC , NOx	1.7
CO, HC	1.3
CO, NOx	0.8

Tabla 4.6 Participación del aumento de concentración de emisiones de gases en el ciclo IM240 del vehículo de ítem 1.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
CO, NOx	2.5
CO, HC , NOx	0.4
CO, HC	0.4

El análisis de resultados de las concentraciones de emisiones de gases dinámicos en el ciclo IM240, del vehículo 1, son las siguientes:

- La relación de HC y NO_x, con respecto a la disminución en sus concentraciones, tiene la mayor participación en el ciclo IM240 con el 65,8%.

- La relación de CO y NO_x, con respecto al aumento en sus concentraciones, tiene la segunda participación en el ciclo IM240 con apenas el 2,5%.
- Y las restantes relaciones de emisiones de gases, tienen participaciones menores al 1,7%, lo cual implica una baja intervención en el ciclo IM240.

4.1.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Los valores promedios de las pruebas de consumo de combustible se indican en la tabla 4.7. Los valores de estas pruebas se encuentran en el anexo 3.

Tabla 4.7 Valores promedios de pruebas de consumo de combustible en el ciclo IM240.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE [Km/l]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	8.53
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	7.93
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	7.87
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	6.38
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	6.10

En la figura 4.7 se muestra el consumo de combustible por año/modelo de vehículo.

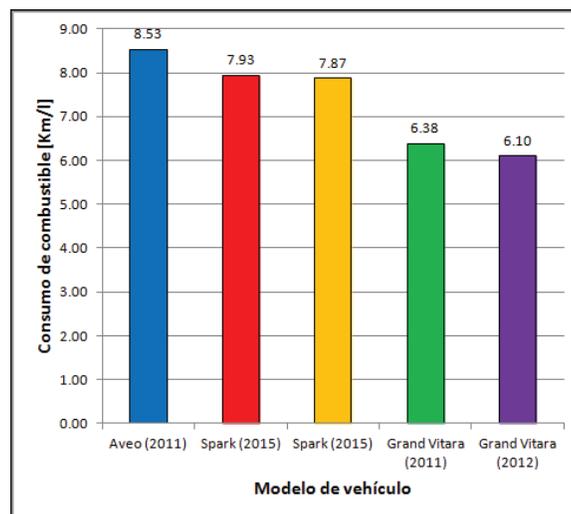


Figura 4.7 Resultado de pruebas de consumo de combustible por modelo/año de vehículo.

4.1.3 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR

Para realizar los cálculos de los factores de emisión vehicular se deben utilizar los resultados de las concentraciones de gases dinámicos y el consumo de combustible de las pruebas realizadas con el ciclo IM240. El combustible utilizado en este estudio es la gasolina extra cuyas especificaciones se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Especificaciones de la gasolina extra⁷⁰.

DETERMINACIÓN	UNIDAD	PROCEDIMIENTO	ESPECIFICACIÓN INEN 935
Análisis PONA Aromáticos Olefinas Saturados	%V	ASTM D1339	20 20 -
Azufre	%P	ASTM D129	0.20
Corrosión a la lamina	U. Corrosión	ASTM D130	1
Densidad API	°API	ASTM D287	-
Destilación ASTM PI 5% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 95% PF V. Destilado	°C	ASTM D86	Máximo - - 70 - - - 121 - - - 189 - 215
Número de octanos	-	ASTM D908	80
Poder Calórico Bruto	Kcal/Kg	ASTM D240	-
Plomo	g/l	ASTM D3708	+0.013
Presión de Vapor Reid	KPa	ASTM D323	56

La densidad promedio de la gasolina extra a 15°C, que se comercializa en el Ecuador es de 748 Kg/m³.⁷¹

⁷⁰ Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma NTE - INEN 935.

⁷¹ RECALDE, M., REVELO, R.; Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante ciclo IM-240, Tesis EPN; abril 2015.

Los factores de emisión del CO, HC y NO_x son determinados utilizando el modelo simplificado de la combustión citada en el capítulo 1, mediante las ecuaciones 1.29, 1.30 y 1.31, respectivamente, como se indican a continuación:

$$EF_{CO} = \frac{28 \frac{\%CO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left(3 \frac{\%HC}{\%CO_2}\right) + 1} * \frac{\delta_{Fuel} * FC}{0.01425}$$

$$EF_{HC} = \frac{42 \frac{\%HC}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left(3 \frac{\%HC}{\%CO_2}\right) + 1} * \frac{\delta_{Fuel} * FC}{0.01425}$$

$$EF_{NO_x} = \frac{30 \frac{\%NO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left(3 \frac{\%HC}{\%CO_2}\right) + 1} * \frac{\delta_{Fuel} * FC}{0.01425}$$

Dónde:

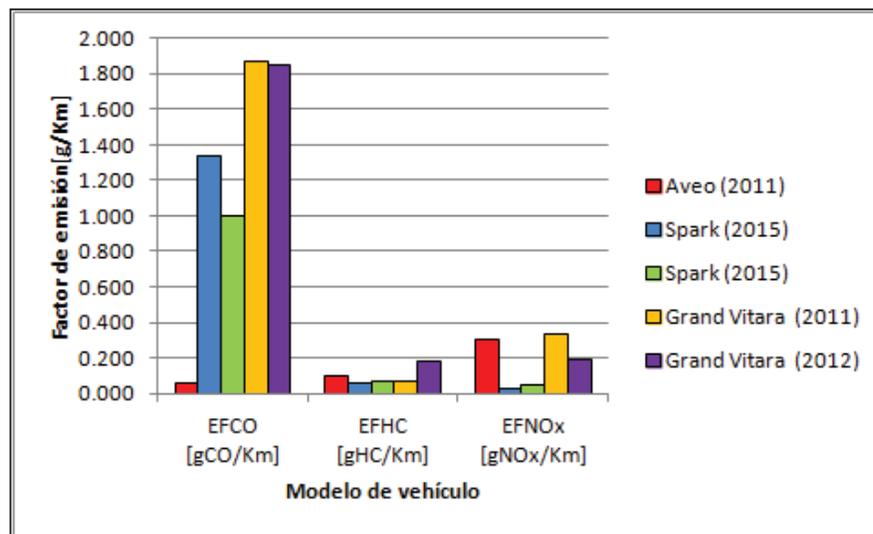
- EF_{CO} : factor de emisión del CO [gCO/Km]
- EF_{HC} : factor de emisión del HC [gHC/Km]
- EF_{NO_x} : factor de emisión del NO_x [gNO_x/Km]
- %CO : concentración en volumen del CO [%Vol]
- %CO₂ : concentración en volumen del CO₂ [%Vol]
- %HC : concentración en volumen del HC [%Vol] (dividir ppm para 10000 y se obtiene %Vol)
- %NO_x : concentración en volumen del NO_x [%Vol] (dividir ppm para 10000 y se obtiene %Vol)
- δ_{Fuel} : densidad de la gasolina extra [Kg/m³]
- FC : consumo de combustible [Km/l]

Los factores de emisión del CO, HC y NO_x de la muestra de los cinco vehículos de prueba al utilizar el ciclo IM240, se indican en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Factores de emisión del CO, HC y NO_x al utilizar el ciclo IM240.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{CO} [gCO/Km]	EF _{HC} [gHC/Km]	EF _{NO_x} [gNO _x /Km]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.054	0.094	0.303
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	1.337	0.057	0.029
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	1.004	0.063	0.043
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	1.865	0.070	0.336
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	1.852	0.182	0.190

En la figura 4.8 se observan los factores de emisión con respecto al año/modelo de los vehículos de muestra.

**Figura 4.8** Resultado de factores de emisión por año/modelo de vehículo con ciclo IM240.

4.1.3.1 Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo IM240 y los límites máximos permitidos según NTE INEN 2204

En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se indican las comparaciones entre los resultados de los factores de emisión de CO, HC y NO_x al utilizar el ciclo IM240, y los límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina, según NTE INEN 2204.

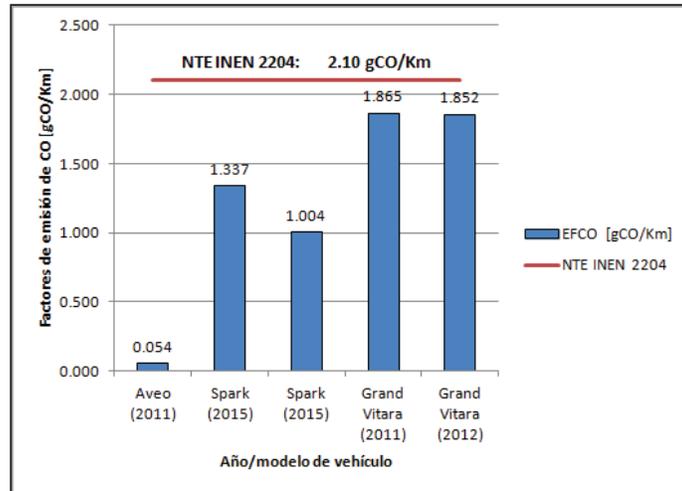


Figura 4.9 Comparación entre resultados de factores de emisión de CO y NTE INEN 2204.

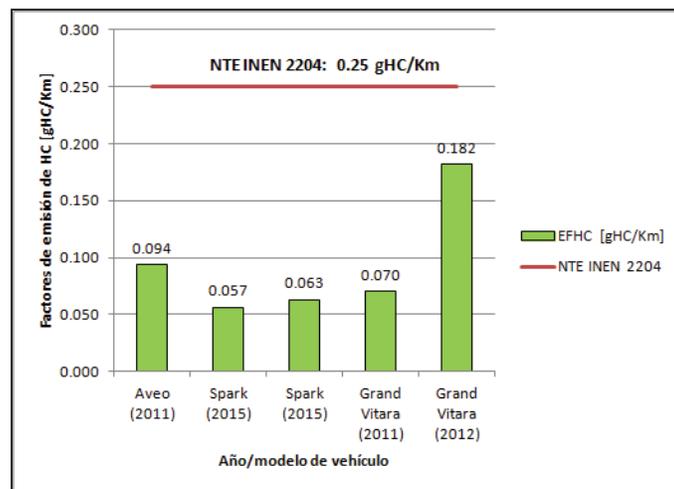


Figura 4.10 Comparación entre resultados de factores de emisión de HC y NTE INEN 2204.

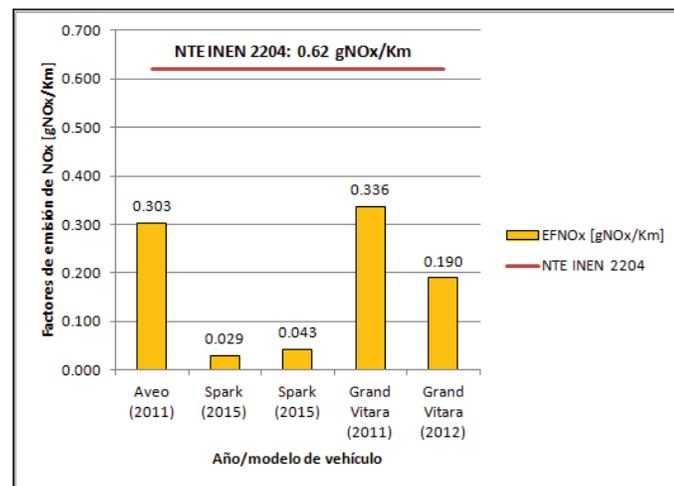


Figura 4.11 Comparación entre resultados de factores de emisión de NO_x y NTE INEN 2204.

Al analizar las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se tiene lo siguiente:

- Los factores de emisión vehicular del CO, HC y NO_x, obtenidos con el ciclo IM240 y comparados con los factores de la NTE INEN 2204, que hace referencia al ciclo FTP 75 y para vehículos con tecnología EURO II, se aprecia que los valores del ciclo IM240 son menores a los límites de la norma.

4.1.3.2 Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo IM240 y resultados con pruebas de laboratorio acreditado

En la tabla 4.10 se indica los resultados de pruebas de factores de emisión de CO, HC y NO_x, realizadas en el laboratorio acreditado "RDW Vehicle Technology Division", de los siguientes vehículos que se detallan a continuación.

Tabla 4.10 Factores de emisión del CO, HC y NO_x del laboratorio acreditado RDW ⁷².

MARCA	MODELO	AÑO	EF _{CO} [gCO/Km]	EF _{HC} [gHC/Km]	EF _{NO_x} [gNO _x /Km]
Chevrolet	Aveo	2015	0.373	0.051	0.080
Chevrolet	Spark	2015	0.500	0.060	0.020
Chevrolet	Grand Vitara	2015	0.428	0.048	0.085

En las tablas 4.11, 4.12 y 4.13, se muestran las diferencias porcentuales entre los factores de emisión de CO, HC y NO_x, respectivamente; obtenidos en pruebas con ciclo IM240 y laboratorio acreditado RDW.

Tabla 4.11 Comparación entre factores de emisión de CO y laboratorio acreditado RDW.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{CO} [gCO/Km]	
					CICLO IM240	LAB. ACREDITADO
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.054	0.373
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	1.337	0.500
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	1.004	0.500
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	1.865	0.428
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	1.852	0.428

⁷² RDW, Vehicle Technology Division, Nederland, 2015

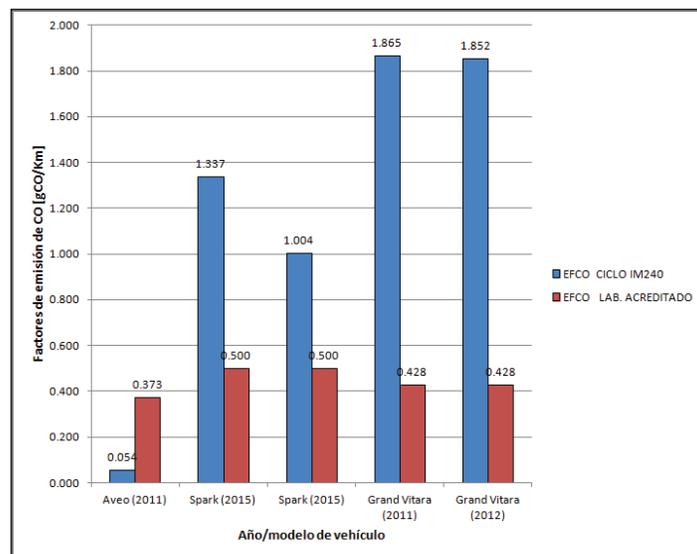
Tabla 4.12 Comparación entre Factores de emisión de HC y laboratorio acreditado RDW.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{HC} [gHC/Km]	
					CICLO IM240	LAB. ACREDITADO
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.094	0.051
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.057	0.060
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.063	0.060
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.070	0.048
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.182	0.048

Tabla 4.13 Comparación entre Factores de emisión de NO_x y laboratorio acreditado RDW.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{NOx} [gNOx/Km]	
					CICLO IM240	LAB. ACREDITADO
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.303	0.080
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.029	0.020
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.043	0.020
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.336	0.085
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.190	0.085

En las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se indican las comparaciones entre factores de emisión del CO, HC y NO_x, con los del laboratorio acreditado RDW, respectivamente.

**Figura 4.12** Comparación entre factores de emisión del CO, con los del laboratorio acreditado RDW.

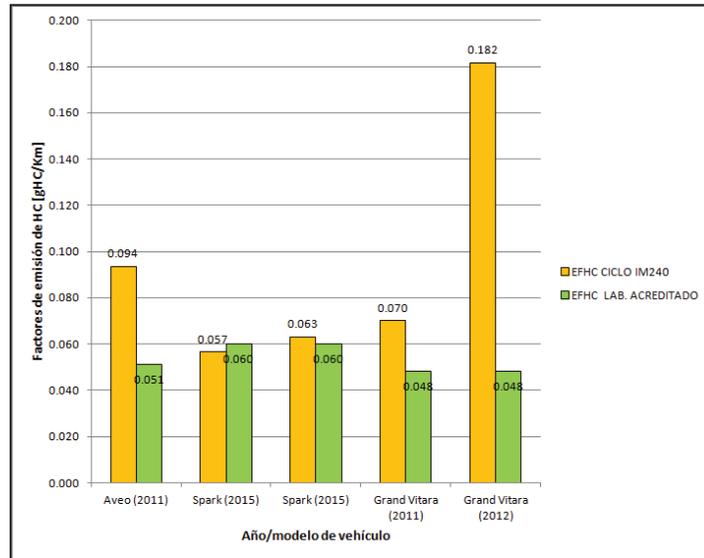


Figura 4.13 Comparación entre factores de emisión del HC, con los del laboratorio acreditado RDW.

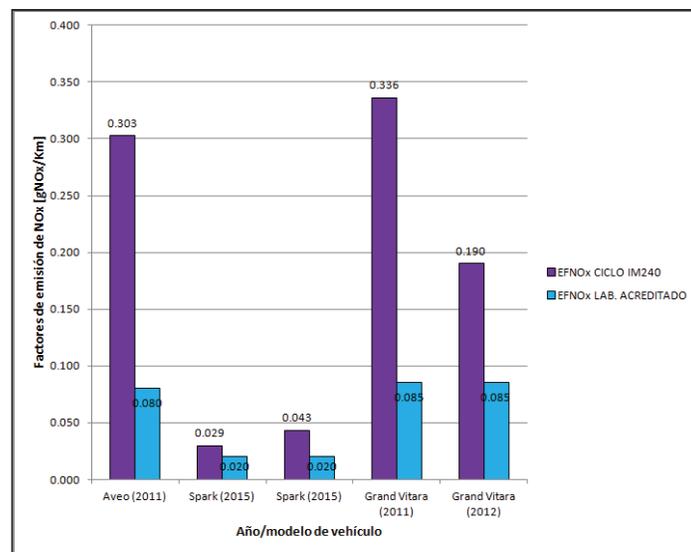


Figura 4.14 Comparación entre factores de emisión del NO_x, con los del laboratorio acreditado RDW.

Al comparar las figuras 4.12, 4.13 y 4.14, se tienen los siguientes análisis entre los factores de emisión obtenidos con el ciclo IM240 y el laboratorio acreditado CRW, haciendo referencia que son condiciones diferentes de comparación, pero al final se obtiene valores representativos del comportamiento de los vehículos.

- Los factores de emisión del CO con ciclo IM240 son mayores que los del laboratorio CRW, con excepción del vehículo Chevrolet Aveo 2011.
- Los factores de emisión del HC con ciclo IM240 son mayores que los del laboratorio CRW, con excepción del vehículo Chevrolet Spark 2015.
- Los factores de emisión del NO_x con ciclo IM240 son mayores que los del laboratorio CRW.
- El análisis comparativo de los factores de emisión vehicular se realizan entre dos ciclos diferentes de conducción, que son el IM 240 y el Europeo ECE-15+ EUDC del laboratorio acreditado CRW.

4.2 RESULTADOS DE PRUEBAS CON CICLO ON BOARD

4.2.1 EMISIONES DE GASES DINÁMICOS

Los valores promedio obtenidos al realizar las pruebas de emisiones de gases dinámicos con ciclo on board, se indican en la tabla 4.14, según el protocolo de pruebas del numeral 3.7.3 citado en el capítulo 3. Los valores de estas pruebas de gases se encuentran en el anexo 1.

Tabla 4.14 Valores promedios de pruebas de emisiones de gases dinámicas con ciclo on board.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	CO [%Vol]	HC [ppm]	NO _x [ppm]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.047	29.658	181.454
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.065	32.797	44.807
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.187	43.220	37.081
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.163	40.705	41.807
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.174	33.449	27.483

A continuación se realiza un análisis de las gráficas de concentraciones de gases de CO, HC y NO_x, para el vehículo de ítem 1, como ejemplo de muestra y el análisis de los demás vehículos se detallan en el anexo 2.

4.2.1.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura 4.15 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 1.

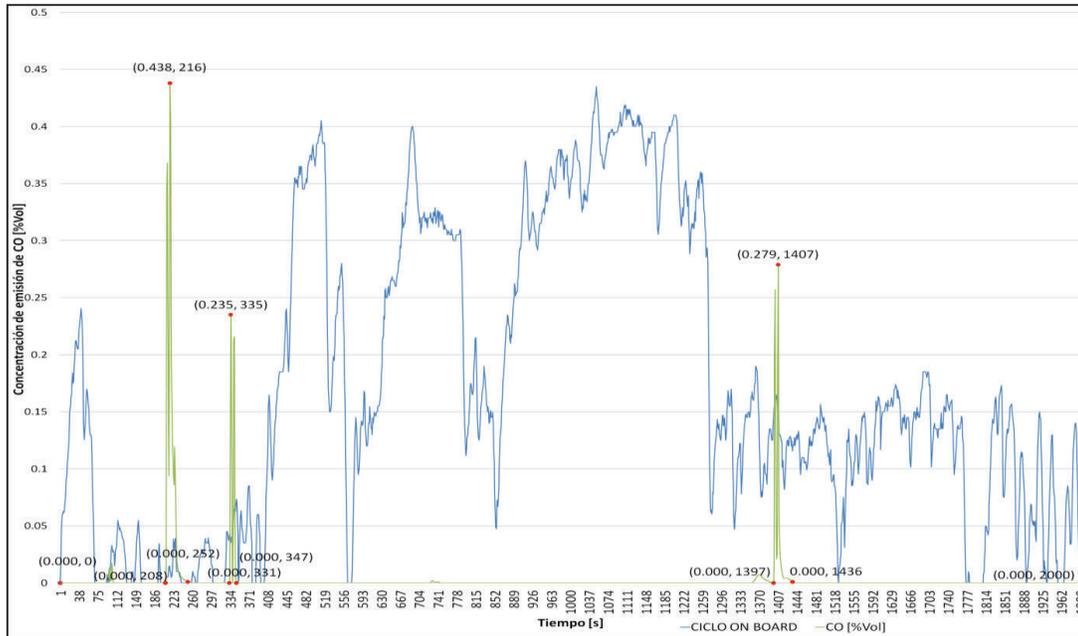


Figura 4.15 Gráfica de concentraciones de CO con ciclo on board, del vehículo de ítem 1.

El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 208$	$V_0 = 0 ; V_{208} = 1$	Constante=0
2	$208 \leq t < 216$	$V_{208} = 1 ; V_{216} = 2,1$	Incremento de 0 a 0,438
3	$216 \leq t < 252$	$V_{216} = 2,1 ; V_{252} = 0$	Decremento 0,438 a 0
4	$252 \leq t < 331$	$V_{252} = 0 ; V_{331} = 7,4$	Constante=0
5	$331 \leq t < 335$	$V_{331} = 7,4 ; V_{335} = 7,1$	Incremento de 0 a 0,235
6	$335 \leq t < 347$	$V_{335} = 7,1 ; V_{347} = 14,2$	Decremento 0,235 a 0
7	$347 \leq t < 1397$	$V_{347} = 14,2 ; V_{1397} = 27,2$	Constante=0
8	$1397 \leq t < 1407$	$V_{1397} = 27,2 ; V_{1407} = 28,2$	Incremento de 0 a 0,279
9	$1407 \leq t < 1436$	$V_{1407} = 28,2 ; V_{1436} = 24$	Decremento 0,279 a 0
10	$1436 \leq t < 2000$	$V_{1436} = 24 ; V_{2000} = 0$	Constante=0

4.2.1.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura 4.16 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 1.

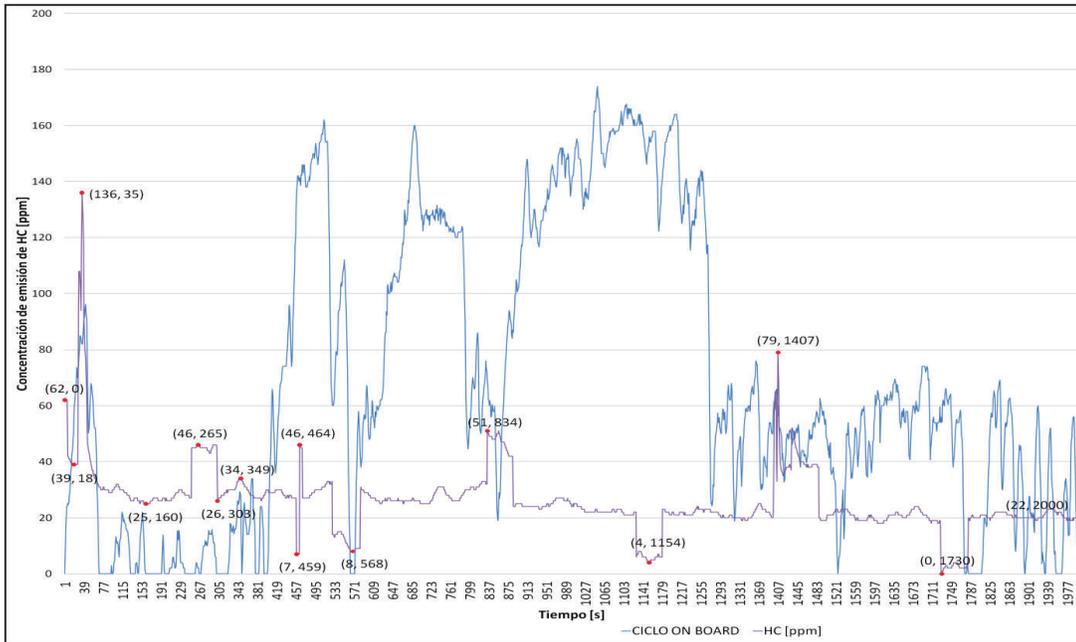


Figura 4.16 Gráfica de concentración de HC con ciclo on board del vehículo de ítem 1.

El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla 4.16.

Tabla 4.16 Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 18$	$V_0 = 0 ; V_{18} = 25,1$	Decremento de 62 a 39
2	$18 \leq t < 35$	$V_{18} = 25,1 ; V_{35} = 41$	Incremento de 39 a 136
3	$35 \leq t < 160$	$V_{35} = 41 ; V_{160} = 0$	Decremento 136 a 25
4	$160 \leq t < 265$	$V_{160} = 0 ; V_{265} = 1$	Incremento 25 a 46
5	$265 \leq t < 303$	$V_{265} = 1 ; V_{303} = 0$	Decremento de 46 a 26
6	$303 \leq t < 349$	$V_{303} = 0 ; V_{349} = 8$	Incremento 26 a 34
7	$349 \leq t < 459$	$V_{349} = 8 ; V_{459} = 69,5$	Decremento de 34 a 7
8	$459 \leq t < 464$	$V_{459} = 69,5 ; V_{464} = 70,7$	Incremento 7 a 46
9	$464 \leq t < 568$	$V_{464} = 70,7 ; V_{568} = 0$	Decremento de 46 a 8
10	$568 \leq t < 834$	$V_{568} = 0 ; V_{834} = 34,5$	Incremento 8 a 51
11	$834 \leq t < 1154$	$V_{834} = 34,5 ; V_{1154} = 77,9$	Decremento de 51 a 4
12	$1154 \leq t < 1407$	$V_{1154} = 77,9 ; V_{1407} = 28,2$	Incremento 4 a 79
13	$1407 \leq t < 1730$	$V_{1407} = 28,2 ; V_{1730} = 27,1$	Decremento de 79 a 0
14	$1730 \leq t < 2000$	$V_{1730} = 27,1 ; V_{2000} = 0$	Incremento 0 a 22

4.2.1.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura 4.17 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 1.

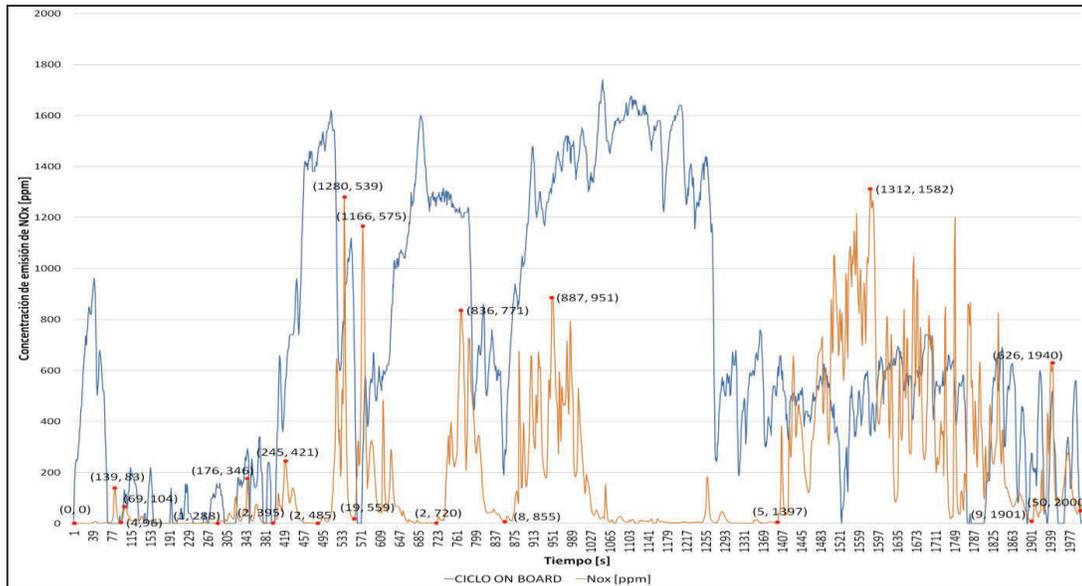


Figura 4.17 Gráfica de concentración de NO_x con ciclo on board del vehículo de ítem 1.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Comportamiento de concentración de NO_x en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NO _x [ppm]
1	$0 \leq t < 83$	$V_0 = 0 ; V_{83} = 0$	Incremento de 0 a 139
2	$83 \leq t < 96$	$V_{83} = 0 ; V_{96} = 0$	Decremento 139 a 4
3	$96 \leq t < 104$	$V_{96} = 0 ; V_{104} = 5,4$	Incremento de 4 a 69
4	$104 \leq t < 288$	$V_{104} = 5,4 ; V_{288} = 7$	Decremento de 69 a 1
5	$288 \leq t < 346$	$V_{288} = 7 ; V_{346} = 14,7$	Incremento de 1 a 176
6	$346 \leq t < 395$	$V_{346} = 14,7 ; V_{395} = 0$	Decremento de 176 a 2
7	$395 \leq t < 421$	$V_{395} = 0 ; V_{421} = 27,1$	Incremento de 2 a 245
8	$421 \leq t < 485$	$V_{421} = 27,1 ; V_{485} = 71,7$	Decremento de 245 a 2
9	$485 \leq t < 539$	$V_{485} = 71,7 ; V_{539} = 41,6$	Incremento de 2 a 1280
10	$539 \leq t < 559$	$V_{539} = 41,6 ; V_{559} = 30,2$	Decremento de 1280 a 19
11	$559 \leq t < 575$	$V_{559} = 30,2 ; V_{575} = 13$	Incremento de 19 a 1166
12	$575 \leq t < 720$	$V_{575} = 13 ; V_{720} = 62,2$	Decremento de 1166 a 2

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
13	$720 \leq t < 771$	$V_{720} = 62,2 ; V_{771} = 60$	Incremento de 2 a 836
14	$771 \leq t < 855$	$V_{771} = 60 ; V_{855} = 9,5$	Decremento de 836 a 8
15	$855 \leq t < 951$	$V_{855} = 9,5 ; V_{951} = 66,7$	Incremento de 8 a 887
16	$951 \leq t < 1397$	$V_{951} = 66,7 ; V_{1397} = 27,2$	Decremento de 887 a 5
17	$1397 \leq t < 1582$	$V_{1397} = 27,2 ; V_{1582} = 17,6$	Incremento de 5 a 1312
18	$1582 \leq t < 1901$	$V_{1582} = 17,6 ; V_{1901} = 12,4$	Decremento de 1312 a 9
19	$1901 \leq t < 1940$	$V_{1901} = 12,4 ; V_{1940} = 18,7$	Incremento de 9 a 626
20	$1940 \leq t < 2000$	$V_{1940} = 18,7 ; V_{2000} = 0$	Decremento de 626 a 50

4.2.1.4 Análisis de resultados de las concentraciones de emisiones de CO, HC y NO_x en el ciclo on board

En las figuras 4.18 y 4.19 se muestran los tiempos de duración durante el ciclo on board, de las diferentes relaciones de disminución y aumento de concentración de gases de CO, HC y NO_x.

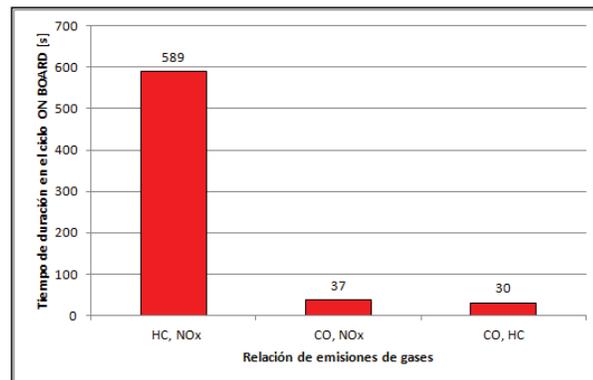


Figura 4.18 Tiempos de duración durante el ciclo on board, de las relaciones de disminución de concentración de gases.

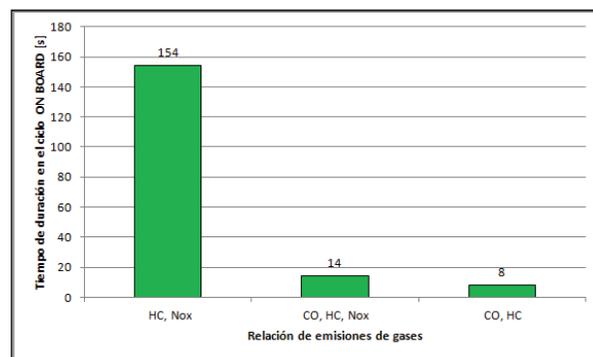


Figura 4.19 Tiempos de duración durante el ciclo on board, de las relaciones de aumento de concentración de gases.

En las tablas 4.18 y 4.19 se indican las participaciones en porcentaje, de las relaciones de emisiones de gases respecto al tiempo de duración total promedio de la prueba en el ciclo on board (2000 segundos).

Tabla 4.18 Participación de la disminución de concentración de emisiones de gases en el ciclo on board del vehículo de ítem 1.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
HC, NO _x	29.5
CO, NO _x	1.9
CO, HC	1.5

Tabla 4.19 Participación del aumento de concentración de emisiones de gases en el ciclo on board del vehículo de ítem 1.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
HC, NO _x	7.7
CO, HC , NO _x	0.7
CO, HC	0.4

El análisis de resultados de las concentraciones de emisiones de gases dinámicos en el ciclo on board , son los siguientes:

- La relación de HC y NO_x, con respecto a la disminución en sus concentraciones, tiene la mayor participación en el ciclo on board con el 29,5%.
- La relación de HC y NO_x, con respecto al aumento en sus concentraciones, tiene la segunda participación en el ciclo on board con apenas el 7,7%.
- Y las restantes relaciones de emisiones de gases, tienen participaciones menores al 1,9%, lo cual implica que tengan una baja intervención en el ciclo on board.

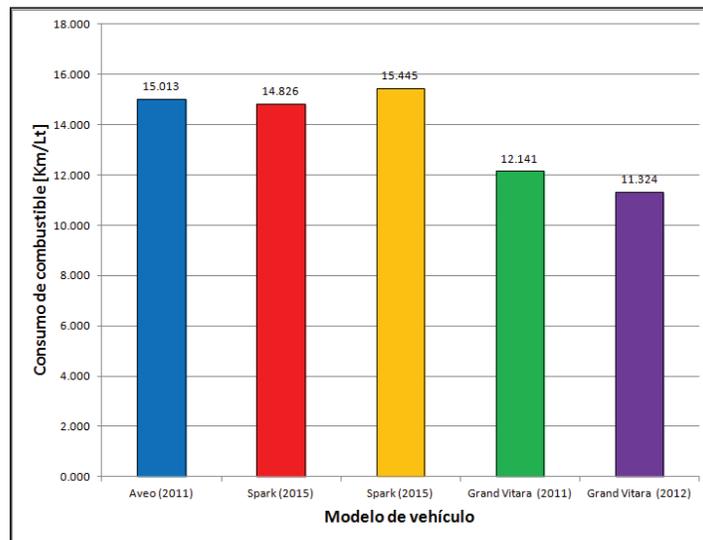
4.2.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Los valores promedios de las pruebas de consumo de combustible se indican en la tabla 4.20. Los valores de estas pruebas se encuentran en el anexo 3.

Tabla 4.20 Valores promedios de pruebas de consumo de combustible en el ciclo on board.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	CONSUMO DE COMBUSTIBLE [Km/l]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	15.013
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	14.826
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	15.445
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	12.141
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	11.324

En la figura 4.20 se muestran los consumos de combustible por año/modelo de vehículo.

**Figura 4.20** Resultado de pruebas de consumo de combustible por modelo/año de vehículo.

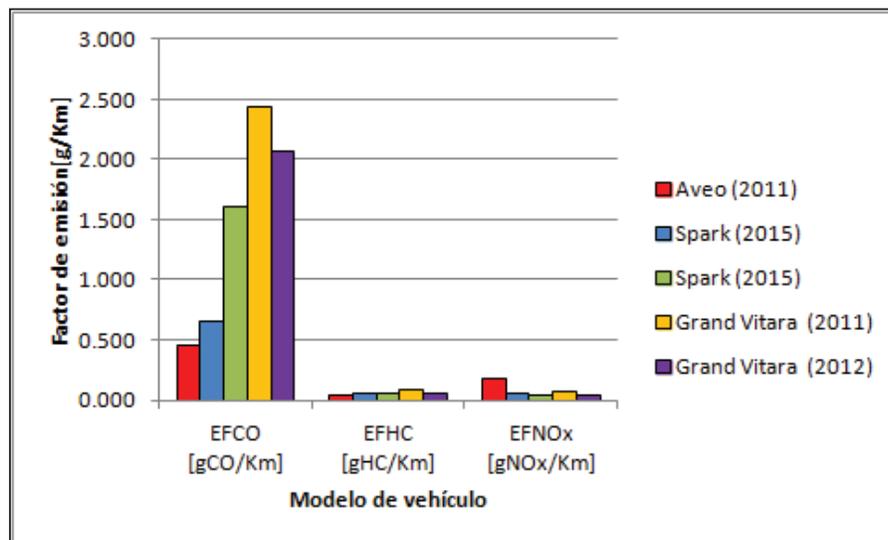
4.2.3 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR

Los cálculos de los factores de emisión vehicular se realizan del mismo procedimiento del numeral 4.1.3, citado anteriormente. Los resultados de los factores de emisión del CO, HC y NO_x de la muestra de los cinco vehículos de prueba al utilizar el ciclo on board, se indican en la tabla 4.21.

Tabla 4.21 Factores de emisión del CO, HC y NO_x al utilizar el ciclo on board.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{CO} [gCO/Km]	EF _{HC} [gHC/Km]	EF _{NO_x} [gNO _x /Km]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.447	0.042	0.184
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.648	0.049	0.048
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	1.600	0.055	0.034
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	2.431	0.091	0.067
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	2.067	0.060	0.035

En la figura 4.21 se observan los factores de emisión con respecto al año/modelo de los vehículos de muestra.

**Figura 4.21** Resultado de factores de emisión por año/modelo de vehículo con ciclo on board.

4.2.3.1 Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo on board y los límites máximos permitidos según NTE INEN 2204

En las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se indican las comparaciones entre los resultados de los factores de emisión de CO, HC y NO_x al utilizar el ciclo on board, y los límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de gasolina, según NTE INEN 2204.

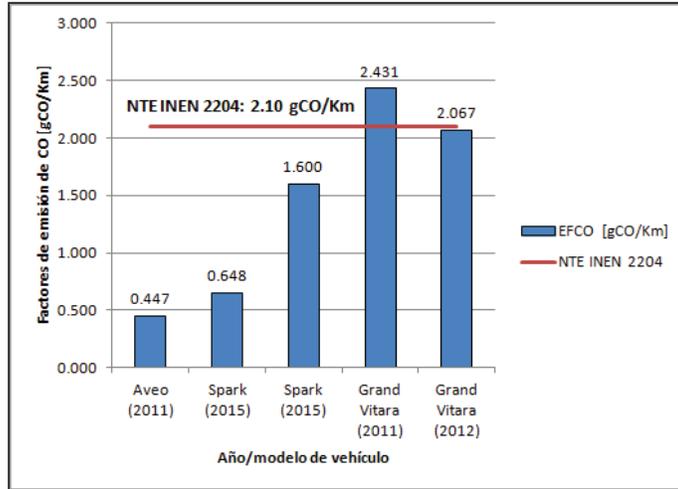


Figura 4.22 Comparación entre resultados de factores de emisión de CO y NTE INEN 2204.

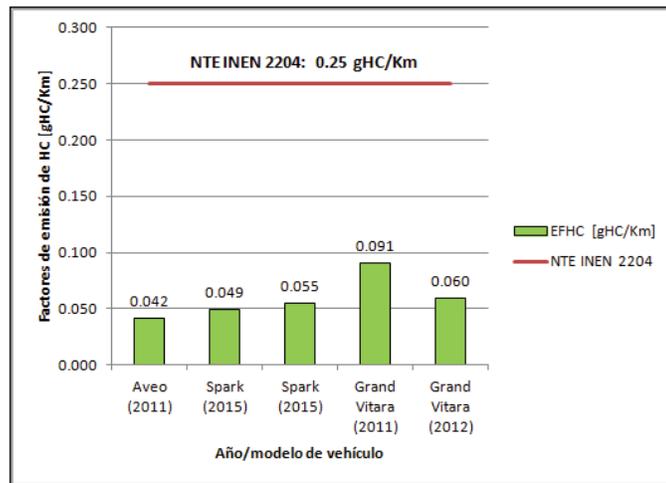


Figura 4.23 Comparación entre resultados de factores de emisión de HC y NTE INEN 2204.

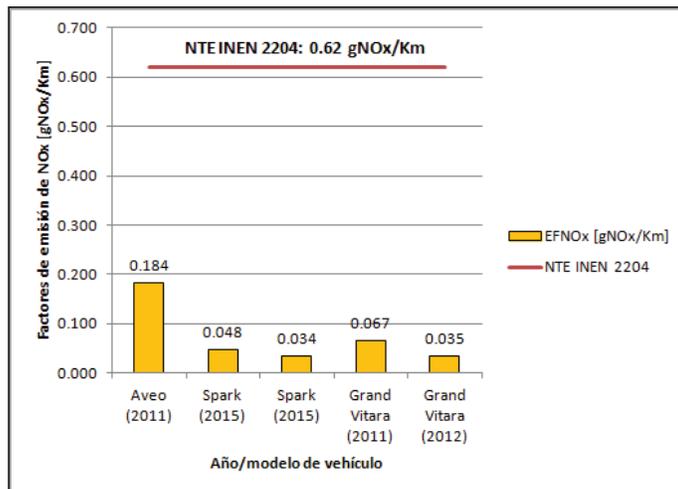


Figura 4.24 Comparación entre resultados de factores de emisión de NO_x y NTE INEN 2204.

Al analizar las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se puede obtener lo siguiente:

- Los factores de emisión vehicular del CO, HC y NO_x, obtenidos con el ciclo on board y comparados con los factores de la NTE INEN 2204, que hace referencia al ciclo FTP 75 y para vehículos con tecnología EURO II, se aprecia que los valores del ciclo on board son menores a los límites de la norma, con excepción del factor de emisión de CO del vehículo Chevrolet Grand Vitara 2011.

4.2.3.2 Análisis comparativo entre los factores de emisión vehicular obtenidos con el ciclo on board y resultados con pruebas de laboratorio acreditado

En la tabla 4.22 se indica los resultados de pruebas de factores de emisión de CO, HC y NO_x, realizadas en el laboratorio acreditado "RDW Vehicle Technology Division", de los siguientes vehículos que se detallan a continuación.

Tabla 4.22 Factores de emisión del CO, HC y NO_x del laboratorio acreditado RDW⁷³.

MARCA	MODELO	AÑO	EF _{CO} [gCO/Km]	EF _{HC} [gHC/Km]	EF _{NOx} [gNOx/Km]
Chevrolet	Aveo	2015	0.373	0.051	0.080
Chevrolet	Spark	2015	0.500	0.060	0.020
Chevrolet	Grand Vitara	2015	0.428	0.048	0.085

En las tablas 4.23, 4.24 y 4.25, se muestran las comparaciones entre los factores de emisión de CO, HC y NO_x, obtenidos en pruebas con ciclo on board y laboratorio acreditado RDW.

Tabla 4.23 Comparación entre Factores de emisión de CO y laboratorio acreditado RDW.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{CO} [gCO/Km]	
					CICLO ON BOARD	LAB. ACREDITADO
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.447	0.373
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.648	0.500
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	1.600	0.500
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	2.431	0.428
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	2.067	0.428

⁷³ RDW, Vehicle Technology Division, Nederland, 2015

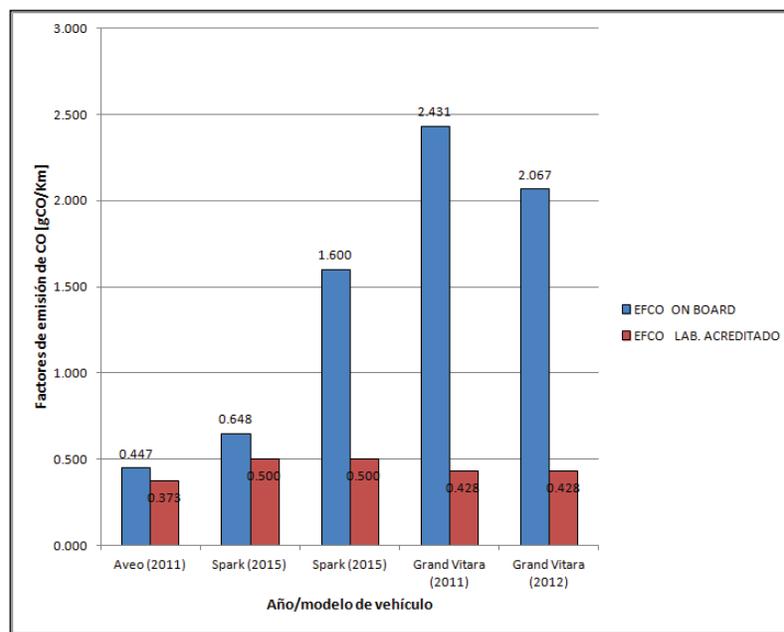
Tabla 4.24 Comparación entre Factores de emisión de HC y laboratorio acreditado RDW.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{HC} [gHC/Km]	
					CICLO ON BOARD	LAB. ACREDITADO
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.042	0.051
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.049	0.060
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.055	0.060
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.091	0.048
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.060	0.048

Tabla 4.25 Comparación entre Factores de emisión de NO_x y laboratorio acreditado RDW.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{NO_x} [gNO _x /Km]	
					CICLO ON BOARD	LAB. ACREDITADO
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.184	0.080
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.048	0.020
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	0.034	0.020
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.067	0.085
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.035	0.085

En las figuras 4.25, 4.26 y 4.27 se indican las comparaciones entre factores de emisión del CO, HC y NO_x, con los del laboratorio acreditado RDW, respectivamente.

**Figura 4.25** Comparación entre factores de emisión del CO, con los del laboratorio acreditado RDW.

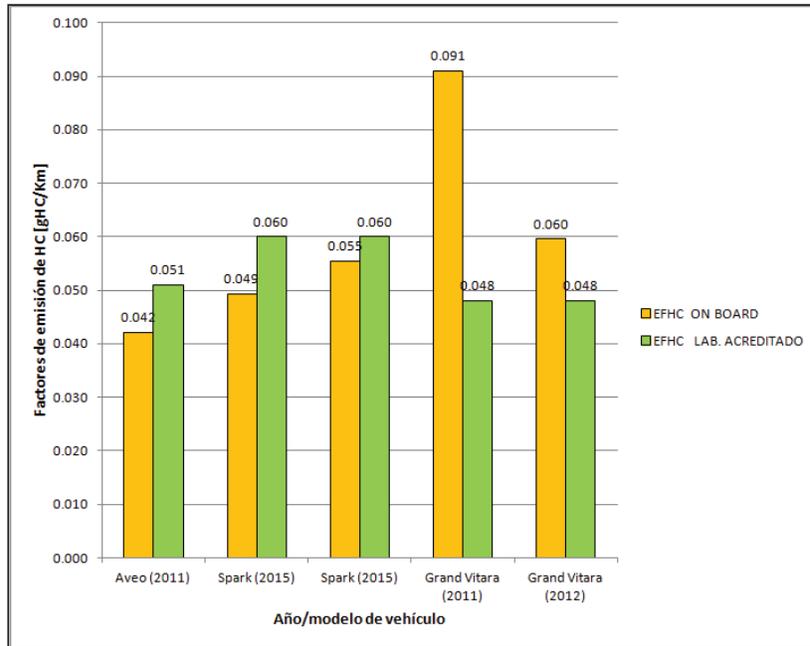


Figura 4.26 Comparación entre factores de emisión del HC, con los del laboratorio acreditado RDW.

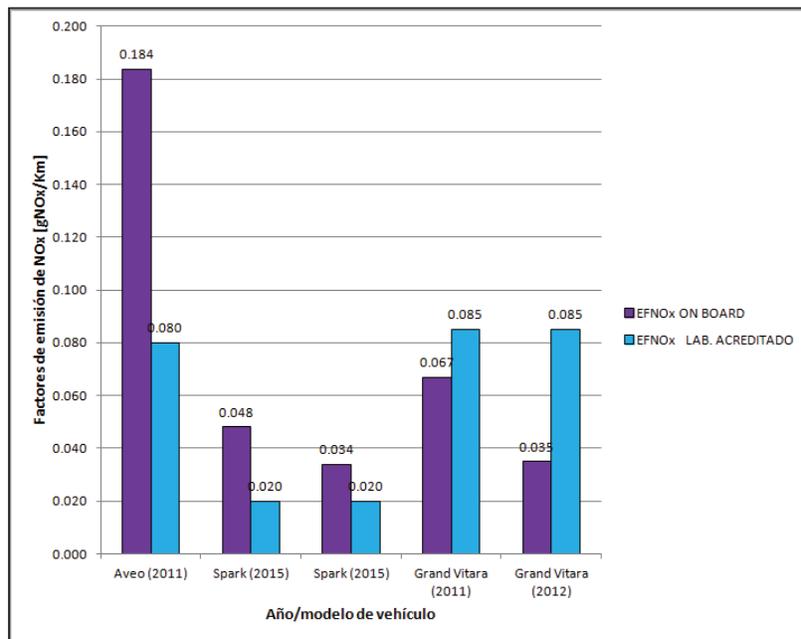


Figura 4.27 Comparación entre factores de emisión del NO_x, con los del laboratorio acreditado RDW.

Al analizar las figuras 4.25, 4.26 y 4.27, se tiene lo siguiente, entre los factores de emisión obtenidos con el ciclo on board y el laboratorio acreditado CRW, haciendo referencia que son condiciones diferentes de comparación, pero al final obtenemos valores representativos del comportamiento de los vehículos.

- Los factores de emisión del CO con ciclo on board son mayores que los del laboratorio CRW.
- Los factores de emisión del HC con ciclo on board son menores que los del laboratorio CRW, con excepción de los vehículos Chevrolet Grand Vitara 2011 y 2012.
- Los factores de emisión del NO_x con ciclo on board son mayores que los del laboratorio CRW, con excepción de los vehículos Chevrolet Grand Vitara 2011 y 2012.
- El análisis comparativo de los factores de emisión vehicular se realizan entre dos ciclos diferentes de conducción, que son el ciclo on board y el Europeo ECE-15+ EUDC del laboratorio acreditado CRW.

4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR CON CICLOS DE CONDUCCIÓN IM240 Y ON BOARD

La metodología de comparación, se basa en cuantificar el grado de correlación lineal que existe entre los factores de emisión de CO, HC y NO_x, de estos dos ciclos de conducción IM240 y on board, e identificar qué tipo de correlación tienen entre las variables de análisis, y al no existir una correlación lineal, se debe calcular los factores de corrección para que sea posible la comparación entre estos factores. En las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se muestran las comparaciones entre los factores de emisión de CO, HC y NO_x, con los ciclos de conducción IM240 y on board.

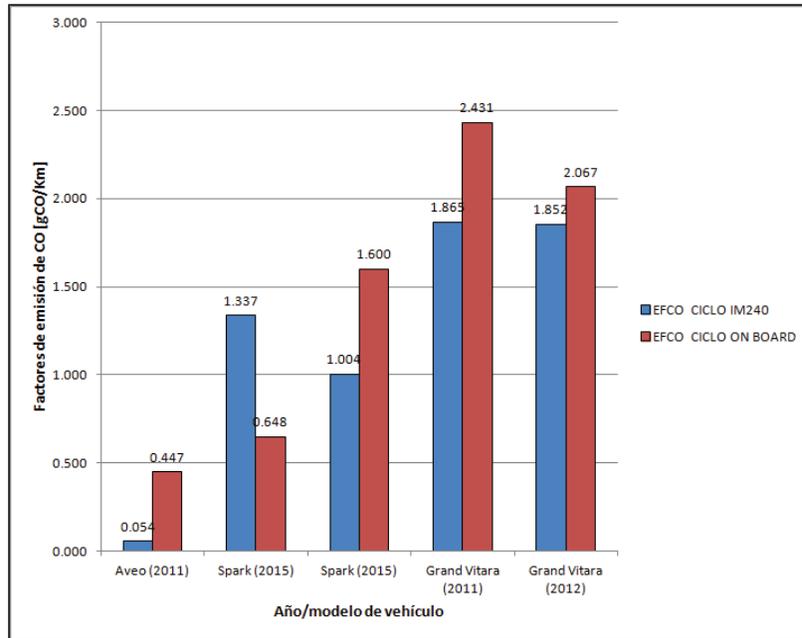


Figura 4.28 Comparación entre factores de emisión de CO, con los ciclos de conducción IM240 y on board.

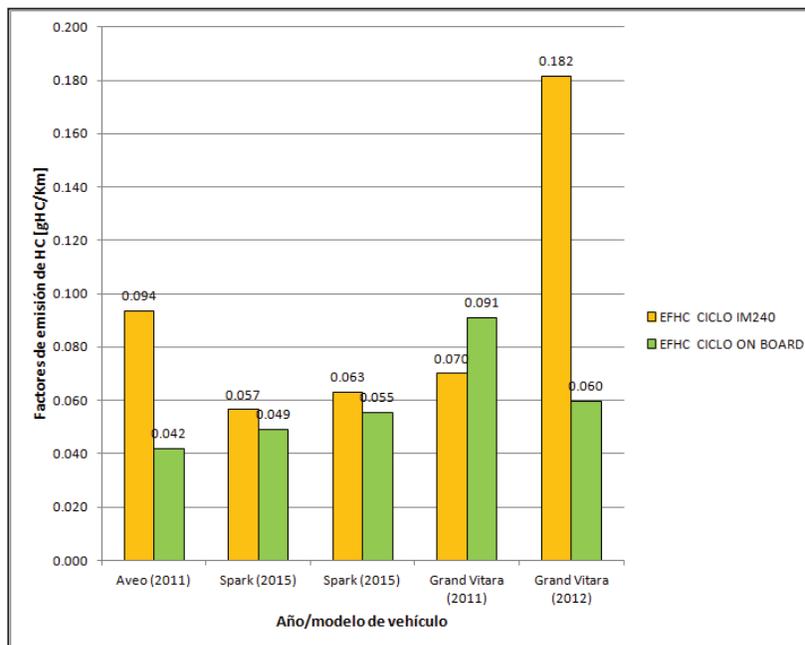


Figura 4.29 Comparación entre factores de emisión de HC, con los ciclos de conducción IM240 y on board.

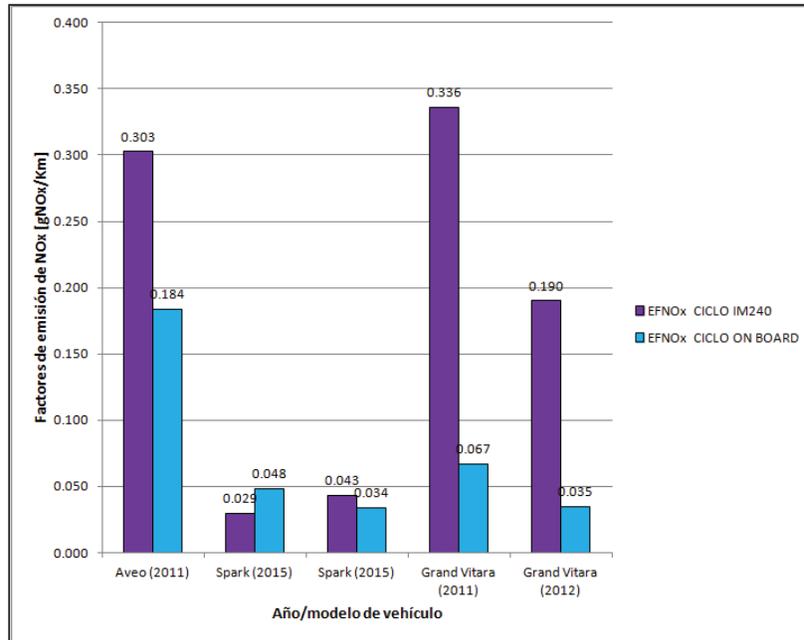


Figura 4.30 Comparación entre factores de emisión de NO_x, con los ciclos de conducción IM240 y on board.

Al analizar las figuras 4.28, 4.29 y 4.30, se obtiene lo siguiente:

- Los factores de emisión de CO con ciclo on board son mayores que los del ciclo IM 240, con excepción del vehículo Chevrolet Spark 2015.
- Los factores de emisión de HC con ciclo IM 240 son mayores que los del ciclo on board, con excepción del vehículo Chevrolet Grand Vitara 2011.
- Los factores de emisión de NO_x con ciclo IM 240 son mayores que los del ciclo on board, con excepción del vehículo Chevrolet Spark 2015.

4.3.1 FACTORES DE CORRELACIÓN LINEAL⁷⁴

El término correlación se usa para describir la relación entre los datos de dos muestras y se clasifica en: correlación lineal positiva, correlación lineal negativa, variables no correlacionadas y correlación no lineal, como se muestra en la figura 4.31.

⁷⁴ RODRIGUEZ, LUIS; Probabilidad y estadística básica para ingenieros; Escuela Superior Politécnica del Litoral; Guayaquil; 2007.

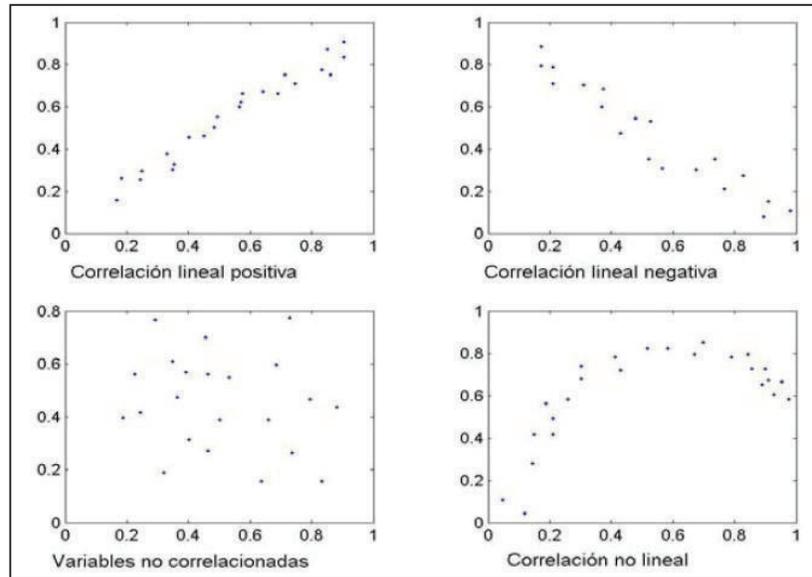


Figura 4.31 Tipos de correlación entre dos variables⁷⁵.

El factor de correlación lineal sirve para cuantificar el grado de correlación lineal entre las variables, a continuación se establecen las siguientes ecuaciones:

- Medias aritméticas muestrales

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{Ec. (4.1)}$$

- Varianzas muestrales

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad S_Y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad \text{Ec. (4.2)}$$

- Covarianza muestral

$$S_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad \text{Ec. (4.3)}$$

- Factor de correlación lineal

$$r = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y}, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad \text{Ec. (4.4)}$$

⁷⁵ RODRIGUEZ, LUIS; Probabilidad y estadística básica para ingenieros; Escuela Superior Politécnica del Litoral; Guayaquil; 2007.

Dónde:

- X, Y: Variables muestrales
- n: Tamaño de la muestra
- \bar{X}, \bar{Y} : Media aritmética de X y Y, respectivamente
- S_x, S_y : Desviaciones estándar muestrales
- S_{xy} : Covarianza muestral
- r: Factor de correlación lineal

El factor de correlación lineal tiene las siguientes características que se indican a continuación:

- Si r está cercano a uno, entonces X y Y tienen correlación lineal positiva fuerte.
- Si r está cercano a menos uno, entonces X y Y tienen correlación lineal negativa fuerte.
- Si r está cercano a cero, entonces X y Y no están correlacionadas linealmente, o es muy débil.

4.3.2. CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CORRELACIÓN LINEAL

Los resultados obtenidos de los factores de emisión vehicular de las tablas 4.9 y 4.21 de los ciclos IM240 y on board, respectivamente, se deben utilizar para obtener los coeficientes de correlación lineal de CO, HC y NO_x mediante el empleo de la ecuación 4.4. A continuación se muestra como un ejemplo de cálculo el factor de correlación lineal del HC.

Sean:

- X: Factores de emisión vehicular del HC con ciclo IM240
X = 0,094; 0,057; 0,063; 0,070; 0,182
- Y: Factores de emisión vehicular del HC con ciclo on board
Y = 0,042; 0,049; 0,055; 0,091; 0,060
- n = 5

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{5} (0,094 + 0,057 + 0,063 + 0,070 + 0,182) = 0,093$$

$$\begin{aligned} S_X^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ &= \frac{1}{4} [(0,094 - 0,093)^2 + (0,057 - 0,093)^2 + (0,063 - 0,093)^2 \\ &\quad + (0,070 - 0,093)^2 + (0,182 - 0,093)^2] = 0,003 \end{aligned}$$

$$S_X = \sqrt{S_X^2} = \sqrt{0,003} = 0,052$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{1}{5} (0,042 + 0,049 + 0,055 + 0,091 + 0,060) = 0,059$$

$$\begin{aligned} S_Y^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \\ &= \frac{1}{4} [(0,042 - 0,059)^2 + (0,049 - 0,059)^2 + (0,055 - 0,059)^2 \\ &\quad + (0,091 - 0,059)^2 + (0,060 - 0,059)^2] = 0,0004 \end{aligned}$$

$$S_Y = \sqrt{S_Y^2} = \sqrt{0,0004} = 0,019$$

$$S_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

$$\begin{aligned} S_{XY} &= \frac{1}{4} [(0,094 - 0,093)(0,042 - 0,059) + (0,057 - 0,093)(0,049 - 0,059) \\ &\quad + (0,063 - 0,093)(0,055 - 0,059) + (0,070 - 0,093)(0,091 - 0,059) \\ &\quad + (0,182 - 0,093)(0,060 - 0,059)] = -0,00004645 \end{aligned}$$

$$r_{CO} = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y} = \frac{-0,00004645}{(0,052)(0,019)}$$

$$r_{CO} = -0,1 \quad \text{Factor de correlación del HC}$$

En la tabla 4.26 se indica el resultado del factor de correlación del CO, para la muestra de datos con ciclos IM240 y on board.

Tabla 4.26 Factor de correlación del CO.

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{CO} [gCO/Km] IM240 (X)	EF _{CO} [gCO/Km] ON BOARD (Y)	FACTOR DE CORRELACIÓN (r _{CO})
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.054	0.447	0,8
Chevrolet	Spark	2015	1000	1.337	0.648	
Chevrolet	Spark	2015	1000	1.004	1.600	
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	1.865	2.431	
Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	1.852	2.067	

En la figura 4.32 se indica el diagrama de dispersión entre los factores de emisión del CO con ciclos IM240 y on board, donde se observa una tendencia lineal con pendiente positiva.

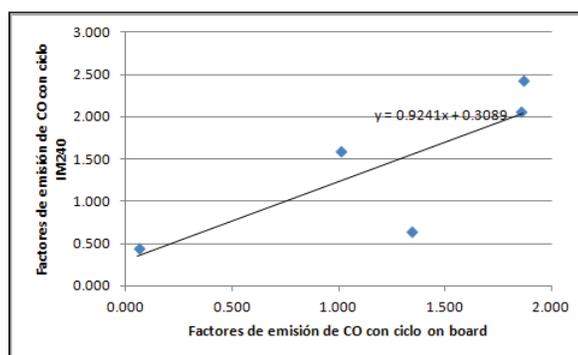


Figura 4.32 Diagrama de dispersión del CO.

En la tabla 4.27 se indica el resultado del factor de correlación del HC, para la muestra de datos con ciclos IM240 y on board.

Tabla 4.27 Factor de correlación del HC.

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{HC} [gHC/Km] IM240 (X)	EF _{HC} [gHC/Km] ON BOARD (Y)	FACTOR DE CORRELACIÓN (r _{HC})
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.094	0.042	- 0.1
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.057	0.049	
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.063	0.055	
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.070	0.091	
Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.182	0.060	

En la figura 4.33 se indica el diagrama de dispersión entre los factores de emisión del HC con ciclos IM240 y on board, donde se observa que no existe una correlación lineal.

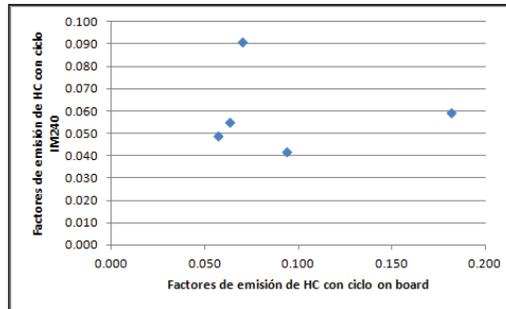


Figura 4.33 Diagrama de dispersión del HC.

En las tablas 4.28 se indica el resultado del factor de correlación del NO_x, para la muestra de datos con ciclos IM240 y on board.

Tabla 4.28 Factor de correlación del NO_x.

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{NOx} [gNO _x /Km] IM240 (X)	EF _{NOx} [gNO _x /Km] ON BOARD (Y)	FACTOR DE CORRELACIÓN (r _{NOx})
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.303	0.184	0,6
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.029	0.048	
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.043	0.034	
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.336	0.067	
Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	0.190	0.035	

En la figura 4.34 se indica el diagrama de dispersión entre los factores de emisión del NO_x con ciclos IM240 y on board, donde se observa una tendencia lineal con pendiente positiva.

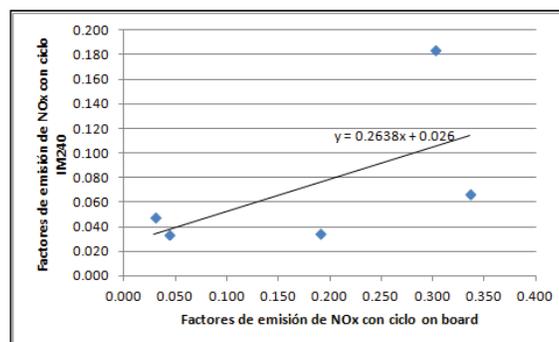


Figura 4.34 Diagrama de dispersión del NO_x.

De los resultados obtenidos de las tablas 4.26, 4.27 y 4.28 se obtiene lo siguiente:

- Los factores de correlación del CO y NO_x son positivos y están casi cercanos a uno, por lo tanto tienen una correlación lineal positiva moderada.
- El factor de correlación del HC es negativo y está cercano a cero, entonces no está correlacionado linealmente.
- La diferencia porcentual entre factores de emisión de CO con ciclos de conducción IM240 y on board es del 106%, correspondiente al vehículo de ítem 2 (Chevrolet Spark 2015); por lo tanto, no se debe incluir en el análisis del factor de correlación del CO, para evitar una variación de resultados.
- Las diferencias porcentuales entre los factores de emisión de HC con ciclos de conducción IM240 y on board son del 123% y 205%, correspondientes a los vehículos de ítem 1 (Chevrolet Aveo 2011) e ítem 5 (Chevrolet Grand Vitara 2012), respectivamente; por lo cual, no se deben incluir en el análisis del factor de correlación del HC, para evitar una variación de resultados.
- Las diferencias porcentuales entre los factores de emisión de NO_x con ciclos de conducción IM240 y on board son del 403% y 443%, correspondientes a los vehículos de ítem 4 (Chevrolet Grand Vitara 2011) e ítem 5 (Chevrolet Grand Vitara 2012), respectivamente; por lo tanto, no se deben incluir en el análisis del factor de correlación del NO_x, para evitar una variación de resultados.

4.3.3. CORRECCIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR CON CICLOS DE CONDUCCIÓN IM 240 Y ON BOARD

Para realizar la corrección de los factores de emisión vehicular al utilizar estos dos tipos de ciclos de conducción, se deben calcular las variaciones entre los factores de emisión de los dos ciclos, con CO, HC y NO_x, los cuales serán los factores de corrección (ΔX), como se indican a continuación:

$$EF_{CO(\text{Corregido})} = EF_{CO(\text{Calculado})} + \Delta X_{EF_{CO}} \quad \text{Ec. (4.5)}$$

$$EF_{HC(\text{Corregido})} = EF_{HC(\text{Calculado})} + \Delta X_{EF_{HC}} \quad \text{Ec. (4.6)}$$

$$EF_{NO_x(\text{Corregido})} = EF_{NO_x(\text{Calculado})} + \Delta X_{EFNO_x} \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Dónde:

- EF_{CO, HC, NO_x} (Corregido): Factores de emisión del CO, HC y NO_x corregidos
- EF_{CO, HC, NO_x} (Calculado): Factores de emisión del CO, HC y NO_x calculados
- $\Delta X_{EF_{CO, HC, NO_x}}$: Diferencia entre factores de emisión de CO, HC y NO_x de los ciclos IM 240 y on board ($\Delta X_{EF} = EF_{ON BOARD} - EF_{IM 240}$)

En las tablas 4.29, 4.30 y 4.31, se muestran los valores promedio de las diferencias entre los factores de emisión del CO, HC y NO_x de los ciclos IM 240 y on board; respectivamente.

Tabla 4.29 Valor promedio de diferencia entre factores de emisión de CO con ciclos IM 240 y on board.

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EFCO [gCO/Km]		ΔX_{EFCO}
				CICLO IM240	CICLO ON BOARD	
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.054	0.447	0.393
Chevrolet	Spark	2015	1000	1.004	1.600	0.596
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	1.865	2.431	0.565
Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	1.852	2.067	0.215
VALOR PROMEDIO ΔX_{EFCO}						0.442

Tabla 4.30 Valor promedio de diferencia entre factores de emisión de HC con ciclos IM 240 y on board.

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EFHC [gHC/Km]		ΔX_{EFHC}
				CICLO IM240	CICLO ON BOARD	
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.057	0.049	0.007
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.063	0.055	0.008
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.070	0.091	0.021
VALOR PROMEDIO ΔX_{EFHC}						0.012

Tabla 4.31 Valor promedio de diferencia entre factores de emisión de NO_x con ciclos IM 240 y on board.

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EFNO _x [gNO _x /Km]		ΔX_{EFNO_x}
				CICLO IM240	CICLO ON BOARD	
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.303	0.184	0.119
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.029	0.048	0.019
Chevrolet	Spark	2016	1000	0.043	0.034	0.009
VALOR PROMEDIO ΔX_{EFNO_x}						0.049

En las tablas 4.32, 4.33 y 4.34 se indican los factores de correlación del CO, HC y NO_x, respectivamente, calculados a través de los factores de emisión vehicular corregidos con ciclo IM240.

Tabla 4.32 Factor de correlación del CO (Corregido).

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{CO} (Corregido) [gCO/Km]		FACTOR DE CORRELACIÓN (r _{co})
				CICLO IM240	CICLO ON BOARD	
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.496	0.447	0.979
Chevrolet	Spark	2015	1000	1.446	1.600	
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	2.308	2.431	
Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	2.295	2.067	

Tabla 4.33 Factor de correlación del HC (Corregido).

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{HC} (Corregido) [gHC/Km]		FACTOR DE CORRELACIÓN (r _{HC})
				CICLO IM240	CICLO ON BOARD	
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.069	0.049	0.930
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.075	0.055	
Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	0.082	0.091	

Tabla 4.34 Factor de correlación del NO_x (Corregido).

MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	EF _{NOx} (Corregido) [gHC/Km]		FACTOR DE CORRELACIÓN (r _{NOx})
				CICLO IM240	CICLO ON BOARD	
Chevrolet	Aveo	2011	1600	0.351	0.184	0.992
Chevrolet	Spark	2015	1000	0.078	0.048	
Chevrolet	Spark	2016	1000	0.092	0.034	

En las figuras 4.35, 4.36 y 4.37 se muestran los diagramas de dispersión entre los factores de emisión del CO, HC y NO_x (corregidos) con ciclo IM240 y los factores de emisión (sin corregir) con ciclo on board.

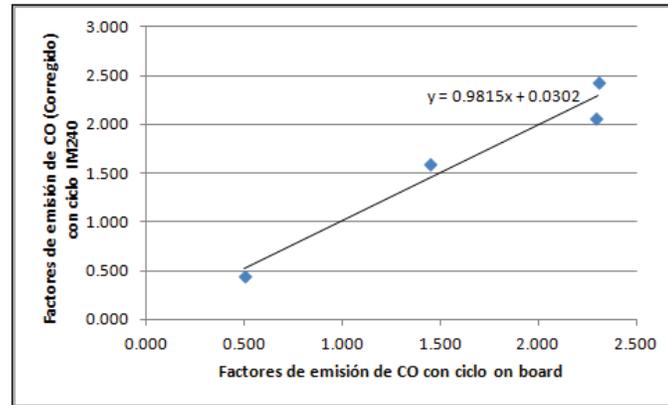


Figura 4.35 Diagrama de dispersión del CO (Corregido).

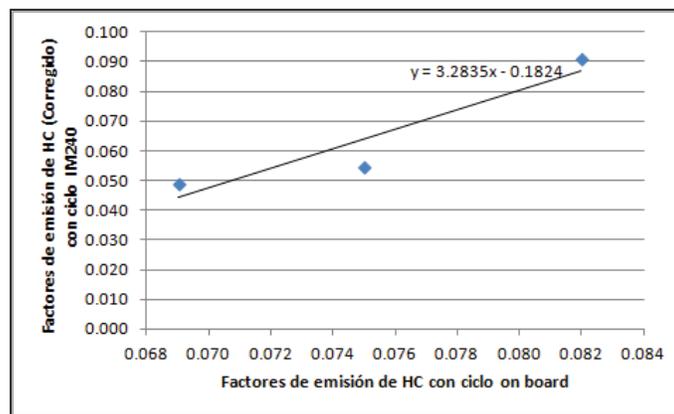


Figura 4.36 Diagrama de dispersión del HC (Corregido).

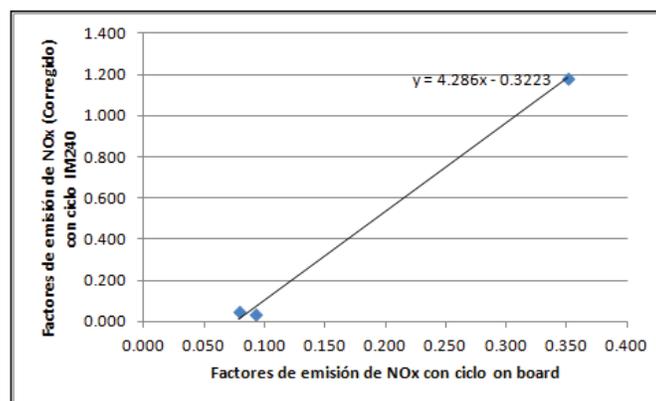


Figura 4.37 Diagrama de dispersión del NO_x (Corregido).

Por lo tanto, mediante el análisis de las tablas 4.29 hasta la 4.34, se tiene lo siguiente:

- Para obtener los factores de emisión del CO (EF_{CO}) con ciclo on board, se deben sumar a los factores de emisión del CO obtenidos con el ciclo IM240 en las pruebas de laboratorio, el valor de 0,442 que es el factor de corrección promedio del CO ($\Delta X_{EF_{CO}}$), calculado en la tabla 4.29; y de esta forma se consigue una correlación lineal positiva fuerte de 0.979.
- Para adquirir los factores de emisión del HC (EF_{HC}) con ciclo on board, se deben sumar a los factores de emisión del HC obtenidos con el ciclo IM240 en las pruebas de laboratorio, el valor de 0,012 que es el factor de corrección promedio del HC ($\Delta X_{EF_{HC}}$), calculado en la tabla 4.30; y de esta manera tener una correlación lineal positiva fuerte de 0.930.
- Para conseguir los factores de emisión del NO_x (EF_{NO_x}) al utilizar el ciclo on board, se deben sumar a los factores de emisión del NO_x obtenidos con el ciclo IM240 en las pruebas de laboratorio, el valor de 0,049 que es el factor de corrección promedio del NO_x ($\Delta X_{EF_{NO_x}}$), calculado en la tabla 4.31; y de este modo obtener una correlación lineal positiva fuerte de 0.992.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los ciclos utilizados para esta experimentación son: el IM240, que representa una parte del ciclo de conducción FTP75 de los Estados Unidos, que se lo reproduce en el Laboratorio a través de un dinamómetro LPS300; y el on board que es un ciclo mixto de ruta en ciudad y carretera. Ambos ciclos se realizaron en el Distrito Metropolitano de Quito.
- Para realizar este estudio se elaboró protocolos de prueba con los ciclos IM240 y on board, obteniendo como resultados diferencias marcadas entre los factores de emisión de estos dos tipos de ciclos de conducción, consiguiendo como resultado, que los factores de emisión del CO con ciclo on board son mayores que los del ciclo IM 240 y los factores de emisión del HC y NO_x con ciclo IM240 son mayores que los del ciclo on board.
- El propósito de esta investigación se ha cumplido, ya que se puede determinar los factores de emisión de CO, HC y NO_x en un ciclo de conducción mixto, realizando pruebas de Laboratorio mediante un ciclo IM240.
- Los factores de ajuste obtenidos para CO, HC y NO_x son 0,442, 0,012 y 0,049, respectivamente.
- Este estudio demostró ser estadísticamente reproducible y tener una alta confiabilidad del 95% de las mediciones tomadas en cada procedimiento; por lo tanto, los resultados obtenidos en esta experimentación son fiables.
- Los factores de emisión obtenidos mediante el ciclo IM240, se podrían utilizar en el cálculo del inventario de emisiones, con valores de factores de emisión más reales.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para mejorar el resultado de los factores de corrección, se sugiere realizar una mayor cantidad de pruebas, y aumentar la muestra de vehículos, los mismos que deben ser seleccionados de acuerdo a la mayor representatividad del parque automotor nacional.
- Para conseguir una buena repetitividad y reproducibilidad en las pruebas realizadas con los ciclos IM240 y on board, se recomiendan seguir los protocolos desarrollados en este estudio.
- Al efectuar las pruebas con el ciclo on board, se debe conducir los vehículos de muestra con el mismo conductor y a la misma hora, para disminuir las variaciones de manejo en cada prueba.
- Utilizar equipos de medición que se encuentran calibrados, para evitar variaciones de resultados en las pruebas efectuadas.
- Se recomienda difundir este método a las autoridades ambientales, con el propósito de obtener factores de emisión más cercanos a la realidad, y de esta manera elaborar el inventario de emisiones.

5.3 BIBLIOGRAFÍA

- Mecánica de motores, (2015). Consultado de: <http://www.ro-des.com/mecanica/motores-gasolina/>
- Termodinámica segundo principio, Luis Gómez (2011). Consultado de: <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/ asignaturas/fisica/termo2p/otto.ht>
- Termodinámica de los gases, (2014). Consultado de: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=2775>
- Motor a explosión cuatro tiempos, (2011). Consultado de: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/14157889/Motor-a-explosion-cuatro-tiempos-ciclo-Otto-4-T.html>
- F. PAYRI, Motores de combustión interna alternativos, España, 2011.

- CAIZA P., PORTILLA A.; Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto de inyección electrónica de gasolina, EPN, 2010.
- ALBAN, E., LOPEZ, J.; Desarrollo y validación de un método para determinación de factores de emisión vehicular mediante pruebas a bordo en la ciudad de Quito, EPN, 2010.
- Gases de Escape y Sistemas Anticontaminación 1er Parte, 2012. Consultado de: <http://www.taringa.net/post/autos-motos/16136191/Gases-de-Escape-y-Sistemas-Anticontaminacion-1er-Parte.html>
- Sistemas de encendido electrónico, (2013). Consultado de: <http://es.slideshare.net/celinpadilla/sistema-de-encendido-electrnico-de-efecto-hall>
- Sensor de oxígeno, (2012). Consultado de: <http://www.fuilmecanica.com/definiciones/s/960-sensor-de-oxigeno-o-sonda-lambda>
- Sistemas de inyección, (2014). Consultado de: <http://www.sistemampfidaniel.blogspot.com/p/introduccion.html>, 2015
- Sistema electrónico, (2014). Consultado de: <http://www.padminivna.com/electronics.html>
- Manual de servicio Ford, 1994. Diagnóstico de Control del Tren de Fuerza y de las Emisiones. EE: UU, 1993.
- Sistemas de inyección, (2013). Consultado de: http://www.aficionadosaamecanica.net/inyeccion_directa2.htm
- TORRES L, URVINA H; Determinación de los factores reales de emisión de los motores ciclo Otto en la ciudad de Quito; EPN; Quito; 2008.
- Clean Air Institute; Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano; Washington; 2013.
- FREY H., EICHENBERGER D; Remote sensing of mobile source air pollutant emissions, North Carolina State University; June 1997.
- Emisiones vehiculares, (2014). Consultado de: <http://www.elcomercio.com/deportes/carburando-autos-automoviles-emisiones-europa.html>
- Jon Bickel, Revisión técnica de vehículos-límites máximos permisibles de emisiones, 2001, Lima-Perú.

- Equipos MAHA, 2015. Consultado de: http://www.maha.de/cps/rde/xbcr/SID-D30930BA-D6B8C15B/maha/BRO_MAHA_alle_LPS_ES.pdf
- Robert Bosch, Manual de la técnica del automóvil, 2005, Alemania.
- Julián Soriano, Límites máximos permisibles para vehículos nuevos y usados, importados o fabricados para circular en el Perú, 2001, Lima-Perú.
- BADI M., GUILLEN A.; Nociones introductorias de muestreo estadístico; International Journal; México; Junio 2011.
- RODRIGUEZ, LUIS; Probabilidad y estadística básica para ingenieros; Escuela Superior Politécnica del Litoral; Guayaquil; 2007.
- CARDENAS E., KASLIN J.; Caracterización tecnológica del parque automotor del DMQ y propuesta para la reforma de la normativa ecuatoriana de emisiones en fuentes móviles terrestres; EPN; Quito; 2006.
- Distribución normalizada, (2014). Consultado de: <http://www.netquiest.com/blog/es/que-tamano-de-muestra-necesito/>
- ARRIAZA, MANUEL; Guía práctica de análisis de datos; Córdova, 2006.
- BADI M., GUILLEN A.; Nociones introductorias de muestreo estadístico; International Journal; México; Junio 2011.
- Manual del usuario MAHA equipo LPS 3000, Alemania, 2003.
- Manual de servicio MAHA analizado de gases MGT5, Alemania, 2003.
- Google maps, (2016). Consultado de: <https://www.google.com.ec/maps/dir>
- Manual del usuario, analizador de gases on board, Estados Unidos, 2016.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma NTE - INEN 935.
- RDW, Vehicle Technology Division, Nederland, 2015.

ANEXOS

ANEXO A 1: VALORES DE PRUEBAS DE EMISIONES DE GASES DINÁMICOS

ANEXO A1.1: CICLO IM240

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	CO ₂ [%Vol]	CO [%Vol]	HC [ppm]	O ₂ [%Vol]	NO _x [ppm]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	13.276	0.007	56.017	0.468	305.321
					13.246	0.004	51.879	0.431	210.142
					13.163	0.002	36.196	0.423	136.058
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	13.607	0.114	27.513	0.052	38.529
					13.700	0.066	22.571	0.002	15.542
					13.673	0.118	33.908	0.028	7.033
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	13.657	0.025	34.208	0.086	26.379
					13.665	0.115	28.829	0.008	40.054
					13.625	0.081	29.775	0.019	22.092
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	13.490	0.097	38.263	0.367	277.958
					13.481	0.115	19.188	0.413	182.471
					13.347	0.118	24.946	0.327	92.788
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	13.434	0.146	89.454	0.316	86.817
					13.382	0.103	63.563	0.356	66.988
					13.338	0.063	50.500	0.436	144.204

ANEXO A1.2: CICLO ON BOARD

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]	CO ₂ [%Vol]	CO [%Vol]	HC [ppm]	O ₂ [%Vol]	NO _x [ppm]
1	Chevrolet	Aveo	2011	1600	11.061	0.009	30.160	3.974	164.699
					10.026	0.036	27.901	5.425	170.183
					9.822	0.097	30.913	5.651	209.480
2	Chevrolet	Spark	2015	1000	8.597	0.062	35.493	6.963	48.816
					9.291	0.062	30.830	5.909	36.786
					11.602	0.071	32.069	2.549	48.820
3	Chevrolet	Spark	2015	1000	10.933	0.081	39.569	3.835	53.874
					10.956	0.251	49.144	3.880	38.150
					10.936	0.230	40.949	3.991	19.218
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000	13.490	0.097	38.263	0.367	277.958
					13.481	0.115	19.188	0.413	182.471
					13.347	0.118	24.946	0.327	92.788
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000	9.366	0.147	38.166	6.282	19.136
					11.327	0.198	37.054	3.195	33.568
					11.553	0.177	25.128	2.912	29.744

ANEXO A 2: RESULTADOS DE PRUEBAS

ANEXO 2.1: CICLO IM240

2.1.1 EMISIONES DE GASES DINÁMICOS

A continuación se realiza un análisis de las gráficas de concentraciones de gases de CO, HC y NO_x, para los siguientes vehículos de muestra que se indican en la tabla A2.1.

Tabla A2.1 Vehículos de muestra.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]
2	Chevrolet	Spark	2015	1000
3	Chevrolet	Spark	2015	1000
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000

2.1.1.1 Vehículo de ítem 2

2.1.1.1.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.1 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo.

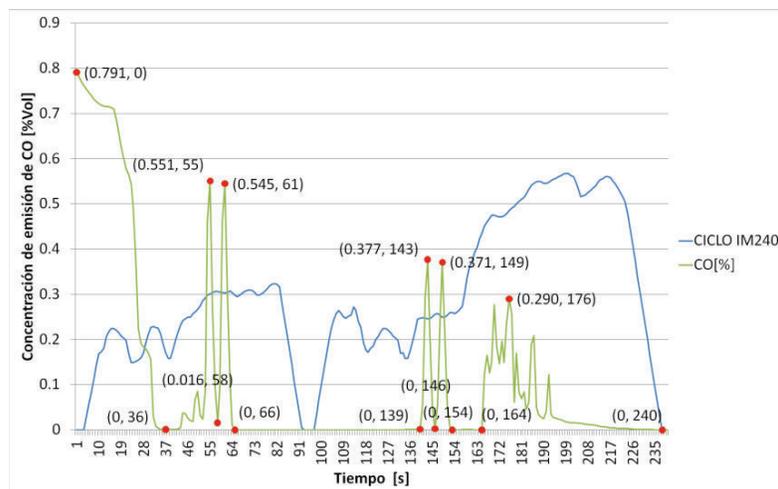


Figura A2.1. Gráfica de concentración de CO con ciclo IM240, del vehículo de ítem 2.

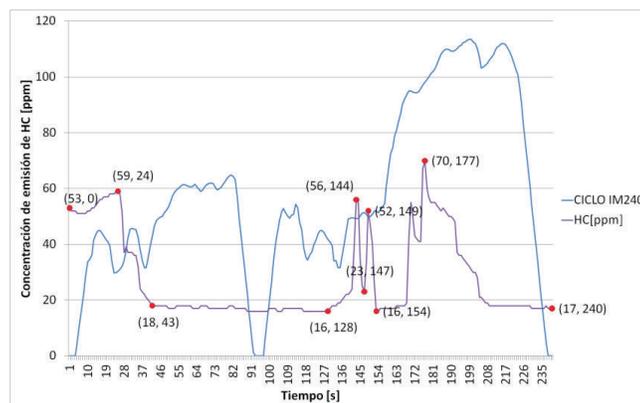
El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.2.

Tabla A2.2. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 36$	$V_0 = 0 ; V_{36} = 19$	Decremento 0,791 a 0
2	$36 \leq t < 55$	$V_{36} = 19 ; V_{55} = 30.1$	Incremento de 0 a 0,551
3	$55 \leq t < 58$	$V_{55} = 30.1 ; V_{58} = 30.7$	Decremento 0,551 a 0,016
4	$58 \leq t < 61$	$V_{58} = 30.7 ; V_{61} = 30.3$	Incremento de 0,016 a 0,545
5	$61 \leq t < 66$	$V_{61} = 30.3 ; V_{66} = 29.5$	Decremento 0,545 a 0
6	$66 \leq t < 139$	$V_{66} = 29.5 ; V_{139} = 22.2$	Constante=0
7	$139 \leq t < 143$	$V_{139} = 22.2 ; V_{143} = 24.7$	Incremento de 0 a 0,377
8	$143 \leq t < 146$	$V_{143} = 24.7 ; V_{146} = 25.1$	Decremento 0,377 a 0
9	$146 \leq t < 149$	$V_{146} = 25.1 ; V_{149} = 25,4$	Incremento de 0 a 0,371
10	$149 \leq t < 154$	$V_{149} = 25.4 ; V_{154} = 26$	Decremento 0,371 a 0
11	$154 \leq t < 164$	$V_{154} = 26 ; V_{164} = 40.5$	Constante=0
12	$164 \leq t < 176$	$V_{164} = 40.5 ; V_{176} = 47.9$	Incremento de 0 a 0,290
13	$176 \leq t < 240$	$V_{176} = 47.9 ; V_{240} = 0$	Decremento 0,290 a 0

2.1.1.1.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.2 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 2.

**Figura A2.2.** Gráfica de concentración de HC con ciclo IM240, del vehículo de ítem 2.

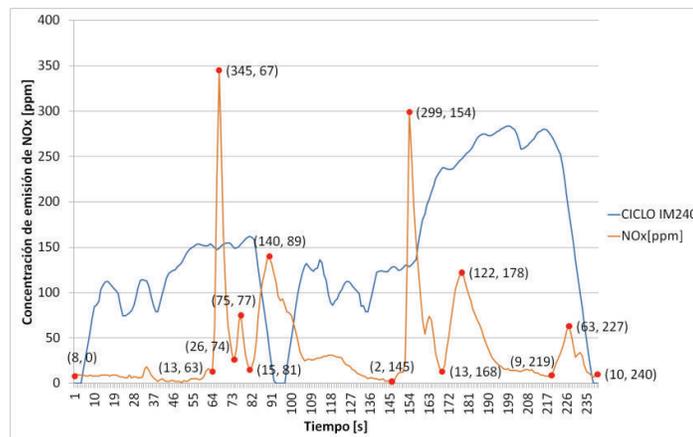
El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.3.

Tabla A2.3. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 24$	$V_0 = 0 ; V_{24} = 14,9$	Incremento de 53 a 59
2	$24 \leq t < 43$	$V_{24} = 14,9 ; V_{43} = 23,2$	Decremento de 59 a 18
3	$43 \leq t < 128$	$V_{43} = 23,2 ; V_{128} = 21,5$	Decremento de 18 a 16
4	$128 \leq t < 144$	$V_{128} = 21,5 ; V_{144} = 24,6$	Incremento de 16 a 56
5	$144 \leq t < 147$	$V_{144} = 24,6 ; V_{147} = 25,6$	Decremento de 56 a 23
6	$147 \leq t < 149$	$V_{147} = 25,6 ; V_{149} = 25,4$	Incremento de 23 a 52
7	$149 \leq t < 154$	$V_{149} = 25,4 ; V_{154} = 26$	Decremento de 52 a 16
8	$154 \leq t < 177$	$V_{154} = 26 ; V_{177} = 48,5$	Incremento de 16 a 70
9	$177 \leq t < 240$	$V_{177} = 48,5 ; V_{240} = 0$	Decremento de 70 a 17

2.1.1.1.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.3 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 2.

**Figura A2.3.** Gráfica de concentración de NO_x con ciclo IM240, del vehículo de ítem 2.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.4.

Tabla A2.4. Comportamiento de concentración de NOx en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
1	$0 \leq t < 63$	$V_0 = 0 ; V_{63} = 30,8$	Incremento de 8 a 13
2	$63 \leq t < 67$	$V_{63} = 30,8 ; V_{67} = 29,8$	Incremento de 13 a 345
3	$67 \leq t < 74$	$V_{67} = 29,8 ; V_{74} = 29,8$	Decremento de 345 a 26
4	$74 \leq t < 77$	$V_{74} = 29,8 ; V_{77} = 30,7$	Incremento de 26 a 75
5	$77 \leq t < 81$	$V_{77} = 30,7 ; V_{81} = 32,4$	Decremento de 75 a 15
6	$81 \leq t < 89$	$V_{81} = 32,4 ; V_{89} = 11,1$	Incremento de 15 a 140
7	$89 \leq t < 145$	$V_{89} = 11,1 ; V_{145} = 24,6$	Decremento de 140 a 2
8	$145 \leq t < 154$	$V_{145} = 24,6 ; V_{154} = 26$	Incremento de 2 a 299
9	$154 \leq t < 168$	$V_{154} = 26 ; V_{168} = 46$	Decremento de 299 a 13
10	$168 \leq t < 178$	$V_{168} = 46 ; V_{178} = 49,1$	Incremento de 13 a 122
11	$178 \leq t < 219$	$V_{178} = 49,1 ; V_{219} = 55,2$	Decremento de 122 a 9
12	$219 \leq t < 227$	$V_{219} = 55,2 ; V_{227} = 41$	Incremento de 9 a 63
13	$227 \leq t < 240$	$V_{227} = 41 ; V_{240} = 0$	Decremento de 63 a 10

2.1.1.2 Vehículo de ítem 3

2.1.1.2.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.4 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo.

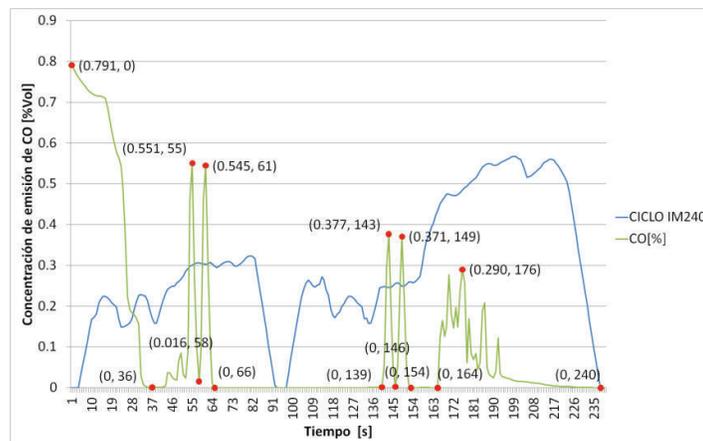


Figura A2.4. Gráfica de concentración de CO con ciclo IM240, del vehículo de ítem 3.

El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.5.

Tabla A2.5. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 36$	$V_0 = 0 ; V_{36} = 19$	Decremento 0,791 a 0
2	$36 \leq t < 55$	$V_{36} = 19 ; V_{55} = 30.1$	Incremento de 0 a 0,551
3	$55 \leq t < 58$	$V_{55} = 30.1 ; V_{58} = 30.7$	Decremento 0,551 a 0,016
4	$58 \leq t < 61$	$V_{58} = 30.7 ; V_{61} = 30.3$	Incremento de 0,016 a 0,545
5	$61 \leq t < 66$	$V_{61} = 30.3 ; V_{66} = 29.5$	Decremento 0,545 a 0
6	$66 \leq t < 139$	$V_{66} = 29.5 ; V_{139} = 22.2$	Constante=0
7	$139 \leq t < 143$	$V_{139} = 22.2 ; V_{143} = 24.7$	Incremento de 0 a 0,377
8	$143 \leq t < 146$	$V_{143} = 24.7 ; V_{146} = 25.1$	Decremento 0,377 a 0
9	$146 \leq t < 149$	$V_{146} = 25.1 ; V_{149} = 25,4$	Incremento de 0 a 0,371
10	$149 \leq t < 154$	$V_{149} = 25.4 ; V_{154} = 26$	Decremento 0,371 a 0
11	$154 \leq t < 164$	$V_{154} = 26 ; V_{164} = 40.5$	Constante=0
12	$164 \leq t < 176$	$V_{164} = 40.5 ; V_{176} = 47.9$	Incremento de 0 a 0,290
13	$176 \leq t < 240$	$V_{176} = 47.9 ; V_{240} = 0$	Decremento 0,290 a 0

2.1.1.2.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.5 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 3.

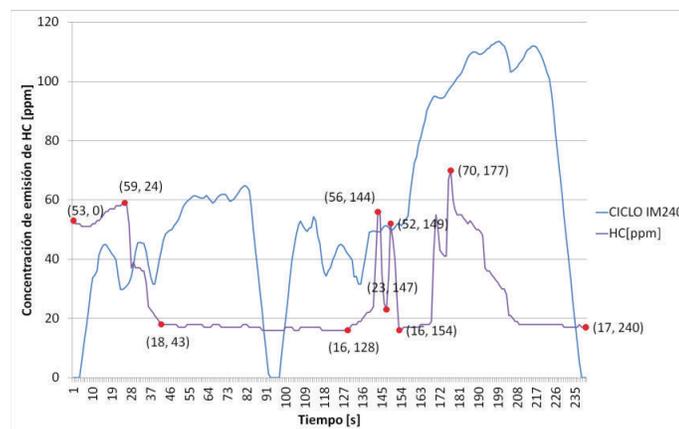


Figura A2.5. Gráfica de concentración de HC con ciclo IM240, del vehículo de ítem 3.

El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.6.

Tabla A2.6. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 24$	$V_0 = 0 ; V_{24} = 14,9$	Incremento de 53 a 59
2	$24 \leq t < 43$	$V_{24} = 14,9 ; V_{43} = 23,2$	Decremento de 59 a 18
3	$43 \leq t < 128$	$V_{43} = 23,2 ; V_{128} = 21,5$	Decremento de 18 a 16
4	$128 \leq t < 144$	$V_{128} = 21,5 ; V_{144} = 24,6$	Incremento de 16 a 56
5	$144 \leq t < 147$	$V_{144} = 24,6 ; V_{147} = 25,6$	Decremento de 56 a 23
6	$147 \leq t < 149$	$V_{147} = 25,6 ; V_{149} = 25,4$	Incremento de 23 a 52
7	$149 \leq t < 154$	$V_{149} = 25,4 ; V_{154} = 26$	Decremento de 52 a 16
8	$154 \leq t < 177$	$V_{154} = 26 ; V_{177} = 48,5$	Incremento de 16 a 70
9	$177 \leq t < 240$	$V_{177} = 48,5 ; V_{240} = 0$	Decremento de 70 a 17

2.1.1.2.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.6 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 3.

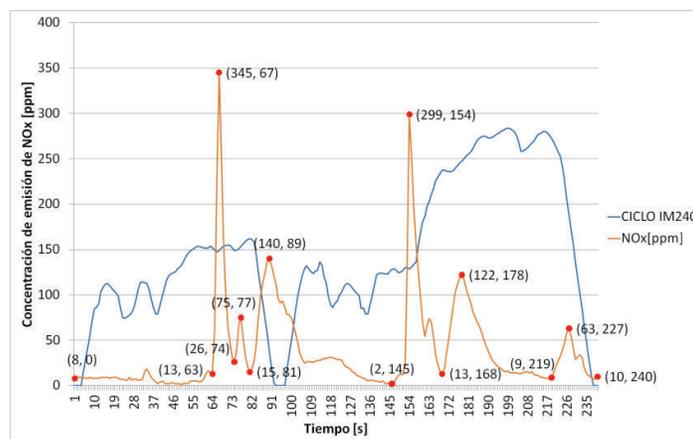


Figura A2.6. Gráfica de concentración de NO_x con ciclo IM240, del vehículo de ítem 3.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.7.

Tabla A2.7. Comportamiento de concentración de NOx en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
1	$0 \leq t < 63$	$V_0 = 0 ; V_{63} = 30,8$	Incremento de 8 a 13
2	$63 \leq t < 67$	$V_{63} = 30,8 ; V_{67} = 29,8$	Incremento de 13 a 345
3	$67 \leq t < 74$	$V_{67} = 29,8 ; V_{74} = 29,8$	Decremento de 345 a 26
4	$74 \leq t < 77$	$V_{74} = 29,8 ; V_{77} = 30,7$	Incremento de 26 a 75
5	$77 \leq t < 81$	$V_{77} = 30,7 ; V_{81} = 32,4$	Decremento de 75 a 15
6	$81 \leq t < 89$	$V_{81} = 32,4 ; V_{89} = 11,1$	Incremento de 15 a 140
7	$89 \leq t < 145$	$V_{89} = 11,1 ; V_{145} = 24,6$	Decremento de 140 a 2
8	$145 \leq t < 154$	$V_{145} = 24,6 ; V_{154} = 26$	Incremento de 2 a 299
9	$154 \leq t < 168$	$V_{154} = 26 ; V_{168} = 46$	Decremento de 299 a 13
10	$168 \leq t < 178$	$V_{168} = 46 ; V_{178} = 49,1$	Incremento de 13 a 122
11	$178 \leq t < 219$	$V_{178} = 49,1 ; V_{219} = 55,2$	Decremento de 122 a 9
12	$219 \leq t < 227$	$V_{219} = 55,2 ; V_{227} = 41$	Incremento de 9 a 63
13	$227 \leq t < 240$	$V_{227} = 41 ; V_{240} = 0$	Decremento de 63 a 10

2.1.1.3 Vehículo de ítem 4

2.1.1.3.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.7 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo.

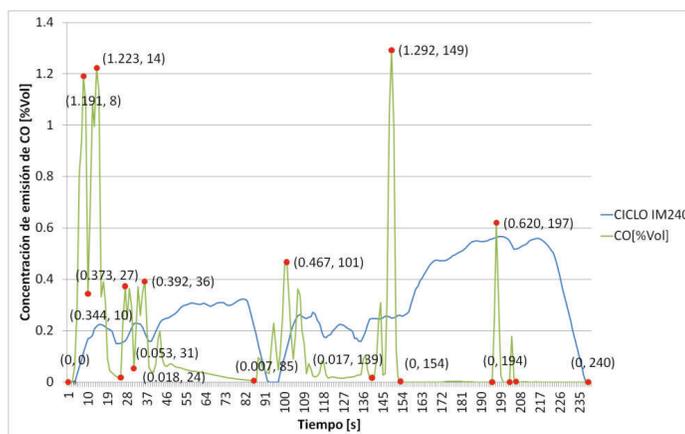


Figura A2.7. Gráfica de concentración de CO con ciclo IM240, del vehículo de ítem 4.

El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.8.

Tabla A2.8. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 8$	$V_0 = 0 ; V_8 = 11,5$	Incremento 0 a 1,191
2	$8 \leq t < 10$	$V_8 = 11,5 ; V_{10} = 16,9$	Decremento de 1,191 a 0,344
3	$10 \leq t < 14$	$V_{10} = 16,9 ; V_{14} = 21,7$	Incremento 0,344 a 1,223
4	$14 \leq t < 24$	$V_{14} = 21,7 ; V_{24} = 14,9$	Decremento de 1,223 a 0,018
5	$24 \leq t < 27$	$V_{24} = 14,9 ; V_{27} = 16$	Incremento 0,018 a 0,373
6	$27 \leq t < 31$	$V_{27} = 16 ; V_{31} = 22,7$	Decremento de 0,373a 0,053
7	$31 \leq t < 36$	$V_{31} = 22,7 ; V_{36} = 19$	Incremento de 0,053 a 0,392
8	$36 \leq t < 85$	$V_{36} = 19 ; V_{85} = 25.1$	Decremento 0,392 a 0,007
9	$85 \leq t < 101$	$V_{85} = 25.1 ; V_{101} = 13,2$	Incremento de 0,007 a 0,467
10	$101 \leq t < 139$	$V_{101} = 13,2 ; V_{139} = 22,2$	Decremento 0,467 a 0,017
11	$139 \leq t < 149$	$V_{139} = 22,2 ; V_{149} = 25,4$	Incremento de 0,017 a 1,292
12	$149 \leq t < 154$	$V_{149} = 25,4 ; V_{154} = 26$	Decremento 1,292a 0
13	$154 \leq t < 194$	$V_{154} = 26 ; V_{194} = 55,1$	Constante=0
14	$194 \leq t < 197$	$V_{194} = 55,1 ; V_{197} = 56,1$	Incremento de 0 a 0,620
15	$197 \leq t < 240$	$V_{197} = 56,1 ; V_{240} = 0$	Decremento 0,620 a 0

2.1.1.3.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.8 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 4.

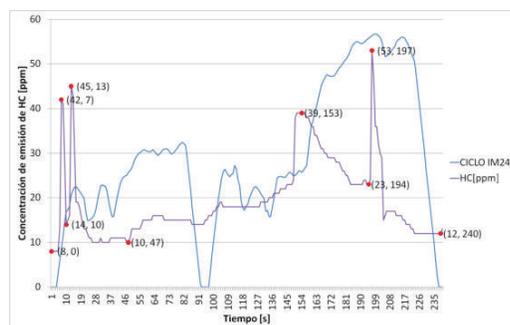


Figura A2.8. Gráfica de concentración de HC con ciclo IM240, del vehículo de ítem 4.

El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.9.

Tabla A2.9. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 7$	$V_0 = 0 ; V_7 = 8,6$	Incremento de 8 a 42
2	$7 \leq t < 10$	$V_7 = 8,6 ; V_{10} = 16,9$	Decremento de 42 a 14
3	$10 \leq t < 13$	$V_{10} = 16,9 ; V_{13} = 20,7$	Incremento de 14 a 45
4	$13 \leq t < 47$	$V_{13} = 20,7 ; V_{47} = 25$	Decremento de 45 a 10
5	$47 \leq t < 153$	$V_{47} = 25 ; V_{153} = 26$	Incremento de 10 a 39
6	$153 \leq t < 194$	$V_{153} = 26 ; V_{194} = 55,1$	Decremento de 39 a 23
7	$194 \leq t < 197$	$V_{194} = 55,1 ; V_{197} = 56,1$	Incremento de 23 a 53
8	$197 \leq t < 240$	$V_{197} = 56,1 ; V_{240} = 0$	Decremento de 53 a 12

2.1.1.3.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.9 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 4.

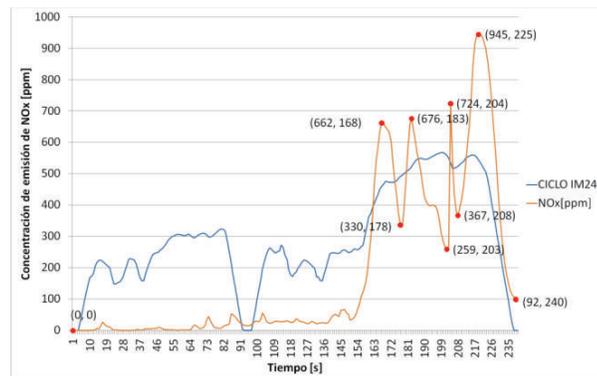


Figura A2.9. Gráfica de concentración de NO_x con ciclo IM240, del vehículo de ítem 4.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.10.

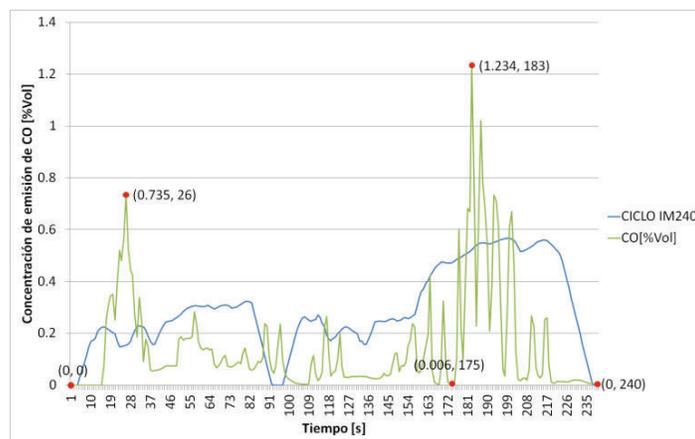
Tabla A2.10. Comportamiento de concentración de NOx en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
1	$0 \leq t < 168$	$V_0 = 0 ; V_{168} = 46$	Incremento de 0 a 662
2	$168 \leq t < 178$	$V_{168} = 46 ; V_{178} = 49,1$	Decremento de 662 a 330
3	$178 \leq t < 183$	$V_{178} = 49,1 ; V_{183} = 51,5$	Incremento de 330 a 676
4	$183 \leq t < 203$	$V_{183} = 51,5 ; V_{203} = 56$	Decremento de 676 a 259
5	$203 \leq t < 204$	$V_{203} = 56 ; V_{204} = 55$	Incremento de 259 a 724
6	$204 \leq t < 208$	$V_{204} = 55 ; V_{208} = 52,1$	Decremento de 724 a 367
7	$208 \leq t < 225$	$V_{208} = 52,1 ; V_{225} = 48$	Incremento de 367 a 945
8	$225 \leq t < 240$	$V_{225} = 48 ; V_{240} = 0$	Decremento de 945 a 92

2.1.1.4 Vehículo de ítem 5

2.1.1.4.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.10 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo.

**Figura A2.10.** Gráfica de concentración de CO con ciclo IM240, del vehículo de ítem 5.

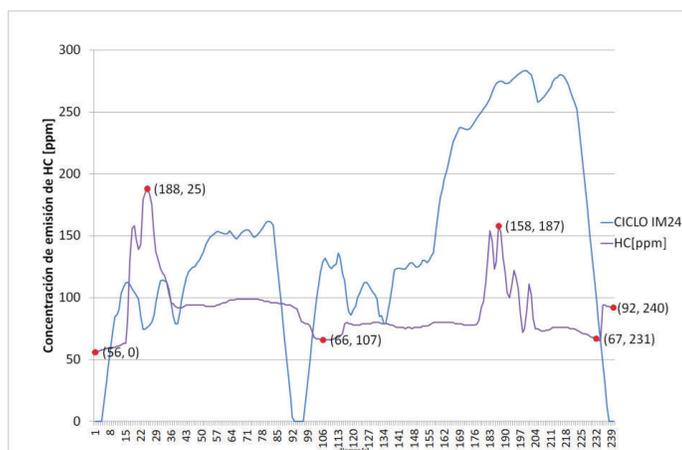
El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.11.

Tabla A2.11. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 26$	$V_0 = 0 ; V_{26} = 15,5$	Incremento 0 a 0,735
2	$26 \leq t < 175$	$V_{26} = 15,5 ; V_{175} = 47,4$	Decremento de 0,735 a 0,006
3	$175 \leq t < 183$	$V_{175} = 47,4 ; V_{183} = 51,5$	Incremento 0,006 a 1,234
4	$183 \leq t < 240$	$V_{183} = 51,5 ; V_{240} = 0$	Decremento de 1,234 a 0

2.1.1.4.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.11 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 5.

**Figura A2.11.** Gráfica de concentración de HC con ciclo IM240, del vehículo de ítem 5.

El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.12.

Tabla A2.12. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 25$	$V_0 = 0 ; V_{25} = 15,2$	Incremento de 56 a 188
2	$25 \leq t < 107$	$V_{25} = 15,2 ; V_{107} = 26,4$	Decremento de 188 a 66
3	$107 \leq t < 187$	$V_{107} = 26,4 ; V_{187} = 54,6$	Incremento de 66 a 158
4	$187 \leq t < 231$	$V_{187} = 54,6 ; V_{231} = 27$	Decremento de 158 a 67
5	$231 \leq t < 240$	$V_{231} = 27 ; V_{240} = 0$	Incremento de 67 a 92

2.1.1.4.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.12 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 5.

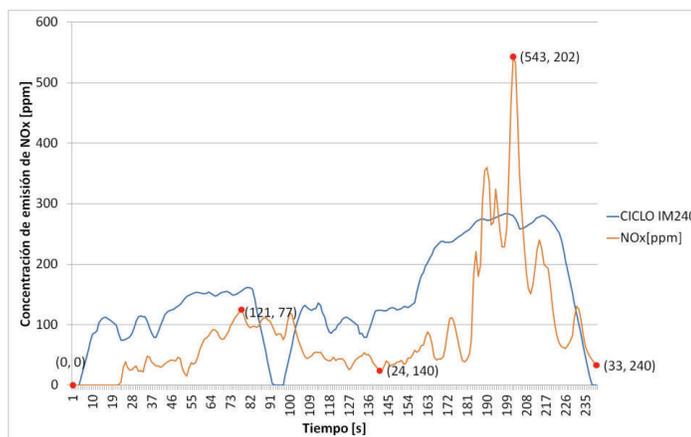


Figura A2.12. Gráfica de concentración de NO_x con ciclo IM240, del vehículo de ítem 5.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo IM240 se indica en la tabla A2.13.

Tabla A2.13. Comportamiento de concentración de NO_x en el transcurso del ciclo IM240.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NO _x [ppm]
1	$0 \leq t < 77$	$V_0 = 0 ; V_{77} = 30,7$	Incremento de 0 a 121
2	$77 \leq t < 140$	$V_{77} = 30,7 ; V_{140} = 24,5$	Decremento de 121 a 24
3	$140 \leq t < 202$	$V_{140} = 24,5 ; V_{202} = 56,3$	Incremento de 24 a 543
4	$202 \leq t < 240$	$V_{202} = 56,3 ; V_{240} = 0$	Decremento de 543 a 33

2.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS CONCENTRACIONES DE EMISIONES DE CO, HC Y NO_x EN EL CICLO IM240

En la figura A2.13 se indican los intervalos de tiempo en donde existen las relaciones de aumento y disminución entre las emisiones de gases de CO, HC y NO_x, de los vehículos de muestra, en el transcurso del ciclo de conducción IM240.

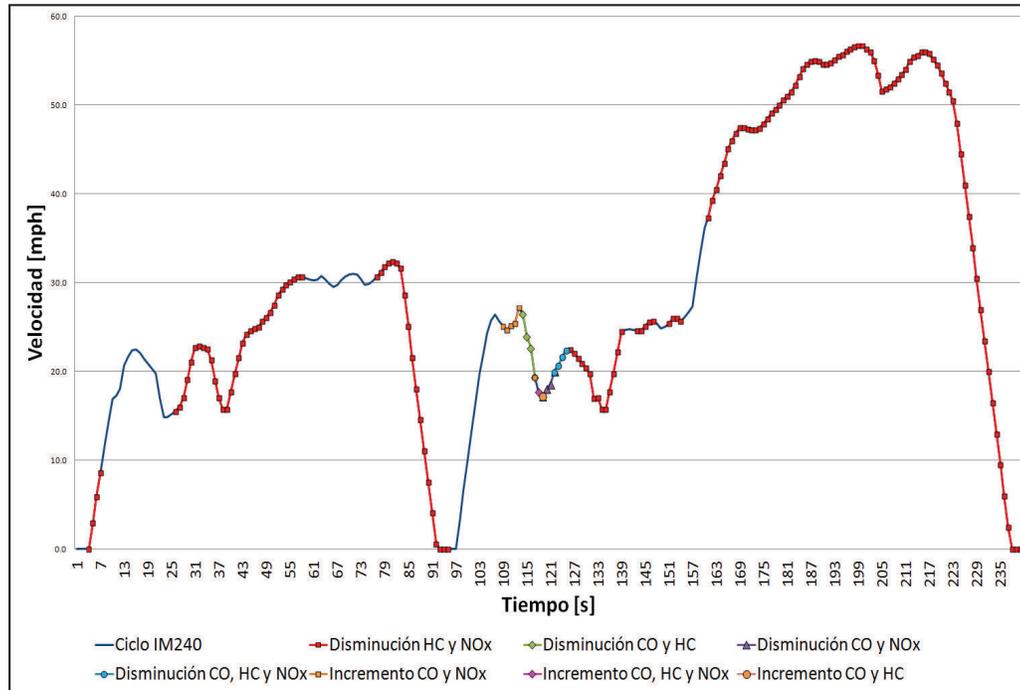


Figura 2.13. Gráfica de relaciones de aumento y disminución entre las emisiones de gases de CO, HC y NO_x, de los vehículos de muestra.

A continuación en las figuras A2.14 y A2.15 se muestran los tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las diferentes relaciones de disminución y aumento de las concentraciones de gases de CO, HC y NO_x.

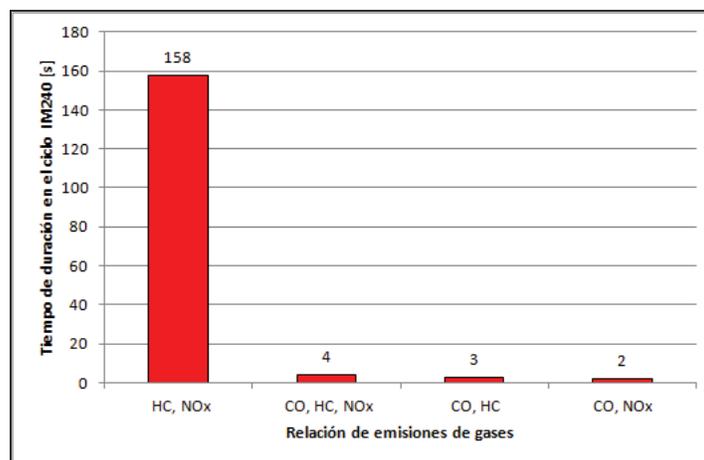


Figura A2.14. Tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las relaciones de disminución de concentración de gases.

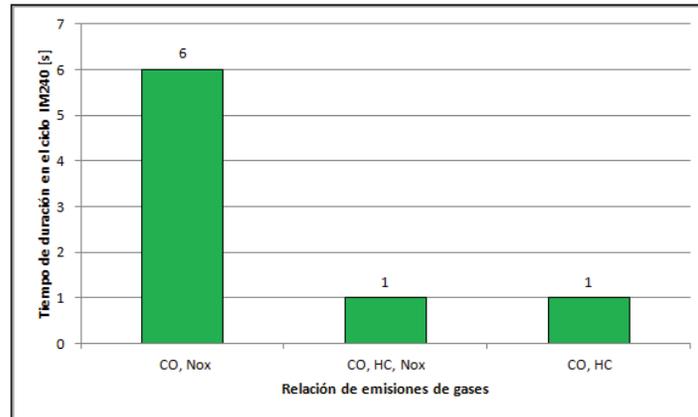


Figura A2.15. Tiempos de duración durante el ciclo IM240, de las relaciones de aumento de concentración de gases.

En las tablas A2.14 y A2.15 se indican las participaciones en porcentaje, de las relaciones de emisiones de gases respecto al tiempo de duración total de la prueba en el ciclo IM240 (240 segundos).

Tabla A2.14. Participación de la disminución de concentración de emisiones de gases en el ciclo IM240 de los vehículos de muestra.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
HC, NOx	65.8
CO, HC , NOx	1.7
CO, HC	1.3
CO, NOx	0.8

Tabla A2.15. Participación del aumento de concentración de emisiones de gases en el ciclo IM240 de los vehículos de muestra.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
CO, NOx	2.5
CO, HC , NOx	0.4
CO, HC	0.4

ANEXO 2.2: CICLO ON BOARD

2.2.1 EMISIONES DE GASES DINÁMICOS

A continuación se realiza un análisis de las gráficas de concentraciones de gases de CO, HC y NO_x, para los siguientes vehículos de muestra que se indican en la tabla A2.16.

Tabla A2.16 Vehículos de muestra.

ITEM	MARCA	MODELO	AÑO	CILINDRADA [cm ³]
2	Chevrolet	Spark	2015	1000
3	Chevrolet	Spark	2015	1000
4	Chevrolet	Grand Vitara	2011	2000
5	Chevrolet	Grand Vitara	2012	2000

2.2.1.1 Vehículo de ítem 2

2.2.1.1.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.16 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 2.

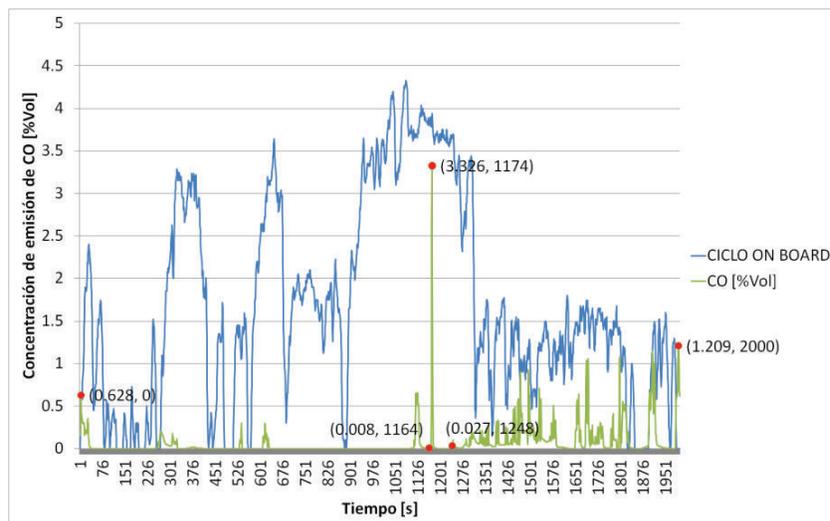


Figura A2.16. Gráfica de concentraciones de CO con ciclo on board, del vehículo de ítem 2.

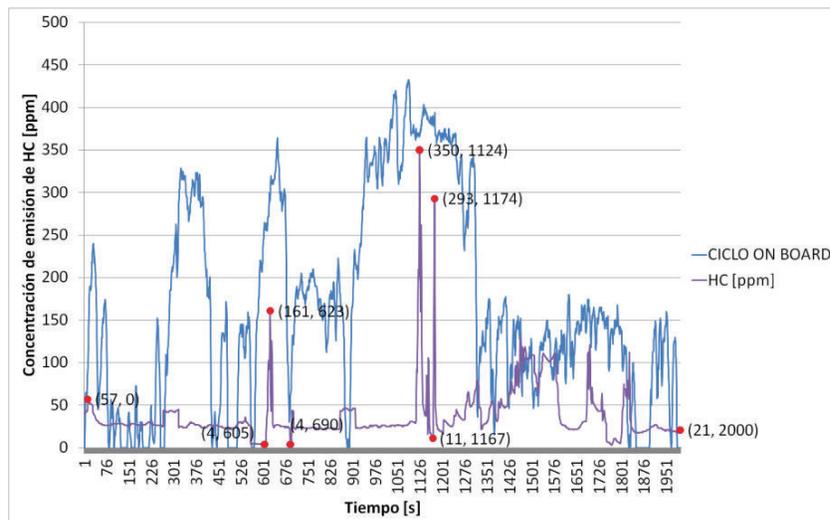
El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A.2.17.

Tabla A2.17. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 1164$	$V_0 = 0 ; V_{1164} = 78$	Decremento 0,628 a 0,008
2	$1164 \leq t < 1174$	$V_{1164} = 78 ; V_{1174} = 77$	Incremento de 0,008 a 0,326
3	$1174 \leq t < 1248$	$V_{1174} = 77 ; V_{1248} = 67,8$	Decremento 0,326 a 0,027
4	$1248 \leq t < 2000$	$V_{1248} = 67,8 ; V_{2000} = 0$	Incremento de 0,027 a 1,209

2.2.1.1.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.17 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 2.

**Figura A2.17.** Gráfica de concentración de HC con ciclo on board del vehículo de ítem 2.

El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.18.

Tabla A2.18. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 605$	$V_0 = 0 ; V_{605} = 53$	Decremento de 57 a 4
2	$605 \leq t < 623$	$V_{605} = 53 ; V_{623} = 58,1$	Incremento de 4 a 161
3	$623 \leq t < 690$	$V_{623} = 58,1 ; V_{690} = 9,7$	Decremento 161 a 4
4	$690 \leq t < 1124$	$V_{690} = 9,7 ; V_{1124} = 73,1$	Incremento 4 a 350

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
5	$1124 \leq t < 1167$	$V_{1124} = 73,1$; $V_{1167} = 77,5$	Decremento de 350 a 11
6	$1167 \leq t < 1174$	$V_{1167} = 77,5$; $V_{1174} = 77$	Incremento 11 a 293
7	$1174 \leq t < 2000$	$V_{1174} = 77$; $V_{2000} = 0$	Decremento de 293 a 21

2.2.1.1.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.18 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 2.

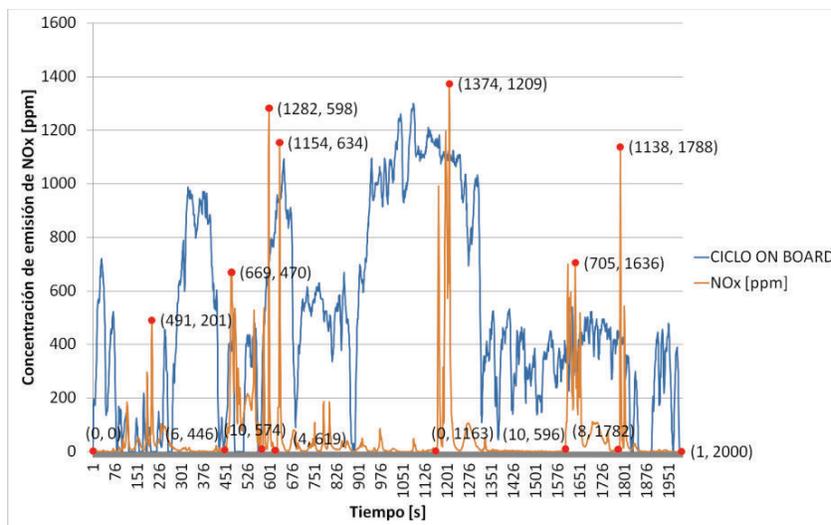


Figura A2.18. Gráfica de concentración de NO_x con ciclo on board del vehículo de ítem 2.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.19.

Tabla A2.19. Comportamiento de concentración de NO_x en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NO _x [ppm]
1	$0 \leq t < 201$	$V_0 = 0$; $V_{201} = 0$	Incremento de 0 a 491
2	$201 \leq t < 446$	$V_{201} = 0$; $V_{446} = 2$	Decremento 491 a 6
3	$446 \leq t < 470$	$V_{446} = 2$; $V_{470} = 25$	Incremento de 6 a 669
4	$470 \leq t < 574$	$V_{470} = 25$; $V_{574} = 15$	Decremento de 669 a 10
5	$574 \leq t < 598$	$V_{574} = 15$; $V_{598} = 43,9$	Incremento de 10 a 1282
6	$598 \leq t < 619$	$V_{598} = 43,9$; $V_{619} = 56,2$	Decremento de 1282 a 4

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
7	$619 \leq t < 634$	$V_{619} = 56,2$; $V_{634} = 62$	Incremento de 4 a 1154
8	$634 \leq t < 1163$	$V_{634} = 62$; $V_{1163} = 76,9$	Decremento de 1154 a 0
9	$1163 \leq t < 1209$	$V_{1163} = 76,9$; $V_{1209} = 75$	Incremento de 0 a 1374
10	$1209 \leq t < 1596$	$V_{1209} = 75$; $V_{1596} = 24$	Decremento de 1374 a 10
11	$1596 \leq t < 1636$	$V_{1596} = 24$; $V_{1636} = 25$	Incremento de 10 a 705
12	$1636 \leq t < 1782$	$V_{1636} = 25$; $V_{1782} = 29$	Decremento de 705 a 8
13	$1782 \leq t < 1788$	$V_{1782} = 29$; $V_{1788} = 33,5$	Incremento de 8 a 1138
14	$1788 \leq t < 2000$	$V_{1788} = 33,5$; $V_{2000} = 0$	Decremento de 1138 a 1

2.2.1.2 Vehículo de ítem 3

2.2.1.2.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.19 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 3.

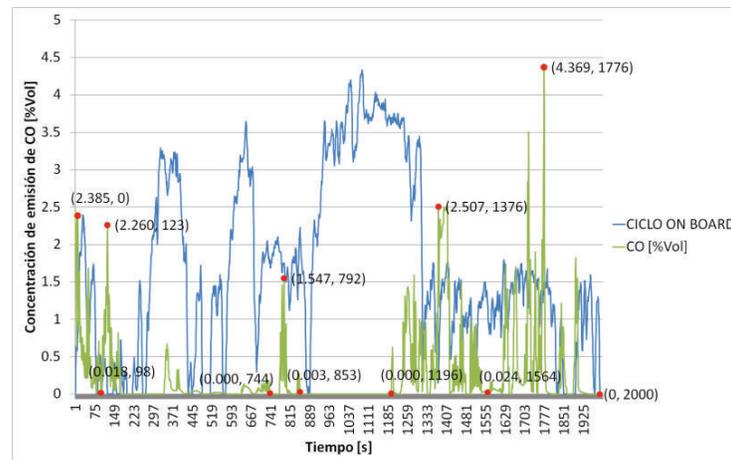


Figura A2.19. Gráfica de concentraciones de CO con ciclo on board, del vehículo de ítem 3.

El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A.2.20.

Tabla A2.20. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 98$	$V_0 = 0$; $V_{98} = 5,8$	Decremento 2,385 a 0,018

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
2	$98 \leq t < 123$	$V_{98} = 5,8$; $V_{123} = 0$	Incremento de 0,018 a 2,260
3	$123 \leq t < 744$	$V_{123} = 0$; $V_{744} = 35$	Decremento 2,260 a 0
4	$744 \leq t < 792$	$V_{744} = 35$; $V_{792} = 35$	Incremento de 0 a 1,547
5	$792 \leq t < 853$	$V_{792} = 35$; $V_{853} = 42,6$	Decremento 1,547 a 0,003
6	$853 \leq t < 1196$	$V_{853} = 42,6$; $V_{1196} = 72$	Constante=0
7	$1196 \leq t < 1376$	$V_{1196} = 72$; $V_{1376} = 5$	Incremento de 0 a 2,507
8	$1376 \leq t < 1564$	$V_{1376} = 5$; $V_{1564} = 19,6$	Decremento de 2,507 a 0,024
9	$1564 \leq t < 1776$	$V_{1564} = 19,6$; $V_{1776} = 27,6$	Incremento 0,024a 4,369
10	$1776 \leq t < 2000$	$V_{1776} = 27,6$; $V_{2000} = 0$	Decremento de 4,369 a 0

2.2.1.2.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.20 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 3.

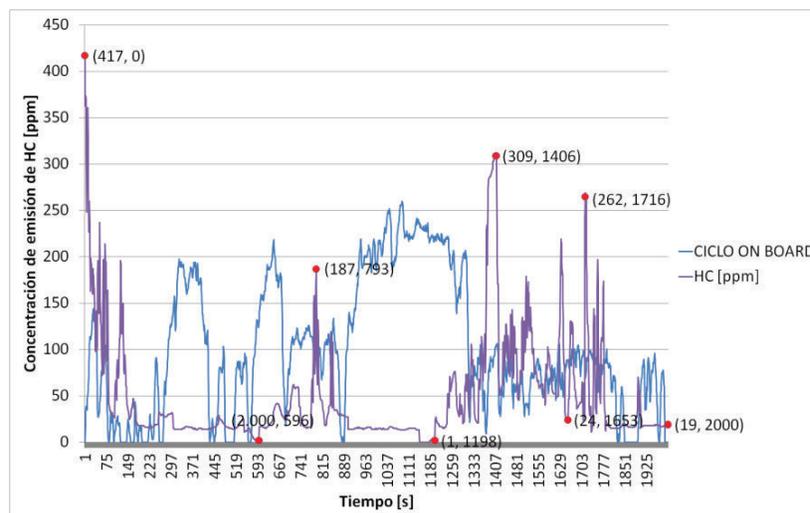


Figura A2.20. Gráfica de concentración de HC con ciclo on board del vehículo de ítem 3.

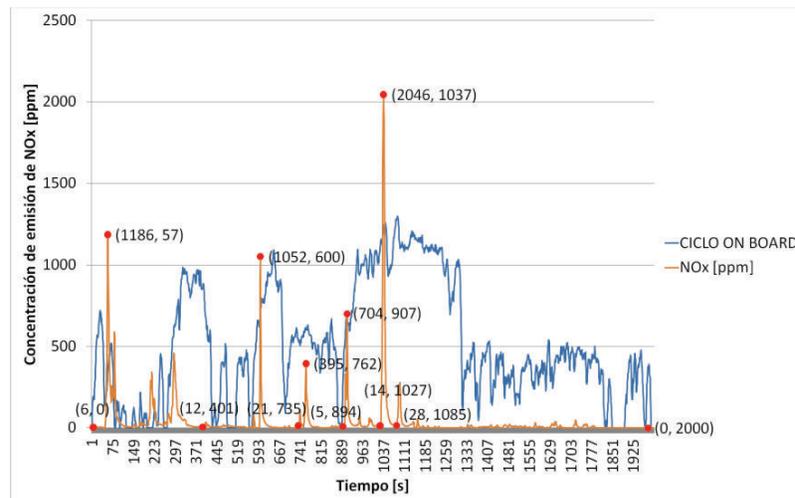
El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.21.

Tabla A2.21. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 596$	$V_0 = 0 ; V_{596} = 41,7$	Decremento de 417 a 2
2	$596 \leq t < 793$	$V_{596} = 41,7 ; V_{793} = 34,7$	Incremento de 2 a 187
3	$793 \leq t < 1198$	$V_{793} = 34,7 ; V_{1198} = 72,1$	Decremento 187 a 1
4	$1198 \leq t < 1406$	$V_{1198} = 72,1 ; V_{1406} = 33,5$	Incremento 1 a 309
5	$1406 \leq t < 1653$	$V_{1406} = 33,5 ; V_{1653} = 29,4$	Decremento de 309 a 24
6	$1653 \leq t < 1716$	$V_{1653} = 29,4 ; V_{1716} = 24,2$	Incremento 24 a 262
7	$1716 \leq t < 2000$	$V_{1716} = 24,2 ; V_{2000} = 0$	Decremento de 262 a 19

2.2.1.2.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.21 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 3.

**Figura A2.21.** Gráfica de concentración de NO_x con ciclo on board del vehículo de ítem 3.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.21.

Tabla A2.21. Comportamiento de concentración de NO_x en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NO _x [ppm]
1	$0 \leq t < 57$	$V_0 = 0 ; V_{57} = 22,3$	Incremento de 6 a 1186

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
2	$57 \leq t < 401$	$V_{57} = 22,3$; $V_{401} = 52,5$	Decremento 1186 a 12
3	$401 \leq t < 600$	$V_{401} = 52,5$; $V_{600} = 48,1$	Incremento de 12 a 1052
4	$600 \leq t < 735$	$V_{600} = 48,1$; $V_{735} = 35,6$	Decremento de 1052 a 21
5	$735 \leq t < 762$	$V_{735} = 35,6$; $V_{762} = 40$	Incremento de 21 a 395
6	$762 \leq t < 894$	$V_{762} = 40$; $V_{894} = 21,5$	Decremento de 395 a 5
7	$894 \leq t < 907$	$V_{894} = 21,5$; $V_{907} = 46,2$	Incremento de 5 a 704
8	$907 \leq t < 1027$	$V_{907} = 46,2$; $V_{1027} = 76$	Decremento de 704 a 14
9	$1027 \leq t < 1037$	$V_{1027} = 76$; $V_{1037} = 82,2$	Incremento de 14 a 2046
10	$1037 \leq t < 1085$	$V_{1037} = 82,2$; $V_{1085} = 85,4$	Decremento de 2046 a 28
11	$1085 \leq t < 2000$	$V_{1085} = 85,4$; $V_{2000} = 0$	Decremento de 28 a 0

2.2.1.3 Vehículo de ítem 4

2.2.1.3.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.22 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 4.

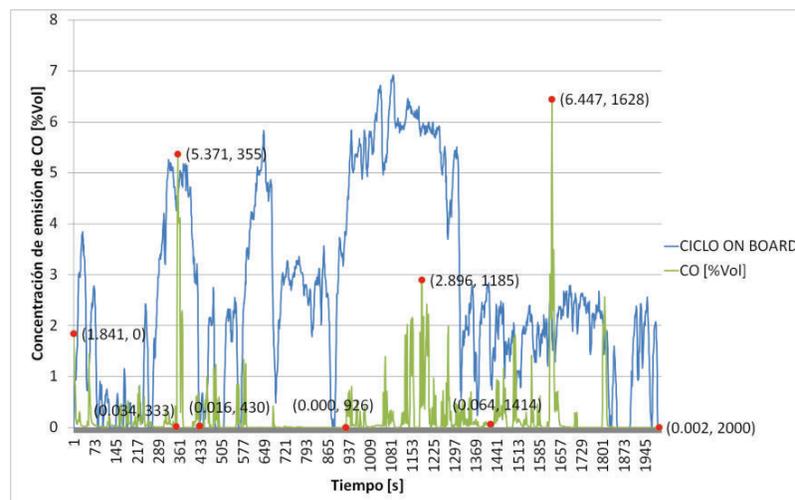


Figura A2.22. Gráfica de concentraciones de CO con ciclo on board, del vehículo de ítem 4.

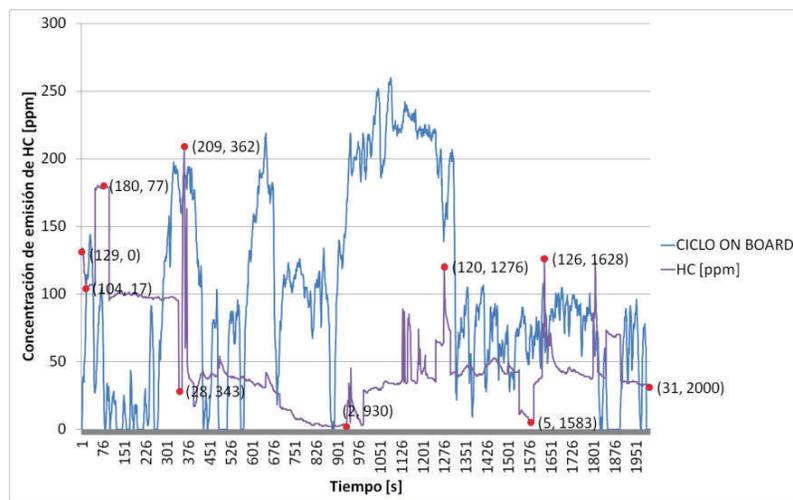
El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A.2.22.

Tabla A2.22. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 333$	$V_0 = 0 ; V_{333} = 63,3$	Decremento 1,841 a 0,034
2	$333 \leq t < 355$	$V_{333} = 63,3 ; V_{355} = 55,5$	Incremento de 0,034 a 5,371
3	$355 \leq t < 430$	$V_{355} = 55,5 ; V_{430} = 0$	Decremento 5,371 a 0,016
4	$430 \leq t < 926$	$V_{430} = 0 ; V_{926} = 47,8$	Constante=0
5	$926 \leq t < 1185$	$V_{926} = 47,8 ; V_{1185} = 73$	Incremento 0a 2,896
6	$1185 \leq t < 1414$	$V_{1185} = 73 ; V_{1414} = 33,2$	Decremento de 2,896 a 0,064
7	$1414 \leq t < 1628$	$V_{1414} = 33,2 ; V_{1628} = 25,5$	Incremento de 0,064 a 6,447
8	$1628 \leq t < 2000$	$V_{1628} = 25,5 ; V_{2000} = 0$	Decremento de 6,447 a 0,002

2.2.1.3.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.23 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 4.

**Figura A2.23.** Gráfica de concentración de HC con ciclo on board del vehículo de ítem 4.

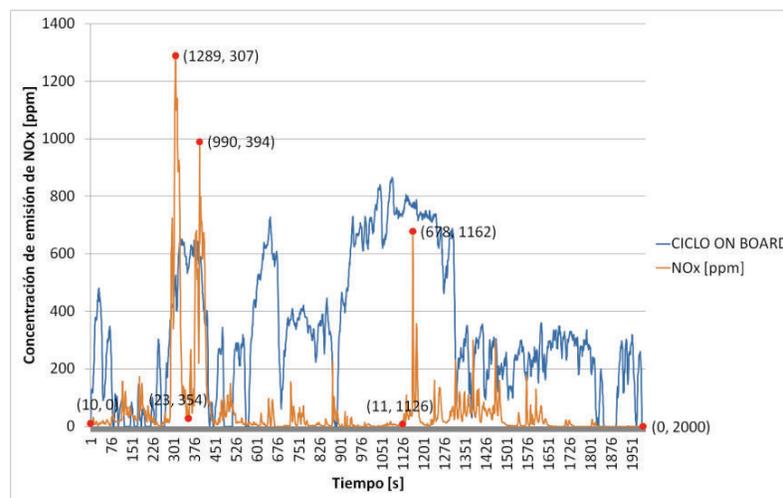
El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.23.

Tabla A2.23. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 17$	$V_0 = 0 ; V_{17} = 35,1$	Decremento de 129 a 104
2	$17 \leq t < 77$	$V_{17} = 35,1 ; V_{77} = 17,7$	Incremento de 104 a 180
3	$77 \leq t < 343$	$V_{77} = 17,7 ; V_{343} = 59$	Decremento 180 a 28
4	$343 \leq t < 362$	$V_{343} = 59 ; V_{362} = 61,6$	Incremento 28 a 209
5	$362 \leq t < 930$	$V_{362} = 61,6 ; V_{930} = 51,4$	Decremento de 209 a 2
6	$930 \leq t < 1276$	$V_{930} = 51,4 ; V_{1276} = 50,4$	Incremento 2 a 120
7	$1276 \leq t < 1583$	$V_{1276} = 50,4 ; V_{1583} = 25,1$	Decremento de 120 a 5
8	$1583 \leq t < 1628$	$V_{1583} = 25,1 ; V_{1628} = 25,5$	Incremento 5 a 126
9	$1628 \leq t < 2000$	$V_{1628} = 25,5 ; V_{2000} = 0$	Decremento de 126 a 31

2.2.1.3.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.24 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 4.

**Figura A2.24.** Gráfica de concentración de NO_x con ciclo on board del vehículo de ítem 4.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.24.

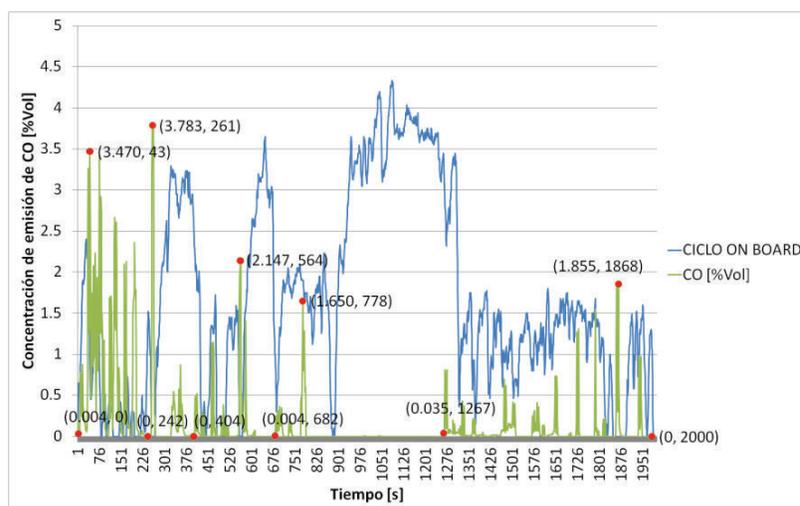
Tabla A2.24. Comportamiento de concentración de NOx en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
1	$0 \leq t < 307$	$V_0 = 0 ; V_{307} = 51,3$	Incremento de 10 a 1289
2	$307 \leq t < 354$	$V_{307} = 51,3 ; V_{354} = 55$	Decremento 1289 a 23
3	$354 \leq t < 394$	$V_{354} = 55 ; V_{394} = 57$	Incremento de 23 a 990
4	$394 \leq t < 1126$	$V_{394} = 57 ; V_{1126} = 74$	Decremento de 990 a 11
5	$1126 \leq t < 1162$	$V_{1126} = 74 ; V_{1162} = 77$	Incremento de 11 a 678
6	$1162 \leq t < 2000$	$V_{1162} = 77 ; V_{2000} = 0$	Decremento de 678 a 0

2.2.1.4 Vehículo de ítem 5

2.2.1.4.1 Gráfica de concentraciones de emisiones de CO

En la figura A2.25 se observan las variaciones de las concentraciones de CO con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 5.

**Figura A2.25.** Gráfica de concentraciones de CO con ciclo on board, del vehículo de ítem 5.

El comportamiento de la concentración del CO en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A.2.25.

Tabla A2.25. Comportamiento de concentración del CO en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
1	$0 \leq t < 43$	$V_0 = 0 ; V_{43} = 25,9$	Incremento 0,004 a 3,470

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	CO [%Vol]
2	$43 \leq t < 242$	$V_{43} = 25,9$; $V_{242} = 21,4$	Decremento de 3,470 a 0
3	$242 \leq t < 261$	$V_{242} = 21,4$; $V_{261} = 0$	Incremento 0 a 3,783
4	$261 \leq t < 404$	$V_{261} = 0$; $V_{404} = 46,2$	Decremento de 3,783 a 0
5	$404 \leq t < 564$	$V_{404} = 46,2$; $V_{564} = 0$	Incremento 0 a 2,147
6	$564 \leq t < 682$	$V_{564} = 0$; $V_{682} = 20,4$	Decremento de 2,147 a 0,004
7	$682 \leq t < 778$	$V_{682} = 20,4$; $V_{778} = 38$	Incremento de 0,004 a 1,650
8	$778 \leq t < 1267$	$V_{778} = 38$; $V_{1267} = 60,2$	Decremento de 1,650 a 0,035
9	$1267 \leq t < 1868$	$V_{1267} = 60,2$; $V_{1868} = 0$	Incremento de 0,035 a 1,855
10	$1868 \leq t < 2000$	$V_{1868} = 0$; $V_{2000} = 0$	Decremento de 1,855 a 0

2.2.1.4.2 Gráfica de concentración de emisiones de HC

En la figura A2.26 se observa las variaciones de las concentraciones de HC con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 5.

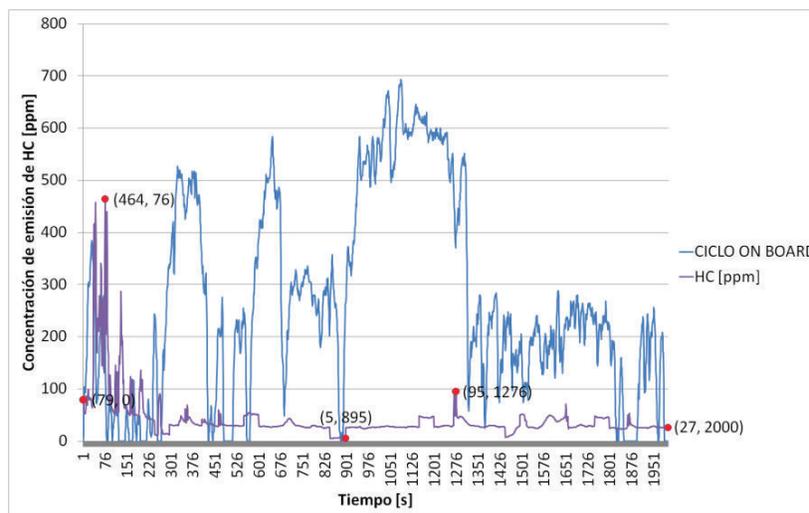


Figura A2.26. Gráfica de concentración de HC con ciclo on board del vehículo de ítem 5.

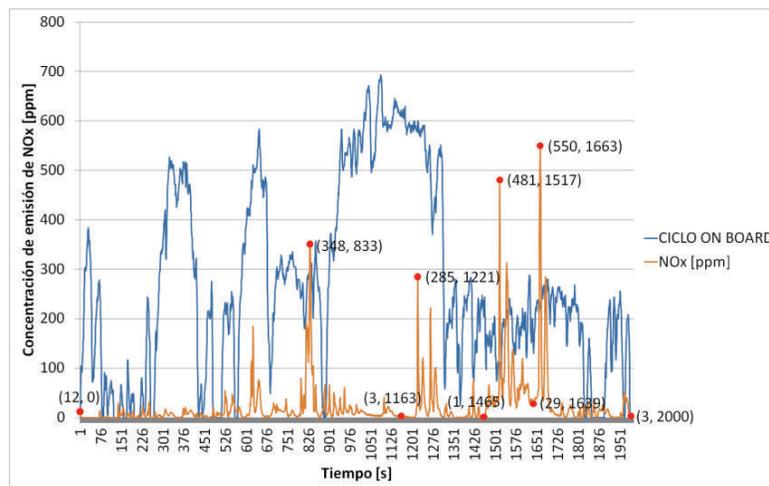
El comportamiento de la concentración del HC en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.26.

Tabla A2.26. Comportamiento de concentración del HC en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	HC [ppm]
1	$0 \leq t < 76$	$V_0 = 0 ; V_{76} = 23,3$	Incremento de 79 a 464
2	$76 \leq t < 895$	$V_{76} = 23,3 ; V_{895} = 26$	Decremento de 464a 5
3	$895 \leq t < 1276$	$V_{895} = 26 ; V_{1276} = 50,4$	Incremento 5 a 95
4	$1276 \leq t < 2000$	$V_{1276} = 50,4 ; V_{2000} = 0$	Decremento 95 a 27

2.2.1.4.3 Gráfica de concentración de emisiones de NO_x

En la figura A2.27 se observa las variaciones de las concentraciones de NO_x con respecto al tiempo, del vehículo de ítem 5.

**Figura A2.27.** Gráfica de concentración de NO_x con ciclo on board del vehículo de ítem 5.

El comportamiento de la concentración del NO_x en el transcurso del ciclo on board se indica en la tabla A2.27.

Tabla A2.27. Comportamiento de concentración de NO_x en el transcurso del ciclo on board.

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NO _x [ppm]
1	$0 \leq t < 833$	$V_0 = 0 ; V_{833} = 35,5$	Incremento de 12 a 348
2	$833 \leq t < 1163$	$V_{833} = 35,5 ; V_{1163} = 76,9$	Decremento 348 a 3
3	$1163 \leq t < 1221$	$V_{1163} = 76,9 ; V_{1221} = 72$	Incremento de 3 a 285
4	$1221 \leq t < 1465$	$V_{1221} = 72 ; V_{1465} = 18,3$	Decremento de 285 a 1

TRAMO	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [Km/h]	NOx [ppm]
5	$1465 \leq t < 1517$	$V_{1465} = 18,3$; $V_{1517} = 12,3$	Incremento de 1 a 481
6	$1517 \leq t < 1639$	$V_{1517} = 12,3$; $V_{1639} = 16,2$	Decremento de 481 a 29
7	$1639 \leq t < 1663$	$V_{1639} = 16,2$; $V_{1663} = 28,2$	Incremento de 29 a 550
8	$1663 \leq t < 2000$	$V_{1663} = 28,2$; $V_{2000} = 0$	Decremento de 550 a 3

2.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS CONCENTRACIONES DE EMISIONES DE CO, HC Y NO_x EN EL CICLO ON BOARD

En las figuras A2.28 y A2.29 se muestran los tiempos de duración durante el ciclo on board, de las diferentes relaciones de disminución y aumento de concentración de gases de CO, HC y NO_x.

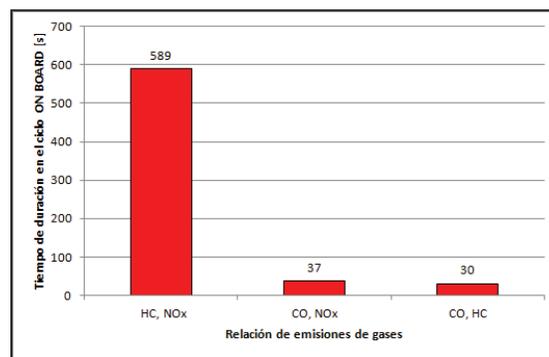


Figura A2.28. Tiempos de duración durante el ciclo on board, de las relaciones de disminución de concentración de gases.

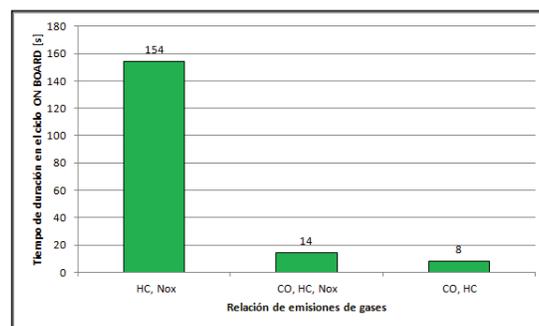


Figura A2.29. Tiempos de duración durante el ciclo on board, de las relaciones de aumento de concentración de gases.

En las tablas A2.28 y A2.29 se indican las participaciones en porcentaje, de las relaciones de emisiones de gases respecto al tiempo de duración total promedio de la prueba en el ciclo on board (2000 segundos).

Tabla A2.28. Participación de la disminución de concentración de emisiones de gases en el ciclo on board de los vehículos de muestra.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
HC, NO _x	29.5
CO, NO _x	1.9
CO, HC	1.5

Tabla A2.29. Participación del aumento de concentración de emisiones de gases en el ciclo on board de los vehículos de muestra.

RELACIONES DE EMISIONES DE GASES	PARTICIPACIÓN EN EL CICLO IM240 [%]
HC, NO _x	7.7
CO, HC , NO _x	0.7
CO, HC	0.4