UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

PRUEBAS DE VALIDACIÓN, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIONES CONTAMINANTES SOBRE VEHÍCULO DEDICADO A COMBUSTIBLE GAS NATURAL EURO 6 SCANIA.

Informe realizado para:

SCANIA COLOMBIA / GAS NATURAL FENOSA SA ESP

Informe elaborado por:

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS, ENERGÍA Y PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE BOGOTÁ.

2014

Contenido

1 Introducción. 5
2 Metodología 6
2.1 Descripción general de las pruebas de emisiones 6
2.2 Descripción equipos de medición, sistema de muestreo de gases y material particulado 8
2.3 Descripción de rutas para pruebas de consumo de combustible y emisiones. 11
2.3.1 Ruta para consumo de combustible 11
2.4 Ruta para medición de emisiones 15
2.5 Protocolos de prueba de validación. 21
2.6 Rutas de evaluación de desempeño: 22
2.6.1 Pruebas de frenado, arranque en pendiente, aceleración y recuperación en plano. 22
2.6.2 Pruebas de habilidad de giro y aproximación a paraderos. 23
2.6.3 Pruebas de arranque en pendiente. 23
2.7 Descripción del vehículo. 25
2.8 Condiciones de Carga del vehículo: 26
2.9 Descripción de las pruebas 27
2.9.1 Arranque en pendiente. 27
2.9.2 Aceleración. 28
2.9.3 Frenado. 28
2.9.4 Recuperación. 29
2.9.5 Radio de giro, aproximación a paradero y sobrepaso 29
2.9.6 Emisiones 33
2.9.7 Banco dinamométrico. 34
2.9.8 Ciclo de conducción Bogotá Padrón. 36
2.9.9 Eficiencia energética. 37
2.10 Características de manejo. 38
2.11 Metodología para la adquisición de datos, prueba de emisiones. 38

2.11.1 Pre-procesamiento de datos. 38
2.11.2 Procesamiento de datos. 39
2.12 Ruido. 41
3 Resultados 42
3.1 Pruebas de desempeño 42
3.1.1 Aceleración. 42
3.1.2 Frenado. 43
3.1.3 Recuperación. 43
3.1.4 Manejabilidad. 44
3.1.5 Flexibilidad – Radio de Giro. 45
3.2 Pruebas de emisiones en ruta. 46
3.3 Emisiones en banco dinamométrico. 47
3.4 Eficiencia energética. 52
3.5 Cálculo equivalencia energética entre tecnologías GNV y diesel convencional 53
3.5.1 Equivalencia energética consumo vehículo GNV y diesel convencional 54
3.6 Ruido. 57
4 CONCLUSIONES 59
5 Referencias 60

Listado de Figuras.

Figura 1. Recorrido de la ruta para evaluación de consumo de combustible de buses PADRON. .. 13
Figura 2. Perfil de elevación de la ruta para las pruebas de consumo de combustible. 14
Figura 3 Recorrido ruta bus PADRON para medición de emisiones. 16
Figura 4. Detalle de la ubicación de la pista de pruebas llana. 23
Figura 5. Ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal. 24
Figura 6. Perfil elevación ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal 24
Figura 7. Ruta y perfil de elevación prueba de arranque en pendiente, Alto del Vino..... 25
Figura 8. Vehículo en prueba en el ascenso en el barrio San Cristóbal. 28
Figura 9. Prueba de frenado..... 29
Figura 10. Ejercicio de aproximación a paradero..... 31
Figura 11. Esquema de la prueba de aproximación a paradero. 32
Figura 12. Esquema de la prueba de distancia mínima de sobrepaso..... 32
Figura 13. Mediciones tomadas en la prueba de radio de giro. 33
Figura 14. Sistema de muestreo de gases para la prueba de emisiones en ruta..... 34
Figura 15. Montaje de equipos de medición de emisiones para la prueba en el banco dinamométrico..... 35
Figura 16. Montaje del vehículo en el banco dinamométrico. 36
Figura 17. Ciclo de conducción para el servicio zonal tipo PADRON de Bogotá. 37
Figura 18: Esquema de actividades efectuadas en el procesamiento de datos 39
Figura 19. Perfil de aceleración para el vehículo evaluado..... 43
Figura 20. Rango de emisión de partículas para una ruta..... 47
Figura 21. Curva de potencia para el vehículo Scania E6 GNV..... 50
Figura 22. Consumo de combustible en función del peso vehicular. 56

Listado de Tablas.

Tabla 1. Pesos vehiculares para las pruebas ejecutadas. 26
Tabla 2. Comparación entre los ciclos de conducción estudiados y los ciclos internacionales normalizados 37
Tabla 3. Descripción de las bases de datos pre-procesadas 39
Tabla 4. Resultados de las pruebas de aceleración. 42
Tabla 5. Resultados de la prueba de frenado. 43
Tabla 6. Resultados de la prueba de recuperación 43
Tabla 7. Resultados de la evaluación de manejabilidad del vehículo. 44
Tabla 8. Resultados de la prueba de habilidad de giro, habilidad de giro y sobrepaso. Distancias en metros. 45
Tabla 9. Resultados prueba de emisiones. [g/km] 46
Tabla 10. Valores importantes de emisión de partículas. 47
Tabla 11. Factores de emisión en prueba dinamométrica de carga constante 25%. 50
Tabla 12. Factores de emisión para prueba dinamométrica ciclo Bogotá Padrón. 50
Tabla 13. Estándar de emisión Europeo para motores diesel y de gas de trabajo pesado (Categoría N3). 51
Tabla 14. Comparativo de los resultados obtenidos en la prueba dinamométrica, respecto al estándar de emisión Euro 6. 52
Tabla 15. Resultados de los análisis de cromatografía del gas natural. 52
Tabla 16. Resultados de la prueba de consumo de combustible. 55
Tabla 17. Información comparativa motores k340 y k280, chasis 12 metros y 15 metros 56
Tabla 18. Valores estimados de consumo de combustible para configuraciones de carrocería nacional con motores k340 y k280. 57
Tabla 19. Resultados obtenidos en la prueba de ruido del vehículo. 57

1 Introducción.

Este informe contiene la descripción, resultados y análisis de una serie de pruebas de realizadas sobre un bus marca Scania, con tecnología de emisiones contaminantes estándar Euro 6, con motor dedicado a operación con gas natural como combustible. El bus fue validado según la normatividad vigente y también fue evaluado en desempeño, prueba en banco dinamométrico, eficiencia energética y emisiones contaminantes en ruta. En la evaluación de emisiones del vehículo y en la de chasis dinamométrico, se midió material particulado con un equipo Dekati modelo Elpi+, muestreando directamente los gases de escape, así mismo se realizó un conteo de partículas con un equipo NanoMet3; se registraron los gases contaminantes con dos analizadores de gases (Testo 350 y Brain Bee Ags688), se monitoreó el vehículo mediante sistemas GPS y se midió el flujo de gases de escape y la temperatura de los mismos. La prueba se realizó sobre una ruta preestablecida que simula las condiciones normales de operación de un bus y abarca diferentes topografías. También se realizaron sesiones de medición de consumo de combustible mediante rastreo GPS en una ruta de 74 km. Los resultados son contrastados con valores de referencia obtenidos con anterioridad por parte de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá dentro del convenio Interadministrativo SDA-UNAL 013 de 2012. Los resultados evidencian el cumplimiento del estándar de emisiones Euro6, así como el desempeño satisfactorio del bus a lo largo de las pruebas de validación del mismo.

El vehículo Scania K340:

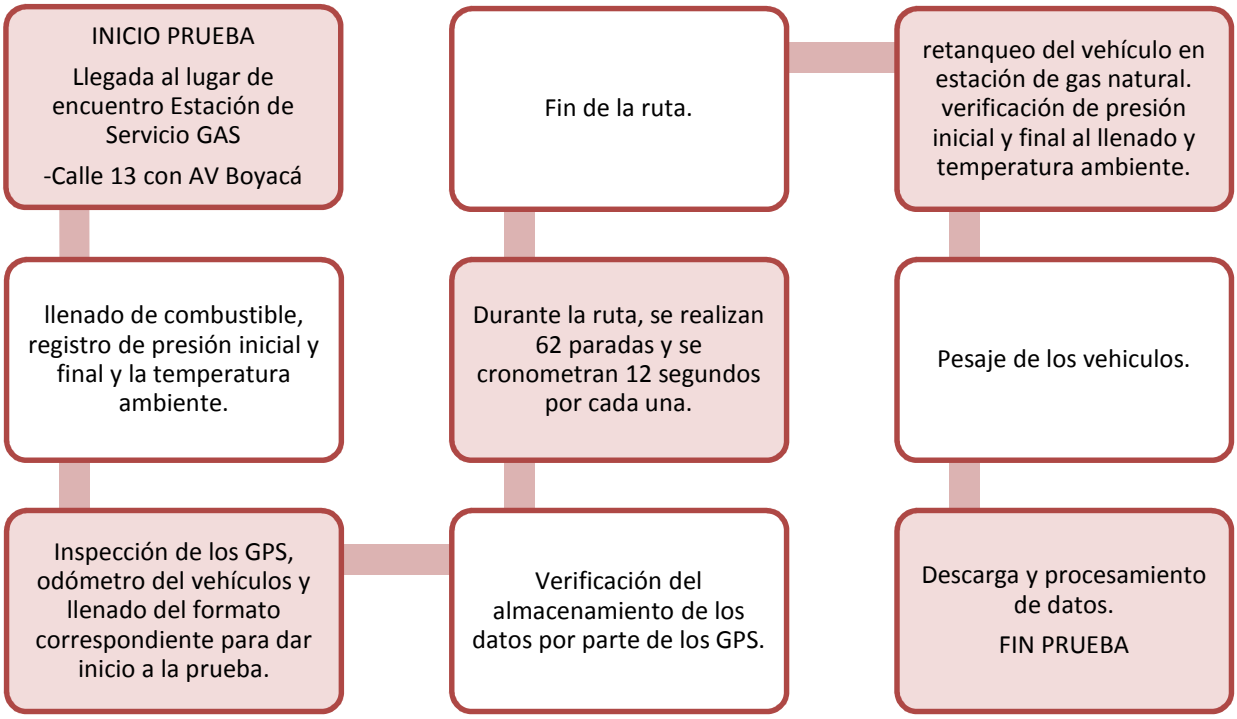
- Cumple satisfactoriamente con los parámetros de desempeño exigidos por la normatividad local (frenado, aceleración en plano y maniobrabilidad).
- Tiene un rendimiento energético de 0.76 galones de diésel equivalente para mover una tonelada de carga en el ciclo aplicado. Vehículos diésel tienen un rendimiento menor (0.87 galones o más para mover una tonelada en el ciclo). Un vehículo híbrido tiene un rendimiento entre 0.62 y 0.65 galones / tonelada.
- Emite concentraciones despreciables de material particulado y óxidos de nitrógeno.
- Emite concentraciones de hidrocarburos totales (THC), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2), muy inferiores a las emitidas por vehículos diésel de tecnologías Euro IV y Euro V.
- Emite una concentración en número de partículas ultrafinas (20,000 partículas/cm3) inferior a la concentración de partículas ultrafinas encontradas en el aire ambiente de la ciudad de Bogotá (150,000 partículas/cm3).
- Emite una concentración en número de partículas ultrafinas (20.000 partículas/cm3) muy inferior a las partículas de un bus diésel Euro II o III (70 millones de partículas / cm3)

2 Metodología

2.1 Descripción general de las pruebas de emisiones

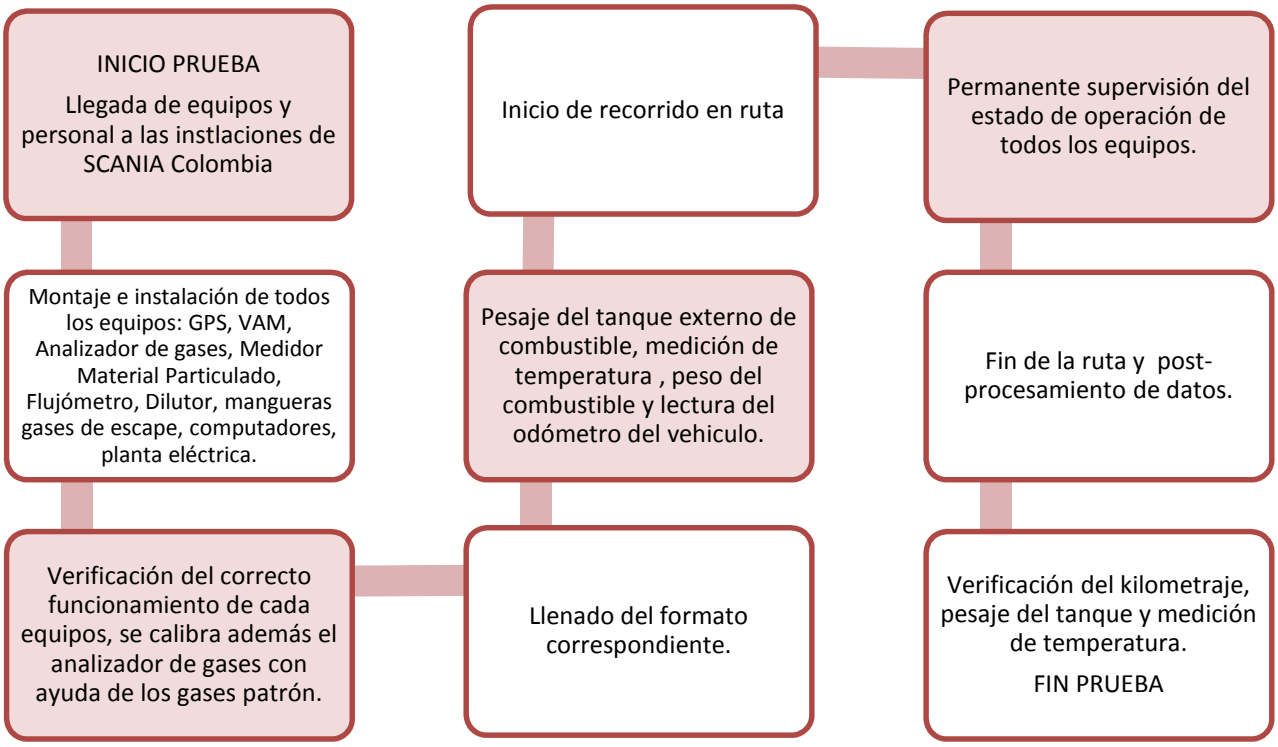
La determinación de la eficiencia energética, el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes atmosféricos se lleva a cabo mediante pruebas en ruta, en condiciones reales de tráfico durante días laborales en Bogotá. Cada vehículo es instrumentado con unidades para determinar su recorrido, sus condiciones de operación, su consumo de combustible y sus emisiones de contaminantes atmosféricos. La Figura 1 y la Figura 2 muestran los procedimientos generales que se llevan a cabo durante las pruebas.

Figura 1 Esquema de actividades durante la medición de consumo de combustible durante la ruta completa.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2 Esquema actividades durante la medición de emisiones en ruta.



Fuente: Elaboración propia

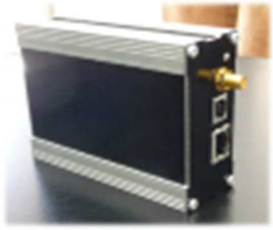
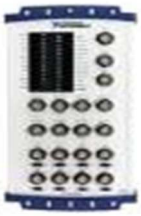
2.2 Descripción equipos de medición, sistema de muestreo de gases y material particulado

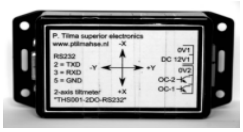
El sistema para medición de material particulado consta de dos medidores de material particulado (DEKATI ELPI + y Nanomet3), un computador, un flujómetro, una bomba de vacío y conectores. El sistema de medición de gases consta de 2 analizadores de gases (Testo 350 y Brain Bee AGS 688), un flujómetro, un GPS, un medidor de temperatura ambiente y humedad relativa, una fuente de poder, una batería de 12V, un computador, un compresor de 9 CFM sistemas de conexión y manta térmica. El sistema de suministro eléctrico consta de la unidad electrógena (5 KW) y cableado.

Las especificaciones de los equipos empleados para la medición de las emisiones se describen en la

Tabla 1 Especificaciones de los Equipos de Medición Usados

Nombre	Descripción
Elpi Plus 	Dekati Elpi plus (ELPI+) es un instrumento para mediciones en tiempo real de emisiones vehiculares de material particulado, en el rango 0.03-10 µm. El principio de operación está basado en una cascada de impactadores que reciben las partículas previamente cargadas eléctricamente. 14 etapas de muestreo y distribución de concentraciones para cada una de ellas. Medición de aire ambiente o muestras previamente procesadas mediante sistemas de dilución. Incluye software especializado. Resolución de muestreo de hasta 10 hz.
NanoMet 3 	Contador de partículas. Rango de medición de 10 a 700 nanómetros. Sistema integrado de dilución de 10, 100 y 300 a 1. Sonda de muestreo con calentamiento. Alimentación 12 VDC o 120 AC.

AGS-688 	Analizador de gases Brain Bee AGS-688 • CO de 0 a 9,99 %vol Res. 0,01 • CO2 de 0 a 19,9 %vol Res. 0,1 • HChexano de 0 a 19.999 ppmvol Res. 1 • 02 de 0 a 25 %vol Res. 0,01 • No de 0 a 5000 ppmvol Res 1 • Lambda de 0.5 a 5 Res. 0,001
TESTO 350 	Analizador de gases TESTO 350 • CO(H2-compensated)-sensor, 0…10000 ppm, resolution 1 ppm • NO-Sensor, 0…4000 ppm, resolution 1 ppm • NO2-Sensor, 0…500 ppm, resolution 0.1 ppm • SO2-Sensor, 0…5000 ppm, resolution 1 ppm • CO2(NDIR)-sensor, 0…50 Vol %, resolution 0.01 Vol %, infrared measurement principle condensate trap and CO2 absorption filter with refill pack • CxHy-sensor, methane 100…40000 ppm, propane 100…21000 ppm, butane 100…18000 ppm, resolution 10 ppm.
VAM Unit 	(Vehicle Activity Monitor) GPS de alta sensibilidad que permite el monitoreo de vehículos mediante seguimiento satelital con alta precisión y autonomía de hasta 7 días de muestreo continuo. 1Hz de muestreo. Capacidad de almacenamiento de datos de sensores externos.
NI USB-6212 BNC 	Módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción. Ofrece ocho entradas analógicas BNC diferenciales (pueden usarse como 16 de una sola terminal); velocidad de muestreo de 400 kS/s; dos salidas BNC analógicas; 24 líneas de E/S digital (ocho BNC); cuatro rangos de entrada programable (±0.2 V a ±10 V) por canal; disparo digital; dos contadores/temporizadores y una terminal BNC definida por el usuario.

NI USB-6212 	Módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 400 kS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (±0.2 V a ±10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.
DWYER DPG 	DWYER Series DPG Medidor de presión digital. Con exactitud del ±0,5% de la escala completa. Rango de medición de 0 a 500 bares. Selección de unidades y congelamiento de pantalla.
TILT001-2DO-USB 	Inclinómetro de dos ejes Con comunicación USB
GPS Columbus V900 	Medidor GPS marca columbus con sistema de almacenamiento de datos

2.3 Descripción de rutas para pruebas de consumo de combustible y emisiones.

La ruta descrita en el presente documento es representativa para los recorridos realizados por los buses tipo PADRON del SITP (Convenio SDA-UNAL 013 de 2012). La ruta inicialmente seleccionada se utilizó para las pruebas en consumo, puesto que aportaba una información muy valiosa al poder someter los vehículos a distintos tipos de tráfico durante distintas horas del día.

Para la prueba de emisiones, la ruta anteriormente seleccionada tuvo que ser recortada debido a la necesidad de contar con mediciones que puedan ser repetibles, es decir, que estén influenciadas en la menor medida posible por factores externos puntuales, tales como accidentes de tránsito, trancones poco usuales, entre otros. Por lo tanto, se debía garantizar que las pruebas fueran repetibles sin prescindir de las características principales de la ruta original, las cuales son: poseer una pendiente significativa, conservar la pendiente promedio, poseer un tramo llano considerable el cual garantice conocer el comportamiento de los vehículos en estas condiciones y, por último, conservar la velocidad promedio, para lo cual se debía conservar la intensidad del número de paradas.

2.3.1 Ruta para consumo de combustible

La ruta seleccionada, de forma general, consiste en un recorrido en sentido oriente – occidente en la primera etapa, sur – norte en la segunda etapa y norte – sur en la etapa final donde se regresa hasta el punto de inicio. Esta ruta recorre puntos claves de la ciudad, como el centro histórico, la Avenida Circunvalar, la zona de las universidades sobre la Calle 19 con Carrera 3ra, el sector sur de la Avenida Primero de Mayo y la entrada hacia Bosa, cruzando por Patio Bonito, el sector del Parque Metropolitano Simón Bolívar, el Campus de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, el sector Norte de la Avenida Ciudad de Quito (Carrera 30) y la Avenida 19.

El recorrido es circular, tiene una extensión de 73,9 Km y la pendiente máxima que se enfrenta es de 12,3%. El perfil de elevación de la ruta se muestra en la Figura 4.

La ruta inicia en la estación de Gas Natural de la calle 13 con av Boyacá. En esta estación de servicio se realiza el repostaje de combustible, además de un chequeo general del vehículo y de los equipos de medición. Por último se diligencian los formatos correspondientes a las pruebas de consumo de combustible. De allí se dirige hacia la calle 6 con carrera 24, tomando la Av 68 al sur, la calle 3, la Tv 42 y luego la calle 6 hacia el oriente.

Al llegar a la calle 6 con carrera 24, se toma esta última hacia el norte, posteriormente la ruta se dirige al oriente por la calle 19, donde se inicia un ascenso hacia la avenida circunvalar desde la Universidad de los Andes. En esta etapa es donde se evalúan los vehículos en ascenso. El

recorrido continúa por la Avenida circunvalar hacia la iglesia del barrio Egipto hasta llegar a la calle 6ta. Se toma la calle 6ta hacia el occidente. Este tramo de la ruta es claramente en descenso hasta llegar a la carrera 30, a partir de la ahí la ruta se puede considerar de nuevo como llana puesto que tiene una pendiente muy baja, inferior al 3%.

El recorrido se extiende hacia el occidente por la calle 6 hasta la carrera 42. Al llegar a la carrera 42 la ruta cambia su sentido hacia el sur hasta la calle 3. Posteriormente se transita por la calle 3 hasta llegar a la carrera 68. Se avanza hacia el sur nuevamente por la carrera 68 hasta la avenida primero de Mayo, por esta vía la ruta se dirige hacia el suroccidente, llegando hasta Bosa, en donde se hace el retorno para regresar por la misma ruta, es decir, por la primero de Mayo hasta la carrera 68. Posteriormente se toma la carrera 68 en dirección norte hasta la calle 53, donde se gira hacia el oriente pasando por la Universidad Nacional de Colombia. Luego se continúa por la Carrera 30 (NQS) hasta la Calle 127 para retornar finalmente por la carrera 19 y regresar por la carrera 30 hasta la Calle 19.El tráfico en la ruta es elevado, sin llegar a presentar trancones que superen los 20 minutos en los días de pruebas y de reconocimiento de la ruta.

El estado de la vía y de las calles es aceptable para la circulación de vehículos de las dimensiones y el peso de un bus tipo PADRON. Sin embargo, en la zona del centro aledaña a la Universidad de los Andes las vías son muy estrechas y no están preparadas para la circulación y el peso de este tipo de vehículo, estando las calles cubiertas con adoquines que presentan un deterioro considerable.



Figura 3. Recorrido de la ruta para evaluación de consumo de combustible de buses PADRON.
Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®



Figura 4. Perfil de elevación de la ruta para las pruebas de consumo de combustible.
Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®

2.4 Ruta para medición de emisiones

La ruta para medición de emisiones parte de un centro de operaciones instalado en Scania Colombia, dadas las facilidades que se ofrecen para hacer el repostaje de combustible en la estación de gas natural cercana, almacenamiento e instalación de equipos y soporte técnico y logístico para las pruebas y el vehículo (Véase Figura 5).

- La ruta parte de la Estación de servicio de Gas Natural ubicada en la calle 13 con Av Boyacá desde donde se parte hacia la Universidad Nacional Sede Bogotá, Calle 53 con carrera 30. De allí se toma hacia el sur por la carrera 30, con una pendiente muy reducida que podría clasificarse como llana. Posteriormente, se dirige al oriente por la calle 19, donde se inicia un ascenso hacia la avenida circunvalar desde la Universidad de los Andes. En esta etapa es donde se evalúan los vehículos en ascenso, posteriormente se inicia el descenso desde la sede la Macarena de la Universidad Distrital.

- El descenso continúa por la iglesia de Egipto y por la calle 6. Desde la Calle 6 con Carrera 30, la ruta se puede considerar de nuevo como llana puesto que tiene una pendiente muy baja.

- El recorrido continúa hacia el occidente por la calle 6 hasta la carrera 42, se toma la carrera 42 hasta la calle 3 y posteriormente se continua por la calle 3 hasta la carrera 68, donde se toma la carrera 68 en dirección norte, hasta llegar a la Calle 13 donde se gira hacia el occidente (siguiendo el correspondiente desvío dado que no existe acceso directo al puente vehicular), por la cual se avanza hacia el oriente y se cierra el circuito ingresando a la Estación de servicio de Gas Natural.

- La distancia total recorrida para un ciclo de medición es de 32,3 km.

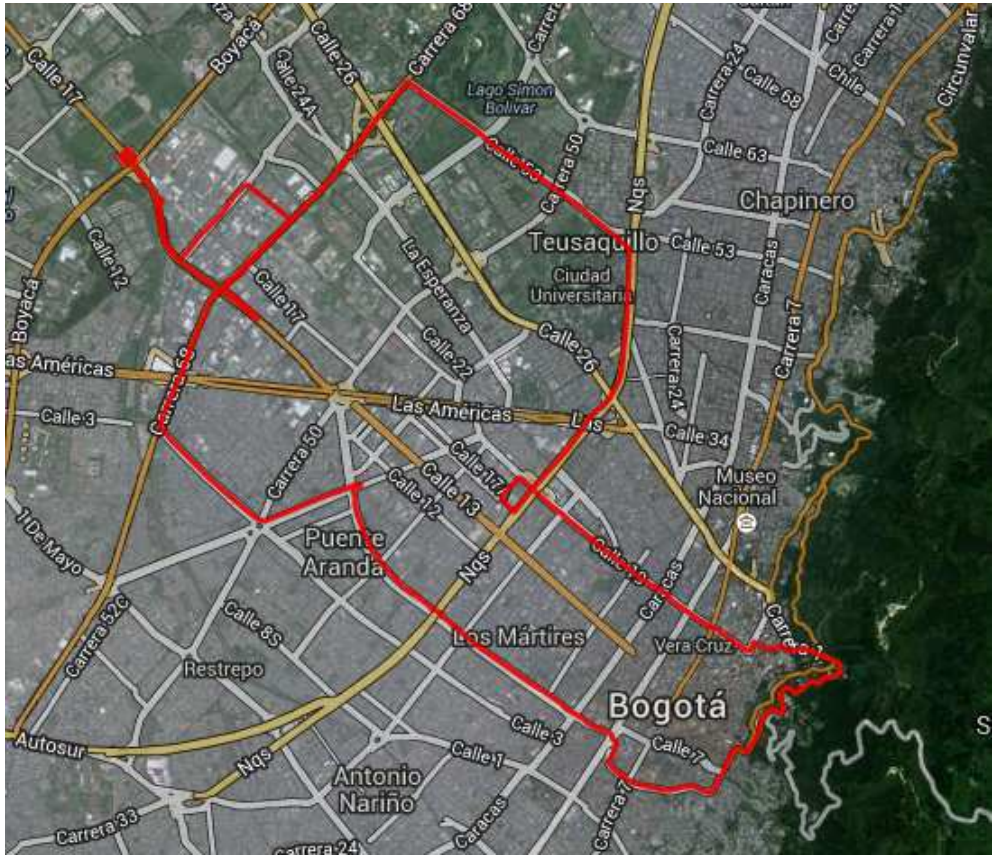


Figura 5 Recorrido ruta bus PADRON para medición de emisiones.
Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®

Perfil de elevación ruta bus PADRON para medición de emisiones



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®

Para las pruebas de emisiones, se repitieron las paradas definidas en la ruta general. En total, se practicaron veinte (20) paradas durante el recorrido, con una duración de doce (12) segundos por parada. Estas paradas fueron definidas previamente de manera clara durante la selección de la ruta general y atienden consideraciones de las detenciones del sistema zonal de SITP, flujo de pasajeros, disponibilidad de paraderos y conveniencia de la vía.

En la prueba de consumo se realizaron sesenta y cuatro (64) paradas mientras en la prueba de emisiones se realizaron veinte (20) paradas, lo cual corresponde aproximadamente a una parada por cada kilómetro recorrido lo cual es suficiente para determinar el comportamiento de cada uno de los buses durante las desaceleraciones, paradas y posterior arranque o periodo de aceleración. Las paradas corresponden a las descritas en la Tabla 2

Tabla 2 Descripción de las paradas durante los recorridos en ruta, para la ruta completa. Para el caso de la ruta recortada son las mismas excepto desde la parada #15 hasta la #28 y desde la #35 hasta la #62.

Parada No.	Lugar	Parada No.	Lugar
1	Carrera 24 entre Calles 9 y 10	32	Avenida68 Calle 26
2	Carrera 24 Calle 17	33	Calle 53 Carrera 66A
3	Calle 19 con Carrera 22	34	Calle 53 Carrera 54
4	Calle 19 Avenida caracas	35	Calle 53 Icontec
5	Calle 19 Carrera 7	36	Carrera 30 Estadio El Campín
6	Universidad de los Andes Edificio ML	37	Carrera 30 Calle 63F, Estación Simón Bolívar
7	Circunvalar - Instituto Roosevelt	38	Carrera 30 Calle 68, antes del puente
8	Circunvalar Barrio Egipto	39	Carrera 30 Calle 72, antes del puente
9	Calle 6 Carrera 5ta	40	Carrera 30 Calle 80
10	Calle 6 Avenida caracas	41	Diagonal 92 Calle 93
11	Calle 6 Carrera 24	42	Carrera 19 Calle 100
12	Calle 6 Carrera 32, después semáforo	43	Carrera 19 Calle 116
13	Calle 6 Carrera 42	44	Carrera 19 Calle 125
14	Transversal 42 Calle 3	45	Carrera 19 Calle 125
15	Calle 3 Carrera 56	46	Carrera 19 Calle 116
16	Avenida Carrera 68 Calle 2	47	Carrera 19 Calle 100
17	Avenida 1º de Mayo Carrera 69A	48	Diagonal 92 Calle 93
18	Avenida 1º deMayoCalle35C	49	Carrera 30 Calle 80,
19	Hospital de Kennedy	50	Carrera 30 Calle 72
20	Avenida 1º de Mayo Calle 43	51	Carrera 30 Calle 68

21	Carrera 80 Calle 58	**52**	Carrera 30 Estadio El Campin
22	Carrera 80 Calle 58	**53**	Calle 53 UNAL
23	Avenida 1º de Mayo Carrera 80	**54**	Calle 53 Pablo VI
24	Avenida 1º de Mayo Calle 43	**55**	Calle 53 Carrera 66 a
25	Hospital de Kennedy	**56**	Avenida 68 Calle 26
26	Avenida1º de Mayo Calle 35c	**57**	Avenida 68 Avenida La Esperanza
27	Avenida 1ºde Mayo Carrera 69 a	**58**	Avenida 68 Calle 19
28	Avenida Carrera 68 Calle 2, puente peatonal	**59**	Calle 3 Avenida 68
29	Avenida 68 Calle 10	**60**	Calle 3 Carrera 54
30	Avenida 68 Calle 19	**61**	Calle 6 Transversal 42
31	Avenida 68, Avenida La Esperanza,	**62**	Calle 6 Carrera 32A

Fuente: Elaboración propia

A continuación se anexa un mapa con las paradas realizadas para la ruta larga y corta:

Figura 6 Recorrido y paradas realizadas para medición de emisiones y consumo de combustible.



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®

2.5 Protocolos de prueba de validación.

Los ensayos realizados tienen como objetivo principal la evaluación del desempeño del vehículo bajo condiciones de cada prueba; estas son realizadas aplicando protocolos desarrollados por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, que siguen las recomendaciones de las prácticas y estándares SAE J1491, SAE J1635, SAE J688. Los protocolos y su alcance se describen a continuación.

Tabla 3 Descripción de los protocolos usados

Prueba	Objetivo	Descripción
Aceleración	Determinar los valores máximos de distancia recorrida, velocidad final y tiempo.	Con un sistema de posicionamiento global (GPS)2 se determina el cambio de velocidad, tiempo y distancia sobre una pista plana con una pendiente no mayor al 1%.
recuperación en plano	Determinar la flexibilidad del vehículo para hacer cambios de velocidad en una marcha establecida	Con una velocidad inicial y una marcha fija se determina si el vehículo tiene la capacidad de recuperar velocidad hasta alcanzar el tope máximo de revoluciones para cada marcha en particular.
arranque en pendiente	Evaluación repetitiva del arranque en pendiente del vehículo	Con el vehículo detenido se hace un arranque sobre pistas con diferentes pendientes y se evalúa su comportamiento.
Manejabilidad	Evaluación subjetiva del desempeño del motor y de las condiciones de conducción y operación.	Bajo un ciclo de conducción establecido por SAE J1635, se hacen cambios de velocidad en función del tiempo y la distancia. La respuesta del motor según los criterios establecidos por dicha norma es la evaluación de desempeño que se le hace al mismo.

frenado	Evaluación repetitiva de la capacidad de frenado del vehículo.	Para determinadas velocidades iniciales se determina la distancia y el tiempo requerido por el vehículo para detenerse completamente evitando el bloqueo de las llantas.
Flexibilidad – Habilidad de giro	Determinar radios de giro y distancias de sobrepaso, aproximación a paradero.	Determinación de los radios de giro mínimos del vehículo para completar un giro de 180º. Así mismo medición de las distancias de sobrepaso a un vehículo idéntico y de aproximación a paradero.

2.6 Rutas de evaluación de desempeño:

Las locaciones para la realización de las pruebas de validación fueron las siguientes:

2.6.1 Pruebas de frenado, arranque en pendiente, aceleración y recuperación en plano.

Estas pruebas requieren de una pista de longitud superior a los 5 km en línea recta, con un desnivel inferior al 1%. Para tal fin se movilizó el vehículo hasta el kilómetro 16 de la vía Bogotá – Medellín (50) y se usó esta vía entre el sector comprendido por Puente Piedra y el Rosal, km 16 a 22.

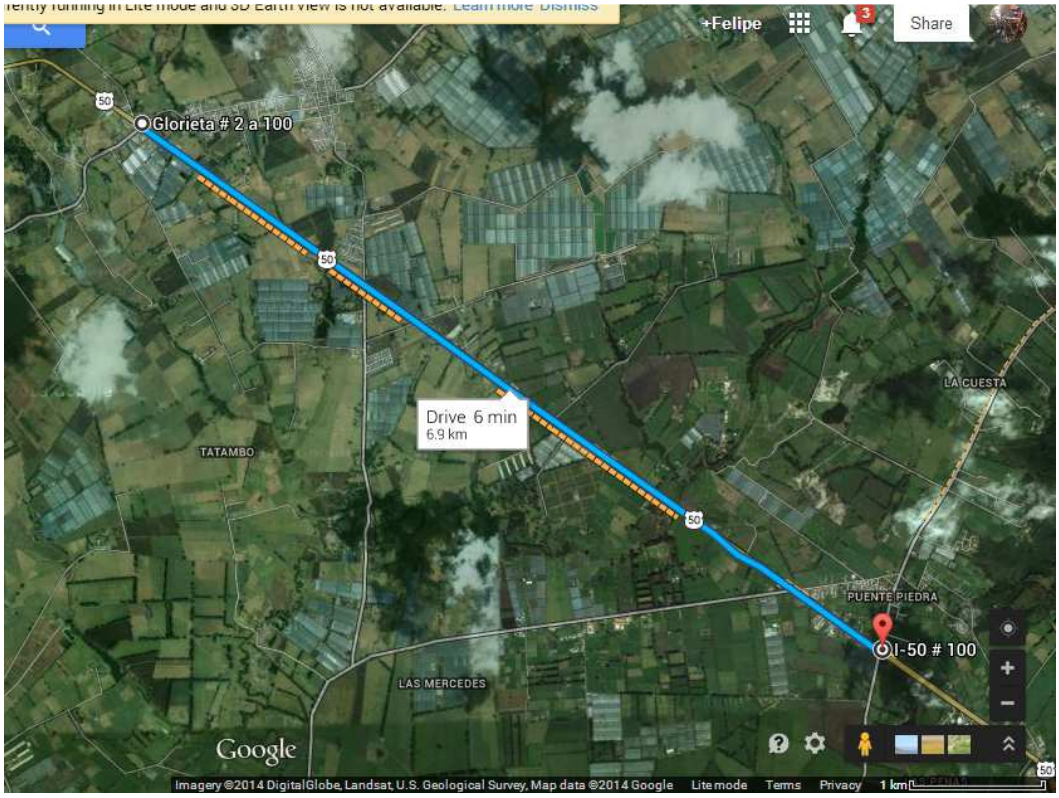


Figura 7. Detalle de la ubicación de la pista de pruebas llana.
(Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®)

2.6.2 Pruebas de habilidad de giro y aproximación a paraderos.

Para estas pruebas, se requiere un espacio amplio que permita maniobrar el vehículo en los ejercicios de parqueo, adelantamiento y giros. El lugar de pruebas fue el patio del portal Américas, en donde se encontraba un simulador de estación para parqueo y una zona libre lo suficientemente amplia para hacer los giros del vehículo con seguridad.

2.6.3 Pruebas de arranque en pendiente.

Para esta prueba se evaluó el bus en dos zonas. La primera en el ascenso al alto del vino, km 22 a 26 de la vía que comunica a Bogotá con Medellín, donde se encontraron pendientes del 8 y 14%. Posteriormente se evaluó el bus en una pendiente del 22%, ubicada en el barrio San Cristóbal al sur oriente de la ciudad, en la Tv 3B este, entre calles 21S y 31AS. A lo largo de este asenso se

encuentran pendientes entre el 15 y 22%. El vehículo fue evaluado en las pendientes máximas allí encontradas.

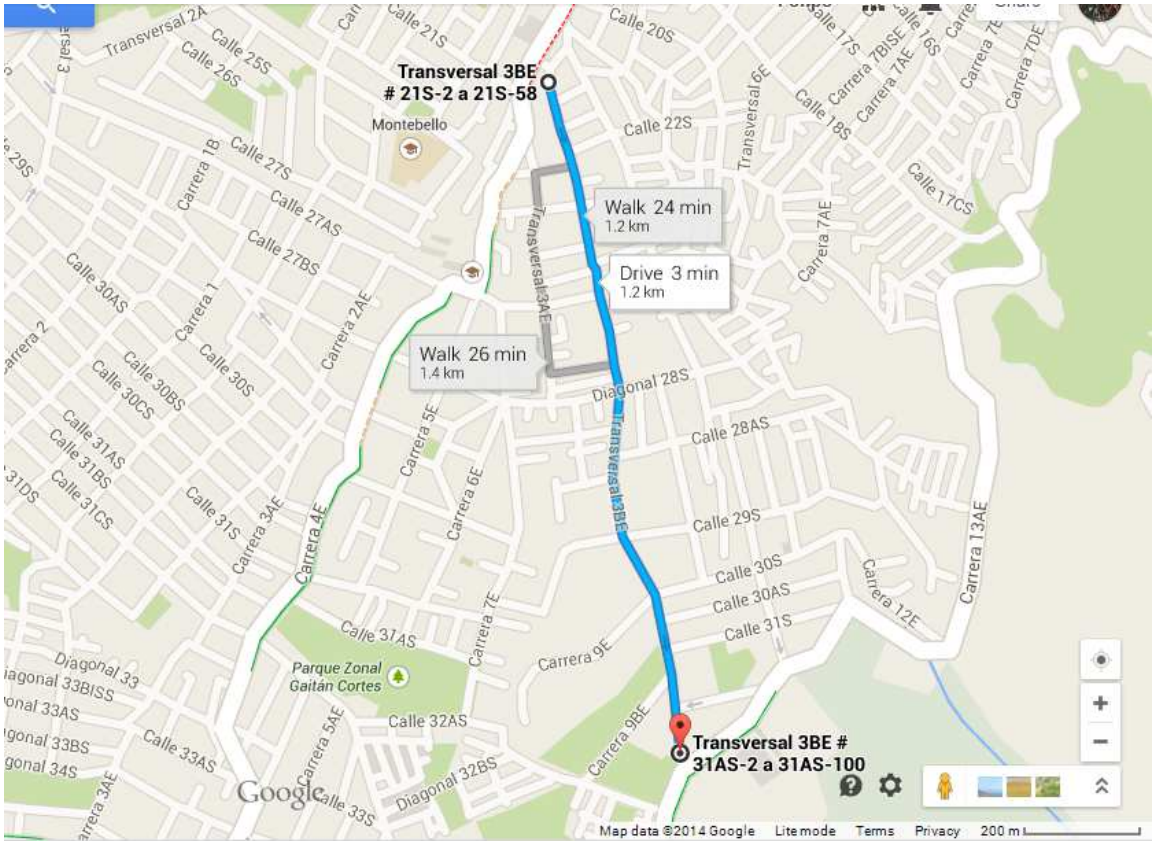


Figura 8. Ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal.
(Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®)



Figura 9. Perfil elevación ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal

(Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®)



Figura 10. Ruta y perfil de elevación prueba de arranque en pendiente, Alto del Vino.

(Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®)

2.7 Descripción del vehículo.

Las especificaciones del vehículo se encuentran en la Tabla 4

Tabla 4 Especificaciones del Vehículo Evaluado Scania K340-Chasis ómnibus urbano de 15 metros

Peso bruto vehicular	24600 Kg
Peso en vacío	15600 Kg
Peso máximo eje 1	7100 kg
Peso máximo eje 2	11500 kg
Peso máximo eje 3	6000 kg

Motor	OC09 102/340 hp Euro 6
Volumen de Desplazamiento	9.3 L
Cilindros	5
Nivel de emisiones	Euro 6
Par motor máx. (1100-1400 rpm)	1600 Nm
Potencia máx. (1900 rpm)	250 kW (340 HP)
Control de emisiones	Catalizador de 3 vías
Transmisión	ZF 6 AP 1400 B
Control de la caja de cambios	Caja de cambios automática
Tipo de selector de la caja de cambios automática	D-N-R 1-2-3 vertical
Programa de cambio de marchas	Ecolife 1
Retardador	ZF
Control del Retardador	Automático

2.8 Condiciones de Carga del vehículo:

Para las pruebas se consideran dos escenarios diferentes con diferente carga para cada uno de ellos. En las pruebas de desempeño, el vehículo debe estar cargado según el GWV o peso bruto vehicular declarado por el fabricante del vehículo. Para las pruebas de emisiones y consumo de combustible, se debe cargar al 70% de la carga útil disponible, que corresponde al peso bruto vehicular menos el peso en vació del vehículo con el 90% de los fluidos y combustible.

En la prueba dinamométrica el vehículo no debe ser cargado, ya que el trabajo sobre la rueda es efectuado por la resistencia que presentan los rodillos al giro, gobernada por el valor de la potencia que se quiera extraer en la prueba. El límite de peso lo marca el dinamómetro, quien tiene un peso máximo en el eje de potencia de 10 toneladas. Por esta razón, en un vehículo de trabajo pesado, era ideal retirar la carga para no sobrepasar este valor.

Tabla 5. Pesos vehiculares para las pruebas ejecutadas.

Prueba	Condición	Porcentaje de Carga útil	Valor medido [kg]
Reconocimiento	Peso en vacío	0%	15600
Desempeño	Peso bruto	100	23800
Emisiones	70% pasajeros	70	21720
Dinamómetro	Sin carga	0	15600
Consumo Combustible	70% pasajeros	70	21720

2.9 Descripción de las pruebas.

2.9.1 Arranque en pendiente.

La prueba realizada al vehículo corresponde a la designación: "Arranque en pendiente. Startability".

La prueba de "*Startability*" o arranque en pendiente consiste en la evaluación repetitiva del arranque en pendiente del vehículo en estado estable con carga predeterminada con la cual se obtiene datos que muestran la respuesta del vehículo en condiciones reales.

2.9.1.1 Procedimiento

Antes de comenzar la prueba, se deben inspeccionar el sistema de frenos del automotor, con el único fin de evitar cualquier catástrofe. Para un gradiente determinado de ruta, el vehículo debe iniciar la marcha en el cambio seleccionado con el acelerador completamente libre. Se debe verificar que al momento de efectuarse la prueba no exista un obstáculo para que el acelerador llegue a su máxima posición, así como también para el accionamiento libre del embrague. Adicionalmente se debe verificar que el arranque se lleve a cabo en forma suave y rápida de tal manera que el vehículo avance. El vehículo se evalúa positivamente cuando puede sostener la marcha sin apagar el motor.



Figura 11. Vehículo en prueba en el ascenso en el barrio San Cristóbal.

2.9.2 Aceleración.

Esta prueba define la capacidad para acelerar del vehículo partiendo desde el reposo. Se basa en la norma SAE 1491 y en ella se busca determinar el tiempo necesario para alcanzar 20 km/h, 40 y 60 km/h. para ello se ubica el vehículo en una pista plana y libre, y desde el reposo se acelera de manera natural, sin realizar maniobras atípicas con acelerador, frenos o embrague. Así mismo, en el caso de un vehículo con transmisión automática, se debe hacer la prueba en la posición de "drive". Mediante rastreo GPS, el velocímetro del vehículo y un cronometro, se realizan 6 repeticiones o más del ejercicio de aceleración, siempre que los resultados no presenten variaciones superiores al 10%, donde serán descartados y deben ser repetidos.

2.9.3 Frenado.

En esta prueba el vehículo es conducido a velocidad constante hacia una zona de frenado. Al llegar a la señal de frenado, se deben aplicar los frenos de manera natural para al detenerse, medir la distancia de frenado. Se realizan 6 repeticiones o más del ejercicio de aceleración, siempre que los

resultados no presenten variaciones superiores al 10%, donde serán descartados y deben ser repetidos.



Figura 12. Prueba de frenado.

2.9.4 Recuperación.

Esta evaluación determina la capacidad del vehículo para acelerar, partiendo desde una velocidad constante. En ella se hacen ejercicios repetitivos a lo largo de una pista con una pendiente inferior al 1%. El objetivo es que el vehículo parte de una velocidad constante, y acelera hasta una velocidad determinada. Mediante rastreo GPS, el velocímetro del vehículo y un cronometro, se realizan 6 repeticiones o más del ejercicio de aceleración, siempre que los resultados no presenten variaciones superiores al 10%, donde serán descartados y deben ser repetidos.

2.9.5 Radio de giro, aproximación a paradero y sobrepaso.

Estas pruebas tienen como objetivo definir las distancias mínimas que requiere el vehículo para su operación dentro de sistemas de transporte. En ella se somete al vehículo a hacer ejercicios de parqueo en carriles delimitados y verificar la longitud de vía necesaria para realizar dicho ejercicio.

En la prueba de radio de giro, se determina el espacio mínimo que requiere el bus para hacer un giro completo de 180 grados, definiendo el radio interior, el espacio mínimo de rodadura y el espacio general de carrocería o pared - pared.

2.9.5.1 Definiciones

Centro de giro: Punto en cual todas las partes del vehículo ó combinación de este describen un radio constante durante una vuelta completa. Para un giro ideal, libre de cualquier obstáculo, la prolongación del eje de giro de las cuatro llantas o más pasan todas por este punto.

Radio de giro: La distancia desde el centro de giro al punto de contacto de la llanta más lejana a este primero con el piso.

Diámetro de giro: El doble del radio de giro.

Diámetro de giro Pared a Pared: Circunferencia mínima en la cual pude el automotor girar en un radio de tal manera que su chasis y su cuerpo como tal girar sin tropezar con ningún elemento externo.

Diámetro de giro Andén a Andén: Circunferencia mínima en la cual puede el automotor girar en un radio de tal manera que sus llantas pasen sin tocar o sufrir daño alguno con el andén.

2.9.5.2 Procedimiento.

- Construir con unos conos una vía recta de dos carriles cuyo ancho sea el de una trocal y con una longitud de al menos tres veces la longitud total del vehículo.
- Alinear el bus perfectamente en el carril izquierdo.
- Proyectar el punto delantero más sobresaliente del vehículo sobre el piso con una plomada. Seguidamente trazar una línea perpendicular al carril y que pase por dicho punto (línea de origen).
- Proyecte el lado derecho del bus a lo largo del carril de la troncal.
- Trazar un eje central a lo largo de la vía.
- Operar toda la dirección hacia la derecha y trasladar lentamente todo el vehicula al carril derecho. Durante la maniobra señale los puntos en los cuales cortan las líneas centrales del carril y la linea de proyección del lado derecho los siguiente puntos:

- Esquina Izquierda del Bomper.
- Rueda Delantera Izquierda (Eje A).
- Rueda Media Izquierda (Eje C)*
- Rueda Trasera Izquierda (Eje B).

- Medir las distancias de cada una de estas intersecciones a la línea de origen.



Figura 13. Ejercicio de aproximación a paradero.

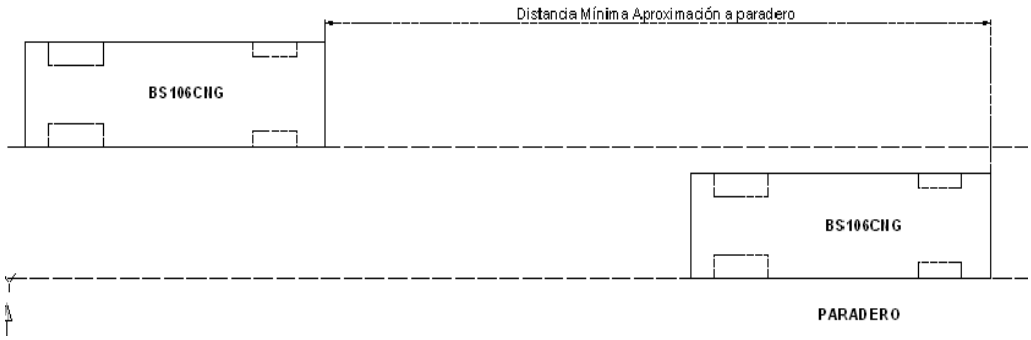


Figura 14. Esquema de la prueba de aproximación a paradero.

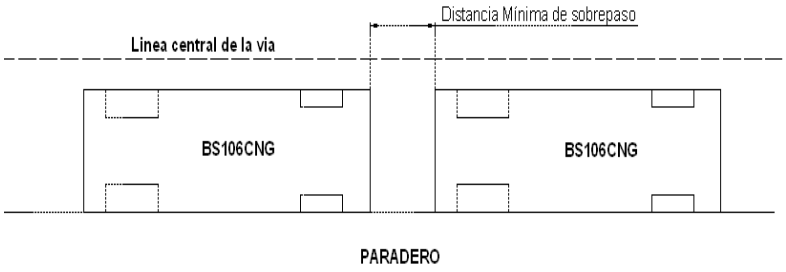


Figura 15. Esquema de la prueba de distancia mínima de sobrepaso.

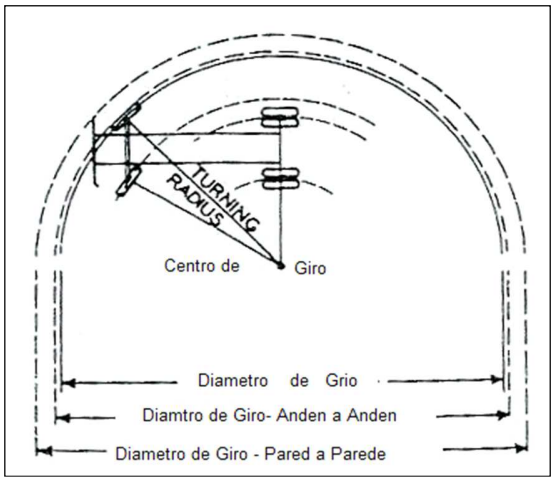


Figura 16. Mediciones tomadas en la prueba de radio de giro.

2.9.6 Emisiones.

Para la prueba de emisiones se instrumenta el equipo con:

- Sistema de direccionamiento de gases de escape
- Tubo Muestreador
- Equipos de medición
- Planta eléctrica de alimentación de equipos
- Sistemas de monitoreo GPS.

La prueba inicia posterior al repostaje de combustible, donde se inician los equipos, se permite el calentamiento de los mismos y del motor del vehículo y se inicializan los archivos de almacenamiento de los datos, con una frecuencia de muestreo de 1 segundo por equipo.

Durante la prueba se monitorea que los equipos funcionen correctamente, así como el modo de conducción del vehículo. Si al finalizar el recorrido el comportamiento de los equipos, el vehículo y las condiciones de tráfico de la prueba son satisfactorios se graban los datos para su posterior procesamiento. Se da inicio a un nuevo test o se da por finalizada la jornada según corresponda.



Figura 17. Sistema de muestreo de gases para la prueba de emisiones en ruta.

2.9.7 Banco dinamométrico.

Para el banco dinamométrico se siguen los siguientes pasos

- Verificación de que la carga en el eje de tracción no supere las 10 toneladas
- Ajuste de la carga
- Instalación del vehículo sobre los rodillos, alineamiento y aseguramiento del chasis a los puntos de fijación del freno.
- Validación de la desconexión de sistemas de control de tracción, anti bloqueo de frenos, estabilidad y otros pertinentes.
- Realización de la curva de potencia al freno
- Determinación de las cargas sobre las cuales se debe realizar la prueba de emisiones a carga constante. 0% 25% 50% y 75% de la carga máxima entregada al freno
- Instalación de tubo Muestreador y analizadores de emisiones contaminantes

- Pruebas de emisiones a carga constante
- Prueba de emisiones en ciclo de conducción bus padrón para la ciudad de Bogotá con una carga del 25% de la carga máxima entregada en el eje.
- Desmontaje del vehículo del freno
- Prueba de ruido en el tubo de escape.



Figura 18. Montaje de equipos de medición de emisiones para la prueba en el banco dinamométrico.



Figura 19. Montaje del vehículo en el banco dinamométrico.

2.9.8 Ciclo de conducción Bogotá Padrón.

Para la prueba sobre el chasis dinamométrico, se implementó un ejercicio de evaluación del comportamiento de las emisiones del vehículo simulando el ciclo de conducción elaborado por la universidad nacional para la tipología de buses padrones en su operación cotidiana en Bogotá. Este ciclo, fue elaborado en el marco del convenio 0013 de 2012 entre la Universidad Nacional y la Secretaría de Ambiente de Bogotá.

La Figura 20 presenta el ciclo de conducción obtenido para los vehículos tipo PADRON del servicio zonal.

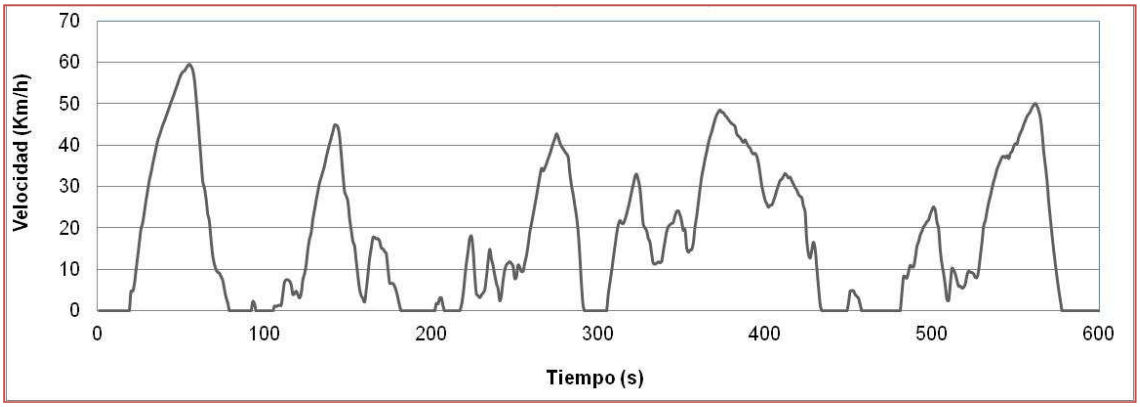


Figura 20. Ciclo de conducción para el servicio zonal tipo PADRON de Bogotá.

Fuente: Convenio SDA-UNAL 013 de 2013

Tabla 6. Comparación entre los ciclos de conducción estudiados y los ciclos internacionales normalizados

Parámetros	PADRON	FTP - 75	EUROPEO EC15
Duración ciclo (s)	600	1874	780
Velocidad media de conducción (Km/h))	17.2	34.1	18.4
Aceleración media (m/s^2)	0.45	0.61	0.64
Desaceleración media (m/s^2)	-0.51	-0.7	-0.75
Proporciones de tiempo en ralentí (%)	25.3	17.9	30.8
Proporciones de tiempo de aceleración (%)	39.9	32.4	21.5
Proporciones de tiempo de desaceleración (%)	35.7	28.2	18.5
Proporciones de tiempo crucero (%)	24.3	21.2	29.2
Coeficiente de correlación (R)	68%	-	-

Fuente: Convenio SDA-UNAL 013 de 2013

2.9.9 Eficiencia energética.

Para prueba de eficiencia, se inicia en la estación de repostaje, monitoreando las temperaturas ambiente antes del repostaje. Se instala el medidor de presión digital y se comienza a suministrar

combustible hasta que se complete el llenado de los tanques. Se registran las presiones iniciales y finales.

Se hace el recorrido en la ruta establecida, realizando las paradas previamente pactadas. Al finalizar la ruta, se dirige a la estación de combustible, para repetir el proceso de repostaje de combustible. Se registran los valores de temperatura ambiente y presiones del tanque y se da por finalizada la jornada.

2.10 Características de manejo.

El tipo de manejo es un parámetro fundamental al momento de analizar las emisiones vehiculares. Para la prueba de ruta siempre se operó el vehículo por parte de un conductor especializado en este tipo de vehículos quien hace parte del equipo de trabajo de Scania Colombia. Al tener un conductor para todas las pruebas, se elimina el factor de variabilidad que induce el diferente modo de conducción de diferentes personas..

El vehículo evaluado en este estudio tiene la característica común de disponer de un acelerador electrónico y programación electrónica de la transmisión, lo cual tiene la enorme ventaja de disminuir los efectos del tipo de manejo entre distintos conductores puesto que la aceleración máxima es regulada, de igual forma para que la velocidad máxima, por lo tanto, las condiciones de operación del vehículo se acercan mucho más a las condiciones de máxima eficiencia de acuerdo a como el fabricante haya realizado la programación de dicho dispositivo.

La clave de funcionamiento de este sistema, está en el desarrollo por parte del fabricante del algoritmo de gestión del motor-transmisión para las condiciones particulares de la ciudad de Bogotá.

2.11 Metodología para la adquisición de datos, prueba de emisiones.

2.11.1 Pre-procesamiento de datos.

En el Anexo 1 se encuentran consignados los datos suministrados en campo por los analizadores de gases y pm junto con los datos reportados por los otros equipos, en formato de archivo Excel. En el Anexo 2 se cada vehículo medido se clasifica de acuerdo con la nomenclatura señalada en la Tabla 7 del presente documento. Cada vehículo recopila el número de pruebas efectuadas y los archivos pre-procesados como se muestra en el siguiente ejemplo:

Tabla 7. Descripción de las bases de datos pre-procesadas

Vehículo	No de pruebas practicadas	No. de archivos para cada prueba	Analizador/Equipo
Scania_E6_GN	T01 T02 T03	DEKATI-T01.dat	DEKATI DMM-230
		pp_DIA1_Test-Test1.csv	SEMTECH-D/G
		vam_dil_t01_0140_20121219_150524.txt	VAM

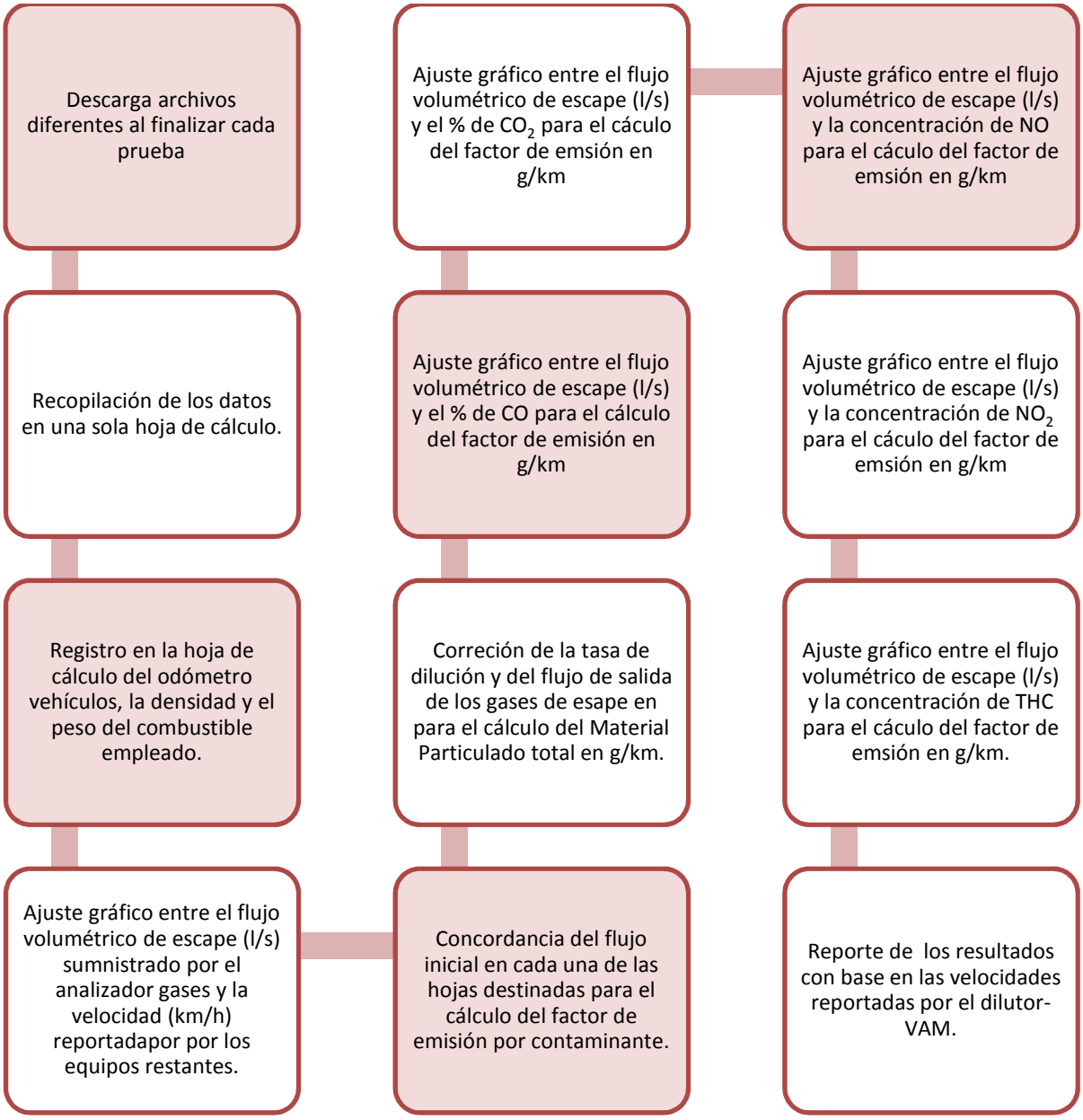
Fuente: Elaboración propia

Cada base de datos cuenta con cerca de 11.300 registros tomados segundo a segundo, es decir que para un vehículo sometido a tres (3) pruebas consecutivas, se procesan alrededor de 33.900 datos.

2.11.2 Procesamiento de datos.

El procesamiento para cada vehículo consistió en la integración de los reportes suministrados por DEKATI Elpi+ y Nanomet 3para la determinación del Material Particulado (PM) y los suministrados por los anlizadores de gases para los Óxidos de Nitrógeno (NOx), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (THC) y Dióxido de Carbono (CO2). La Figura 21, describe el paso a paso en el procesamiento de los factores de emisión.

Figura 21 Esquema de actividades efectuadas en el procesamiento de datos



Fuente: Elaboración propia

2.12 Ruido.

Se realiza una evaluación del ruido generado por el escape del motor según la normatividad vigente. En este caso se sigue el procedimiento descrito tal cual en la norma NTC 4194.

El equipo usado cuenta con las siguientes características.

- Rango de Medición: 50-110dB
- Precisión: +/- 0.7dB
- Filtro de ponderación de frecuencias tipo A
- Respuesta temporal rápida
- Resolución de la medición: 1s

3 Resultados

3.1 Pruebas de desempeño

3.1.1 Aceleración.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la prueba de aceleración del vehículo.

Tabla 8. Resultados de las pruebas de aceleración.

	Velocidad objetivo [km/h]		
Repetición	20	40	60
1	4.44	10.78	21.18
2	3.75	10	20.71
3	3.24	9.2	19.73
4	3.85	10.15	20.91
5	3.05	9.05	19.18
6	3.18	9.7	25.64
7	2.8	7.54	15.93
8	2.85	7.89	15.82
9	2.89	8.27	18.18
10	3.25	8.42	17.99
Promedio [segundos]	3.33	9.1	19.53

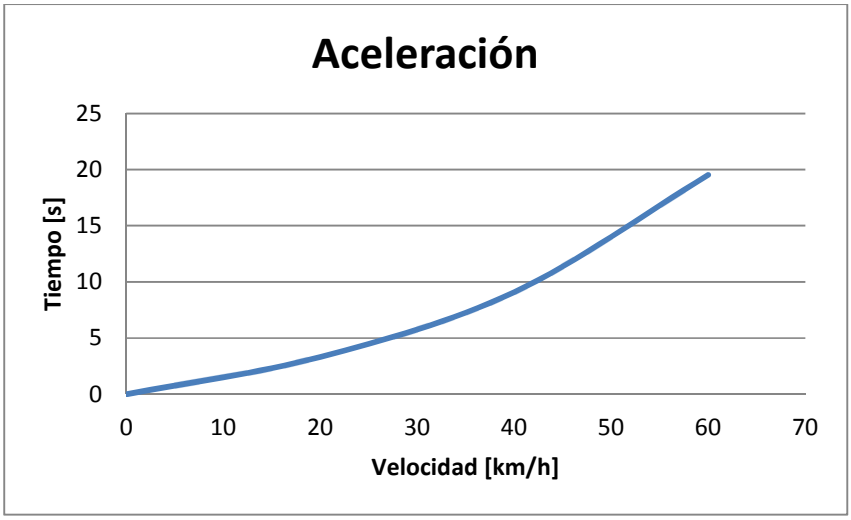


Figura 22. Perfil de aceleración para el vehículo evaluado.

3.1.2 Frenado.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la prueba de frenado del vehículo.

Tabla 9. Resultados de la prueba de frenado.

Distancia de frenado			
velocidad inicial	20 km/h	40 km/h	60 km/h
1	3.3	8.8	17.9
2	1.7	7.75	16.1
3	2.5	7.3	18.4
4	2.5	7.4	15.0
Promedio	2.5	7.8	16.8

3.1.3 Recuperación.

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la prueba de recuperación del vehículo.

Tabla 10. Resultados de la prueba de recuperación

	Rango velocidad

Repetición	20 - 40 km/h	40 - 60 km/h
1	7.94	12.09
2	7.56	11.41
3	8.02	14.06
4	8.39	14.06
5	9.06	12.33
6	9.56	10.31
7	9.55	10.75
8	8.56	11.38
Promedio [segundos]	8.58	12.04

3.1.4 Manejabilidad.

Los resultados de la evaluación de la manejabilidad del vehículo se presentan a continuación.

Tabla 11. Resultados de la evaluación de manejabilidad del vehículo.

Característica evaluada	Resultado
El motor sigue encendido después de apagarlo	NO
Explosión en múltiples de admisión ó escape	NO
Fluctuaciones de torque-movimiento del vehículo hacía adelante y atrás	NO
Golpeteo-Combustión anormal	NO
Encendido en falso	NO
Operación suave del motor	SI
Aumento de r.p.m. con apertura de mariposa	SI
Variación de velocidad en ralentí	NO
Apagado del motor después de alcanzar condiciones de operación	NO
Aumento de la velocidad del motor sin cambio en apertura de mariposa	NO
Vibración transmitida por el motor a la cabina	NO
Temperatura confortable en el sitio del conductor	SI

Temperatura confortable en los asientos sobre el motor	SI
Manejo del vehículo seguro y confiable	SI
Manejo suave del vehículo	SI
Encendido instantáneo del motor en la mañana.	SI

Adicional a este protocolo, se realizó un ejercicio de arranque de motor y operación en condiciones atmosféricas típicas de la madrugada en Bogotá. Para ello, se encendió el motor a las 3:00 horas del día viernes 7 de marzo en las instalaciones de Scania Colombia. La temperatura promedio a esa hora en la ciudad estaba entre 10 y 12 grados Celsius y el motor encendió con total normalidad. Posterior a ello se realizó un recorrido de evaluación. Como es natural, una vez encendido el motor, y alcanzada su temperatura de operación, este opera con normalidad en un rango de temperaturas normales de un lugar habitable por cualquier ser humano, entiéndase -25 a 45 grados Celsius. Esto es natural para cualquier motor de combustión interna y por las condiciones del combustible, gas con un punto de licuefacción -162^{o}, el tipo de tecnología empleada (inyección controlada con gestión electrónica y ciclos de retroalimentación para la cantidad de combustible), y las temperaturas mínimas de una ciudad como Bogotá (temperaturas mínimas anuales promedio de 9^{o}), se puede concluir que este motor nunca tendrá problemas de encendido a bajas temperaturas, según los históricos de temperatura de la ciudad.

De igual manera, el vehículo proviene de un país con estaciones climáticas, donde en invierno se pueden encontrar temperaturas promedio en invierno de -6^{o}. Esto, al ser un vehículo homologado para su uso en Suecia y los países de la unión europea con inviernos tanto o más fríos que el sueco, garantiza la operación del bus en un clima como el bogotano por simple inspección.

3.1.5 Flexibilidad – Radio de Giro.

En la Tabla 12 se presentan los resultados de la prueba de habilidad de giro, distancia mínima de sobrepaso y aproximación a paradero.

Tabla 12. Resultados de la prueba de habilidad de giro, habilidad de giro y sobrepaso. Distancias en metros.

Prueba	Aproximación		Sobrepaso		Diámetros		
	Izquierdo	Derecho	Izquierdo	Derecho	Giro	Andén	Pared
1	34.8	39.5	15.2	18.7	12.5	20.2	20.9
2	35.1	38.5	15.2	19.7	12.5	19.3	23.0

3	35.7	39.5	15.3	19.2	12.5	20.2	23.4
Promedio	35.2	39.2	15.2	19.2	12.5	19.9	22.4
máximo	35.7	39.5	15.3	19.7	12.5	20.2	23.4
mínimo	34.8	38.5	15.2	18.7	12.5	19.3	20.9

3.2 Pruebas de emisiones en ruta.

Durante la prueba de emisiones se registraron valores de emisión de gases contaminantes y material particulado. Este último se analizó mediante un equipo de amplio rango, con capacidad para medir partículas de hasta 10 micras de tamaño, y un contador de partículas que se centra en el rango de 10 a 700 nm, donde tiene una precisión mayor que el equipo de amplio rango.

Los resultados de las pruebas se consignan en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados prueba de emisiones. [g/km]

	THC	CO	NOx	CO2	PM10	PM2.5	Nanomet pm
T1	0.029647	3.215313	1.47E-05	1502.5	1.13E-06	2.99E-10	3.81269E-05
T2	0.066839	1.785407	4.6E-05	1889.645	1.29E-06	3.15E-08	4.18529E-05
Promedio	0.066839	1.785407	4.6E-05	1889.645	1.21E-06	3.15E-08	4.18529E-05

Es evidente como los niveles de emisión de material particulado son extremadamente bajos, tanto que los valores registrados por el equipo Dekati, de amplio rango de medición, carecen de precisión, dado que la concentración es muy baja, manteniéndose en el rango inferior de sensibilidad del equipo y en ocasiones por debajo del mismo. Tomando entonces los datos registrados por el equipo nanomet3, podemos notar una emisión de material particulado muy baja. También se evidencia, como a pesar de emitir muy poco, estas emisiones se reducen considerablemente luego de 7 u 8 minutos de prueba, tiempo en el cual se puede asumir el motor alcanza su rango óptimo de temperatura de operación.

También se pueden tomar como valores de interés, los consignados en la Tabla 14, donde se puede ver que el diámetro medio de las partículas ronda los 87 nanómetros, el valor medio de emisión ronda las 244 mil partículas por cm^3, un valor bastante bajo que es tan solo 3 veces la concentración media del aire ambiente y que según las zonas de una ciudad con alta contaminación como Bogotá, puede ser hasta inferior la emisión, que la concentración ambiente.

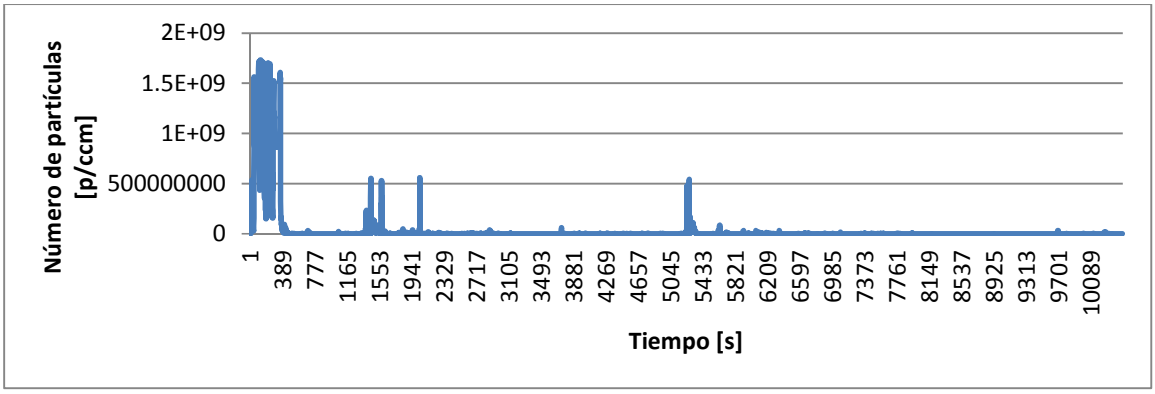


Figura 23. Rango de emisión de partículas para una ruta.

Tabla 14. Valores importantes de emisión de partículas.

	PN [p/ccm]	Diam. [nm]	PM [mg/m3]
Promedio	2448419	87.08936	0.072716
Max	1.73E+09	300	44.38772

En cuanto a las emisiones gaseosas, es importante observar los bajos niveles de emisión de CO e hidrocarburos sin quemar, algo esperado, dada la tecnología del motor y que el mismo, opera en mezcla estequiométrica y logra una combustión de alta eficiencia, además de complementarse con un sistema de catalizador de 3 vías, que elimina los productos de combustión intermedios.

3.3 Emisiones en banco dinamométrico.

Para la prueba en banco dinamométrico solo se registran los resultados para las cargas del 0% y 25%, dado que el vehículo operó de manera inestable en cargas del 50% y 75%. Esta inestabilidad es atribuida a la falta de capacidad del freno, que puede extraer de manera puntual la potencia máxima en la rueda, mas no cuenta con la robustez necesaria para sostener altos valores de carga por tiempos prolongados.

A continuación se presenta la curva de potencia entregada por el dinamómetro. Debido a que el vehículo cuenta con transmisión automática, es difícil generar una curva suave, al intervenir la

transmisión durante la prueba. Es por ello que el motor aceleraba y frenaba para una misma posición de acelerador al ir engranando diferentes cambios, en un estado para el que la transmisión no está programada.

Mustang Dynamometer Test Report

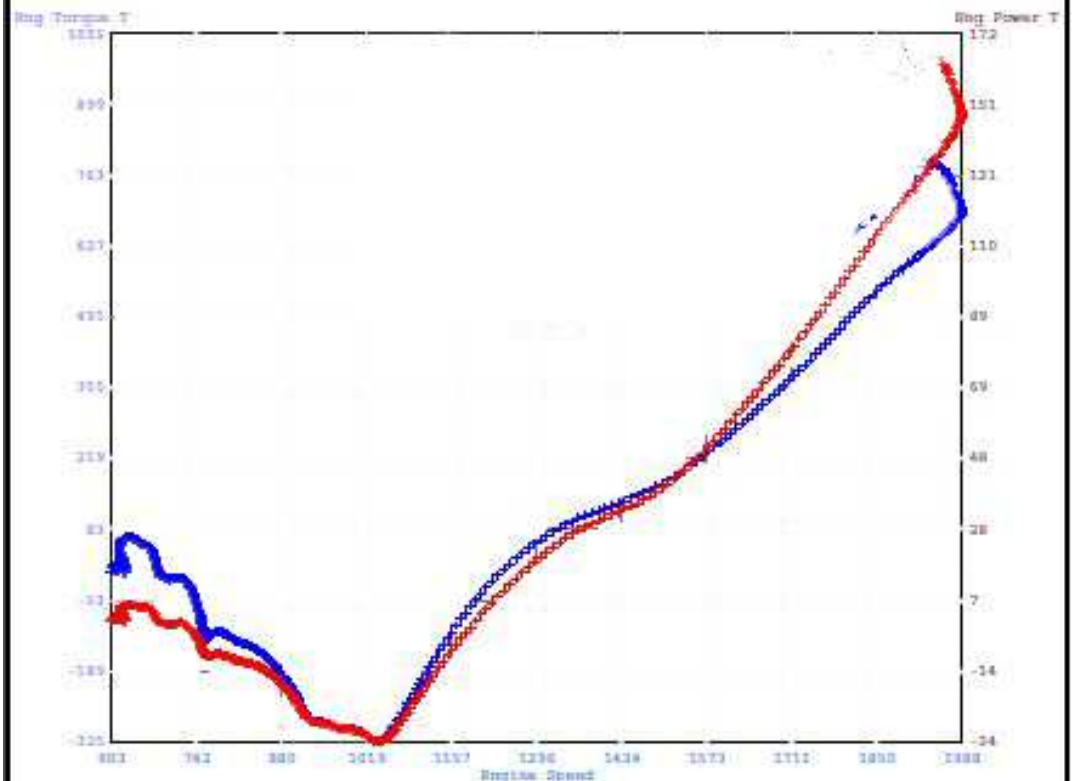
Updates, Documentation & More At:
www.MustangDyno.com
Or Call 1-330-963-5400

Universidad Nacional de Colombia

Campo Universitario,
Bogota, Cundinamarca
Phone: 3006511946 / - Fax: /

Date Printed	: 2014/02/25	Filter Mode	: FIR
Time Printed	: 11:36:05	Filter Value	: 99

Run#	License	Owner	Acquired	Test Comments
1	0000	Pinilla	02/25 09:20:35	
2				
3				



	Min			Max			Avg		
Channel / Run	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Eng Torque T MC (N-M)	-443			1405			528		
Eng Power T MC (KW)	-47			220			80		

Figura 24. Curva de potencia para el vehículo Scania E6 GNV

Los valores de la prueba de potencia son:

RPM ralenti	**610**
RPM gobernación	**2200**
Pot. Max @ x RPM [kw]	186
Par. Max @ y RPM [Nm]	1012.2

Los resultados de la prueba de emisiones a carga constante se presentan a continuación:

Tabla 15. Factores de emisión en prueba dinamométrica de carga constante 25%.

CO [gr/kW*h]	NOx[gr/kW*h]	CO2 [gr/kW*h]	HC [gr/kW*h]	Material Particulado [gr/kW*h]*
0.0978	0.3	15953.9	0.32	9.09537E-05

Tabla 16. Factores de emisión para prueba dinamométrica ciclo Bogotá Padrón.

CO [gr/kW*h]	NOx[gr/kW*h]	CO2 [gr/kW*h]	HC [gr/kW*h]	Material Particulado [gr/kW*h]*
0.64	0.11	1079.57	8.94	6.07576E-07

Es de alto interés el análisis de estos resultados, ya que el motor es evaluado y certificado dentro de la normativa de emisiones Euro 6 en una prueba dinamométrica realizada al motor por una autoridad Europea. La única manera de comprobar dicho estándar, es replicar dicho procedimiento, el cual en este caso no tiene comparación, ya que la prueba requiere una evaluación del motor sin estar montado en el chasis, es decir con la potencia medida directamente en el eje. Aun así, los resultados son importantes porque dan a conocer que tan cerca se encuentra el vehículo dentro de la normativa que lo regula. Para comprender estos resultados, es mejor analizar primero como la normatividad Euro 6 es aplicada a un motor de combustión interna encendido por chispa y de combustible Gas Natural, como es el caso del motor K340 evaluado en este estudio. Tal como se presenta la normativa, es resumido en la Tabla 17

Tabla 17. Estándar de emisión Europeo para motores diesel y de gas de trabajo pesado (Categoría N3).

Stage	Test	CO	NMHC	CH_4[a]	NOx	PM[b]	PN[e]
		g/kWh					*1/kWh*
Euro VI	WHTC	4	0.16[d]	0.5	0.46	0.01	6.0×10^{11}
a – for gas engines only (Euro III–V: NG only; Euro VI: NG + LPG)							
b – not applicable for gas fueled engines at the Euro III–IV stages							
c – PM = 0.21 g/kWh for engines < 0.75 dm^3 swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min^{-1}							
d – THC for diesel engines							
e – for diesel engines; PN limit for positive ignition engines TBD							

El primer aspecto es notar, que el ciclo de conducción de valuación es el WHTC (World Harmonized Transient Cycle) el cual difiere del ciclo de evaluación desarrollado para la ciudad de Bogotá en aspectos como la velocidad máxima, la velocidad media, la duración y el porcentaje de tiempo en movimiento, donde en todos los casos el ciclo de Bogotá presenta valores inferiores. Esto es evidente, dado que se replican lo problemas de movilidad típicos de la ciudad lo cual influye en mayores procesos de arranque-parada, que incrementan las emisiones del motor y así mismo su consumo.

Otro aspecto, es que se realiza una medición diferenciada de CH4 y THC, mientras que la prueba realizada no contaba con la disponibilidad de medir el metano de manera independiente. Esto es reflejo del atraso en normatividad que existe en el país, dado que al no existir tecnologías en motores de comercialización actual en países desarrollados, sino que el mercado se mueve entre tecnologías de estándar Euro 2 a Euro 5, los métodos, equipos y técnicas de evaluación son inapropiados para un motor de última generación como el K340.

Como ejercicio comparativo, en Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos, respecto al estándar de emisiones Euro 6 aplicable para este caso.

Tabla 18. Comparativo de los resultados obtenidos en la prueba dinamométrica, respecto al estándar de emisión Euro 6.

Evaluación	CO [gr/kW*h]	NOx[gr/kW*h]	HC [gr/kW*h]	PM [gr/kW*h]*
Ciclo Bogotá	0.64	0.11	8.95	6.08E-07
25% carga Constante	0.097	0.30	0.32	9.10E-05
Euro 6 WHTC	4	0.46	0.16	0.01

**medición exclusiva de material particulado en tamaño 700 nm o inferior.*

Se puede concluir con certeza, que el efecto de la transmisión desde el eje a las ruedas castiga las emisiones, junto con un ciclo de manejo exigente y que no favorece las mismas. Esto es evidenciado en los hidrocarburos sin quemar, los cuales tienen una mayor emisión, cuanto mayor ejercicio de aceleración y desaceleración brusca se presenten. A pesar de este aumento en las emisiones de hidrocarburos sin quemar, se debe tener en cuenta que estas deberían ser referenciadas al valor combinado de CH4 y THC que en este caso es 0.66 g/kW*h, dado que la técnica de medición fue combinada, y allí se presenta una emisión inferior en la prueba de carga constante, lo que favorece la teoría del incremento en emisiones que recibe el motor en la operación del ciclo Bogotá.

Las otras emisiones son más bajas que las establecidas por la norma, donde el material particulado destaca por sus bajos registros, así como las emisiones de CO. Al ser un motor de mezcla estequiométrica, se evidencia en la prueba como la gestión del sistema de inyección de combustible logra una operación altamente eficiente, con un suministro del mismo preciso que es el que se ve reflejado en la baja emisión de CO.

3.4 Eficiencia energética.

Para el análisis de eficiencia energética se tiene como primer resultado el análisis de la calidad del combustible. Gas Natural Fenosa SA ESP, provee las cromatografías del gas suministrado en la estación de servicio para los días 19, 20, 21 y 28 de febrero, días en los cuales se realizó el análisis de eficiencia energética. Los valores promedio de estos días son los siguientes:

Tabla 19. Resultados de los análisis de cromatografía del gas natural.

Poder Calorífico [BTU/ft^3]	1143.8

Nitrógeno [%]	0.53
CO2 [%]	1.90
Metano [%]	82.86
Etano [%]	9.89
Propano [%]	3.60
i_butano [%]	0.53
n_butano [%]	0.52
i_pentano [%]	0.090
n_pentano [%]	0.047
n_hexano [%]	0.013
Neopentano [%]	0
grav. Especifica	0.677
Densidad [Kg/m^3]	0.517

En estos valores es de destacar que la desviación estándar para cada día de prueba fue inferior a 1, en cada uno de los parámetros analizados.

3.5 Cálculo equivalencia energética entre tecnologías GNV y diesel convencional

Al momento de comparar la eficiencia energética de distintas tecnologías de buses o de vehículos en general se hace indispensable conocer la equivalencia energética entre las unidades de consumo que se van a medir directamente en las pruebas.

Para un vehículo diesel convencional, el consumo se mide en galones o en kilogramos de diesel por unidad de distancia recorrida. Para el caso de los vehículos a gas se mide la presión en el tanque de combustible, pero la presión en sí misma no representa una unidad de energía por lo tanto se requiere conocer la curva de carga del tanque que relacione los metros cúbicos normalizados de combustible por unidad de presión.

En las pruebas realizadas se midieron los consumos del bus a gas natural vehicular (GNV).

A continuación se detalla la metodología empleada para calcular las equivalencias en consumos entre estas tecnologías alternativas y un bus diesel convencional.

3.5.1 Equivalencia energética consumo vehículo GNV y diesel convencional

Para poder relacionar energéticamente dos tipos de combustibles como el gas natural vehicular GNV y el diesel, se requiere básicamente conocer sus poderes caloríficos. El reto adicional que resulta de comparar un combustible gaseoso con un combustible líquido consiste en la forma de medir el consumo, mientras para el caso del diesel la medición se hace de forma directa pesando el tanque externo de combustible, para el caso del gas se requiere revisar las presiones al interior del tanque y de acuerdo a una curva de carga estimar el volumen de gas a condiciones normalizadas que se ha usado durante la prueba de consumo o de emisiones.

Procedimiento de cálculo:

1. Cálculo de la densidad para cada combustible a condiciones atmosféricas estándar:

Diesel: ρdiesel = 856 kg/m^3

Gas Natural: A condiciones estándar el gas natural puede considerarse como un gas ideal, por lo que:

P= ρGNRT → ρGN = 0,577 kg/m^3

2. Se obtienen los valores de LHV (Low Heating Value) para los combustibles:

LHVdiesel=43.829 MJ/kg (mezcla de biodiesel y diesel)

LHVgas natural=42.619 MJ/kg

3. Se calcula la cantidad de energía por unidad de volumen para cada combustible:

ρ*LHV=energía/volumen

Diesel= 37517.624 MJ/m3

Gas natural= 27.7123 MJ/m3

4. Con los datos anteriores se busca el equivalente energético entre los dos combustibles:

1 m3 de diesel equivale a 1353.8 m3 de gas natural.

5. Ahora se calcula por cada unidad de volumen de gas natural cuantos galones de diesel se necesitan:

$$\frac{1353.8\ m3\ GN}{m3\ diesel} * \frac{m3\ diesel}{264.17\ gal\ diesel} = 5.1248\ \frac{m3\ GN}{gal\ diesel\ equivalente}$$

Adicional a la prueba de consumo de combustible planteada originalmente, se realizó un ejercicio estimativo de consumo para configuraciones diferentes de chasis y motor. Para ello se cargó el vehículo con 50% de la carga útil (4080 kg) y 25% de la carga útil (2040 kg). Los resultados de la prueba de consumo de combustible se presentan a continuación:

Tabla 20. Resultados de la prueba de consumo de combustible.

Parámetro	Prueba Eficiencia energética	prueba a 50% carga	prueba a 25% carga
Consumo en km/m^3	1.33	1.35	1.40
Consumo en (km/gal) equiva	6.83	6.92	7.13
galequi/100km	14.62	14.45	14.02
Peso prueba [kg]	21312	19680	17640
Gal_equi/tonelada	0.68	0.73	0.79

Con estos resultados se puede estimar el consumo de combustible por tonelada transportada

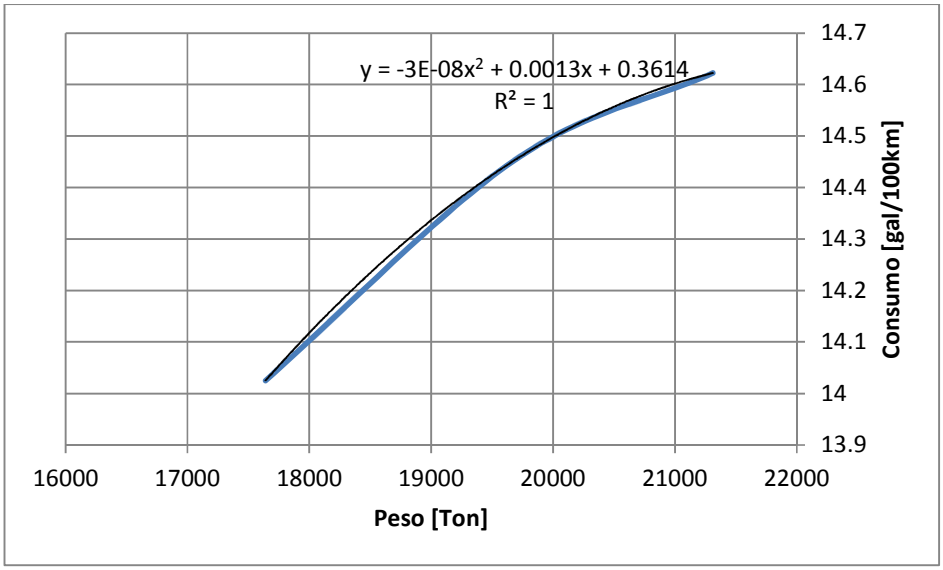


Figura 25. Consumo de combustible en función del peso vehicular.

Adicional a esta información, el fabricante del vehículo proporciona una serie de datos de las configuraciones típicas de sus carrocerías de buses urbanos, así como los resultados de la homologación del motor realizada para obtener el estándar euro 6, donde se presenta el consumo de combustible específico en función de la energía entregada para el ciclo de conducción WHTC. Estos valores corresponden tanto al motor K340 evaluado como al k280 que se proyecta usar en configuraciones tipo padrón de 12 metros de longitud y 2 ejes. El motor K280 es una versión del mismo bloque motor evaluado, que cambia su configuración de admisión y gestión de motor para reducir su potencia a 280 hp a 1900 rpm y 1350 Nm a 1000 rpm.

Tabla 21. Información comparativa motores k340 y k280, chasis 12 metros y 15 metros

	K340 3 ejes 15 metros	**K280 2 ejes 12 metros**
Consumo específico combustible [g/kWh]	270	207
Peso chasis [kg]	7667	6444
Peso carrocería [kg]	6313*	5306
Peso bruto vehícular [kg]	24600	19500
Cantidad de pasajeros [und]	120	80

*Valor estimado para carrocería de especificaciones nacionales.

Así mismo, es importante señalar que el vehículo evaluado, cuenta con una carrocería especial para climas con temperaturas invernales que son ampliamente inferiores a los 0 grados. Por tal motivo, los sistemas de aire acondicionado, silleterías tipo turismo, doble vidrio templado de aislamiento termo-acústico se espera que una carrocería de especificaciones nacionales pese entre 6300 y 7000 kilogramos, para las condiciones de operación de Bogotá, siguiendo las líneas de diseño usadas en las carrocerías de 12 metros del bus padrón.

Teniendo esto en cuenta se presentan las siguientes estimaciones de consumo de combustible:

Tabla 22. Valores estimados de consumo de combustible para configuraciones de carrocería nacional con motores k340 y k280.

	Gal equi/100km	km/gal equivalente	km/m^3
K340 15 metros carrocería nacional 70% carga	14.45	6.92	1.35
K280 12 metros carrocería nacional 70% carga	12.26	8.16	1.60

Estos resultados, evidencian el potencial de este motor en relación con su eficiencia energética. En configuraciones de operación de Bogotá, con carrocerías más livianas, el vehículo debe tener una alta eficiencia en consumo de combustible, lo que se traduce en una menor inversión económica para la operación, así como unas menores emisiones de gases contaminantes. Ello sin contar con el impacto ambiental que genera la cadena de distribución de hidrocarburos desde los pozos de extracción hasta el usuario final.

3.6 Ruido.

Se realizó la prueba de ruido bajo la normatividad vigente. Lo resultados son presentados a continuación:

Tabla 23. Resultados obtenidos en la prueba de ruido del vehículo.

	Nivel de ruido [dB]
Máximo valor registrado Según norma	96.2

Máximo valor Registrado	89.73
Máximo valor Ambiente	71.00
Diferencia	18.73

Al presentar una diferencia superior a 10 dB entre el ruido ambiente y el obtenido según norma, se puede calificar como aceptable el resultado.

Por otro lado este valor de ruido es un valor inferior a los límites registrados para vehículos de más de 5 toneladas en la Resolución 8321 de 1983 del Ministerio de Salud, en un porcentaje de 2% (valor límite 92 dB).

4 Conclusiones

- El vehículo Scania K340 cumple satisfactoriamente con los parámetros de desempeño exigidos por la normatividad local (frenado, aceleración en plano y maniobrabilidad)
- El vehículo Scania K340 tiene un rendimiento energético de 0.76 galones de diésel equivalente para mover una tonelada de carga. Vehículos diésel tienen un rendimiento menor (0.87 galones o mas para mover una tonelada). Un vehículo híbrido tiene entre 0.62 y 0.65 galones / tonelada
- El vehículo Scania K340 emite concentraciones despreciables de material particulado y óxidos de nitrógeno (principales contaminantes de la ciudad de Bogotá).
- Las concentraciones de hidrocarburos totales (THC), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2), del vehículo Scania K340, son muy inferiores a las emitidas por vehículos diésel de tecnologías Euro IV y Euro V.
- El vehículo Scania K340 emite una concentración en número de partículas ultrafinas (20,000 partículas/cm3) inferior a la concentración de partículas ultrafinas encontradas en el aire ambiente de la ciudad de Bogotá (150,000 partículas/cm3).
- El vehículo Scania K340 emite una concentración en número de partículas ultrafinas (20.000 partículas/cm3) muy inferior a las partículas de un bus diésel Euro II o III (70 millones de partículas / cm3)

5 Referencias

- https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php
- ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA, EMISIONES GASEOSAS Y MATERIAL PARTICULADO PARA VEHICULOS DE SERVICIO ZONAL, TRONCAL Y VEHÍCULOS COLECTIVOS DE SERVICIO PÚBLICO , Convenio 0013- 2012 SDA Universidad Nacional de Colombia
- http://www.epa.vic.gov.au/your-environment/noise/motor-vehicle-train-and-tram-noise
- European Community Whole Vehicle Type Approval (ECWVTA). http://www.dft.gov.uk/
- *SAE J1491 Vehicle Acceleration Measurement - Práctica recomendada - modificada para buses.)*
- SAE J688 Truck Ability Prediction Procedure. Práctica Recomendada.SAE J2181 Steady State Circular Test procedure for Trucks y buses. Práctica Recomendada.
- SAE J1491 Vehicle Acceleration Measurement - Práctica recomendada - modificadapara buses.)
- SAE J1635 Cold Start and Driveability Procedure - Práctica Recomendada - modificada para buses