



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Pruebas de validación y eficiencia:

VEHÍCULO ELÉCTRICO BYD K9G (EBUS ANDINO-12)

Informe realizado para:

BYD COLOMBIA

Informe elaborado por:

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE BOGOTÁ.

2014



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	5
2	Metodología	6
2.1	Descripción general de las pruebas de eficiencia energética.....	6
2.2	Descripción equipos de medición e instrumentación empleada	7
2.3	Descripción de rutas para pruebas de eficiencia energética.....	9
2.4	Protocolos de prueba de validación.	16
2.5	Rutas de evaluación de desempeño:.....	17
2.6	Descripción del vehículo.	18
2.7	Condiciones de Carga del vehículo	19
2.8	Descripción de las pruebas.	20
2.8.1	Arranque en pendiente.	20
2.8.2	Aceleración.	21
2.8.3	Frenado.....	21
2.8.4	Radio de giro, aproximación a paradero y sobrepaso.	21
2.9	Características de manejo.	24
3	Resultados	25
3.1	Pruebas de desempeño	25
3.1.1	Aceleración.	25
3.1.2	Frenado.....	25
3.1.3	Arranque en pendiente	26
3.1.4	Flexibilidad – Radio de Giro.	26
3.1.5	Distancia mínima de aproximación a paraderos	26
3.1.6	Distancia mínima de Sobrepaso	27
3.2	Eficiencia energética.....	27
4	Conclusiones.....	29
5	Referencias	31



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Listado de Figuras.

Figura 1 Esquema de actividades durante la medición de consumo de combustible durante la ruta completa.....	6
Figura 2 Recorrido corto ruta bus.	10
Figura 3 Perfil de elevación ruta bus PADRON para medición de emisiones.....	11
Figura 4. Recorrido de la ruta para evaluación en la ruta larga de buses PADRON.....	12
Figura 5. Perfil de elevación de la ruta larga para las pruebas de eficiencia energética.	13
Figura 6. Recorrido y paradas realizadas para ruta larga.....	15
Figura 7. Ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal.	18
Figura 8. Perfil elevación ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal	18
Figura 9. Vehículo en prueba en el ascenso en el barrio San Cristóbal.	20
Figura 10. Prueba de frenado.....	21
Figura 11. Esquema de la prueba de aproximación a paradero.	23
Figura 12. Esquema de la prueba de distancia mínima de sobrepaso.....	23
Figura 13. Mediciones tomadas en la prueba de radio de giro.	24



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Listado de Tablas.

Tabla 1 Descripción de la Instrumentación Usada	7
Tabla 2 Descripción de las paradas durante los recorridos en ruta, para la ruta completa.	14
Tabla 3 Descripción de los Protocolos para Desempeño	16
Tabla 4 Especificaciones Generales del Vehículo Evaluado	19
Tabla 5. Pesos vehiculares para las pruebas ejecutadas.....	19
Tabla 6. Resultados de las pruebas de aceleración.....	25
Tabla 7. Resultados de la prueba de frenado.....	25
Tabla 8. Resultados de la evaluación de arranque en pendiente	26
Tabla 9. Resultados de la prueba de habilidad de giro. Distancias en metros.....	26
Tabla 10. Distancia mínima de aproximación a paraderos	27
Tabla 11. Distancia mínima de sobrepaso.....	27
Tabla 12. Resultados de las pruebas de eficiencia energética.....	28
Tabla 13. Consumo y kilometraje del vehículo durante las pruebas de eficiencia energética ...	28
Tabla 14. Estado de consumo/regeneración y ratas de descarga y recarga batería	28



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

1 Introducción.

Este informe contiene la descripción, resultado y análisis de una serie de pruebas de realizadas sobre un bus tipo padrón de referencia BYD K9G de tipo eléctrico. El bus fue validado según la normatividad vigente y también fue evaluado en desempeño y eficiencia energética. La prueba se realizó sobre una ruta preestablecida que simula las condiciones normales de operación de un bus y abarca diferentes topografías. Los resultados son contrastados con valores de referencia obtenidos con anterioridad por parte de la Universidad Nacional.

Los resultados evidencian el comportamiento a conformidad en las pruebas de validación y eficiencia energética, así como un perfil del potencial de aplicación del vehículo dentro de la flota vehicular del sistema integrado de transporte de la ciudad de Bogotá, dentro de las condiciones particulares de tráfico, estado de vías, topográfica y condiciones de medio ambiente de dicha ciudad.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

2 Metodología

2.1 Descripción general de las pruebas de eficiencia energética

La determinación de la eficiencia energética 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 y sus condiciones de operación. La Figura 1 muestra los procedimientos generales que se llevan a cabo durante las pruebas.

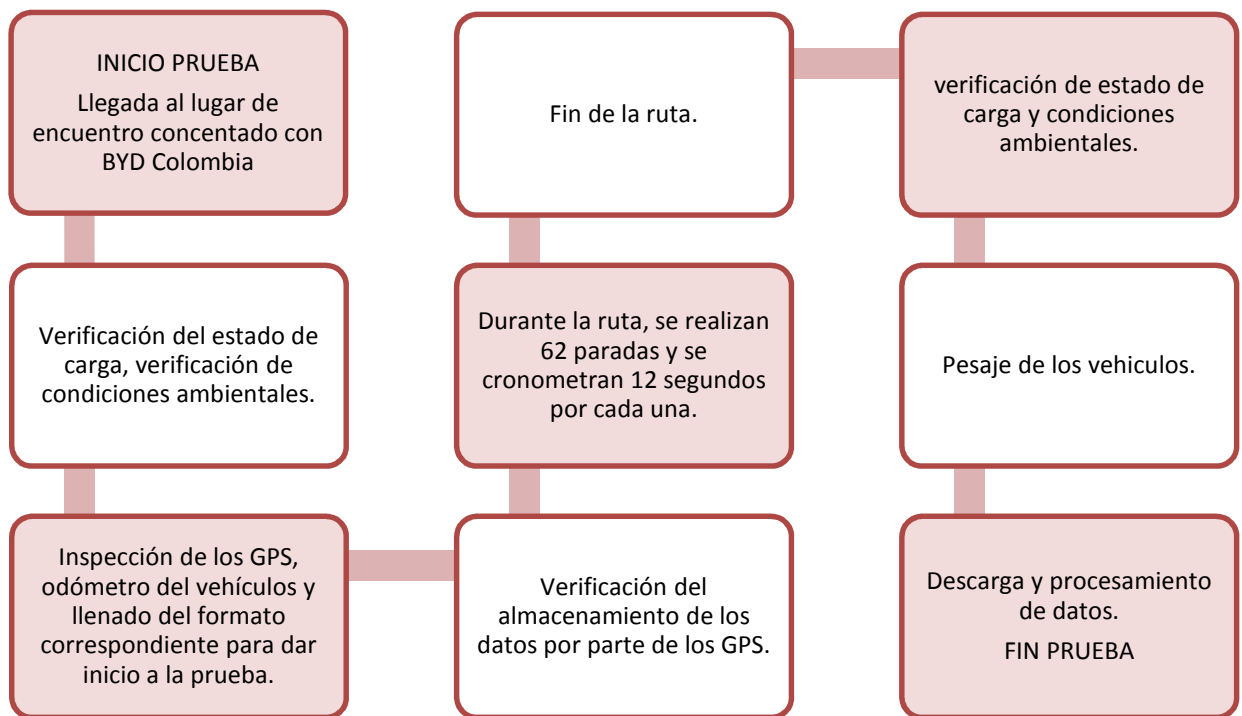


Figura 1 Esquema de actividades durante la medición de consumo de combustible durante la ruta completa.

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

2.2 Descripción equipos de medición e instrumentación empleada

Los equipos empleados para la medición se describen en la Tabla 1

Tabla 1 Descripción de la Instrumentación Usada

Nombre	Descripción
AC/DC Current Probe Model MR461 	Pinza amperimétrica. <ul style="list-style-type: none">• Measurement range of 1000Aac/1500Adc• Cable de comunicación BNC blindado• Calibración y ajuste de cero programable• Cumplimiento del protocolo de seguridad EN 61010, 600V, CAT III
Tarjeta de adquisición de datos National Instruments 	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.
Unidad VAM 	VehicleActivity 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

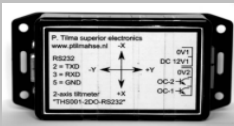
Rueda métrica



Rueda metrica

- Rango de medición hasta 900 metros
- Presición 10 cms

TILT001-2DO-USB



- Inclinómetro de dos ejes Con comunicación USB

GPS Columbus V900



Medidor GPS marca columbus con sistema de almacenamiento de datos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

2.3 Descripción de rutas para pruebas de eficiencia energética

A continuación se describen las dos rutas de evaluación del vehículo. Para aquellos vehículos con motores térmicos que emiten gases contaminantes se diseñaron dos rutas, en las cuales se evaluaba por separado la eficiencia energética a lo largo de un recorrido típico de la movilidad de la ciudad y una ruta corta que es una sección de la ruta larga, en donde se evalúan emisiones contaminantes y que permite hacer un recorrido circular de corta distancia y varias repeticiones en un mismo día. Para evaluar el vehículo en las mismas condiciones se hicieron pruebas en ambos recorridos. Las rutas son descritas en las Figura 3 y Figura 4.

Para las pruebas en la ruta corta, se repitieron las paradas definidas en la ruta larga. 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 ruta larga 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 se describen en la Tabla 2 y en la Figura 6 se muestran sobre la ruta real.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

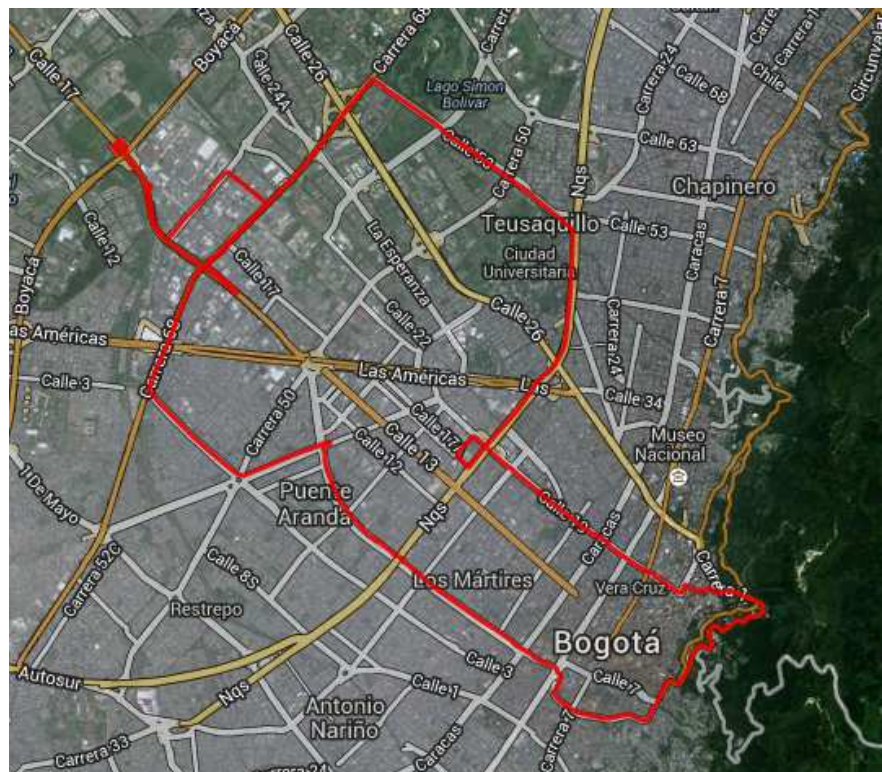


Figura 2 Recorrido corto ruta bus.

Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ



Figura 3 Perfil de elevación ruta bus PADRON para medición de emisiones

Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ



Figura 4. Recorrido de la ruta para evaluación en la ruta larga de buses PADRON.

Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ



Figura 5. Perfil de elevación de la ruta larga para las pruebas de eficiencia energética.

Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Tabla 2 Descripción de las paradas durante los recorridos en ruta, para la ruta completa.

Parada No.	Lugar	Parada No.	Lugar
1	Carrera 24 entre Calles 9 y 10	32	Avenida 68 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 de Mayo Calle 35C	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 Campín
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	Avenida 1º de Mayo Calle 35c	57	Avenida 68 Avenida La Esperanza
27	Avenida 1º de 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

* 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. Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

2.4 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 para Desempeño

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.
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.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

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 180°. Así mismo medición de las distancias de sobrepaso a un vehículo idéntico y de aproximación a paradero.
---	---	---

2.5 Rutas de evaluación de desempeño:

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

- Pruebas de frenado:

Estas pruebas fueron realizadas en el patio del portal Américas del sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá. En este lugar se adecuó el espacio necesario y se aprovechó para realizar las repeticiones necesarias de cada prueba.

- Pruebas de aceleración:

Estas pruebas fueron realizadas en el patio del portal Américas del sistema Transmilenio donde se contaba con la distancia necesaria para realizar aceleraciones hasta 40 km/h.

- 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.

Las pruebas de radio de giro fueron desarrolladas en el patio del portal Américas, en donde se encontraba un espacio suficientemente amplio para realizar esta prueba y realizar la con seguridad.

Las aproximaciones a paraderos fueron llevadas a cabo en la troncal de la calle 26 en donde se aprovecharon los espacios de las estaciones.

- Pruebas de arranque en pendiente:

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.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

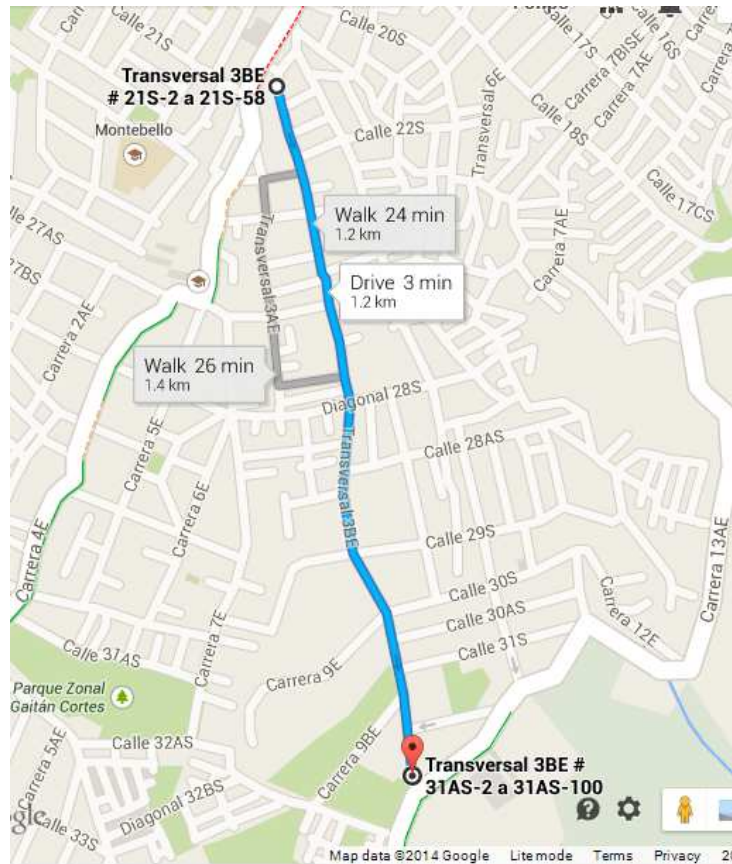


Figura 7. Ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal.



Figura 8. Perfil elevación ruta de prueba arranque en pendiente barrio San Cristóbal

2.6 Descripción del vehículo.

Las especificaciones del vehículo se muestran en la



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Tabla 4 Especificaciones Generales del Vehículo Evaluado

BUS BYD eBus Andino (12m)	
Largo	12000 mm
Ancho	2550 mm
Alto	5900 mm
Capacidad de Pendiente	20%
Radio de Giro	< 12 m
Motor Eléctrico	AC Motor de Magneto Permanente (Sin Escobillas) – BYD2912TZA
Potencia Máxima	300 kW (150 kW x 2)
Potencia Nominal	240 kW (120 kW x 2)
Torque Máximo	1100 Nm (550 Nm x 2)
Tipo de Batería	Batería de Fe
Capacidad Energética	330 kWh / 600 Ah (200 Ah x 3)
Potencia Energética	200 kW (100 kW x 2, 480 V, 3Ø, AC)
Peso Bruto Vehicular	19600 kg
Peso en Vacío	14060 kg
Capacidad de Carga	5540 kg
Peso Máximo Eje Delantero	7100 kg
Peso Máximo Eje Trasero	12500 kg

Fuente: Hoja de Especificaciones Suministrada por el Fabricante

2.7 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 vacío del vehículo con el 90% de los fluidos.

Tabla 5. Pesos vehiculares para las pruebas ejecutadas.

CARGA DEL VEHÍCULO			
Prueba	Condición de Carga Requerido	Valor Medido (kg)	Condición de Carga Real
Reconocimiento	0%	14410	0%
Desempeño Mecánico	100%	19560	99%
Eficiencia Energética	70%	18440	71%
Eficiencia Emisiones	70%	18440	71%



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

2.8 Descripción de las pruebas.

2.8.1 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.

Procedimiento:

Antes de comenzar la prueba, se deben inspeccionar el sistema de frenos del automotor, con el único fin de evitar cualquier incidente que atente contra la seguridad de todos. 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 9. Vehículo en prueba en el ascenso en el barrio San Cristóbal.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

2.8.2 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 y 40 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 3 repeticiones o más del ejercicio de aceleración, siempre que los resultados no presenten variaciones superiores al 10%, donde serán descartados y deben ser repetidos.

2.8.3 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 3 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 10. Prueba de frenado.

2.8.4 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



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

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.

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 puede 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.

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).



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

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

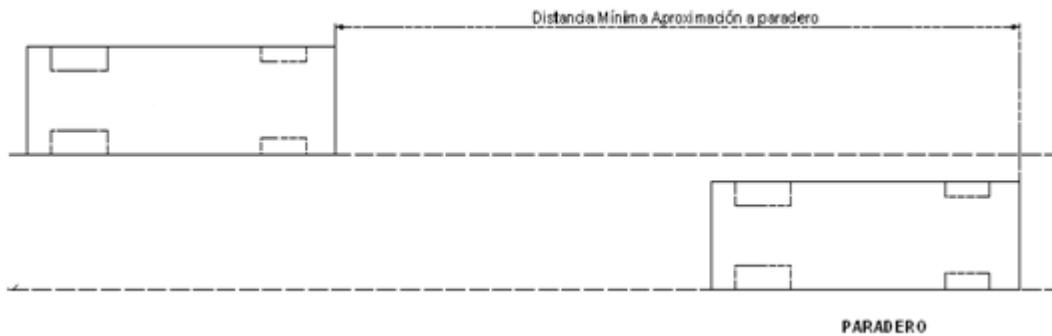


Figura 11. Esquema de la prueba de aproximación a paradero.



Figura 12. Esquema de la prueba de distancia mínima de sobrepaso.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

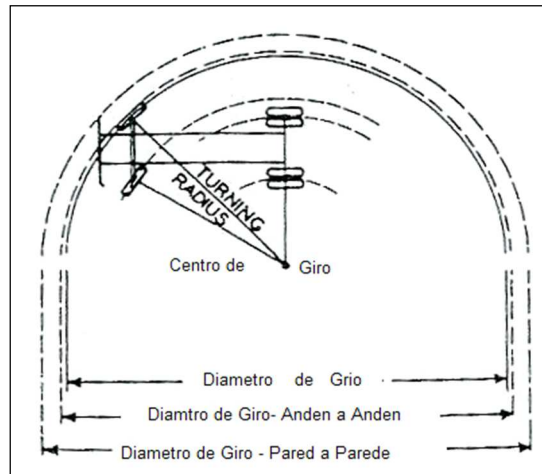


Figura 13. Mediciones tomadas en la prueba de radio de giro.

2.9 Características de manejo.

Para la prueba de ruta siempre se operó el vehículo por parte de un conductor capacitado en la tecnología de este tipo de vehículos quien hace parte del equipo de trabajo de BYD 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

3 Resultados

3.1 Pruebas de desempeño

3.1.1 Aceleración.

En la Tabla 6 se presentan los resultados de la prueba de aceleración del vehículo.

Tabla 6. Resultados de las pruebas de aceleración.

Repetición	Velocidad Objetivo	
	20 km/h	40 km/h
1	4,38	9,21
2	5,1	9,43
3	4,51	9,46
Promedio (Segundos)	4,66	9,37

El valor promedio del tiempo de aceleración de 0 km/h a 40 km/h, es de 9,37 segundos el cual es muy inferior al descrito en la norma NTC 4901 – 3, la cual establece como límite un lapso de 22,5 segundos.

3.1.2 Frenado.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la prueba de frenado del vehículo.

Tabla 7. Resultados de la prueba de frenado.

Repetición	Velocidad Objetivo	
	32 km/h	40 km/h
1	4,9	6,9
2	4,8	7,6
3	4,4	6,8
Promedio (m)	4,70	7,10

La distancia de frenado promedio para una velocidad de 32 km/h es de 4,70 m, el cual es inferior al valor de 10,7m indicado como máximo en la norma NTC 4901 – 3.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

3.1.3 Arranque en pendiente

El arranque en pendiente se realizó con la capacidad de carga máxima del vehículo correspondiente a 80 pasajeros, tal como se describe en la prueba. En el tramo en donde se evaluó la capacidad de arranque del bus, se encuentran pendientes del 12, 15 y 20%. El vehículo logró superar cada una de estas sin dificultad a una velocidad promedio de 20 km/h.

Tabla 8. Resultados de la evaluación de arranque en pendiente

Repetición	Pendiente Objetivo		
	12%	15%	20%
1	Aprobado	Aprobado	Aprobado
2	Aprobado	Aprobado	Aprobado

3.1.4 Flexibilidad – Radio de Giro.

En la En la tabla mostrada a continuación, se muestran las medidas de los diferentes diámetros de giro del vehículo, siendo el mayor de 24,55 m, correspondiente al de pared. Este es equivalente a un radio de pared de 12,275 m, siendo menor al máximo permitido por la norma NTC 4901 – 3 de 12, 5 m.

Tabla 9. Resultados de la prueba de habilidad de giro. Distancias en metros.

Repetición	DIÁMETRO MEDIDO		
	GIRO	ANDÉN	PARED
1	21	21,4	24,8
2	21,4	21,7	24,2
3	22,6	23	24,8
4	21,6	22,1	24,4
Promedio (m)	21,65	22,05	24,55

3.1.5 Distancia mínima de aproximación a paraderos

La distancia mínima que requiere el bus para acercamiento de paraderos de es 30,94 m, el cual es un valor promedio de los obtenidos durante las pruebas para cada uno de los lados, izquierdo y derecho, los cuales son presentados en la tabla a continuación.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Tabla 10. Distancia mínima de aproximación a paraderos

Repetición	LADO DE PARADERO	
	DERECHO	IZQUIERDO
1	30,45	32,9
2	29,2	31,2
Promedio (m)	29,83	32,05

La distancia mínima que requiere el bus para acercamiento de paraderos de es 30,94 m, el cual es un valor promedio de los obtenidos durante las pruebas para cada uno de los lados, izquierdo y derecho, los cuales son presentados en la Tabla 10.

3.1.6 Distancia mínima de Sobrepaso

Adicionalmente, la distancia mínima que requiere el vehículo para sobrepasar otro es en promedio de 8 m aproximadamente. Esta corresponde a la distancia mínima a la que deberá encontrarse el vehículo para sobrepasar otro del mismo ancho, que se encuentra en frente.

Tabla 11. Distancia mínima de sobrepaso

Repetición	LADO DE SOBREPASO	
	DERECHO	IZQUIERDO
1	8,75	8
2	7,2	8,2
Promedio (m)	7,98	8,10

3.2 Eficiencia energética.

El vehículo fue evaluado en una ruta larga y una corta, en las que se han evaluado previamente otros vehículos de similares configuraciones y que hacen la misma validación para ingresar a operar en el sistema integrado de transporte. Las pruebas 1 y 2 fueron realizadas en la ruta larga con un recorte debido a cierres viales. Las rutas 3 y 4 fueron realizadas en la ruta corta. Las distancias recorridas ilustradas en la Tabla 12 correspondientes al perfil de ambas rutas detalladas en la Figura 2 y 4.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

Tabla 12. Resultados de las pruebas de eficiencia energética.

Prueba	Tiempo de medición [h]	Distancia recorrida [km]	Velocidad media [km/h]	Consumo energético [kWh] sin regeneración	Consumo energético [kWh] con regeneración
Prueba 1	1.89	30.12	15.95	46.67	67.15
Prueba 2	2.80	43.19	18.10	67.14	96.85
Prueba 3	1.66	25.07	15.14	38.33	55.85
Prueba 4	1.56	19.31	12.35	30.76	44.39

El consumo específico de energía para las pruebas en ruta larga y corta fue muy similar. En particular el vehículo muestra una buena capacidad de regeneración de energía durante los recorridos en descenso que compensan la energía invertida en el ascenso. Esta recuperación de energía no es posible en vehículos con motor de combustión interna (MCI).

La Tabla 13 muestra los resultados de consumo total, consumo neto, y la regeneración durante las pruebas realizadas. Se evidencia una regeneración promedio de 44.54%.

Tabla 13. Consumo y kilometraje del vehículo durante las pruebas de eficiencia energética

Prueba	Consumo Total-Regeneración Incluida [kWh/km]	Consumo Neto (kWh/km)	Energía recuperada respecto a la invertida	Regeneración de energía [kWh]*
Prueba 1	1.55	0.87	43.88%	+20.48
Prueba 2	1.55	0.87	44.26%	+29.72
Prueba 3	1.53	0.83	45.71%	+17.52
Prueba 4	1.59	0.89	44.32%	+13.63
Valor medio	1.56	0.86	44.54	+20.33
Desviación estándar	0.03	0.03	0.01	6.86

*Los valores positivos indican que es una energía que el vehículo recupera durante el proceso de frenado principalmente

Tabla 14. Estado de consumo/regeneración y ratas de descarga y recarga batería

Tipo de ruta	Ubicación	Consumo [kWh]	Longitud de la Zona [km]	Regeneración [kWh]*
Montaña	Paloquemao - Instituto Roosevelt	22,89	11,61	+4,48
Descenso	Calle 6 con Carrera 3ra - Calle 6 con Avenida Caracas	3,85	4,65	+7,11
Alto nivel de tráfico	Carrera 30 Calle 72, antes del puente - Cra 19 cl. 100	12,10	9,53	+4,61



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

***Los valores positivos indican que es una energía que el vehículo recupera durante el proceso de frenado principalmente**

Se ilustra en la Tabla 14 el consumo y la regeneración para tres tipos de ruta comunes en la ciudad de Bogotá: montaña (principalmente ascenso, algunos descensos cortos y por ello existe regeneración), descenso y alto nivel de tráfico. Se aprecia en ascenso que la operación del vehículo es en mayor grado consumo y la regeneración se reduce, en descenso la regeneración dobla en valor al consumo de energía, finalmente el vehículo operando en rutas de alto tráfico vehicular se aprecia como el consumo es mayor que la regeneración.

En rutas de alto nivel de tránsito se aprecia una regeneración limitada debido a las pocas secciones que tiene el vehículo de alcanzar tiempos de regeneración altos. Sin embargo este efecto se recompensa con el bajo consumo del vehículo de 1.8 [kWh], que se observó durante la prueba cuando la velocidad del mismo era menor o igual a 10 km/h, el cual es menor a un vehículo con motor de combustión interna ya que este mantiene un consumo en estado de ralentí de 4 [kWh] en promedio para vehículos con MCI de la misma tipología del vehículo eléctrico en estudio.

4 Conclusiones.

- El vehículo cumple con los requerimientos definidos en la normativa colombiana en las pruebas de
 - Arranque en pendiente
 - Aceleración
 - Frenado
- El vehículo evaluado tiene un radio de giro de 24.55 m de pared a pared
- El vehículo evaluado tiene una distancia mínima de aproximación a paraderos de 29.8 y 32.5 m para el lado derecho e izquierdo respectivamente.
- El vehículo evaluado tiene una distancia mínima de sobrepaso de 7.9 y 8.1 m para el lado derecho e izquierdo respectivamente.
- De acuerdo a los resultados de consumo energético se estima que el vehículo evaluado supera la autonomía exigida en el Manual del Operación del SITP que debe ser al menos de 260 km.
- En los tramos de ascenso y descenso, la energía regenerada en el descenso no compensa la totalidad de la invertida para ascender y las ratas de descarga son tres veces menores a las ratas de consumo en las respectivas secciones de ascenso y descenso.
- Durante la operación del vehículo, se estima que la capacidad de regeneración es de un 40%



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

- El consumo promedio del vehículo en rutas de alto tráfico es menor en 2.2 veces comparado a un vehículo Diesel convencional debido a las condiciones de operación del vehículo.
- El consumo de energía promedio es de 1.56 [kWh/km] sin incluir la regeneración, incluyendo la energía regenerada este valor cae a 0.86 [kWh/km]. Estos valores son obtenidos durante la ruta de prueba especificada en este documento, la cual representa una ruta típica para la tipología del vehículo en prueba, sin embargo se debe tener en cuenta que estos valores cambiarán de acuerdo a las condiciones de tráfico, operación y pendiente de la ruta final en la que opere el mismo.
- El vehículo no presenta emisiones de CO₂ directas ya que no cuenta con un motor de combustión interna para su funcionamiento.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

5 Referencias

Emissions Standards, European Union. DieselNet.

<https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php> . Consultado 23.12.2014.

Estudio De Eficiencia Energética, Emisiones Gaseosas Y Material Particulado Para Vehículos De Servicio Zonal, Troncal Y Vehículos Colectivos De Servicio Público. Convenio 0013- 2012. Secretaría Distrital de Ambiente y Universidad Nacional de Colombia.

Motor vehicle, train and tram noise. Environment Protection Authority Victoria (EPA Victoria). 2013.

<http://www.epa.vic.gov.au/your-environment/noise/motor-vehicle-train-and-tram-noise>.

Consultado 22.12.2014

SAE J1491 Vehicle Acceleration Measurement. Práctica recomendada - modificada para buses. SAE.

SAE J688 Truck Ability Prediction Procedure. Práctica Recomendada. SAE.

SAE J2181 Steady State Circular Test procedure for Trucks y buses. Práctica Recomendada. SAE

SAE J1635 Cold Start and Driveability Procedure - Práctica Recomendada - modificada para buses

Heywood, J. B. (1989). *Internal Combustion Engines Fundamentals.* Mc Graw Hill.

Mantilla, J. M., Acevedo, H., Galeano, C., & Duque, C. A. (2007). *Implementación de un bus articulado con motor dedicado a gas natural en los sistemas de transporte masivo de Colombia: Estudio Técnico.*

motornature. (n.d.). *moteur nature.* From <http://www.moteurnature.com/actu/2013/BYD-autobus-electrique.php>

BYD Company Limited. (n.d.). *DYD.* From <http://www.byd.com/la/auto/ebus.html>