

Implementación de un bus articulado con motor dedicado a gas natural en los sistemas de transporte masivo de Colombia: Estudio Técnico

Implementation of a bus with natural gas articulated motor in Colombia's massive transportation system: A technical study

*Juan Miguel Mantilla González**, Carlos Galeano, Helmer Acevedo, Carlos Alberto Duque

Universidad Nacional de Colombia, Carrera. 30 No. 45-03, Edificio 453, Bogotá, Colombia.

(Recibido el 26 de junio de 2007. Aceptado el 9 de noviembre de 2007)

Resumen

El objetivo del presente trabajo es mostrar los resultados de las pruebas para la evaluación del desempeño de un bus articulado prototipo con motor dedicado a gas natural comprimido. Los resultados se utilizarán para establecer la viabilidad técnica de la implementación de flotas de este tipo de buses, en los sistemas de transporte masivo de las grandes ciudades colombianas. Para llevar a cabo la evaluación se desarrollaron protocolos de pruebas, siguiendo algunas prácticas recomendadas de SAE, en los que se obtuvieron los principales parámetros de desempeño descritas en tales documentos. Las pruebas fueron realizadas en dos ciudades diferentes, la primera fue Bogotá, capital de Colombia con 10 millones de habitantes y ubicada a 2.650 msnm; y la segunda fue la ciudad de Cali, con 4 millones de habitantes y ubicada a 900 msnm. Los resultados muestran que es factible implementar este modelo de bus articulado en la ciudad de Cali, mientras que en la ciudad de Bogotá se necesitan algunas modificaciones en el sistema de alimentación, ya que el bus prototipo no cumple con la aceleración requerida por la norma para sistemas de transporte masivo. Por su parte el consumo de combustible es similar al de los buses articulados que trabajan con motor diesel y que se encuentran actualmente en operación en la ciudad de Bogotá.

----- *Palabras clave:* bus articulado, combustible alternativo, gas natural comprimido, protocolo de pruebas, sistema de transporte masivo.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 316 50 00 ext.14062, fax: + 57 + 1 + 316 53 33, correo electrónico: jmmantillag@unal.edu.co (J. Mantilla)

Abstract

This paper shows the results of the performance of an articulated prototype bus fueled with compressed natural gas (CNG). The results will be used to establish the technical viability of the fleet implementation in the massive transport systems of the largest Colombian cities. In order to carry out the evaluation, some SAE recommended practices were modified to set with this kind of bus. Main performance parameters were obtained. The tests were made in two different cities the first one was Bogotá, Colombia's capital with 10 million inhabitants and located at 2600 meters above sea level (masl). The second city was Cali, with 4 million inhabitants and located at 900 masl. The results show that it is feasible to implement this articulated bus in the city of Cali, whereas in Bogota some modifications in the fuel system are needed, since the bus prototype does not fulfill the acceleration requirements imposed by the local authorities for massive transport systems. On the other hand the fuel consumption is similar to that of the articulated buses fueled with diesel fuel that actually operate in Bogotá.

----- *Keywords:* alternative fuel, articulated bus, compressed natural gas, massive transportation system, testing protocol.

Introducción

Colombia no es un país con potencial petrolero, dado que posee moderadas existencias del recurso, en donde la nueva misión de la explotación petrolera es lograr el autoabastecimiento sin requerir de la importación de hidrocarburos en un futuro inmediato. Colombia debe enfrentar una nueva etapa en su desarrollo petrolero, después de una década en la que las reservas han presentado una caída constante. Es necesario optar por nuevas alternativas energéticas en busca de resultados contundentes, ya que las probabilidades de hallar yacimientos comerciales de hidrocarburos son cada vez más reducidas. En este mismo contexto resulta estratégico apostarle a yacimientos de menor tamaño, aquellos que antes no fueron explotados por no considerarse viables económicamente [1]. Dado lo anterior, y teniendo en cuenta la fluctuación de la industria petrolera se hace necesario que el país extienda su interés hacia nuevas fuentes de energía que proporcionen una estabilidad energética. Una alternativa de alto potencial de reserva y uso a nivel nacional es el gas natural.

Desde los años 70 el gas natural ha sido el combustible de mayor crecimiento a nivel mundial, su demanda se ha visto impulsada por la necesidad de los países industrializados de sustituir los derivados del petróleo como principales fuentes de energía, además de las grandes ventajas ecológicas que este combustible ofrece. Consecuencia de esto es el aumento en su exploración y explotación, lo que ha repercutido en avances tecnológicos y en la disminución de las inversiones necesarias para su producción, tratamiento y transporte [2]. Para la empresa estatal de petróleos de Colombia, ECO-PETROL S.A., es fundamental maximizar la incorporación de reservas y la producción de petróleo y gas del país en términos comerciales, dentro de un criterio de competitividad [3]. Aunque el uso de gas natural en vehículos automotores se considera una tecnología probada y comercialmente disponible, diferentes razones han impedido su uso masivo en centros urbanos como Bogotá. Dentro de los obstáculos tecnológicos se encuentran el efecto de la altitud y la variación en la composición del combustible sobre el desempeño del vehículo [4].

En los últimos años se han dado importantes avances para consolidar el gas natural como una alternativa viable y segura de combustible en los Sistemas Integrados de Transporte Masivo. El Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) ha ideado diferentes elementos para el fortalecimiento de sus estrategias, tales como: la política para mejorar el servicio de transporte público urbano de pasajeros mediante la aplicación de herramientas técnicas y financieras innovadoras; la estrategia institucional para la venta de servicios ambientales de mitigación del cambio climático; un conjunto de estrategias que continúen con la consolidación y masificación de la industria del gas natural y su vinculación activa al desarrollo económico y social del país; incentivos al uso de combustibles limpios en los Sistemas Integrados de Transporte Masivo a gas natural o diesel, donde la restricción para éste último implica contenidos de azufre menores a 500 partes por millón (p.p.m.) [5, 6, 7, 8].

La pérdida de autosuficiencia petrolera, la bajísima capacidad de refinación de diesel (que está actualmente copada en el país), los factores de manejo y normatividad ambiental, el alto costo de los combustibles sustitutos del gas natural (ocasionado por el desmonte gradual de los subsidios en los precios de la gasolina y el diesel), así como la adopción de una serie de medidas gubernamentales para promover el uso del gas natural en el transporte, se constituyen en razones para que el gas natural se presente como una de las mejores alternativas de utilización de combustible en los nuevos Sistemas de Transporte Masivo del país [9].

Debido a la actual situación Colombiana descrita de forma breve anteriormente, la empresa Colombiana de Chasises S.A. (COLCHA S.A.) ensambló en el país el primer bus articulado con motor dedicado a gas natural comprimido como una opción para los Sistemas de Transporte Masivo. Se hace necesario entonces realizar estudios técnicos de evaluación de flotas con motores dedicados a gas natural comprimido, que examinen la viabilidad de implementar esta tecnología en los Sistemas de Transporte Masivo de las ciuda-

des colombianas, las cuales están localizadas a diferentes altitudes, de modo que resulte rentable el uso de estas tecnologías, tanto para los operadores de las flotas como para los usuarios de estos sistemas. Es por esto que ECOPEPETROL S.A. suscribe un convenio con la Universidad Nacional de Colombia, para la realización de estudios económicos y de desempeño de éste bus prototipo con motor dedicado a gas natural comprimido. El presente trabajo hace parte de una serie de artículos desarrollados en este tema.

Bus, instrumentación y procedimiento

Bus Articulado Prototipo

En la figura 1, se puede ver el bus articulado prototipo con motor dedicado a gas natural comprimido ensamblado por COLCHA S.A.

Las características técnicas del bus articulado prototipo evaluado en este trabajo se presentan en la Tabla 1.



Figura 1 Bus articulado prototipo RENNO 280 GA.

Tabla 1 Tecnología evaluada en este estudio

Característica		Valor	Unidad
Marca y/o referencia		RENNO 280 GA	--
Chasis		COLCHA S.A.	--
Carrocería		BUSSCAR S.A.	--
Dimensiones Externas	Largo total	18,20	m
	Ancho total	2,99	m
	[1] Distancia entre ejes delantero –tracción	5,95	m
[2]	Distancia entre ejes tracción – trasero	6,58	m
Peso	Bruto Vehicular Permisible	27.500	kg
	Vacío	17.500	kg
	Capacidad	48 sentados + 112 de Pie	Pasajeros

	Característica	Valor	Unidad
	Marca y/o referencia	RENNO 280 GA	--
	Chasis	COLCHA S.A.	--
	Carrocería	BUSSCAR S.A.	--
	Ubicación en el vehículo	Adelante	--
	Fabricante	Cummins Westport	--
Motor	Modelo	CG 280 Plus	--
[4]	Combustible	Gas Natural Comprimido	--
[5]	Número de cilindros / disposición	Seis / en línea	--
[6]	Cilindraje	8.300	c.c.
[7]	Relación de compresión	10:1	--
[8]	Potencia máxima	205@2.400	kW@rpm
[9]	Torque máximo	1152@1.400	N-m@rpm
I.	Control electrónico	Sí	--
II.	Marca	Allison	--
III.	Modelo	T325R	--
Transmisión	Caja de cambios	6 adelante (programable) 1 reversa	--
[10]	Relaciones 1ª	3,49	--
[11]	Relaciones 2ª	1,86	--
[12]	Relaciones 3ª	1,41	--
[13]	Relaciones 4ª	1,00	--
[14]	Relación Reversa	5,03	--
[15]	Convertidor de Torque	TC 418 – 1,98	--
Dirección	Marca	Sheppard	--
[17]	Tipo	Hidráulica	--
Suspensión	Marca	Reyco	--
[18]	Tipo	Neumática	--
	Frenos	Neumáticos	--
	Convertidor catalítico	No	--
	Aire acondicionado	No	--
	Llantas	295 / 80 R x 22,5 Accurride	--

Las pruebas se han desarrollado con la transmisión programada para cuatro cambios adelante. El Módulo de Control del Motor ha sido ajustado para un funcionamiento adecuado en las ciudades de Bogotá y Cali.

La carrocería del bus articulado prototipo es igual a la carrocería de un bus articulado diesel. La única diferencia ha sido la reubicación de una puerta delantera derecha que fue desplazada dos metros (2 m) hacia atrás debido a que el motor está en la parte delantera del vehículo, contrario al bus articulado diesel que tiene el motor en la parte trasera.

Combustible

Se usó gas natural comprimido (GNC) proveniente del campo Cusiana, el cual está ubicado en el piedemonte llanero colombiano, en el departamento de Casanare. Este campo abastece a las dos ciudades donde se llevó a cabo la evaluación; la composición de este gas natural se puede observar en la tabla 2 [10].

El bus articulado prototipo cuenta con ocho (8) cilindros, con capacidad nominal de treinta metros cúbicos (30 m³) de gas natural comprimido cada uno, a condiciones de carga máxima de GNC (200 atm y 25°C), para una capacidad total de doscientos cuarenta metros cúbicos (240 m³) de gas. Para las pruebas de desempeño, se habilitan siete (7) de los ocho (8) cilindros con los que cuenta el bus prototipo. Resulta conveniente señalar que un bus articulado diesel cuenta con una capacidad de 0,190 m³ de combustible.

Tabla 2 Composición química del gas natural suministrado por el campo Cusiana

<i>Especificación</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Metano	%	82,53
Etano	%	9,15
Propano	%	3,90
i-Butano	%	0,61
n-Butano	%	0,66
i-Pentano	%	0,15
n-Pentano	%	0,08
Hexano	%	0,03
Nitrógeno	%	0,60
CO ₂	%	2,23
Oxígeno	%	0,00
Poder calorífico	kJ/m ³	42,80

Protocolos de pruebas

Los protocolos han sido elaborados por la Universidad Nacional de Colombia, siguiendo las recomendaciones de las prácticas y estándares de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) [11, 12, 13, 14, 15].

Las pruebas realizadas tienen como objetivo la evaluación del desempeño del bus articulado prototipo bajo condiciones propias de cada una de ellas. Los protocolos desarrollados se describen en la tabla 3.

Tabla 3 Protocolo de Pruebas

<i>Prueba</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Descripción</i>
Llenado de tanques	Determinar la curva de llenado estable para la configuración de los tanques del bus a evaluar.	Para una diferencia de presión determinada se mide el valor de m ³ de GNC en los tanques con un tiempo de estabilización propio.
Aceleración	Determinar los valores máximos de distancia recorrida, velocidad final y tiempo.	Con un Sistema de Posicionamiento Global se determina el cambio de velocidad, tiempo y distancia sobre una pista plana con una pendiente no mayor al 1%.

Prueba	Objetivo	Descripción
Velocidad máxima	Determinar la velocidad máxima que alcanza el vehículo.	En forma repetitiva encontrar, en pista plana con una pendiente no mayor al 1%, la velocidad límite superior.
Arranque en pendiente	Evaluar de forma repetitiva el arranque en pendiente del vehículo.	Con el vehículo detenido sobre una pista con pendiente determinada, se hace un arranque y se evalúa el comportamiento.
Manejabilidad	Evaluar de forma subjetiva el desempeño del motor y de las condiciones de confort y operación.	Bajo un ciclo de conducción, 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.
Consumo de combustible en trayecto urbano	Medir el consumo de combustible en un recorrido urbano típico.	Bajo la carga máxima permisible, se establece una ruta con condiciones propias de la geografía local para determinar el consumo de combustible en el caso mas extremo (Peso Bruto Vehicular Permisible)
Flexibilidad - Habilidad de giro	Determinar los radios de giro, de giro pared a pared y de giro andén a andén.	Girando el volante hasta alcanzar su punto máximo en cualquier dirección se mueve el bus hasta cumplir una vuelta. Se determina el radio de giro, de pared a pared y de andén a andén.

Condiciones de evaluación

Las pruebas se desarrollaron primero en la ciudad de Cali y luego en Bogotá, manteniendo siempre una carga de trabajo equivalente al peso bruto

vehicular permisible, cumpliendo de esta manera con lo estipulado en la norma técnica colombiana NTC 4901 – 1 [16]. En la tabla 4 se consignan los valores máximos permisibles para el peso bruto vehicular.

Tabla 4 Reglamentación para el peso bruto vehicular máximo

Configuración del autobús	Unidad	Peso bruto vehicular permisible	Peso bruto vehicular permisible del bus articulado prototipo
Articulado de dos cuerpos	kg	30.000	27.500

El peso bruto vehicular del bus articulado prototipo se compone de una carga dinámica (setenta por ciento-70% de la carga total), y de una carga estática (el restante 30 %). La carga dinámica se ha simulado utilizando recipientes de agua, en

tanto que para la simulación de la carga estática se recurre a sacos de arena.

Las condiciones atmosféricas presentes durante el desarrollo de las pruebas en las ciudades de Bogotá y Cali se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Condiciones atmosféricas presentes durante el desarrollo de las pruebas

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Bogotá</i>		<i>Cali</i>	
<i>Altura sobre nivel del mar [17]</i>	m.s.n.m.	2.650		1.000	
<i>Presión atmosférica</i>	kPa	74,50		90,36	
<i>Temperatura ambiente</i>	°C	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
		16	28	20	32

Instrumentación

Se han seleccionado 21 de los 29 parámetros que registra el Módulo de Control del Motor, tomando aquellos que son requeridos para el desarrollo del protocolo. El Sistema de Posiciona-

miento Global sirvió como instrumento adicional en el bus articulado prototipo, de manera que se registran los valores de posición, velocidad, dirección y altitud sobre el nivel del mar del vehículo. Los parámetros medidos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Variables evaluadas en las pruebas (las unidades de las variables registradas con los sensores propios del motor, son reportadas de acuerdo con las unidades propias del Módulo de Control del Motor)

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Instrumentación utilizada</i>
Posición del pedal del acelerador	%	
Nivel del ventilador	%	
Posición de la mariposa	%	
Posición del regulador	%	
Comando de la válvula de control de combustible	%	
Presión barométrica	inHg	
Contra presión de escape	inHg	
Presión de aceite del motor	psi	
Presión primaria de combustible	psi	
Presión secundaria de combustible	psi	
Presión gases de escape	psia	
Presión del múltiple de admisión	psia	
Presión de entrada del mezclador	psia	
Temperatura del aceite del motor	°F	Sensores
Temperatura del combustible	°F	Propios del Motor
Temperatura del refrigerante	°F	
Temperatura de aire del múltiple de admisión	°F	

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Instrumentación utilizada</i>
Voltaje batería	V	
Velocidad del motor	Rpm	
Velocidad del bus	Mph	
Encendido del ventilador	On/Off	
Velocidad del bus	km/h	
Distancia recorrida por el bus y Geo-referenciación de rutas	km	Sistema de Posicionamiento Global
Altura sobre el nivel del mar	m.s.n.m	
Temperaturas atmosféricas y de tanques de combustible	°C	Termocupla Tipo J

Tabla 7 Condiciones de la prueba de llenado para Bogotá

<i>Condiciones</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Temperatura inicial	°C	23,4
Temperatura final	°C	16,1
Duración de la prueba	min	190,0

La curva de llenado, tal como la que se muestra en la figura 2, depende de las condiciones técnicas de la estación de servicio y por lo tanto se debe realizar una gráfica para cada tipo de operación, es decir, para servicio municipal o urbano. Cabe anotar que el tiempo de carga de combustible para el bus evaluado, desde una presión manométrica en tanques de 900 psig hasta 3000 psig, varía entre quince (15) y veinte (20) minutos en estaciones de servicio certificadas por la norma técnica colombiana NTC 4820 [18].

La figura 2 se debe entender como una curva de calibración del tanque, mediante la cual el usuario del bus articulado prototipo puede determinar la cantidad real de gas natural comprimido observando directamente la medida de presión leída del manómetro y teniendo como referencia la temperatura ambiente. Esta curva es muy útil para llevar un control de consumo de combustible; por ejemplo, si el usuario realiza esta lectura en horas de la ma-

ñana, antes de encender el motor, opera todo el día el vehículo y al día siguiente igualmente antes de iniciar la operación toma la misma lectura, puede establecer el consumo real y determinar mediante el odómetro el consumo de combustible por kilómetro recorrido [m³/km] bajo operación normal.

Aceleración

Los resultados obtenidos de la prueba de aceleración se muestran en la tabla 8.

En la figura 3 se observan las curvas comparativas de la prueba de velocidad del bus desde 0 km/h hasta 40 km/h, para cada ciudad, como lo recomienda la norma técnica colombiana NTC 4901 - 2 [19]. Es de aclarar que estos tiempos fueron medidos empleando un cronómetro con resolución de centésimas de segundo y con mando manual para el inicio y final de la medición. Las curvas presentadas, representan el mejor tiempo alcanzado por el bus en cada ciudad, dentro de un conjunto de veinte (20) pruebas realizadas en cada lugar, durante diferentes días. En la figura 3 se observa que el bus articulado prototipo alcanza la velocidad de 40 km/h, en un tiempo cercano a los veinte segundos (20,17 seg) para la ciudad de Cali, en tanto que en Bogotá este tiempo está alrededor de los veintitrés segundos (23,50 seg). De acuerdo con la norma del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá (Transmilenio S.A.), la

cual exige un tiempo menor a veintidós segundos con cincuenta centésimas (22,50 seg) para alcanzar una velocidad de cuarenta kilómetros por hora

(40 km/h), se ve que este bus cumple con el requerimiento en la ciudad de Cali, pero no cumple con el mismo en la ciudad de Bogotá.

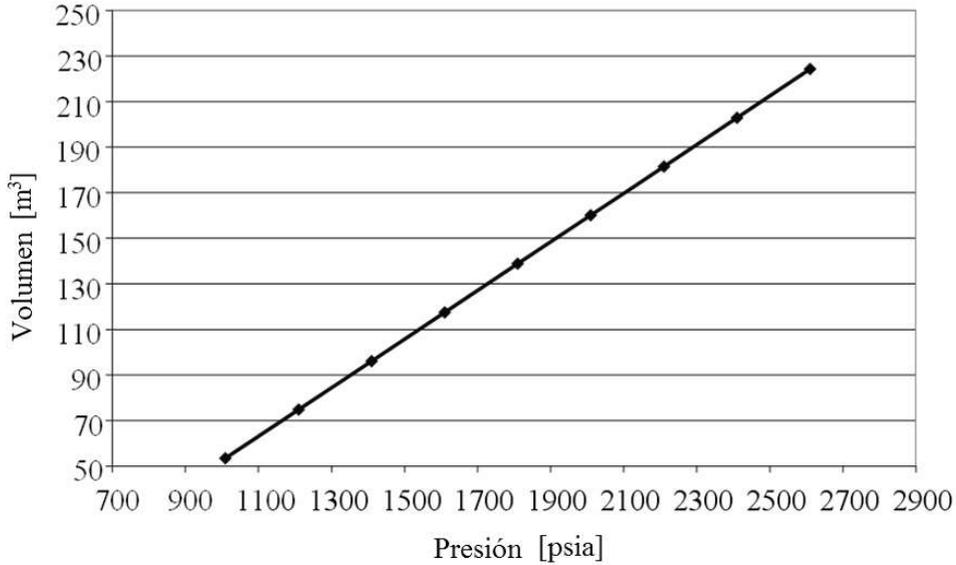


Figura 2 Curva de llenado del bus articulado prototipo en Bogotá (La presión se presenta en psia , dado que es la unidad de trabajo en las estaciones de servicio de GNC en Colombia).

Tabla 8 Resultados de la prueba de aceleración

<i>Prueba</i>	<i>Ciudad</i>	<i>Variables</i>				
		<i>Tiempo [s]</i>	<i>Distancia [m]</i>	<i>Velocidad final de giro del motor [rpm]</i>	<i>Velocidad final vehicular [km/h]</i>	<i>Tiempo esperado</i>
Velocidad del bus de 0-30 [km/h]	Bogotá	17,00	65,70	1.925	30,00	
	Cali	14,00	56,37	1.907	30,00	
Velocidad del bus de 0-40 [km/h]	Bogotá	23,50	131,30	1.868	40,00	22,5 [s]
	Cali	20,17	115,67	1.894	40,00	22,5 [s]
Velocidad del bus de 0-60 [km/h]	Bogotá	43,50	420,00	1.887	60,00	
	Cali	37,67	372,83	1.996	60,00	
Tiempo de aceleración de 0 – 22 [s]	Bogotá	22	118,87	1.817	38,85	
	Cali	22	155,17	2.106	44,37	

Prueba	Ciudad	Variables				
		Tiempo [s]	Distancia [m]	Velocidad final de giro del motor [rpm]	Velocidad final vehicular [km/h]	Tiempo esperado
Tiempo de aceleración de 0 – 60 [s]	Bogotá	60	714,87	---	71,40	
	Cali	60	818	2.474	77,08	
Prueba de distancia recorrida de 0 - 200 [m]	Bogotá	29,41	200	1.508	47,84	
	Cali	27,00	200	1.655	50,43	
Prueba de Distancia recorrida de 0 - 500 [m]	Bogotá	48,84	500	1.864	64,18	
	Cali	45,25	500	2.211	67,15	
Prueba de Distancia recorrida de 0 - 1000 [m]	Bogotá	73,58	1000	2.483	78,62	
	Cali	68,67	1000	2.473	79,48	

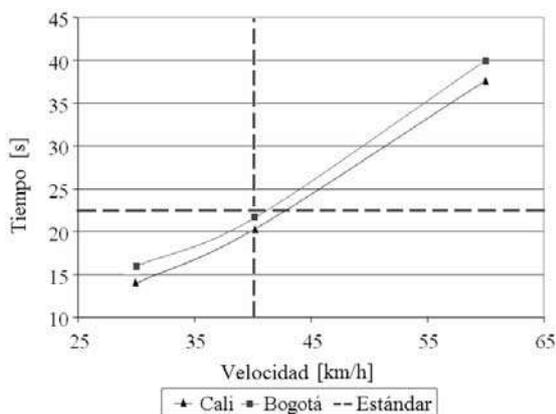


Figura 3 Prueba de velocidad de 0 a 40 [km/h]

Velocidad máxima

Según la normatividad colombiana en materia de tránsito vehicular, desde el año 2002 todos los vehículos de 2 o más ejes que estén operando en servicio público, deben limitar su velocidad máxima a 80 km/h [20]. Por esta razón, el bus articulado prototipo tiene un limitador de velocidad, que restringe la velocidad máxima a este valor límite.

Arranque en Pendiente

El bus articulado prototipo se ha evaluado en pendientes de 3,5%, 10,5% y 14% de inclinación, para la ciudad de Bogotá. De forma análoga, en Cali se evalúan pendientes de 5% y 10%. En todas las pruebas, sin importar el valor de la pendiente, siempre se ha comenzado la prueba del prototipo articulado desde la primera relación de caja. La distancia recorrida en Bogotá no supera los cien metros (100 m) por restricción en la longitud de las vías; mientras que en Cali se ha alcanzado un recorrido de trescientos metros (300 m). En la tabla 9, se muestran los resultados obtenidos con la prueba de arranque en pendiente.

El arranque del bus prototipo articulado puede efectuarse sin problema en todas las pendientes consideradas, excepto para la del catorce por ciento (14%) en la ciudad de Bogotá. Para una vía de un Sistema de Transporte Masivo, este bus articulado prototipo cumple ampliamente, pues las pendientes máximas que se pueden encontrar no superan el once por ciento (11%).

Tabla 9 Parámetros del estudio

<i>Ciudad</i>	<i>Pendiente [%]</i>	<i>Resultado</i>
Bogotá	3,5	Satisfactorio
	10,5	Satisfactorio
	14,0	No satisfactorio
Cali	5,0	Satisfactorio
	10,0	Satisfactorio

Manejabilidad

Los resultados de la evaluación de manejabilidad se encuentran consignados en la tabla 10, en donde se muestra la apreciación subjetiva de cada uno de los parámetros evaluados tanto en Bogotá como en Cali.

Tabla 10 Resultados de la prueba de manejabilidad

<i>Característica evaluada</i>	<i>Bogotá</i>	<i>Cali</i>
El motor sigue encendido después de apagarlo	NO	NO
Explosión en múltiples de admisión ó escape	NO	NO
Fluctuaciones de torque-movimiento del vehículo hacia adelante y atrás	NO	NO
Golpeteo-Combustión anormal	NO	NO
Encendido en falso	NO	NO
Operación suave del motor	SI	SI
Aumento de rpm (velocidad de giro del motor) con apertura de mariposa	SI	SI
Variación de velocidad en ralentí	NO	NO
Apagado del motor después de alcanzar condiciones de operación	NO	NO
Aumento de la velocidad del motor sin cambio en apertura de mariposa	NO	NO
Vibración transmitida por el motor a la cabina	SI	SI
Ruido en cabina	SI	SI
Temperatura confortable en el sitio del conductor	NO	NO
Manejo del vehículo seguro y confiable	SI	SI
Manejo suave del vehículo	SI	SI

Para el caso de Bogotá, la prueba se desarrolla en las afueras de la ciudad, en un trayecto con una longitud de 3,3 km.

Una de las características más repetitivas en esta prueba fue la vibración en la cabina como consecuencia de la ubicación del motor, del acople motor-transmisión y del cardán. De igual forma, el aislamiento térmico y sonoro dentro de la cabina no presenta sensación de comodidad para los pasajeros. Dado que este es un vehículo prototipo, estas características deben ser mejoradas.

Consumo de Combustible

El objetivo de esta prueba es determinar el consumo de combustible en una ruta típica de operación cuando el bus está cargado con su peso bruto vehicular permisible. En la tabla 11, se observan los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 11 Consumo de combustible del bus prototipo articulado. Comparación contra un bus articulado con Motor Diesel

<i>Ciudad</i>	<i>Resultados obtenidos para el prototipo operando con GNC</i>		<i>Resultados para un bus articulado con Motor Diesel</i>
	Consumo en ruta urbana [km/m ³]	Consumo en Ruta urbana [km/gal diesel equivalente]	Consumo en ruta urbana [km/gal diesel]
Bogotá	1,23	5,6	4-7 [21]
Cali	1,12 - 1,39	5,1 – 6,3	No existe comparativo

El cálculo del volumen de combustible diesel equivalente para un bus con motor dedicado a GNC se muestra en el apéndice A.

La ruta elegida para la prueba de consumo de combustible en la ciudad de Bogotá, fue el servicio corriente número 5 de Transmilenio S.A. Las características de esta ruta se presentan en la tabla 12. Para esta prueba, se han hecho 15 réplicas del recorrido diario, lo que implica una distancia de aproximadamente 220-250 km.

Tabla 12 Características de la ruta en Bogotá para el consumo de combustible

<i>Característica</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Distancia en un recorrido	[km]	22,1
Tiempo	[min]	50,1

Para la ciudad de Cali se eligió la ruta Menga-Valle de Lili, cuyas características principales se muestran en la tabla 13. El recorrido diario sobre esta ruta, para la prueba de consumo, se ha establecido entre 230-250 km.

Tabla 13 Características de la ruta en Cali para el consumo de combustible

<i>Característica</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Distancia en un recorrido	[km]	21,1
Tiempo	[min]	70,0

La autonomía del bus articulado prototipo, o distancia máxima recorrida desde el momento de llenado máximo de tanques hasta el momento de indicación dado por el módulo de control del motor para realizar una nueva recarga de combustible, evaluada para la ciudad de Cali fue de doscientos veinticuatro kilómetros (224 km) y para la ciudad de Bogotá fue de doscientos cuarenta y seis kilómetros (246 km). Esta autonomía puede ser considerada como aceptable dentro de rangos de ruta urbana, considerando que existen pérdidas de 60% en combustible durante ciclos de baja carga o en vacío [22], donde estos ciclos representan un 40% de esta clase de recorridos. Un bus articulado con motor dedicado a diesel cuenta con una autonomía de doscientos cincuenta kilómetros (250 km), razón por la cual se puede considerar que estos dos tipos de buses presentan autonomías de funcionamiento equivalentes.

Flexibilidad, habilidad de Giro

Esta prueba se ha llevado a cabo siguiendo los parámetros de medición recomendados [13], obteniéndose los resultados presentados en la tabla 14.

Tabla 14 Resultados de la prueba de habilidad de giro

<i>Característica</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Radio de Giro	[m]	13,05
Radio de Giro Andén-Andén	[m]	13,30
Radio de Giro Pared-Pared	[m]	14,80

En la figura 4 se pueden ver cada una de las características indicadas anteriormente.

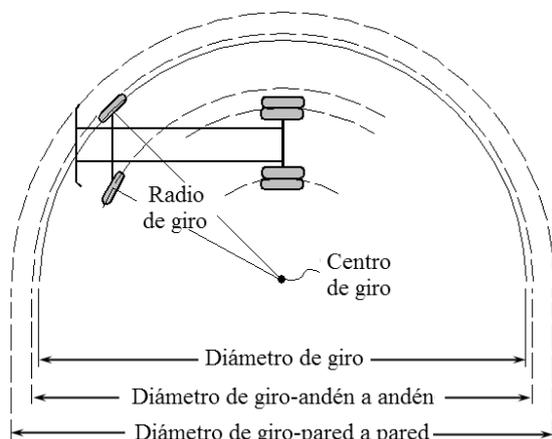


Figura 4 Coronas circulares para maniobrabilidad de un vehículo [13]

Conclusiones y recomendaciones

Según la prueba de llenado de tanques, para la ciudad de Bogotá, se obtiene un valor promedio de dieciocho minutos de duración para el llenado completo de seis (6) tanques del bus articulado prototipo. Este tiempo, en un bus articulado a gas con las especificaciones mencionadas, es similar al tiempo de llenado de un bus articulado diesel.

De acuerdo con la Norma NTC 4901 – 1 [16], el bus articulado prototipo cumple el requisito de alcanzar una velocidad igual o mayor a cuarenta kilómetros por hora (40 km/h) en un tiempo de veintidós segundos con cincuenta centésimas (22,50 seg) sólo para la ciudad de Cali. En cambio para la ciudad de Bogotá el bus articulado prototipo requiere de un mayor tiempo para alcanzar esta velocidad, es decir, no cumple con la Norma establecida para este parámetro.

Teniendo en cuenta los resultados de la prueba de arranque en pendiente, el bus prototipo articulado puede alcanzar todas las pendientes consideradas en un corredor vial de un Sistema de Transporte Masivo.

El bus articulado prototipo cumple los requisitos de flexibilidad de la Norma NTC 4901 - 2 [19] es decir, se ajusta a las especificaciones para los sistemas de transporte masivo como Transmilenio S.A., referente a la maniobrabilidad dentro del corredor vial, las estaciones y los paraderos. El bus articulado prototipo puede movilizarse sin riesgo de tocar los muros, estantes y demás elementos estructurales del sistema de transporte.

Según la prueba de manejabilidad se hace necesario mejorar el aislamiento tanto térmico como acústico de la cabina de pasajeros.

El consumo de combustible diesel equivalente del bus articulado prototipo es similar al consumo de un bus articulado con motor diesel de acuerdo a los datos suministrados por el operador de Transmilenio S.A.

El bus articulado prototipo no cuenta con sistema de aire acondicionado. Debido a las condiciones climáticas propias de la región, varias ciudades en Colombia probablemente exigirán este tipo de sistema adicional. Lo anterior cambiará el desempeño del vehículo, así como el consumo de combustible, por lo que se hará necesario, en los casos particulares, evaluarlo bajo esa nueva configuración.

Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen la colaboración de Daimler Chrysler Colombia S.A., Bogotá – Ingeniero Jaime Ballén; Equitel-Cumandes S.A., Bogotá – Ingeniera Erica Polo; Colombiana de Chasises S.A. – Ingeniero José Fernando Díaz; Stewart & Stevenson de las Americas Ltda, Bogotá – Ingeniero Alejandro Tamayo. Este trabajo fue financiado por la empresa estatal de petróleos de Colombia ECOPETROL S.A.

Referencias

1. Universidad Nacional de Colombia. *Memorias del Seminario de Servicios Públicos, Experiencias Colombianas y Latinoamericanas*. Bogotá. 2004. <http://www.fce.unal.edu.co/occe/eventos/eventos.php?page=1>. Consultada el 25 de Marzo de 2007.
2. O. Naranjo. *Análisis de los Riesgos y Posibilidades de la Expansión del Gas Natural en Colombia*. Observatorio Colombiano de Energía. Boletín 12. 2003. pp.16-19.

3. J. Cárdenas. "Evaluación Económica del Nuevo Sistema de Contratación en Hidrocarburos "El Caso del Gas Natural". *Memorias del Seminario de Servicios Públicos, Experiencias Colombianas y Latinoamericanas*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2004. <http://www.fce.unal.edu.co/oce/eventos/eventos.php?page=1>. Consultada el 25 de Marzo 2007.
4. J. Huertas. "Evaluación de Vehículos a Gas Natural". *Memorias del 1er Seminario Internacional de Biocombustibles*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2004. pp.180-190.
5. Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. *Documento Conpes 3167: Política para mejorar el servicio de transporte público urbano de pasajeros*. Bogotá. 2002. pp.1-26.
6. Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. *Documento Conpes 3242: Estrategia institucional para la venta de servicios ambientales de mitigación del cambio climático*. Bogotá. 2003. pp.1-15.
7. Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. *Documento Conpes 3244: Estrategias para la dinamización y consolidación del sector de gas natural en Colombia*. Bogotá. 2003. pp.1-17.
8. Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. *Documento Conpes 3260: Política nacional de transporte urbano y masivo*. Bogotá. 2003. pp.1-36.
9. "El Gas Natural Vehicular: Alternativa Limpia para el Sistema Integrado de Transporte Masivo". *Publigas al día: Revista Especializada de la Industria del Gas*. Vol 3. 2005. pp. 26.
10. www.ecopetrol.com.co. Consultada 25 de Marzo de 2007.
11. Society of Automotive Engineers. *SAE J1491: Vehicle Acceleration Measurement-Recommended Practice*. Warrendale PA. 2002. Vol. 2 pp. 26.562-26.565.
12. Society of Automotive Engineers. *SAE J1635: Cold Start and Driveability Procedure-Recommended Practice*. Warrendale PA. 2002. Vol. 2 pp. 26.557-26.561.
13. Society of Automotive Engineers. *SAE J695: Turning Ability and OffTracking-Motor Vehicles-Recommended Practice*. Warrendale PA. 1998. Vol. 3 pp.36.85-36.90
14. Society of Automotive Engineers. *SAE J218: Steady-State Circular Test Procedure for Trucks and Buses-Recommended Practice*. Warrendale PA. 1998. Vol. 3 pp.36.75-36.85
15. Society of Automotive Engineers. *SAE J688: Truck Ability Prediction Procedure-Recommended Practice*. Warrendale PA. 1997. Vol. 3 pp.36.03-36.05.
16. Instituto colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Norma Técnica Colombiana NTC 4901-1: Vehículos para el Transporte Urbano de Pasajeros, Parte 1- Autobuses*. Bogotá. 2000. pp. 1-27.
17. www.ideam.gov.co. Consultada el 25 de Marzo de 2007.
18. Instituto colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Norma Técnica Colombiana NTC 4820: Estaciones de servicio para vehículos que utilizan gas natural comprimido como combustible*. Bogotá. 2000. pp. 1-22.
19. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Norma Técnica Colombiana NTC 4901-2: Vehículos para el Transporte Urbano de Pasajeros, Parte 2-Métodos de Ensayo*. Bogotá. 2000. pp. 1-15.
20. República de Colombia. *Ley 769 de 2002*. Diario oficial 44893 del 7 de agosto de 2002. pp. 1-48.
21. Operador SI-99 del Sistema de Transporte Masivo Transmilenio S.A. *Manual de Procedimiento de Ruta*. Bogotá. 2005. pp. 1-53.
22. M. Umierski, P. Stommel. "Fuel efficient natural gas Engine with common-rail micro-pilot injection". *SAE Technical Paper 2000-01-3080*. Warrendale PA. 2000. pp. 1-10.