

Fundamentos para el desarrollo de sistemas de transporte con tracción eléctrica como una alternativa sostenible para Bogotá, Colombia

Edder Alexander Velandia Durán*

RESUMEN

Los problemas locales relacionados con mala calidad del aire en las principales ciudades del mundo, sumado a los problemas del calentamiento global y el deterioro de la capa de ozono, son hechos que motivan a los líderes de los países industrializados, la industria y los centros de investigación a plantear, desarrollar e implementar estrategias alternativas en las prácticas que comúnmente se realizan en un área claramente identificada como no sostenible en el actual contexto de desarrollo: El sector transporte. En este documento se hace referencia al caso de la ciudad de Bogotá, además, describe la actual problemática de calidad del aire generada por el sector transporte y plantea una posible al problema de la contaminación atmosférica.

Palabras clave: transporte, sostenibilidad, tracción eléctrica, calidad del aire, Bogotá.

FOUNDATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SYSTEMS OF TRANSPORT WITH ELECTRICAL TRACTION AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR BOGOTA, COLOMBIA

ABSTRACT

The local problems related to bad air quality in the main cities of the world, along with the global warming problems and the deterioration of the ozone layer, are facts that motivate leaders of the developed countries, the industry and research centers to propose, develop and implement alternative strategies in the practices that are commonly carried out in an area clearly identified as not sustainable, in the current context of development: The transport sector. This article refers to the city of Bogotá, and also it describes the current problems of air quality, generated by the transport sector and it proposes a possible solution to the problem related to the atmospheric pollution.

Key words: transport, sustainability, electric traction, air quality, Bogotá.

* Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: ingeaved@gmail.com
Fecha de envío: 9 de julio de 2007.
Fecha de aceptación: 1 de agosto de 2007.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de mejorar la calidad del aire en las principales ciudades del mundo es un hecho evidente que requiere de una considerable atención para detener el creciente deterioro de las condiciones del planeta mediante planes de desarrollo sostenibles. Según el Ayuntamiento de la Coruña (2007), “una actividad es sustentable cuando el ritmo de consumo de los recursos no supera la capacidad de los recursos naturales para generarlos, cuando el ritmo de emisiones contaminantes no supera la capacidad del medio ambiente para absorberlos y procesarlos, cuando el consumo de los recursos no renovables no supera la capacidad humana para implantar de manera efectiva tecnologías destinadas a sustituir este consumo”.

Siguiendo estos criterios, se establece que el sector transporte es no sostenible, debido al consumo continuo y creciente de recursos no renovables y al aprovechamiento de su potencial a través de sistemas de combustión que generan altos contenidos de emisiones contaminantes al aire. El sector transporte, sólo en el momento de crisis de altos precios del petróleo y la actual crisis ambiental del aire, ha iniciado el estudio serio de sustitutos, bajo algunas restricciones impuestas por actores beneficiados con el sistema existente. En este mismo orden de ideas, el sector

asociado al transporte se ha convertido en un gremio con poder económico y político con mínimos intereses ambientales y sociales; debido en gran parte, a las escasas y débiles medidas políticas desarrolladas por las autoridades a lo largo de los años. Sumado a los anteriores argumentos, se presentan altos costos de infraestructura y los altos costos de exploración, extracción, refinación y transporte de los combustibles fósiles que ocasionan una insostenibilidad económica de dichos procesos.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Según Capoano (2005), en el mundo circulan más de 520 millones de vehículos que producen emisiones superiores a 1400 millones de toneladas por año de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), material particulado (MP), óxidos de azufre (SOx), compuestos orgánicos volátiles (COV), entre otros. En Colombia, según cifras del Ministerio de Transporte (2007) circulan cerca de 3,1 millones de vehículos que consumen el 31% de la energía final en el país (UPME, 2002), de los cuales, el 36% operan en Bogotá. En este sentido, según el Departamento Administrativo del Medio Ambiente – DAMA (2006), el parque automotor genera el 82,5% del total de emisiones contaminantes en Bogotá (Tabla 1).

TABLA 1. INVENTARIO DE EMISIONES EN BOGOTÁ

Emisiones totales por fuente (kg/día)						
	móviles	%	fijas	aéreas	Biogénicas	TOTAL
CO	838776	96.7	21912	6694		867383
MP	4456	35.6	8062			12518
NOx	37397	76.7	3825	7567		48789
SOx	6268	30.4	14011	356		20635
COVNM	130357	89.5	12125	3164	28	145674
CH4	1375	1.0	132689			134064
CO2	5133420	82.4	1095905			6229325
	6152049	82.5	1288529	17781	28	7458387

Fuente: DAMA, 2006.

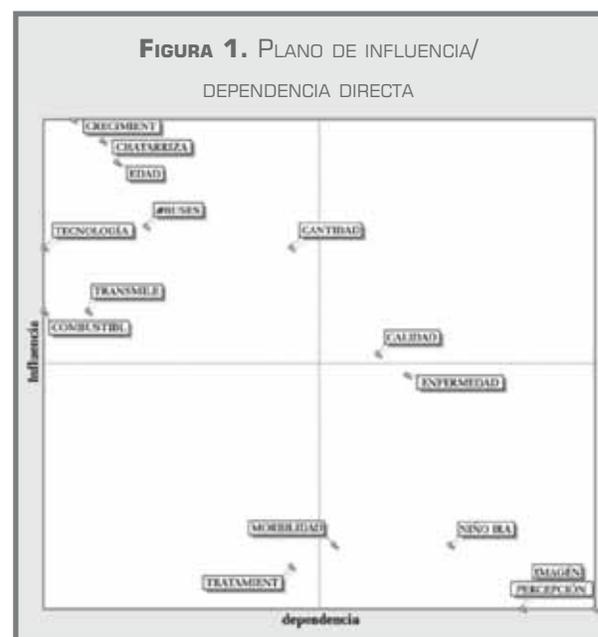
Como consecuencia de la mala calidad del aire durante considerables períodos de tiempo en la zona occidente, centro y sur occidente de Bogotá y algunos cortos períodos de tiempo, bajo condiciones atmosféricas específicas, en gran parte de la ciudad, pueden identificarse una variedad de problemas, entre los cuales se destacan: fomento y complicación de cuadros médicos relacionadas con infecciones respiratorias agudas y enfermedades cardiovasculares; complicación de patologías geriátricas y pediátricas; deterioro de la vida vegetal; fenómenos de lluvia ácida; percepción continua de polvo en el ambiente; aumento del índice de propensión a enfermar de la población.

En Bogotá, el problema de la calidad del aire es una situación compleja donde existe un gran número de actores y variables asociadas que se relacionan entre sí y generan una situación difícilmente analizada por modelos estructurados. Bajo esta condición, es poco probable el poder identificar una estrategia de respuesta efectiva para mitigar el problema, ya que la solución a un problema no estructurado no es fácilmente distinguible. Sin embargo, es posible identificar una o varias ideas fuerza que pueden ser utilizadas para orientar los esfuerzos de quienes estén interesados en solucionar el problema y encaminarlo hacia un *holón* –situación deseada– que progresivamente se irá construyendo (Aldana y Reyes, 2004).

Para tratar de manejar esta complejidad asociada al problema de mala calidad del aire en Bogotá se desarrolló una modelación en MICMAC 6.1.2 (Godet *et al.*, 2004) con base en los argumentos propuestos por Velandia *et al.* (2006) con quince variables que podrían considerarse claves en el contexto del problema. Las variables modeladas fueron: número de personas enfermas IRA (Enfermedad); tasa muertes asociadas a enfermedades cardiovasculares (Morbilidad); tasa morbilidad infantil IRA (Niño IRA); indicadores de calidad del aire en la

ciudad (Calidad); percepción de contaminación de la comunidad (Percepción); número unidades de servicio público (Buses); edad vehículos de transporte público (Edad); tasa crecimiento del parque automotor (Crecimiento); porcentaje contaminación del aire generada por el transporte público (Cantidad); vehículos de servicio público a chatarrizar (Chatarriza); tipos de sistemas de combustión en vehículos (Tecnología); calidad de los combustibles empleados (Combustible); imagen de la ciudad (Imagen); contaminación que genera Transmilenio; costos tratamiento de enfermedades inducidas por la calidad del aire (Tratamiento).

La Figura 1, generada por el modelo MICMAC (2003),¹ se encuentra que las variables dependientes son la tasa de morbilidad infantil, la imagen de la ciudad, la percepción de contaminación de la población, costos de tratamiento de las enfermedades asociadas al problema y tasa de morbilidad debida a complicaciones cardiovasculares y respiratorias. Resultado de esta simulación se encontró una relación de influencia entre variables del 95% y de dependencia del 94%.



1 MICMAC 6.1.2. "Structural analysis is a tool designed to linkup ideas. It allows describing the system thanks to a matrix which links up all its constitutive elements. The method enables, by studying these relations, to underline the variables that are essential to the system's evolution. It has the advantage of stimulating reflection within the group, and leading it to think about certain aspects, which are sometimes counterintuitive. It applies to the qualitative study of extremely different systems". Godet *et al* (2004).

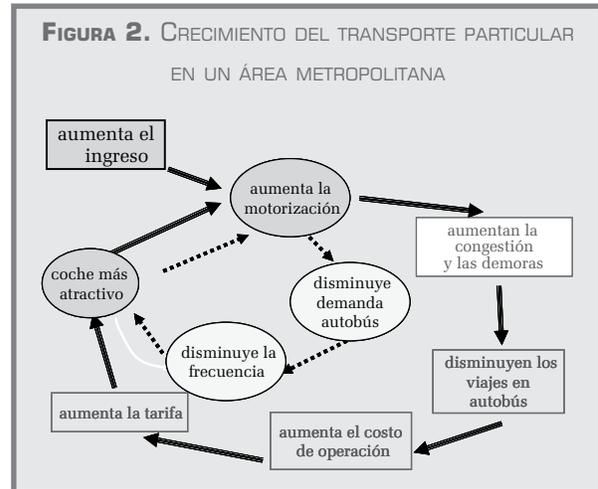
Con base a este análisis puede explicarse el problema de mala calidad del aire en Bogotá como resultado de una combinación de situaciones en el tiempo: alto número de vehículos, tecnología vehicular contaminante, sobreoferta del número de buses, mala calidad de los combustibles, gran edad del parque automotor de servicio público, poca eficiencia del proceso de chatarrización y, finalmente, la generación de emisiones contaminantes por Transmilenio. Sobre este mismo particular, se identifican como variables clave dentro del contexto del problema a los sistemas de servicio público colectivo y masivo de la ciudad debido a que son estos los principales agentes emisores de contaminación del aire en Bogotá (DAMA, 2006).

SOLUCIÓN

En la estructura social de Bogotá pueden identificarse diferentes actores de carácter político, institucional, industrial, económico, ambiental, social, cultural, tecnológico, académico y comercial, que interactúan diariamente en el contexto de acción de los sistemas de transporte urbano. Estas interacciones recurrentes, generadas por una variedad de motivaciones, han originado una situación compleja de movilidad que se ha hecho cada vez menos manejable debido a varios aspectos: crecimiento periférico de la ciudad, aumento de las densidades de población, alto grado de dispersión de personas – trabajos – servicios y el desarrollo de intereses particulares, la cual, es cubierta de alguna forma por un sistema de transporte en crecimiento.

Sobre este particular, para argumentar este planteamiento se presenta un análisis del diagrama planteado por Ortúzar (2000) para explicar el crecimiento del parque vehicular particular y su impacto en los sistemas de transporte público en una ciudad (Figura 2). De acuerdo al planteamiento propuesto por Ortúzar (2000) se puede establecer que el ciclo de crecimiento del parque automotor particular y la reducción de la movilidad es consecuencia del aumento

de la capacidad económica de la población y de la poca eficiencia del sistema de transporte público en una ciudad.



Fuente: Ortúzar, 2000.

En Bogotá y sus municipios vecinos se concentra cerca del 20% de la población de Colombia y la mayor parte de la fuerza productiva del país, hecho que estimula el crecimiento espacial de la ciudad, aumenta las necesidades de movilidad de una población en crecimiento e incrementa la demanda de sistemas de transporte. Sumado a lo anterior, actualmente existen en la ciudad diferentes sistemas de transporte urbano colectivo y masivo que cubren cerca del 75% de las necesidades de movilidad sin ser esto necesariamente una completa garantía de eficiencia, sostenibilidad ambiental, economía y cultura ciudadana (Secretaría de Movilidad, 2007). En Bogotá hay una tendencia a incrementar la motorización, situación que se ratifica con el crecimiento en más del 46% de las ventas de vehículos particulares en los primeros seis meses del año 2007, sin contar el crecimiento del parque de motocicletas (Ortiz, 2007).

En búsqueda de alternativas para disolver el problema de mala calidad del aire en la ciudad, una “idea fuerza” que puede considerarse es el desarrollo de nuevos combustibles o energéticos sustitutos como la electricidad para reducir las emisiones del siste-

ma de transporte urbano. Esta iniciativa encaminada a controlar el deterioro de la calidad del aire en las principales ciudades y reducir las emisiones de CO a la atmósfera se alinea con el diseño de sistemas de transporte cuya fuente de poder se obtiene a través de baterías recargables, sistemas de alimentación directa y/o celdas de combustible.

Para Bogotá, la posible solución al problema de la calidad del aire no es sólo qué hacer para reducir la contaminación sino también identificar alternativas de sistemas de transporte público masivo con bajos índices de contaminación, que permitan reducir el uso del transporte particular. Sobre este tema, entre las posibles alternativas de sistemas de tracción eléctrica mencionadas, los sistemas de transporte masivo con alimentación directa son una opción que se ha empleado desde principios del siglo XX para satisfacer las crecientes demandas de movilidad en el mundo y que actualmente ha evolucionado para aumentar sus beneficios.

Un aspecto que necesariamente debe incluirse para argumentar la idea planteada es el tema de los combustibles fósiles. La calidad de los mismos es una pieza clave en la generación de emisiones con altas cargas contaminantes. Como acciones programadas a mediano plazo por Ecopetrol S.A. (2007) se contempla la optimización de los procesos de refinación y la construcción de dos plantas de hidrotreatmento en las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja, y la construcción de una planta de biocombustible en Barrancabermeja con una capacidad de 100 mil toneladas/año a partir del 2008.

Con base en estas acciones, con inversiones que superan los US \$1400 millones, la política colombiana para mejorar la calidad del aire está alineada con el mejoramiento de los combustibles y el sostenimiento del esquema actual de transporte. Con respecto a estas acciones cabe destacar que el biodiesel, si bien reduce las emisiones de material particulado y óxi-

dos de azufre, continúa siendo contaminante, más aún cuando el contenido de azufre en el diesel es del orden de 500 ppm, superior en más de 10 veces a la concentración de azufre en países europeos. Sobre este mismo particular, el aumento en la producción del combustible ecológico a partir de la caña puede traer consigo un impacto negativo en el abastecimiento de azúcar y panela en Colombia, siendo esta situación identificada como un problema oculto en países como México en donde se implementó la producción masiva de biocombustibles a partir del maíz (Gualdoni, 2006).

Si bien estas acciones deben ser realizadas para mejorar la calidad de los combustibles, esta iniciativa no es la clave para resolver el problema de calidad del aire en la ciudad y la sostenibilidad del sistema de transporte debido a las limitantes de los biocombustibles como solución: problemas de masificación de un combustible 100% ecológico, sostenimiento de tecnologías de combustión ineficientes, malas prácticas operativas y de conducción, sobreoferta, acciones reducidas para su masificación y alta edad del parque automotor en los sistemas de transporte. Con respecto a este tema, se puede concluir que el desarrollo de combustibles más limpios, a excepción del hidrógeno, así como la implementación de catalizadores en los escapes, no son la clave para mitigar completamente la crisis ambiental que agobia actualmente a la sociedad bogotana y, en general, a las principales ciudades del mundo.

A nivel mundial es evidente el uso de la electricidad frente a los combustibles fósiles, al igual que, el gran sentido ecológico que se obtiene al reducir completamente las emisiones del sistema de transporte. Sin embargo, es conveniente decir que el proceso de generar la electricidad para alimentar las baterías y/o los motores de los sistemas de tracción eléctrica genera contaminación del aire cuando ésta se desarrolla en Termoeléctricas. Sobre este particular, en Colombia cerca del 60% del sistema de generación proviene de

centrales hidroeléctricas (Londoño, 2007). Si bien en el país existe generación a través de plantas de energía térmicas que producen grandes emisiones de MP, SOx, NOx, HC, CO y CO₂, estas se encuentran, en su gran mayoría, fuera de los centros urbanos. Hecho que las hace un sistema puntual controlable de menor impacto en las ciudades.

En el mundo, muchos países han desarrollado políticas y programas para el desarrollo y fortalecimiento de las tecnologías con combustibles alternativos como la electricidad y las tecnologías híbridas principalmente en el sector de transporte urbano debido a la importante reducción de la carga contaminante y a la reducción de los consumos diarios de combustibles fósiles. Las tendencias a las que se hace referencia, relacionadas con sistemas de transporte urbano con tracción eléctrica, son el trolebús como vehículo de un esquema BRT (Bus Rapid Transit) con aplicaciones en México DF, Quito, Mérida y en varias ciudades de Europa Oriental; los buses y articulados híbridos con aplicaciones en más de 15 ciudades de Estados Unidos y Canadá; el LRT (Light Rail Transit) con aplicaciones en más de 40 ciudades de Europa Occidental, Estados Unidos y Australia; el metro como sistema de transporte masivo de alta capacidad con múltiples aplicaciones en ciudades con altas demandas de movilidad (Torres, 2006); trenes de cercanías y trenes de alta velocidad para comunicar poblaciones con grandes centros urbanos o entre ciudades con múltiples aplicaciones en el mundo.

Hoy en día, al momento de plantear un proyecto de transporte masivo de bajo costo se piensa en sistemas BRT. De acuerdo a algunos proyectos construidos a nivel mundial, los costos de las inversiones iniciales se encuentran entre US \$5 millones y \$10 millones/Km; sin embargo, según los estimados iniciales de la fase III del sistema BRT en Bogotá, se contemplan inversiones superiores a los US \$22 millones/Km, siendo este costo muy distante a los peores estimativos de sus diseñadores.

Los BRT de Bogotá, luego de siete años de experiencia, han sido importantes en el progreso urbanístico de la ciudad, en el programa de reordenamiento del sistema de transporte público y han establecido una nueva cultura emergente de sistemas de transporte urbano. Sin embargo, también existen aspectos negativos: sistema de transporte público urbano con mayor costo del pasaje; sistema de transporte financieramente susceptible al incremento del valor de los combustibles aún cuando las inversiones iniciales y de parte de los costos operativos son asumidos por la Nación y el Distrito; altos costos de mantenimiento vial; sobre costo en la infraestructura generados por el alineamiento del sistema en zonas residenciales altamente urbanizadas con restricciones de espacio para la vía que ha hecho complejo su desarrollo; generación de emisiones de MP, CO y SOx; desarrollo de problemas sociales en el sector de la comunidad que basa su sostenimiento en los sistemas de transporte público colectivo que es reemplazado; crecientes problemas de insatisfacción de los usuarios del sistema (Cámara de Comercio de Bogotá, 2007).

El sistema BRT de Bogotá, con ventajas y desventajas, es un paso hacia el desarrollo de un sistema integrado de transporte público urbano, pero es evidente que por las limitantes que presenta sea necesario el proponer nuevos sistemas de transporte público sostenibles que tengan mayor impacto en la reducción de emisiones y del uso del vehículo e impulso de la cultura de uso de sistemas de transporte público masivo en la ciudad.

Con base al escenario de transporte urbano en Bogotá y la idea planteada para mitigar el problema de mala calidad del aire en la ciudad, algunas alternativas que podrían considerarse son los sistemas BRT –trolebús y los sistemas de transporte sobre rieles: LRT y metro–. Sobre esta última alternativa, con inversiones superiores a los US \$40 millones/Km e importantes costos de operación anual se puede establecer que, con base a los planes de desarrollo de Colombia

y los programas de financiación de organismos de crédito internacional, esta opción puede ser lejana aun cuando existen corredores viales en Bogotá que ya ameritan soluciones de este tipo para atender las altas demandas de movilidad y las expectativas de desarrollo de la ciudad (Torres, 2006).

En cuanto a otras soluciones de sistemas de transporte masivo con tracción eléctrica, los trolebuses son una opción que puede ser integrada al sistema existente de transporte masivo o que puede ser contemplado en nuevas fases viables del sistema BRT. Este tipo de sistemas si bien generan costos adicionales asociados a la instalación y mantenimiento de las líneas eléctricas de alimentación a los vehículos, son sistemas que anulan la influencia del precio de los combustibles, se da una mayor estabilidad al precio del pasaje y se eliminan las emisiones contaminantes contribuyendo al mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad. En Mérida, Venezuela, el costo del sistema fue de US \$10 millones/Km (Porrás, 2007).

Los trolebuses, para la topografía de Bogotá, no están limitados operativamente y con un sistema de trac-

ción convencional de respaldo, son una alternativa de transporte masivo urbano que podría sustituir de manera eficiente y sostenible al actual sistema de transporte público. De igual forma, la tecnología implementada en el CIVIS, desarrollada por Iris bus & Siemens Transportation, está revolucionando el concepto del trolebús en el mundo (Figura 3). Este tipo de vehículos puede transitar por carriles con y sin catenarias (Eléctrico-Híbrido) y dentro de carriles propios (BRT) o carriles compartidos con el transporte urbano, hecho que les proporciona una gran flexibilidad y menores costos de infraestructura. Algunas aplicaciones se encuentran en Valencia, España, Las Vegas y USA.

En Bogotá, el trolebús se operó como sistema de transporte público hasta finales de los 80. En ese momento, las administraciones tomaron decisiones siguiendo lineamientos mundiales de transporte enfocados a sistemas tipo bus sin precisar situaciones futuras asociadas con problemas de movilidad, altos precios de los combustibles, sobreoferta de servicio público y mala calidad del aire en la ciudad (Morrison, 2006).

FIGURA 3. ESTACIÓN TROLEBÚS QUITO, ECUADOR – SISTEMA CIVIS EN VALENCIA, ESPAÑA



Otra posible alternativa de transporte masivo con tracción eléctrica viable a corto plazo son los LRT. Este tipo de sistemas se desarrolla sobre rieles instalados en carriles exclusivos o en carriles comparti-

dos con el transporte urbano de una ciudad. Un LRT si bien maneja una limitante en cuanto a la capacidad de transporte, cercana a los 16 mil pasajeros por hora-sentido, por sus características operativas po-

dría ser considerado como un sistema de movilidad urbana en algunas vías de Bogotá. Los LRT pueden reducir en hasta ocho veces el costo del energético empleado en comparación a un BRT de combustión interna, en un escenario de requerimientos de movilidad similar (Thomson, 2004). Sin embargo, este beneficio se obtiene pagando un costo adicional por los vehículos LRT, los cuales, pueden costar el doble que una unidad tipo bus articulado convencional. Cabe destacar que, una unidad LRT puede tener una vida útil de 30 años mientras que un bus articulado tiene una vida útil de 7 años (Pizarro, 2005)

En Bogotá, para algunas zonas donde las restricciones de espacio para incorporar un sistema BRT de carriles exclusivo en sectores altamente urbanizados y/o en zonas en donde se generan cañones de contaminación por la altura de las edificaciones que circundan las vías, los LRT pueden ser una alternativa de transporte viable. El LRT se desarrolla en un

ancho de vía menor a 2,60 m, situación que los hace muy competitivos en zonas urbanas con restricción de ancho de vía frente a los BRT (Alstom, 2007).

Por otra parte, el LRT bajo una configuración relativamente diferente al urbano puede ser contemplado como una opción para reactivar el tren de cercanías en la Sabana propuesto por Steer Davies & Gleave (IDU, 2007). Si bien un sistema LRT posee poca flexibilidad, inducida por el transitar estrictamente sobre rieles, un buen diseño y construcción de los carriles puede producir un sistema operativo flexible (Figura 4). Según Thomson (2004), los LRT requieren inversiones iniciales cercanas a los US \$20 millones que los hace un sistema comparable, en cuanto a costos de inversión, a los BRT de la Fase III de Transmilenio estimados en US \$22 millones/Km, costos que no contemplan compras de predios y obras especiales del diseño definitivo (Castro, 2007).



Fuente: Tranvia, 2007.

Si bien este tipo de soluciones pueden llegar a requerir inversiones iniciales superiores a las necesarias para implementar un sistema BRT de costo mínimo, a los LRT se le puede adicionar un importante valor agregado que ha sido identificable en muchas de sus aplicaciones en el mundo: alto impacto cultural que motiva a las persona de una ciudad a usar este tipo

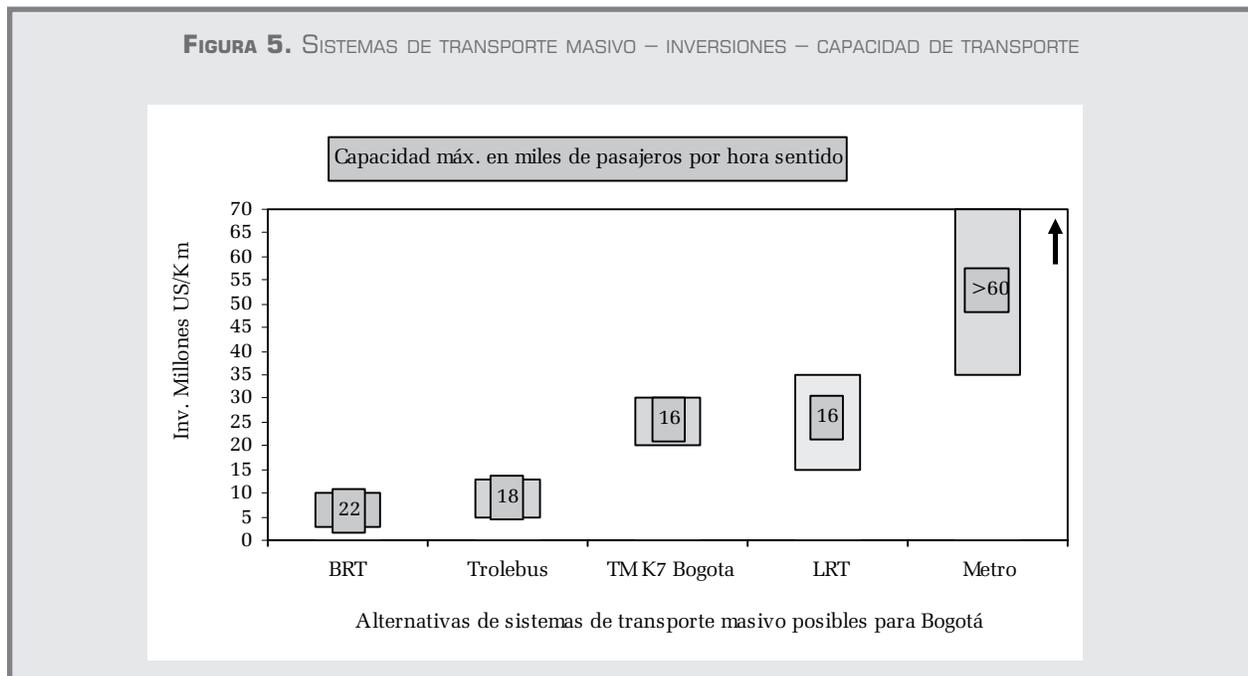
de sistemas de transporte masivo (Carter, 2006). Los LRT para la topografía de Bogotá no presentan ninguna limitante operativa importante; sin embargo, es necesario que cada unidad de transporte contemple un sistema de respaldo de tracción convencional – diesel que les permita funcionar independientemente del suministro de energía durante posibles caídas

del sistema de distribución. Finalmente, si bien los costos de operación de un LRT son en promedio 1,1 veces más altos que los requeridos por un BRT (Pizarro, 2005), sólo sus beneficios ambientales por ser un sistema de transporte cero emisiones en una ciudad pueden compensar esta condición.

En la Figura 5 se presenta un comparativo de algunos aspectos importantes entre el sistema BRT existente en Bogotá y los sistemas de transporte con tracción eléctrica presentados como alternativa para solucionar el problema de mala calidad del aire y de sostenibilidad del sistema de transporte masivo actual. En esta figura se presenta de manera ilustrativa el rango de inversiones iniciales cada sistema de transporte y su capacidad máxima de transporte de pasajeros.

Si bien, los sistemas de transporte con tracción eléctrica presentados son alternativas sostenibles para ser

implementados en Bogotá, es claro, que todo sistema de transporte masivo necesariamente debe ser integrado con otros sistemas. Con base a este criterio, dentro de un esquema integral de transporte urbano es indispensable que el transporte colectivo constituido por buses se convierta en un sistema que permita cubrir las zonas no circunscritas en las áreas de servicio del sistema de transporte masivo, como sistema alimentador o sistema de conexión entre sistemas de transporte masivo. Con relación a este tema, a mediano y largo plazo podrían emplearse masivamente buses y articulados híbridos (HEV). Estos sistemas, implementados en ciudades como New York, Los Angeles, México DF y Ontario, han demostrado una reducción en las emisiones superiores al 60% y ahorros en combustible del 40% al emplear un sistema combinado de tracción por combustión interna convencional y de tracción eléctrica alimentada por baterías de alto poder no recargables *plug in* (Bradley *et al*, 2000).



Los buses y articulados híbridos (Figura 6) tienen un costo cercano a tres veces el costo de un vehículo diesel, situación que los ha hecho poco viables para ciudades de poca capacidad económica y reducidos

intereses ambientales. En Bogotá, estos vehículos podrían ser considerados como sustitutos de los vehículos de transporte colectivo o como sustituto de los buses articulados BRT. En la actualidad, lo que

hace falta para que esta tecnología se masifique es el desarrollo de las baterías para que sean más ligeras, económicas y recargables, con lo cual, se reducirían los costos de la inversión y operativos del vehículo debido a la mayor eficiencia del sistema de tracción

eléctrica. Con relación a este sistema existen algunas dudas de su eficiencia en ciudades de gran altura debido a que sus aplicaciones se desarrollan en ciudades con relieves bastante diferentes a los de Bogotá.



Fuente: US. FTA, 2006.

Finalmente, el uso de la bicicleta sigue siendo clave dentro de este esquema movilidad. En Bogotá cerca de un 4% de la población utiliza este tipo de transporte diariamente (Secretaría de Movilidad, 2007). Sobre este particular, a mediano plazo se espera que los desarrollos en las baterías y el sistema de tracción eléctrica de las bicicletas aumenten los beneficios en autonomía y velocidades, y reduzcan sus precios, para que con ello, sea posible el desarrollo de un sistema de transporte económico y ecológico en la ciudad que permita cubrir la necesidad de movilidad de un mayor número de personas.

CONCLUSIONES

La idea fuerza que se propone para mejorar la calidad del aire en Bogotá es la implementación de sistemas de transporte público con tracción eléctrica que tenga una identidad propia para la ciudad y que transmita una invitación convincente a los usuarios de sistemas de transporte particular para que sean usuarios de un sistema de transporte eficiente, sostenible, seguro, económico y duradero, a través del

cual se construya una nueva cultura ciudadana y un cambio en el paradigma actual de uso de sistemas de combustión interna como única posible alternativa en Bogotá.

Cada alternativa de transporte masivo trae consigo ventajas y desventajas que dan peso a la selección de una u otra opción por evaluaciones de competitividad. Sin embargo, para el caso de Bogotá no existen estudios completos del efecto de la mala calidad del aire en la economía de la ciudad, de la disposición a pagar de la ciudadanía por un sistema no contaminante y de la sostenibilidad financiera del sistema de transporte masivo existente, los cuales, podrían ayudar a generar un mayor acierto de los planes de transporte urbano de la ciudad al considerar una evaluación integral entre nuevas alternativas posibles, diferentes a los BRT tales como LRT, metro, trolebuses y tren de cercanías.

El concepto de BRT como sistema de transporte masivo económico debe ser reevaluado para las nuevas fases del sistema Transmilenio en Bogotá. Esto debi-

do a la pérdida de sus mayores ventajas en comparación con otros sistemas de transporte masivo: bajas inversiones iniciales y sostenibilidad económica por subsidio de la inversión.

Finalmente, el desarrollo de sistemas de transporte público de tracción eléctrica traería consigo beneficios de gran importancia como la reducción de los costos públicos asociados a la mala calidad del aire en la ciudad, desarrollo de nuevos campos laborales no explotados en el área de servicios, mantenimiento y comercialización de una nueva tecnología, aumento en los consumos de energía que incentiva-

rían el sector de desarrollo de generación eléctrica, reducción de los costos de mantenimiento de vías, creación de una nueva imagen de sostenibilidad para la ciudad, estímulo al aprovechamiento de fuentes de energía renovables y reducción del consumo de combustibles fósiles, todas estas posibles situaciones con gran impacto en la economía de Bogotá y de la Nación.

AGRADECIMIENTOS

A los dos evaluadores que permitieron mejorar el manuscrito inicial.

BIBLIOGRAFÍA

Aldana, E. & Reyes, A. *Disolver Problemas. Criterios para formular proyectos sociales*. Bogotá. Colombia: Universidad de los Andes, 2004.

ALSTOM. 2007. Tranvía. <<http://www.alstom.com>>

Ayuntamiento de La Coruña. 2007. España. < <http://www.coruna.es/medioambiente>>

Beherentz, E. *Calidad del Aire en Bogotá*. Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.

Bradley, M.J. and Associates Inc. *Hybrid-electric drive. Final Emissions Report. Northeast Advanced Vehicle Consortium*. US: West Virginia University, 2000.

Cámara de Comercio de Bogotá. "Reportes de seguimiento al servicio del sistema de transporte público masivo Transmilenio". Colombia, 2007.

Capoano, E. 2005. Brasil. <<http://www.eletrabus.com/español/limpio.htm>>

Carter, D. "What Future for UK Light Rail?". *The Future of UK Rail*, 2006.

Castro, A. "En la séptima ya hay una decisión". Entrevista directora Transmilenio. *Diario El Tiempo*. Bogotá, (Edición febrero 03 de 2007).

DAMA. *Red de monitoreo de la calidad del aire en Bogotá*. Colombia, 2006.

DANE. *Calidad de vida en la ciudad de Bogotá*. Colombia, 2003.

ECOPETROL S.A. 2007. Colombia. < <http://www.ecopetrol.com.co>>

FTA. *Vehicle Catalog. A compendium of vehicles and power train systems for bus rapid transit service*. Departamento de transporte US, 2006.

Godet, Arcade, Meunier & Roubelat. Structural analysis with the MICMAC method & Actors' strategy with MACTOR method. The authors are with the Laboratory for Investigation in Prospective and Strategy (LIPS). París, Francia.

Gualdoni, F. "La apuesta por los biocombustibles pone en guardia al mercado de alimentos". *Nuevo Diario*. (29 de diciembre 2006).

- Instituto de Desarrollo Urbano. “Estudio de Demanda para el Tren de Cercanías de la Sabana de Bogotá-Cundinamarca”. Colombia: Steer Davies & Gleave, 2007.
- Londoño, J. “La nueva generación de hidroeléctricas. Redacción de economía y negocios”. *Diario El Tiempo*. (Julio 04 de 2007)
- Ministerio de Transporte. 2007. Colombia. <http://www.mintransporte.gov.co>
- Morrison, A. Porqué Mérida desea el Trolebus (aunque los merideños aún no lo saben....). <http://www.merida360.com/mrd-city/trolmerida/tesis01-allen-espa.html> [fecha de consulta: 21 de agosto de 2007]. 2007.
- Ortiz, J. *Ventas vehículos y motocicletas – reporte DIAN*. Colombia, 2007.
- Ortúzar, J. *Modelos de demanda de transporte*. México: Alfaomega, 2000.
- Pizarro, A. *BRT Vs LRT. Comparación de tecnologías para ejes de transporte público masivo*. Quito: Banco Mundial, 2005.
- Plataforma internaúta de amigos del ferrocarril. <http://www.tranvia.org>.
- Porras. *Gobernador de Mérida, Venezuela. Proyecto Trolmérida*. Venezuela, 2007.
- Secretaria de Movilidad. 2007. Bogotá. < <http://www.transitobogota.gov.co>>
- Siemens Transportation e IrisBus. 2006. CIVIS, en armonía con la ciudad. España.
- Thomson, I. “Unidad de Transporte CEPAL”. Primer curso de capacitación integral sobre transporte urbano. El desarrollo y características de los sistemas de metro y una comparación entre ellos y el transporte masivo basado en buses. Perú, 2004.
- Torres, C. “Fundamentos científicos del desarrollo del sistema metro como vía de solución al problema del transporte masivo de las grandes ciudades”. *Revista Épsilon* 7. (2006): 23 - 29.
- Unidad de Planeación Minero Energética. *Balance energético*. Colombia, 2002.
- Velandia, E; Quintero, L; Rodríguez, M; López, A. & Bonilla M. *Contaminación del aire por emisiones del sistema de transporte urbano en Bogotá*. Colombia, 2006.