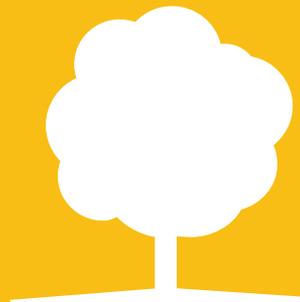


ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO

CONVENIENCIA DEL GAS NATURAL VEHICULAR EN COLOMBIA

Caso de estudio para el sector de transporte público



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
GRUPO DE ESTUDIOS EN SOSTENIBILIDAD
URBANA Y REGIONAL-SUR

Director
Juan Pablo Bocarejo

Investigadores
Ingrid Joanna Portilla
Edgar Andrés Virgüez

Asistente de Investigación
Maria Alejandra Pardo

Marzo de 2016

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN	7
2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	8
3. METODOLOGÍA	9
3.1. INVESTIGACIÓN TEÓRICA	10
3.1.1. EVALUACIÓN AMBIENTAL	10
3.1.2. VALORACIÓN DE COSTOS	11
3.2. CASO DE ESTUDIO MEDELLÍN Y BOGOTÁ	12
4. DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE BAJO CARBONO	13
4.1. EMISIONES DIRECTAS	13
4.2. EMISIONES INDIRECTAS	19
4.3. RUIDO	20
5. VALORACIÓN DE COSTOS	22
5.1. COSTOS DE ADQUISICIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	22
5.2. ANÁLISIS FINANCIERO	24
5.2.1. VARIABLES Y SUPOSICIONES	24
5.2.2. RESULTADOS	25
5.2.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	27
5.3. ANÁLISIS ECONÓMICO	30
5.3.1. VARIABLES Y SUPOSICIONES	30
5.3.2. RESULTADOS	32
5.3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	34
5.3.4. ANÁLISIS INTEGRAL DE LA TOTALIDAD DE LOS COSTOS POR CATEGORÍA	38
6. CONCLUSIONES	40
7. BIBLIOGRAFÍA	42

1. RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

La Universidad de los Andes, por medio de la presente investigación, tiene el objetivo de actualizar y complementar el análisis realizado previamente por el Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de los Andes del año 2011, ampliando el alcance del mismo y presentando información actualizada.

En este informe se presenta una comparación ambiental y económica del gas natural, el diésel y la alternativa híbrida (diésel-eléctrico) como opciones para implementar en sistemas de transporte público de pasajeros.

La primera parte del estudio comprende una valoración

ambiental sobre las emisiones directas de gases de combustión y un análisis sobre las emisiones de ruido.

La segunda parte analiza las emisiones indirectas de la producción y distribución del combustible.

La última parte presenta un comparativo económico de las diferentes alternativas, evaluando los costos de inversión, operación y mantenimiento durante la vida útil de las flotas de buses, incorporando también en este análisis los costos ambientales.

2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Dada la relación entre los sistemas de transporte público, el cambio climático y la salud pública en las ciudades, la industria automotriz en conjunto con entidades gubernamentales, han focalizado esfuerzos para el desarrollo e incorporación de tecnologías de bajas o cero emisiones en la flota de transporte público. De manera particular dichos esfuerzos se han encaminado hacia el desarrollo de tecnologías vehiculares menos dependientes de los combustibles derivados del petróleo empleando fuentes de energía alternativas, como el gas natural y la tecnología híbrida (diésel-eléctrico). Siguiendo esta línea el Gobierno Colombiano fijó metas ambientales espe-

cíficas para el subsector transporte, en el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales, establecido por el Ministerio de Minas y Energía, enfocado en la disminución de la intensidad energética, al mejoramiento de la eficiencia de los sectores de consumo y la promoción de las fuentes no convencionales de energía.

Los gobiernos locales, en consideración de estas metas y bajo los lineamientos de sus planes ambientales y de movilidad, han implementado políticas, programas y estrategias para la transformación del parque automotor de servicio público de pasajeros a un sistema que incorpore nuevas tecnologías eficientes y menos contaminantes. Para incentivar y apoyar la reconversión de la flota de transporte público el Gobierno Nacional y los gobiernos locales han desarrollado

estrategias que permiten reducir y apalancar los costos de adquisición de este tipo de tecnologías. Cabe destacar experiencias pioneras en el país en el uso de vehículos de transporte público a gas natural e híbridos (diésel – eléctricos), en las ciudades de Medellín y Bogotá respectivamente. En estas ciudades las autoridades locales y los operadores de transporte han hecho importantes inversiones en busca de mejoras ambientales y de reducción de consumos de combustible.

3. METODOLOGÍA

El objetivo de este estudio es analizar comparativamente, los beneficios ambientales y costos de las tecnologías vehiculares de transporte público dedicadas a gas natural, híbrida (diésel-eléctrica) y diésel a partir de la revisión de literatura en artículos indexados e informes técnicos (ver sección 7 Bibliografía).

De manera específica este estudio tiene como objetivos:

- Actualizar el documento "*Conveniencia del gas natural vehicular en Colombia: caso de estudio para el sector de transporte público (2011).*"
- Documentar los beneficios y costos realmente obtenidos en la operación de las tecnologías GNV en la ciudad de Medellín e híbrida (diésel-eléctrica) en la ciudad de Bogotá, como estudios de caso.

La metodología utilizada está compuesta por dos secciones: primero una investigación teórica acerca de las tecnologías vehiculares y segundo la documentación del caso de estudio mencionado.

3.1 INVESTIGACIÓN TEÓRICA

La primera sección de la metodología incluye la revisión y análisis de veinte (20) estudios previos, acerca de tecnologías vehiculares realizados entre el año 2001 y 2014 por diferentes organizaciones. De las fuentes consultadas se obtuvieron indicadores para comparar el desempeño ambiental y los costos de las tecnologías estudiadas.

3.1.1 EVALUACIÓN AMBIENTAL

La evaluación del desempeño ambiental toma en cuenta las emisiones directas del tubo de escape de contaminantes atmosféricos, como material particulado (PM), monóxido de carbono, dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Por otro lado también se estima las emisiones indirectas de dióxido de carbono (CO₂ equivalente) producidas durante las etapas de producción y distribución del combustible. Como complemento al análisis realizado previamente, se consideró el ruido percibido debido al motor, como un factor ambiental a valorar para cada tecnología.

3.1.2 VALORACIÓN DE COSTOS

La valoración de costos de las tecnologías, tuvo en cuenta el costo de adquisición, el costo de operación y el costo de mantenimiento para cada una de las tecnologías. Posteriormente para comparar cada una de ellas se realiza un análisis financiero para traer a valor presente los costos operativos y de mantenimiento, con el fin de ser agregados con el costo de adquisición. También se incorporó un análisis económico que toma en cuenta los costos ambientales y de salud pública. Los resultados de estos análisis se presentan en las secciones 5.2 y 5.3.

3.2 CASO DE ESTUDIO MEDELLÍN Y BOGOTÁ

La segunda parte de la metodología, se basa en una investigación sobre el uso de tecnologías gas natural, diésel e híbrida (diésel-eléctrica), en diferentes ciudades del mundo, como Lima, Londres, Curitiba, Barcelona, Nueva York, entre otras. También se recopiló información acerca de los antecedentes y procesos de implementación de tecnologías de bajo carbono en el transporte público en Colombia.

A partir de los resultados obtenidos de la revisión de literatura para las diferentes tecnologías, se analizaron los beneficios y costos reales de la operación de estas tecnologías en las ciudades de Medellín y Bogotá. Dicho análisis incluye la revisión del desempeño de cada tecnología y los beneficios potenciales identificados en etapas previas de los proyectos. La comparación del desempeño real de cada tecnología toma en cuenta los costos de operación, combustible e inversión, el desempeño ambiental, en emisiones reales presentadas del tubo de escape y las características de operación del sistema como la demanda, los kilómetros recorridos y el Índice de Pasajeros por Kilómetro (IPK).

4. DESEMPEÑO AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE BAJO CARBONO

4.1 EMISIONES DIRECTAS

El análisis de emisiones directas del tubo de escape toma como información base los factores de emisión de CO₂, PM, NO_x y CO. Estos valores se presentan en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 para buses padrones (12 metros) operados con ACPM, gas natural vehicular (GNV) y vehículos híbridos eléctricos, respectivamente.

FUENTE	CO ₂	PM	CO	NO _x
(ISSRC - Clinton Climate Initiative, 2013)	1.011	0,066	6,40	12,2
(Universidad de los Andes - Clean Air Institute, 2012)	787	1,210	-	-
(Tzeng, Lin, & Opricovic, 2005)	-	1,260	10,23	15,7
(EMBARQ, 2012)	1.538	0,314	2,26	12,8
(New Energy World, 2012)	1.222	-	-	-
(MJ Bradley, 2013)	1.254	0,007	-	0,3
(US Department of Transportation, 2007)	1.458	0,017	-	2,8
(RARE, 2012)	1.496	0,535	1,95	-
(Jayaratne, Ristovski, Meyer, & Morawska, 2009)	847	0,093	-	10,0

TABLA 1. FACTOR DE EMISIÓN (g/km) PARA BUSES PADRONES QUE UTILIZAN ACPM.

FUENTE	CO ₂	PM	CO	NO _x
(ISSRC - Clinton Climate Initiative, 2013)	-	-	-	-
(Universidad de los Andes - Clean Air Institute, 2012)	606	-	-	0,02
(Tzeng, Lin, & Opricovic, 2005)	-	0,020	0,73	7,25
(EMBARQ, 2012)	1.181	0,009	0,62	9,86
(New Energy World, 2012)	1.171	-	-	-
(MJ Bradley, 2013)	1.169	-	-	0,17
(US Department of Transportation, 2007)	1.355	0,014	-	1,77
(RARE, 2012)	-	-	-	-
(Jayaratne, Ristovski, Meyer, & Morawska, 2009)	639	2x10 ⁻⁰⁴	-	11
(Universidad Nacional, 2014)	1.502	1x10 ⁻⁰⁶	1,79	5x10 ⁻⁰⁵

TABLA 2. FACTOR DE EMISIÓN (g/km) PARA BUSES PADRONES QUE UTILIZAN GNV

FUENTE	CO ₂	PM	CO	NO _x
(ISSRC - Clinton Climate Initiative, 2013)	844	0,020	3,30	2,59
(Universidad de los Andes - Clean Air Institute, 2012)	504	0,013	-	-
(Tzeng, Lin, & Opricovic, 2005)	-	0,230	-	8,64
(EMBARQ, 2012)	1.458	0,035	0,62	9,66
(New Energy World, 2012)	1.013	-	-	-
(MJ Bradley, 2013)	1.014	0,003	-	-
(US Department of Transportation, 2007)	1.161	0,011	-	2,57
(RARE, 2012)	1.319	0,208	0,85	-
(Jayaratne, Ristovski, Meyer, & Morawska, 2009)	-	-	-	-

TABLA 3. FACTOR DE EMISIÓN (g/km) PARA BUSES PADRONES HÍBRIDOS ELÉCTRICOS QUE UTILIZAN ACPM.

La información consolidada en valores promedio y su desviación se presenta en la Ilustración 1. Es importante mencionar que estos valores presentan una alta variabilidad, debido a que los estudios consultados fueron realizados en localizaciones diferentes, con estándares de emisión y condiciones de operación variables. Aislando este aspecto, se evidencia que los valores promedio de factores de emisión de los vehículos híbridos y con GNV son bastante menores que los de un vehículo diésel convencional.

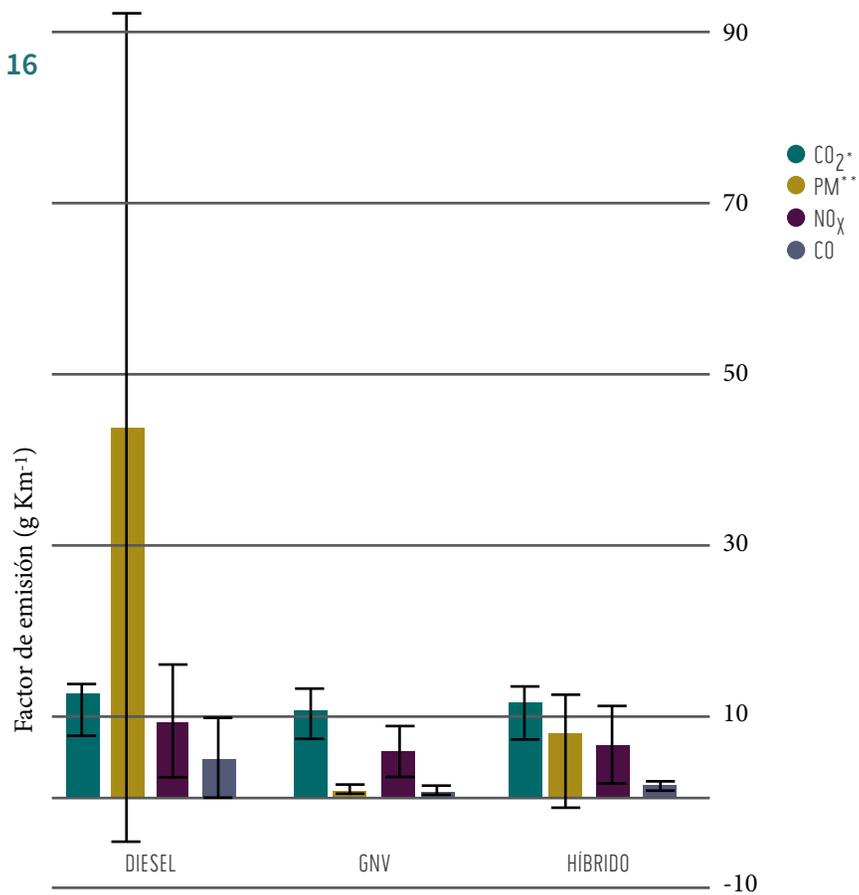


ILUSTRACIÓN 1. FACTORES DE EMISIÓN (g/km-) DE BUSES PADRONES PARA DIESEL, GNV E HÍBRIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN REGISTRADA EN TABLA 1, TABLA 2 Y TABLA 3.

* CO₂ 100 ** PM100

La cuantificación de la reducción porcentual promedio en cada contaminante para buses dedicados a GNV y para buses híbridos eléctricos con respecto a los factores de emisión de un bus diésel convencional permite evidenciar los beneficios en emisiones. Estos resultados se consolidan gráficamente en la Ilustración 2.

La comparación de estas dos tecnologías evidencia una mayor reducción en los contaminantes evaluados para el bus operado con GNV. Sin embargo, en cuanto a las emisiones de CO₂, el vehículo híbrido parece tener más beneficios.

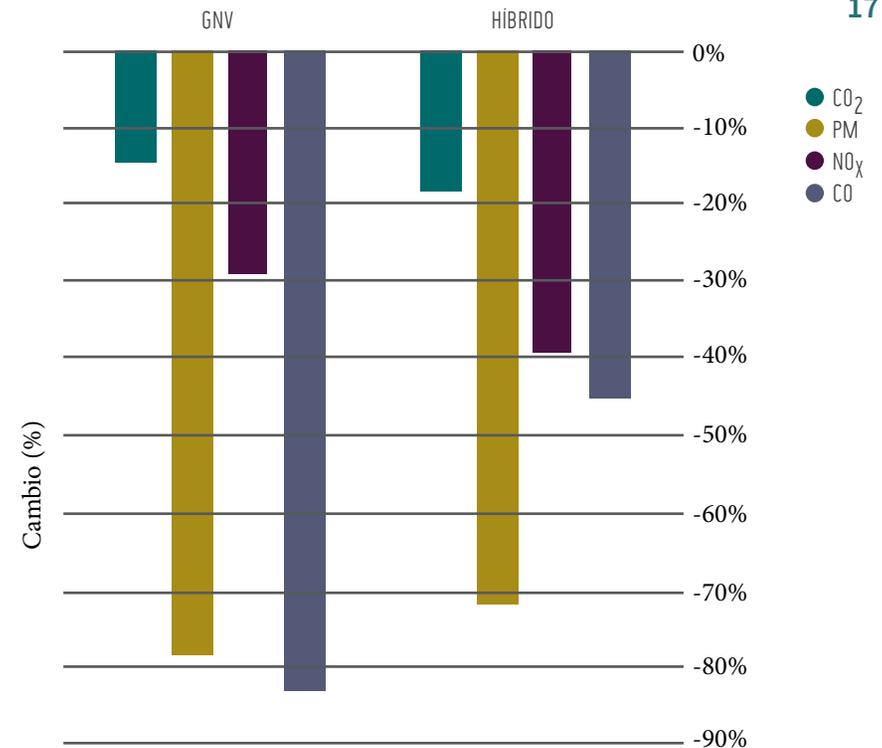


ILUSTRACIÓN 2. REDUCCIÓN PROMEDIO DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE BUSES PADRONES PARA GNV E HÍBRIDO CON RESPECTO AL DIESEL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LA INFORMACIÓN REGISTRADA EN TABLA 1, TABLA 2 Y TABLA 3.

En ambos casos, se destaca que el factor de emisión de PM alcanza una alta reducción, siendo el gas natural el que presenta mayor beneficio, logrando una reducción promedio frente al diésel, cercana al 80%.

Esta disminución es importante para Bogotá ya que éste es el contaminante que presenta mayor excedencia con respecto a la norma nacional vigente, como muestra la Ilustración 3. La resolución 610 de 2010, del MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) establece los niveles de concentración máximos permitidos de PM cuyo diámetro sea inferior a diez micras, para un tiempo de exposición anual corresponde a 50 ug/m³ y 100 ug/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas.

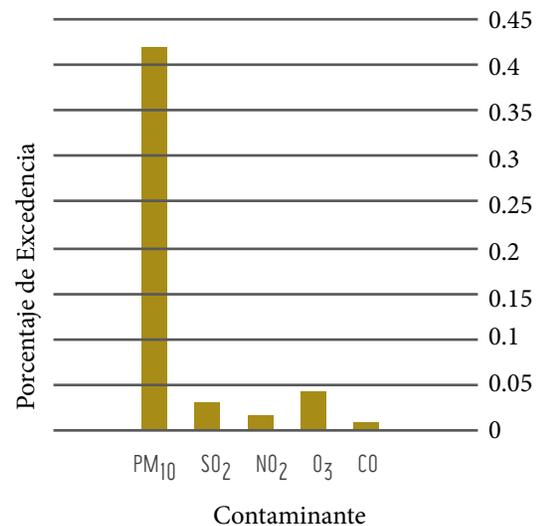


ILUSTRACIÓN 3. PORCENTAJE DE EXCEDENCIA DE LA NORMA DE DIFERENTES CONTAMINANTES EN BOGOTÁ. FUENTE: (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2010)

Por otra parte, se ha demostrado en estudios internacionales que la velocidad de operación de la flota tiene un efecto significativo sobre las emisiones instantáneas (Zhang, y otros, 2013). En la Ilustración 4 se evidencia un caso particular, en dónde se presentan las emisiones relativas de CO₂ en función de velocidad para un bus diésel Euro V, un híbrido y uno operado a GNV para condiciones de operación similares.

En el caso de Bogotá, según el observatorio de movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá (2011), la velocidad promedio para buses y busetas del sistema de transporte público de la ciudad es cercana a los 20 km/h, mientras que para vehículos del sistema Transmilenio corresponde a 26 km/h. Para este rango de velocidades, la disminución en emisiones de CO₂ alcanza el 16% para un bus híbrido y el 19% para un bus a GNV. No obstante, para velocidades superiores a 27 km/h, resulta más favorable el vehículo híbrido, que alcanza una reducción del 78% frente a sólo 25% del bus a GNV.

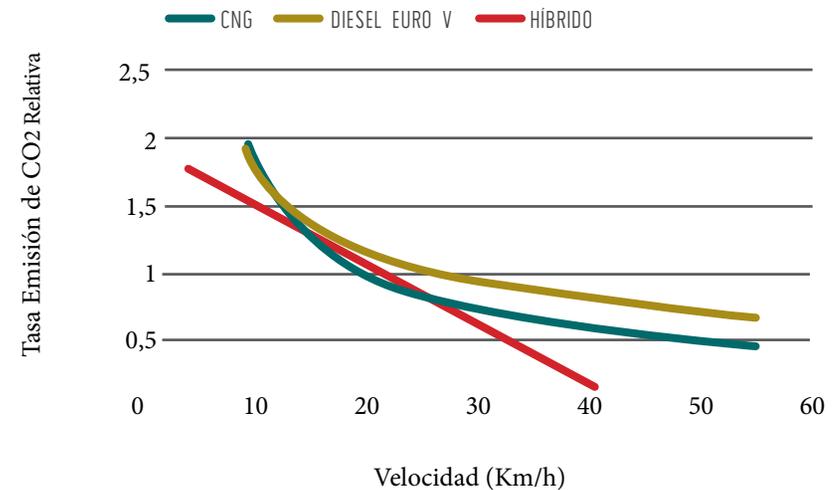


ILUSTRACIÓN 4. EMISIÓN RELATIVA DE CO₂ EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD. FUENTE: (ZHANG, Y OTROS, 2013)

4.2 EMISIONES INDIRECTAS

En el caso de la evaluación de emisiones indirectas, se toma en cuenta las emisiones de CO₂ asociadas al ciclo de vida (ACV) del uso del combustible en los buses. No obstante, este análisis se concentra únicamente en la etapa que corresponde “del pozo al tanque” o WTT (por sus siglas en inglés: Well-to-Tank). Es importante aclarar que, la definición de emisiones indirectas corresponde a las emisiones generadas por la producción y distribución del combustible, y no tienen en cuenta la operación del vehículo.

La Tabla 4 presenta los factores de emisión encontrados en la literatura para la etapa estudiada. La alta variabilidad entre las distintas fuentes se debe a que en general en cada país de estudio se utilizan metodologías de extracción, producción y distribución diferentes que generan cambios significativos en las emisiones. Sin embargo, se evidencia que para todos los casos, resulta más favorable en términos de emisiones de CO₂ el GNV ya que las emisiones son hasta 30% menores que las de ACPM.

FUENTE	ACPM	GNV
(Tamba, Njomo, & Mbog, 2011)	70.000	-
(Unnasch & Pont, 2007)	92.000	80.000
(General Motors Corporation, BP, Argonne National Library, ExxonMobil, & Shell, 2001)	17.900	16.600
(Brinkman, Wang, Weber, & Darlington, 2005)	21.300	14.900
(Toyota Motor Corporation, 2004)	7.900	6.300

TABLA 4. FACTOR DE EMISIÓN (g/km) DE LA ETAPA WELL-TO-TANK PARA ACPM Y GNV

4.3 RUIDO

De acuerdo a la información generada por diversos estudios (Zhang, Zhou, & Zhang, 2014) el ruido puede ser considerado como un elemento que afecta directamente el confort de los usuarios del vehículo.

Como ejemplo de esto, se presentan los resultados de mediciones de ruido en buses de diferentes tecnologías en la Ilustración 5 (New Energy World, 2012).

Para este caso particular, se evidencia que los vehículos híbridos presentan menor nivel de ruido tanto detenidos como en movimiento. El vehículo operado con GNV genera un nivel de ruido inferior al diésel, pero la diferencia es solamente de 2dBA. Adicionalmente, es pertinente mencionar que para todas las tecnologías, el nivel de ruido supera los 65 dB, que se considera el límite aceptable para la OMS.

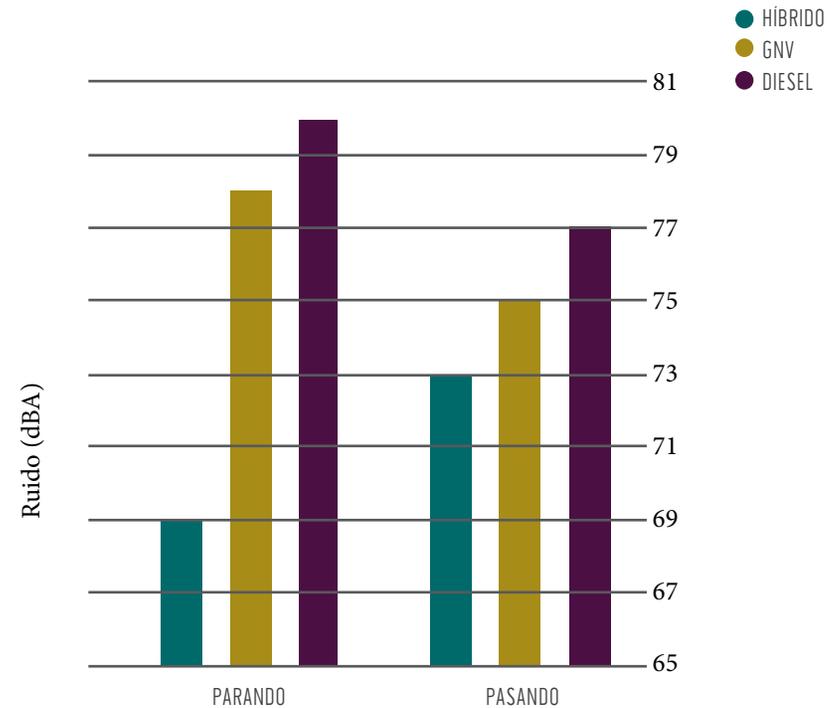


ILUSTRACIÓN 5. COMPARACIÓN DEL RUIDO MEDIDO EN EXTERIOR E INTERIOR DE UN BUS PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS. FUENTE: (NEW ENERGY WORLD, 2012)

5. VALORACIÓN DE COSTOS

5.1 COSTOS DE ADQUISICIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

ADQUISICIÓN. De acuerdo a las fuentes consultadas, se tomaron como referencia los siguientes costos de adquisición de los vehículos (bus de 18 metros):

– Bus diésel:
COP\$360.000.000

– Bus a GNV:
COP\$400.000.000

– Bus híbrido:
COP\$660.000.000.

COSTO DE OPERACIÓN. Se evaluaron los costos asociados al consumo de combustible. Para cuantificarlos, es necesario tener en cuenta el rendimiento y el costo del combustible por unidad.

El rendimiento de un bus diésel (18 metros) oscila entre 8,9 - 10,5 km/gal (Universidad de los Andes - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013) (ECOPE-TROL, 2006) mientras que un bus híbrido alcanza una reducción del 37% de éste consumo (ISSRC - Clinton Climate Initiative, 2013). Por su parte, el rendimiento para un bus de GNV se estima entre 1.33 - 2,15 km/m³ (Universidad de los Andes - Clean Air Institute, 2012) (Universidad Nacional de Colombia, 2014).

Con el fin de comparar la eficiencia energética de las tecnologías, se calculó el rendimiento equivalente de energía por galón de diésel, teniendo en cuenta la capacidad calorífica de los combustibles. Los rendimientos se presentan en la ilustración 6.

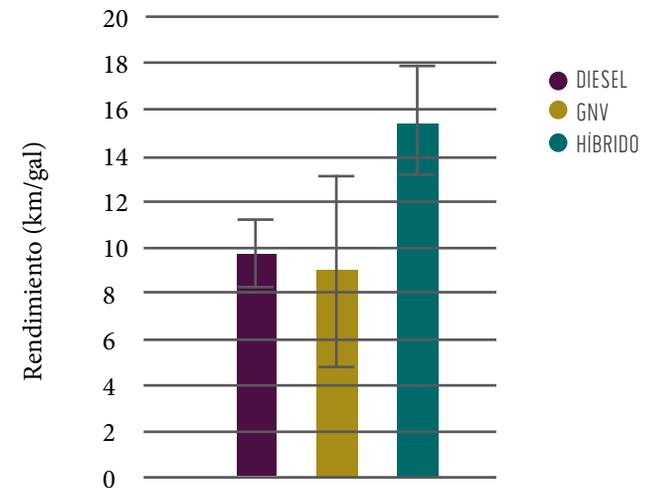


ILUSTRACIÓN 6. RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE PARA CADA TECNOLOGÍA. FUENTE: (ISSRC - CLINTON CLIMATE INITIATIVE, 2013) (ECOPE-TROL, 2006) (UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2014) (UNIVERSIDAD DE LOS ANDES - CLEAN AIR INSTITUTE, 2012)

COSTOS DE MANTENIMIENTO. De acuerdo a las fuentes consultadas, se tomaron como referencia los siguientes costos de mantenimiento:

– Bus diésel: COP\$578/km
 – Bus a GNV: COP\$405/km
 – Bus híbrido: COP\$711/km

Adicionalmente a estos costos, para el vehículo híbrido se consideró el costo asociado al cambio de batería que se realiza aproximadamente cada cinco años, con un costo unitario de COP\$40.000.000 (Universidad de los Andes - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013).

Con base en la información recopilada, se realizó un análisis financiero y económico de las diferentes alternativas y de sus potenciales beneficios y costos de implementación en el transporte público.

5.2 ANÁLISIS FINANCIERO

5.2.1 VARIABLES Y SUPOSICIONES

El análisis financiero de las tres tecnologías se realizó tomando como referencia los costos anunciados en el numeral anterior, es importante destacar que los costos de operación y mantenimiento dependen de los kilómetros recorridos por el vehículo. Dado lo anterior, se tomó como referencia los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE (2012) para los vehículos de transporte público en Bogotá, con el objetivo de estimar un factor de actividad de 64.600 km/año.

Las variables de vida útil, tasa de descuento y tasa de interés se fijaron de forma estándar para las tres tecnologías, esto es, la vida útil de los vehículos se establece en 10 años, la tasa de descuento en 12% y suponiendo que el comprador del vehículo recibe algún tipo de financiación, se toma una tasa de interés del 12.41% anual.

ITEM	VALOR	FUENTE
Factor de Actividad	64.600 km año ⁻¹	(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2012)
Vida Útil	10 años	Autores
Tasa de descuento	12%	Autores
Financiación	Tiempo: 10 años Tasa: 12.41%	Autores
Costo Combustible	GNV: 1.356 COP m ⁻³ ACPM: 8.085 COP gal ⁻¹	(Unidad de Planeación Minero Energética, 2014)
Costos Adicionales	Cambio de baterías híbrido Intervalo: 6 años Costo: 40.000.000 COP	(Universidad de los Andes - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013)

TABLA 5. SUPOSICIONES PARA EL ANÁLISIS FINANCIERO

5.2.2 RESULTADOS

El Valor Presente de los Costos (VPC) por kilómetro para cada tecnología se evalúa a partir de la información presentada anteriormente. Los resultados se pueden ver en la Tabla 6 e Ilustración 7, respectivamente.

COSTO	DIESEL	HIBRIDO	GNV
Combustible	\$455	\$287	\$426
Mantenimiento	\$286	\$352	\$200
Adquisición	\$326	\$623	\$362
Total	\$1,067	\$1,262	\$987

TABLA 6. COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS EN EL ANÁLISIS FINANCIERO (VPC km⁻¹)

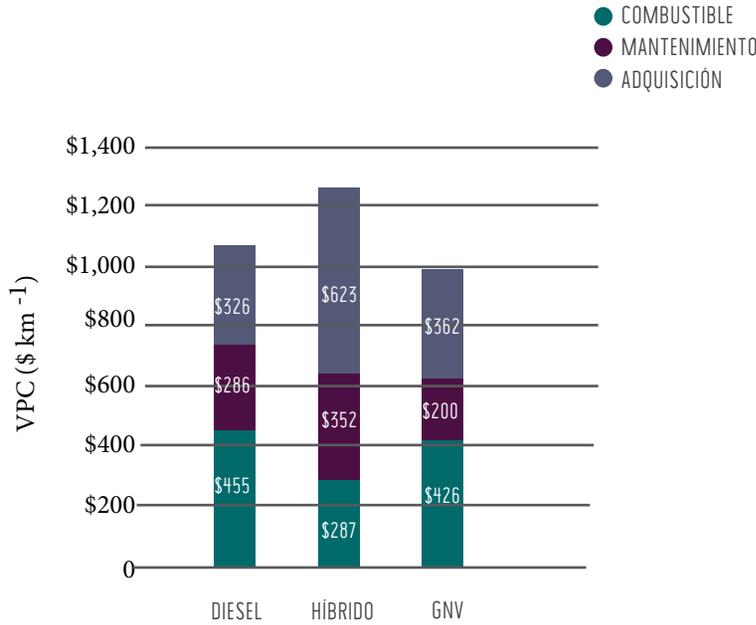


ILUSTRACIÓN 7. COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS EN EL ANÁLISIS FINANCIERO (VPC km⁻¹)
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Del anterior análisis se evidencia cómo la tecnología con menores costos financieros es la del GNV. Los vehículos que operan con este combustible, generan costos financieros 22% inferiores a los generados por vehículos con tecnología híbrida y 7% inferiores a los generados por vehículos diésel. Adicionalmente, se observa que para la tecnología híbrida el mayor costo proviene de la adquisición, mientras que para el diésel y el GNV el mayor costo corresponde al combustible.

5.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para evaluar la incidencia de cada costo sobre el VPC total de cada tecnología se realizó un análisis de sensibilidad del costo de adquisición y del costo de mantenimiento. El VPC de cada tecnología (normalizado por el VPC del vehículo diésel) resultante al variar el costo de adquisición se muestran en la Ilustración 8. De igual forma se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del costo de mantenimiento en la Ilustración 9.

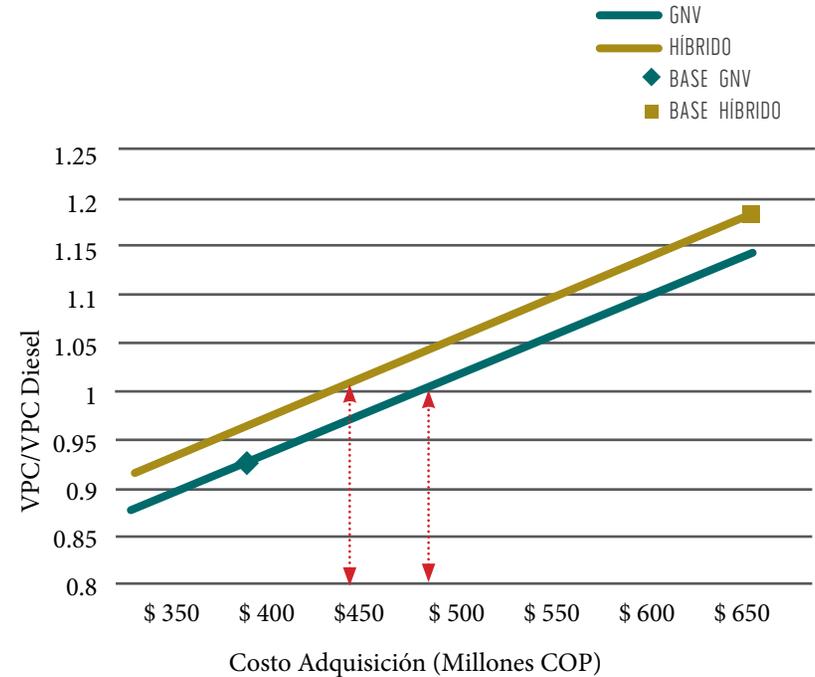


ILUSTRACIÓN 8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO DE ADQUISICIÓN PARA LA VALORACIÓN FINANCIERA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En este análisis, cuando el eje vertical está cercano al valor unitario (1) representa que el VPC de la tecnología (hibrida o GNV) se hace similar al VPC del diésel. Si el valor es mayor a 1, representa que la tecnología estudiada es más costosa que el diésel y viceversa. De la anterior ilustración se hace evidente que, si el costo de adquisición del vehículo híbrido fuera inferior a los \$450 millones de pesos, el VPC por kilómetro, sería inferior al del diésel, haciéndolo la segunda opción más deseable. Este escenario es viable debido a que se espera que los vehículos híbridos disminuyan su costo a medida que se generen avances en la tecnología. Asimismo, el vehículo operado por GNV será mejor al diésel siempre y cuando sus costos de adquisición no sean superiores a \$480 millones.

En cuanto a los costos de mantenimiento, se evidencia que, para que el VPC del híbrido sea igual al VPC del diésel, los costos de mantenimiento de la tecnología híbrida deben ser inferiores incluso a los de GNV y deben estar alrededor de los \$320 COP/km.

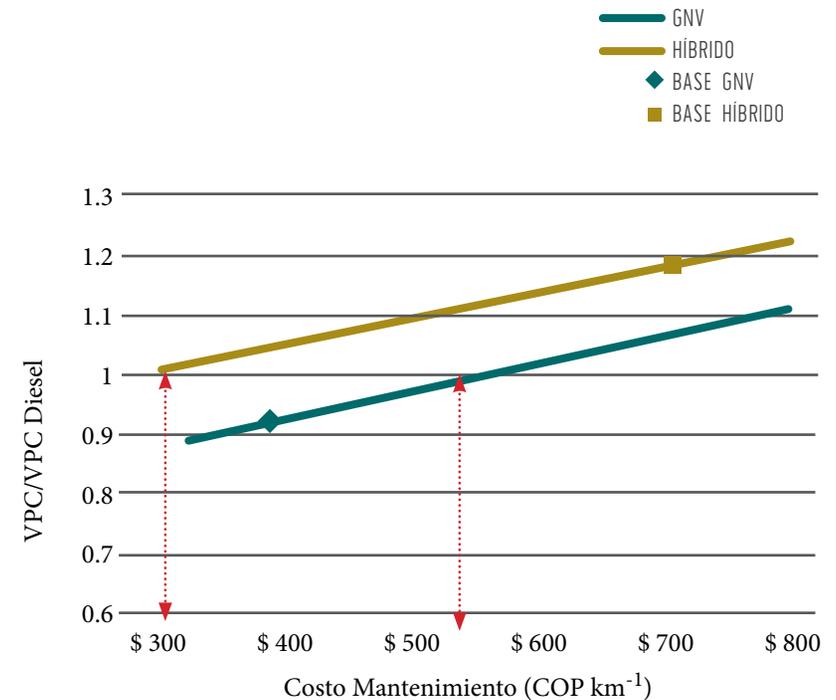


ILUSTRACIÓN 9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO DE MANTENIMIENTO PARA LA VALORACIÓN FINANCIERA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

5.3.1 VARIABLES Y SUPOSICIONES

Para el análisis económico, se tienen en cuenta los costos generados a la sociedad y ciudadanía por el uso de cada tecnología. Es decir, se cuantifica monetariamente los impactos ambientales, en términos del impacto sobre la salud de la población expuesta, generados por la operación del vehículo y la producción del combustible.

Los costos ambientales se traducen principalmente en las emisiones directas del tubo de escape de CO₂ y PM resultantes de la actividad del vehículo en su vida útil, y las emisiones indirectas de CO₂ generadas desde el pozo de extracción hasta el tanque del vehículo. El costo asociado a la reducción

de una tonelada de PM se estima en 480.000 USD para la ciudad de Bogotá, de acuerdo a los registros establecidos en el Plan Decenal para la Descontaminación del Aire de Bogotá donde se contemplan los costos asociados a la morbilidad y mortalidad de enfermedades respiratorias generadas por partículas en el ambiente (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010). Por otro lado, el costo de la tonelada de CO₂ se determinó de acuerdo al IPCC y se estimó en 14 USD (2012).

ITEM	VALOR	FUENTE
Factor de Actividad	64.600 km año ⁻¹	(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2012)
Vida Útil	10 años	Autores
Tasa de descuento	12%	Autores
Financiación	Ninguna	Autores
Costo Combustible	GNV: 1.356 COP m ⁻³ ACPM: 8.085 COP gal ⁻¹	(Unidad de Planeación Minero Energética, 2014)
Costos Adicionales	Cambio de baterías híbrido Intervalo: 6 años Costo: 20.000.USD	(Universidad de los Andes - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013)
Costo PM ₁₀	480.000 USD ton ⁻¹	(Secretaría Distrital de Ambiente, 2010)
Costo CO ₂	14,17 USD ton ⁻¹	(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

TABLA 7. SUPOSICIONES PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO

5.3.2 RESULTADOS

Los resultados del análisis económico se presentan en la Tabla 8. De acuerdo con este análisis, la tecnología más favorable sigue siendo el GNV, que supera por \$300 por km al vehículo diésel. La tecnología híbrida resulta ligeramente más costosa que el diésel. Sin embargo, es importante destacar la reducción, frente al diésel, en las emisiones directas de PM que para ambas tecnologías es cercana a \$200 por km.

COSTO	DIESEL	HÍBRIDO	GNV
Emisiones directas CO ₂	\$ 18.6	\$ 16.2	\$ 16.9
Emisiones directas PM	\$ 232.1	\$ 39.2	\$ 5.8
Emisiones indirectas	\$ 9.3	\$ 5.8	\$ 10.5
Combustible	\$ 455.4	\$ 285.8	\$ 414.6
Mantenimiento	\$ 285.8	\$ 351.8	\$ 199.9
Adquisición	\$ 414.6	\$ 786.3	\$ 460.7
Total	\$ 1,415.8	\$ 1,485.2	\$ 1,108.5

TABLA 8. COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS EN EL ANÁLISIS ECONÓMICO (VPC km⁻¹)

Para identificar la participación de los costos de adquisición, mantenimiento, combustible y los atribuidos a impacto ambiental, se presenta la siguiente Ilustración.

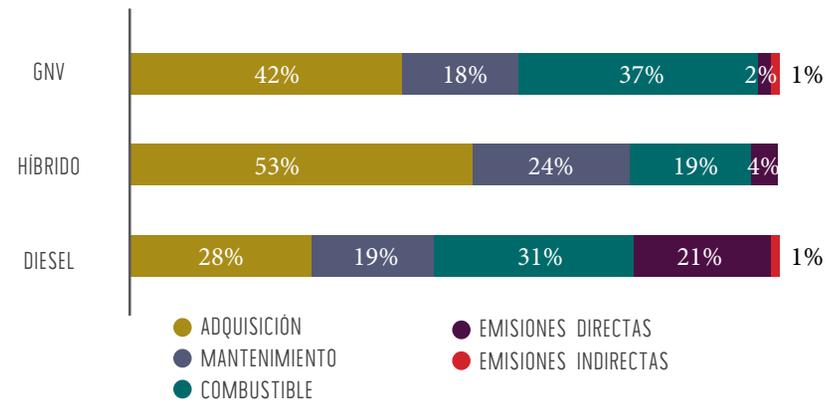


ILUSTRACIÓN 10. PARTICIPACIÓN (%) DE CADA ÍTEM EN EL COSTO TOTAL DE CADA TECNOLOGÍA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En general, se puede afirmar que en el costo total de cada tecnología los costos ambientales generados por las emisiones indirectas son poco representativos ya que están por debajo del 1%. Este mismo fenómeno ocurre también para las emisiones directas pero únicamente para el GNV y el híbrido, para el caso del diésel estas emisiones ascienden al 21%. Para el caso de las tecnologías alternativas se evidencia cómo el costo de adquisición es superior al 40% de los costos totales. Finalmente, los costos de mantenimiento tienen una participación similar en los tres casos.

5.3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para este caso, el análisis de sensibilidad se realizó para las variables costo de adquisición, costo de mantenimiento y factor de emisión de PM. En primer lugar, se evalúa el costo de adquisición, tomando en cuenta que a futuro los precios de las tecnologías alternativas pueden variar, tal como se mencionó en la Sección 5.3, se espera que disminuyan en el futuro. En segundo lugar, se encuentran los costos de mantenimiento, que se consideran de alta variabilidad debido a la dependencia de las condiciones de manejo. Los resultados del VPC por km para los diferentes costos de adquisición y mantenimiento se pueden ver en la Ilustración 11 e Ilustración 12.

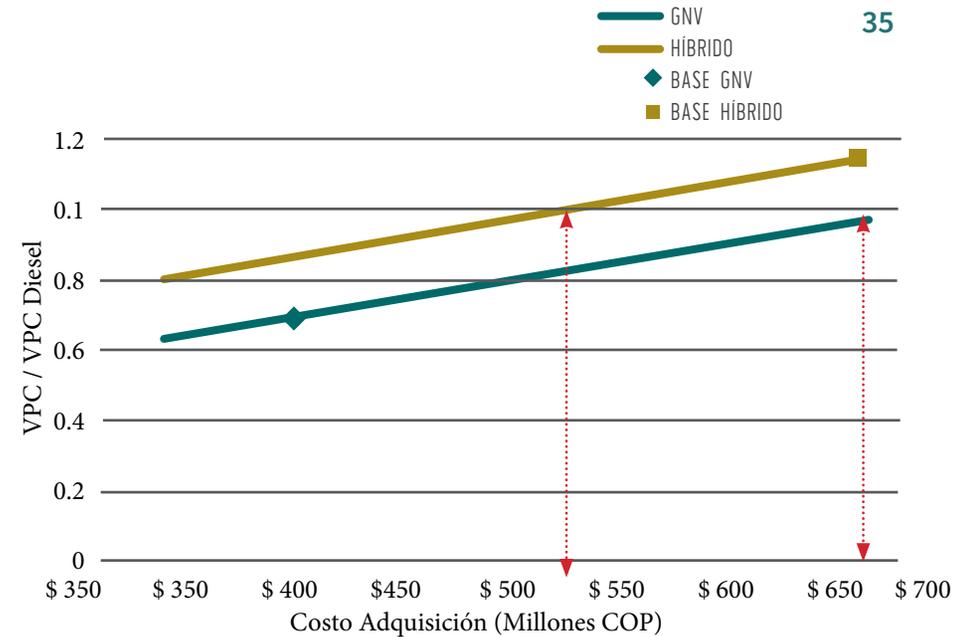


ILUSTRACIÓN 11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO DE ADQUISICIÓN PARA LA VALORACIÓN ECONÓMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

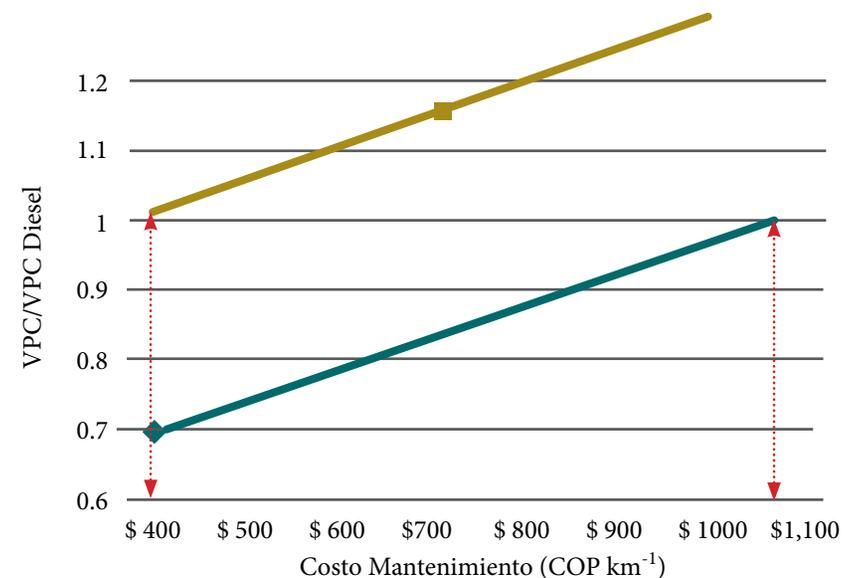


ILUSTRACIÓN 12. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO DE MANTENIMIENTO PARA LA VALORACIÓN ECONÓMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Nuevamente, se evidencia que al disminuir el costo de adquisición del vehículo híbrido a menos de \$530 millones de pesos, el VPC por km es similar al del diésel. Adicionalmente, se observa que si el vehículo híbrido tuviera costos de mantenimiento similares a los del GNV, tendría un VPC por kilómetro similar al vehículo diésel. Similar a lo que ocurre en el análisis financiero, aumentar los costos de mantenimiento y adquisición del bus a GNV no implica que deje de ser la opción más económica.

En tercer lugar, se realizó el análisis de sensibilidad de los factores de emisión de PM para las tres tecnologías debido a que es el componente que tiene mayor peso en el total de los costos. Los rangos de cambio de los factores de emisión se establecieron de acuerdo a la información recopilada en la Sección 2.1. Los factores de emisión de las tecnologías alternativas son bastante bajos, lo que implica que una disminución en éstos no genera un cambio significativo en el VPC por km.

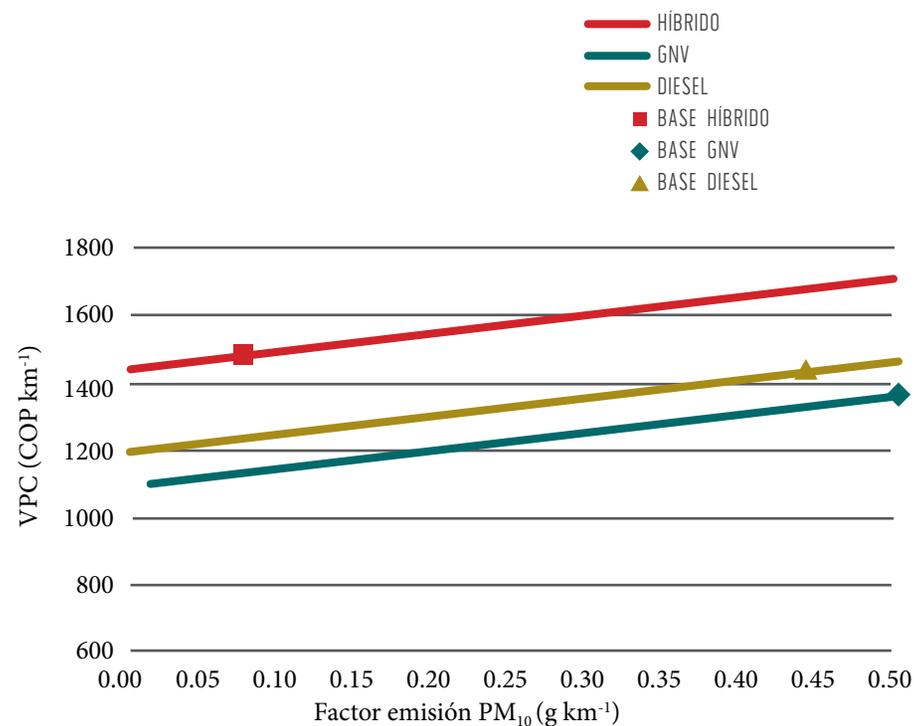


ILUSTRACIÓN 13. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL FACTOR DE EMISIÓN DE PM₁₀ PARA LA VALORACIÓN ECONÓMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.3.4 ANÁLISIS INTEGRAL DE LA TOTALIDAD DE LOS COSTOS POR CATEGORÍA

Para ilustrar mejor las fortalezas y las debilidades de cada tecnología, se normalizó cada costo para obtener un indicador de 0 a 1, donde 1 representa el costo más alto de las tres tecnologías comparadas en el presente estudio. Los resultados se presentan en la Ilustración 14.

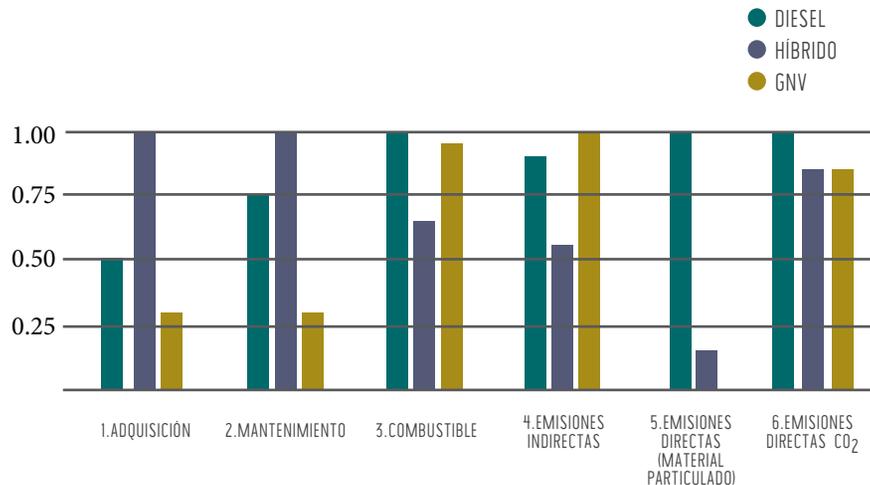


ILUSTRACIÓN 14. ANÁLISIS INTEGRAL DE LA TOTALIDAD DE LOS COSTOS POR CATEGORÍA
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como resultado de la ilustración anterior, se evidencia que la tecnología de GNV es la menos costosa en cuanto a mantenimiento y emisiones directas de material particulado, y en el global, tal como se evidenció en la tabla 8, representa el costo más bajo de las tres tecnologías. En segundo lugar, se encuentra el bus diésel convencional, cuya principal fortaleza es el costo de adquisición mientras que sus debilidades se encuentran en las emisiones directas y el combustible. Finalmente, la tecnología híbrida presenta sus grandes debilidades en los costos de mantenimiento y adquisición, y aunque tiene excelentes desempeños en cuanto a emisiones directas de dióxido de carbono, esto no logra compensar el alto costo de adquisición y se presenta como la tecnología más costosa de acuerdo al análisis.

6. CONCLUSIONES

Durante la investigación reportada en el presente estudio se realizó un análisis comparativo de los beneficios ambientales y costos de las tecnologías vehiculares de transporte público dedicadas a gas natural, híbrida (diésel-eléctrica) y diésel a partir de la revisión de literatura en artículos indexados e informes técnicos.

Con base en la información analizada, los resultados presentados permiten concluir que, el uso del gas natural como combustible puede generar reducciones promedio de material particulado de hasta 70% y de dióxido de carbono de hasta 19% en comparación con las emisiones promedio que generaría un vehículo diésel. Para el caso de las emisiones indirectas de dióxido de carbono, se presenta tam-

bién un beneficio potencial obteniendo reducciones promedio de hasta 30%.

Con base en los resultados de los costos financieros y económicos realizados es posible cuantificar el beneficio económico de reemplazar un vehículo diésel por uno que opere con GNV generando un ahorro de costos financieros equivalente a \$80 por kilómetro y de costos económicos equivalente a \$307 por kilómetro. De igual forma, el cambio en la tecnología representaría reducciones de 0,61 toneladas de PM y 1.200 toneladas de CO₂ por cada vehículo en su vida útil.

Lo anterior significa, que la implementación de una política para la renovación de la flota que constituye el componente zonal del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá (representando cerca de diez mil buses) reemplazando vehículos diésel por nuevos vehículos que operen con GNV, representaría un ahorro \$220.000 millones de pesos y una reducción total de 11,7 millones de toneladas de CO₂ y de 6.000 toneladas de PM. Todo esto tomando como periodo de análisis una ventana de tiempo equivalente a la vida útil de un vehículo

7. BIBLIOGRAFÍA

Brinkman, N., Wang, M., Weber, T., & Darlington, T. (2005). *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions and Criteria Pollutant Emissions*.

Camara de Comercio de Bogotá. (2011). *Observatorio de Movilidad*. Universidad de los Andes, Bogotá.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2012). *Transporte urbano de pasajeros*. Recuperado el 30 de 10 de 2014, de www.dane.gov.co

ECOPETROL. (04 de 2006). *Operación a Gas Natural*. Recuperado el 05 de 11 de 2014, de www.ecopetrol.com.co/especiales

EMBARQ. (2012). *Emisiones de escape de autobuses de transporte público*.

General Motors Corporation, BP, Argonne National Library, ExxonMobil, & Shell. (2001). *Well-to-tank Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Transportation Fuels*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. En Mobile Combustion (Vol. 2)*.

ISSRC - Clinton Climate Initiative. (2013). *Hybrid – Electric Bus Test Program in Latin America Final Report*. La Habra: ISSRC.

Jayarathne, E., Ristovski, Z., Meyer, N., & Morawska, L. (2009). *Particle and gaseous emissions from compressed natural gas and ultralow sulphur diesel-fuelled buses at four steady engine loads*. Brisbane: Science of the Total Environment.

MJ Bradley. (2013). *Comparison of Modern CNG, Diesel and Diesel Hybrid-Electric Transit Buses*. Washinton.

New Energy World. (2012). *Urban buses: alternative powertrains for Europe*. Europa.

RARE. (2012). *Transport for NSW hybrid bus trial*. Sydney: Pitt&Sherry.

Secretaria Distrital de Ambiente. (2010). *Plan Decenal para la Descontaminación del Aire de Bogotá*. Universidad de los Andes.

SFMTA. (2002). *Alternative Fuel Pilot Program*. San Francisco Municipal Railway Fleet Engineering, San Francisco.

Tamba, J. G., Njomo, D., & Mbog, E. T. (2011). Assessment of CO₂ emissions in the petroleum refining in Cameroon. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 1(4), 455-466.

Terpel. (2013). Lista de precios GNV vs. Diesel. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

Toyota Motor Corporation. (2004). *Well-to-Wheel Analysis of GHG of Automotive Fuels in the Japanese Context*. Mizuho Information & Research Institute, Inc.

Tzeng, G.-H., Lin, C.-W., & Opricovic, S. (2005). *Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation*. Taiwan.

Unidad de Planeación Minero Energética. (31 de 07 de 2014). *Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano*. Recuperado el 31 de 10 de 2014, de Precio promedio gas natural vehicular (Bogotá): www.upme.gov.co/

Unidad de Planeación Minero Energética. (31 de 07 de 2014). *Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano*. Recuperado el 31 de 10 de 2014, de www.upme.gov.co

Universidad de los Andes - Banco Interamericano de Desarrollo. (2013). *Análisis Beneficio – Costo del programa de financiación para la transformación tecnológica del Sistema de Transporte Público de Bogotá (SITP) y el Potencial de Reducción de Emisiones de Gases Efecto invernadero (GEI)*. Bogotá.

Universidad de los Andes - Clean Air Institute. (2012). *Estrategias Ambientales Integradas*. Bogotá.

Universidad Nacional de Colombia. (2005). *Evaluación de vehículos dedicados a gas natural*. Ecopetrol S.A., Grupo de Investigación Conversión y Transferencia de Energía, Bogotá.

Universidad Nacional de Colombia. (2014). *Pruebas de validación, eficiencia energética y emisiones contaminantes sobre vehículo dedicado a combustibles gas natural Euro 6 Scania*. Bogotá: Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía y Protección al Medio Ambiente.

Unnasch, S., & Pont, J. (2007). *Full fuel cycle assessment well to tank inputs, emissions and water impacts*. California Energy Commission, Cupertino.

Zhang, K., Zhou, K., & Zhang, F. (2014). Evaluating bus transit performance of Chinese cities: Developing an overall bus comfort model. *Transportation Research Part A*, 105-122.

Zhang, S., Wu, Y., Liu, H., Huang, R., Yang, L., Li, Z., y otros. (2013). *Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses*. Pekin.





Impreso en papel reciclado

