



Final Report:

Rendimiento Real de Buses Híbridos y Eléctricos

Rendimiento ambiental y económico de buses híbridos y eléctricos basados en grandes flotas operacionales



Author(s):
Jürg Grütter, Grütter Consulting AG

Date of the Report: 22/02/2015	Contract Number: 2014.01
Institution: Grütter Consulting AG	Country: international

Prepared by:

Institution XY

Grütter Consulting AG

Thiersteinerstr.22, 4153 Reinach, Schweiz

Tel: ++44 208 5637 463; jgruetter@gmail.com; www.transport-ghg.com



With the Support of:

REPIC Platform

c/o NET Nowak Energy & Technology AG

Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen

Tel: +41(0)26 494 00 30, Fax: +41(0)26 494 00 34, info@repic.ch / www.repic.ch

The REPIC Platform is a mandate issued by the:

Swiss State Secretariat for Economic Affairs SECO

Swiss Agency for Development and Cooperation SDC

Swiss Federal Office of Energy SFOE

The author(s) are solely responsible for the content and conclusions of this report.

Rendimiento Real de Buses Híbridos y Eléctricos

Rendimiento ambiental y económico de buses híbridos y eléctricos basados en grandes
flotas operacionales

Jürg M. Grütter
Grütter Consulting
Diciembre 2014
jgruetter@transport-ghg.com
www.transport-ghg.com

Contenido

Abreviaciones	4
1. Introducción	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Objetivo	5
1.3. Contenido	6
1.4. Repic y Grütter Consulting	6
2. Comparación Ciudades.....	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Información General de las Ciudades.....	7
3. Tecnologías Alternas para Buses Urbanos	9
3.1. Introducción.....	9
3.2. Buses Híbridos.....	10
3.3. Buses Eléctricos.....	11
3.4. El Mercado de Buses Urbanos Híbridos y Eléctricos	12
4. Rendimiento Buses Híbridos.....	14
4.1. Introducción.....	14
4.2. Desempeño Ambiental de Híbridos	16
4.2.1. Informes Publicados	16
4.2.2. Desempeño Ambiental de Híbridos en Bogotá.....	18
4.2.3. Desempeño Ambiental de Híbridos en Zhengzhou.	19
4.3. Desempeño Económico	23
4.3.1. Introducción.....	23
4.3.2. Disponibilidad del Bus.....	23
4.3.3. Inversión y Costo Operacional	23
4.3.4. Rentabilidad	24
4.4. Conclusiones Buses Híbridos	28
5. Bús Eléctrico	28
5.1. Introducción.....	28
5.2. Desempeño Ambiental de Buses Eléctricos.....	31
5.2.1. Desempeño Ambiental de Buses Eléctricos en Zhengzhou	31
5.2.2. Desempeño Ambiental de Buses Eléctricos en Shenzhen.	32
5.2.3. Conclusión Desempeño Ambiental Buses Eléctricos.....	33
5.3. Desempeño Económico de Buses Eléctricos.....	34

Buses Eléctricos e Híbridos

5.3.1. Introducción	34
5.3.2. Disponibilidad del Bus.....	34
5.3.3. Inversión y Costo Operativo.....	35
5.3.4. Rentabilidad	35
5.4. ConclusionesBusesEléctricos	36
6. Oportunidades de Financiamiento por Carbono.	36
7. Conclusiones.....	37
Literatura.....	39

Abbreviaciones

AC	Air Conditioning
ADB	Asian Development Bank
AFD	French Agency for Development
BM	Build Margin
BRT	Bus Rapid Transit
CAF	Andean Development Corporation
CM	Combined Margin
CTF	Climate Technology Fund
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicles
FOEN	Swiss Federal Office of Energy
GEF	Global Environment Facility
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Licuado
GPS	Global Positioning Satellite
ICCT	International Council on Clean Transportation
ICE	Internal Combustion Engine
IDB	Inter-American Development Bank
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
NAMA	Nationally Appropriate Mitigation Actions
NCV	Net Calorific Value
NBFL	New Bus for London
OM	Operating Margin
PM	Particle Matter
RFID	Radio Frequency Identification
SDC	Swiss Agency for Development and Cooperation
SECO	Swiss State Secretariat for Economic Affairs
SFOE	Swiss Federal Office of Energy
TDL	Transmission and Distribution Losses
TfL	Transport for London
TOD	Transit Oriented Development
TTW	Tank-to-Wheel
UITP	International Association of Public Transport
UNFCCC	United Nations Framework Convention for Climate Change
WTW	Well-to-Wheel

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El sector de transporte es la segunda fuente más grande de emisiones de CO₂ proveniente del uso de energía. El sector de transporte emitió en el año 2012 al rededor de 10GtCO_{2e} y consumió la mitad del consumo mundial de petróleo¹. Las emisiones de CO₂ del sector de transporte aumentaron más rápidamente que las emisiones de otras fuentes en las últimas dos décadas. Se pronostica que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de buses para el año 2015 serán del orden de 700Mt de CO₂ con una tasa de crecimiento del 50% previsto hasta el año 2030². Al usar buses híbridos en lugar de unidades convencionales, se podrían evitar 200MtCO₂ de emisiones por año. Esto representa aproximadamente las emisiones de GEI anuales de los Países Bajos. Al usar buses eléctricos, se podría reducir aún más las emisiones de GEI³.

El número de buses, especialmente en los países en vía de desarrollo, está creciendo rápidamente. Se espera que más del 80% de los buses en el 2020, sean adquiridos en países en vía de desarrollo⁴ o sea éstos serán el principal mercado y el mayor potencial para nuevas tecnologías. Por lo tanto, el enfoque de este informe es sobre el uso de buses híbridos y eléctricos en los países en desarrollo.

1.2. Objetivo

El objetivo del informe y del Excel-Tool "Hybrid y E-Bus Tool" es de poder comparar buses híbridos y eléctricos con buses convencionales de motores diesel o gas. El informe muestra el rendimiento real, las emisiones y la rentabilidad de buses eléctricos e híbridos, especialmente en el contexto de los países en desarrollo.

Se ha reportado en numerosos documentos información sobre el rendimiento de buses híbridos y eléctricos. Sin embargo, la información se basa en datos proporcionados por los fabricantes de buses o en mediciones realizadas con flotas pilotos o ensayos, es decir, durante un tiempo limitado con una pequeña muestra de vehículos. Las conclusiones basadas en muestras pequeñas de buses tienden a ser poco fiables. Esto es debido al hecho de que el consumo de combustible, incluso de buses convencionales idénticos, variará significativamente dependiendo de la situación de conducción, las características de la ruta, las condiciones ambientales, el conductor, el mantenimiento del bus, la velocidad promedia, la marca del bus y el tipo, el uso de AC, el tipo de neumáticos usados, etc.. Resultados fiables y sólidos son sólo posibles si el monitoreo del rendimiento se hace por un lapso de tiempo prolongado, con una gran flota de buses en la misma ciudad. De esta manera, se pueden comparar unidades con una configuración similar pero con tecnologías diferentes.

¹ ICCT, Global Transportation Energy and Climate Roadmap, 2012

² Cálculo realizado por Grütter Consulting en base de km-vehículo reportado por ICCT, Global Transportation Energy and Climate Road map, 2012

³ Reducciones dependen de la producción eléctrica en el país o sea del grado de uso de combustibles fósiles para la producción eléctrica.

⁴ Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 08/2013; unit shipment forecast

Buses Eléctricos e Híbridos

La parte innovadora de este informe es que todos los datos se basan en grandes flotas de buses alternativos que operan en la misma ciudad al mismo tiempo juntos con unidades convencionales. Los datos reportados son de muy alta calidad: dos de las ciudades involucradas, son proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) donde toda la información se verifica externamente por una entidad autorizada de Naciones Unidas.

Un elemento central del informe es un enfoque en ciudades de países en vías de desarrollo. Ciudades utilizadas para este informe son fundamentalmente Zhengzhou y Shenzhen en China y Bogotá en Colombia. También información de otras ciudades por ejemplo de Londres se incluye, en base a revisión bibliográfica y entrevistas. El informe incluye por tanto datos de las principales flotas de buses híbridos y eléctricos en el mundo.

El informe está dirigido a los gestores de flotas, así como a consultores. La herramienta de excel proporcionada junto con el informe permite una comparación ambiental y financiera sencilla de buses híbridos y eléctricos con unidades convencionales mostrando así ahorros o costos incrementales de unidades, incluyendo el coste marginal de reducción por tCO₂.

1.3. Contenido

El informe está estructurado en torno a las siguientes partes principales:

- El capítulo 2 presenta las principales ciudades analizadas en este informe: Bogotá, Shenzhen y Zhengzhou;
- El Capítulo 3 comenta sobre las diferentes tecnologías y sus escenarios de mercado;
- El capítulo 4 se centra en los aspectos ambientales y económicos de los buses híbridos;
- El capítulo 5 se centra en los aspectos ambientales y económicos de los buses eléctricos;
- El capítulo 6 comenta sobre las oportunidades de financiación por carbono.

1.4. Repic y Grütter Consulting

Este informe se realiza por Grütter Consulting con financiación proporcionada por Repic y Grütter Consulting.

Repic y es una plataforma interdepartamental Suiza para la promoción de energía renovable y eficiencia energética en la cooperación internacional. Se trata de una iniciativa conjunta de la Secretaría de Estado de Economía de Suiza (SECO), la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), la Oficina Federal Suiza para el Medio Ambiente (FOEN), así como la Oficina Federal Suiza de Energía (SFOE). Para obtener más información, consulte www.repic.ch

Grütter Consulting fue fundada en 1996 y se centra en relacionar el financiamiento del carbono con el transporte. La compañía tiene su sede en Suiza y oficinas o socios en varios países de Asia y América Latina. La compañía ha realizado más de 200 proyectos de transporte con financiación de carbono en todas las áreas de transporte y en este contexto también es responsable del monitoreo de varios sistemas de BRT (Bus Rapid Transit) y de grandes flotas de autobuses en todo el mundo. Para obtener mayor información, consulte www.transport-ghg.com

Buses Eléctricos e Híbridos

El autor desea agradecer a las compañías de autobuses involucradas y a los productores de buses por la información suministrada. Un agradecimiento especial a Deysi Rodríguez de Transmilenio/Bogotá, Michael Kwei de Shenzhen Bus Group y Ba Zhendong del BRT Zhengzhou.

2. Comparación Ciudades

2.1. Introducción

La información proporcionada por las ciudades participantes es único debido a tres razones principales:

- Las flotas de buses híbridos y/o eléctricos desplegadas en las ciudades son muy grandes. Los buses han sido operados en general desde hace varios años. Por lo tanto, los datos de rendimiento son sólidos y fiables.
- Las ciudades seleccionadas en general manejan flotas grandes de buses, por lo cual, no sólo manejan flotas grandes de buses alternos, sino, también flotas grandes de buses convencionales que operan bajo condiciones comparables.
- Las ciudades consideradas tienen un excelente sistema de gestión de datos de monitoreo del rendimiento. En el caso de Zhengzhou y Bogotá los datos también están siendo verificados externamente a través de una entidad internacional designada por Naciones Unidas. Datos de rendimiento se reportan por cada bus en forma mensual.

La singularidad del informe, por tanto, se basa en la comparación de los datos de rendimiento de buses híbridos y eléctricos en la operación diaria en condiciones normales. Ciudades incluidas en el informe son básicamente: Bogotá, Shenzhen y Zhengzhou.

2.2. Información General de las Ciudades

Bogotá es la capital y la ciudad más grande de Colombia. Cuenta con una población urbana de alrededor de 9 millones de habitantes en su área metropolitana y está situada a 2,625 metros⁵.

Figura 1: Ubicación Bogotá y BRT TransMilenio



Photo: Grütter

⁵ Las cifras de población dependen de la fuente y definición. Puede basarse en los límites administrativos o en conceptos como la ciudad, zona urbana, zona metropolitana o la gran zona económica, etc. Las cifras de población citadas en este informe se basan en "Demographia" que define un área urbana como un área urbana construida con el mismo mercado de trabajo, sin tener en cuenta los límites administrativos. Demographia utiliza mapas y fotografías de satélite para estimar la urbanización. Vea Demographia, World Urban Areas 10th Edition, 2014

Buses Eléctricos e Híbridos

TransMilenio S.A. es una empresa municipal de Bogotá y coordina a todos los operadores de buses del sistema BRT. El BRT TransMilenio de Bogotá fue el primer proyecto MDL de transporte registrado a nivel mundial y está monitoreando por sus emisiones de GEI con ayuda de Grütter Consulting desde 2006.

Shenzhen es una ciudad importante en el sur de China, situada inmediatamente al norte de HongKong. Su población urbana es de alrededor de 13 millones de habitantes.

Figura 2: Ubicación de Shenzhen y Shenzhen Bus Group



Photo: Grütter

El sistema de transporte público en Shenzhen está actualmente operado por tres grandes compañías de buses: Shenzhen Bus Group Co., City West Bus Company y City East Bus Company.

Zhengzhou es la capital y mayor ciudad de la provincia de Henan en el norte-centro de China. La población urbana es de alrededor de 4 millones de habitantes.

Figura 3: Ubicación de Zhengzhou y BRT



Photo: Grütter

Zhengzhou Bus Communication Company que forma parte del Gobierno Municipal de Zhengzhou es la empresa matriz de todas las compañías de transporte público. El Zhengzhou BRT es un proyecto registrado del MDL y está monitoreando y verificando sus emisiones de GEI con ayuda de Grütter Consulting desde 2010.

Buses Eléctricos e Híbridos

La siguiente tabla muestra algunas cifras de comparación de las flotas de buses utilizados en cada ciudad involucrada.

Tabla 1: Datos Principales de Buses

	Bogotá⁶	Shenzhen	Zhengzhou
Pasajeros diarios	2.3 millones	> 6 millones	3.2 millones
Cantidad de buses	4,500	> 10,000	> 5,000
Tamaños de buses	50% buses medianos 20% estandard 25% articulados 3% bi-articulados	Majoría estandard; unos buses medianos y unos de dos pisos	7% buses medianos 67% estandard 26% articulados
Tipos de combustible usado	100% diesel	GNCy diesel básicamente	50% GNCy 50% diesel; unos trolebuses electricos
Estandard Euro de los buses	55% Euro II 20% Euro III 3% Euro IV 22% Euro V	Euro III, IV, V y unidades 0-emisión (buses eléctricos)	Euro III, IV, V y unidades 0-emisión (buses eléctricos)
Marcas más usadas	Chevrolet, MB and Volvo	BYD, Wuzhoulong	Yutong
Buses alternos operando a mediados de 2014	200 diesel-híbridos (12m, no tienen plug-in híbridos)	1,800 plug-in híbridos (12m) 1,300 buses eléctricos (12m)	600 diesel híbridos 2,000 GNC híbridos 200 GNL híbridos Unos 1,300 GNC híbridos son plug-in 12m, 14m y 18m híbridos 110 buses eléctricos (12m)

Bus mediano: 8-11m; 30-60 pasajeros

Bus estandard: 12-14m; 60-100 pasajeros

Bus articulado: 16-18m; 140-180 pasajeros

Bus bi-articulado: 24m, 240-280 pasajeros

3. Tecnologías Alternas para Buses Urbanos

3.1. Introducción

El enfoque del estudio es en la comparación del rendimiento real de buses híbridos y eléctricos con buses de diesel, GNC (Gas Natural Comprido) y GNL (Gas Natural Licuado)⁷. Los buses híbridos incluyen los seriales, los paralelos y los híbridos enchufables (plug-in), pero no los llamados "híbridos suaves" sin propulsión eléctrica independiente. Buses eléctricos incluyen los buses con batería. El informe no incluye los trolebuses eléctricos porque esta tecnología ya se utiliza en muchas ciudades desde hacen décadas. El informe tampoco incluye buses eléctricos de oportunidad, ya que esta tecnología se encuentra todavía en la etapa de pruebas pilotos. El informe tampoco incluye buses en base de hidrógeno con pilas de combustible por la misma razón.

El informe trata de tecnologías de bus y no del combustible utilizado. Por lo tanto, no se hace ninguna discusión sobre los méritos de combustibles en base de gas o de biocombustibles.

⁶ Incluye unicamente el sistema BRT

⁷ No se incluyen a buses GLP (Gas Licuado Petroleo) por exisitir muy pocas unidades de este tipo.

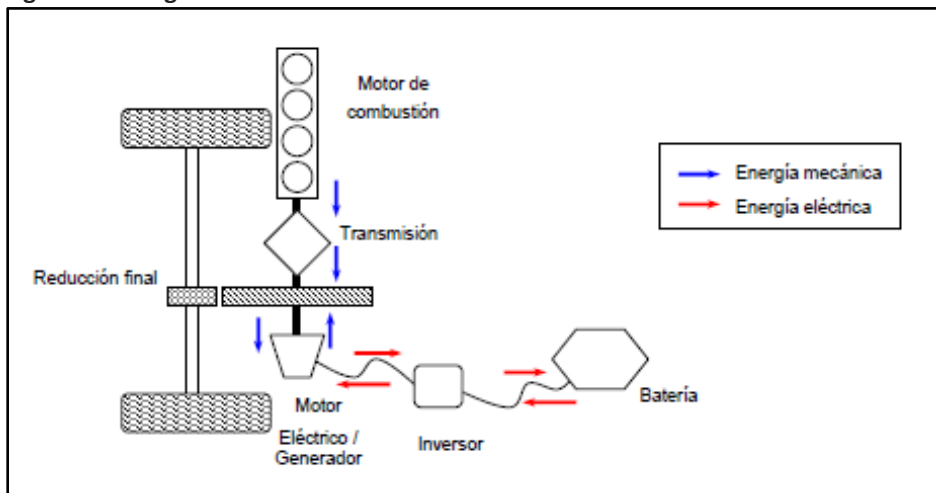
Buses Eléctricos e Híbridos

El estudio se centra en buses urbanos de 12m con una capacidad promedio de ochenta pasajeros. Este es el principal tipo de autobús urbano que circula en todo el mundo. El informe, sin embargo, también incluye información sobre buses más grandes (18m, unidades articuladas).

3.2. Buses Híbridos

Existen diferentes tipos de buses híbridos que incluyen el híbrido en serie, el híbrido paralelo y los híbridos paralelo-serie que usan una combinación de los dos tipos de sistemas de accionamiento. Adicionalmente, se hace una diferenciación entre el bus híbrido "convencional" y los buses híbridos enchufables (*plug-in*) que permiten la carga eléctrica por una fuente de alimentación externa.

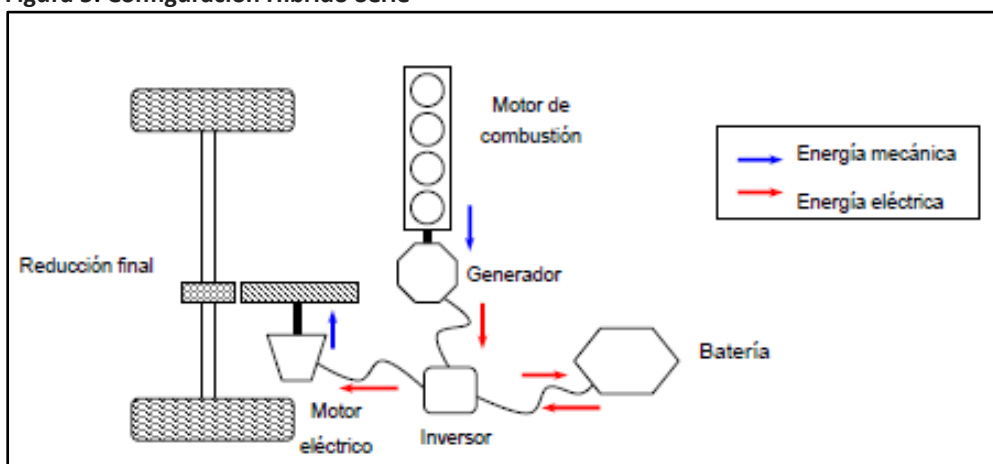
Figura 4: Configuración Híbrido Paralelo



Fuente: M. Garmendia, <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4130/1/memoria.pdf>

En un bus híbrido en paralelo, el motor de combustión da la potencia al eje y un motor eléctrico funciona también como alternador para generar energía que carga la batería. El motor de combustión y el motor eléctrico están conectados a la transmisión y las dos pueden impulsar el vehículo en forma independiente. El motor eléctrico está diseñado para proporcionar energía durante la circulación en stop-and-go, mientras que a velocidades mayores el vehículo es impulsado únicamente por el motor de combustión interna. Además, por medio de un proceso llamado frenado regenerativo, la energía perdida debido al frenado se recupera y se utiliza para cargar la batería.

Figura 5: Configuración Híbrido Serie



Fuente: Fuente: M. Garmendia, <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4130/1/memoria.pdf>

Buses Eléctricos e Híbridos

En un bus híbrido en serie no existe una relación mecánica entre el motor de combustión interna y el eje motriz. El motor da su potencia a un generador que carga la batería y los motores eléctricos hacen girar las ruedas del vehículo. Dado que el motor no está conectado a las ruedas se le puede operar a una revolución óptima e incluso se puede apagar el motor por períodos cortos de tiempo para un funcionamiento totalmente eléctrico del bus.

Híbridos diesel-eléctricos están disponibles comercialmente desde hace más de quince años. Los nuevos modelos están siendo desarrollados por una variedad de fabricantes. Buses híbridos GNC o GNL operan de una manera similar a los híbridos diesel-eléctricos y se utilizan básicamente en China. Híbridos enchufables son alimentados por una batería que se puede cargar desde una fuente de alimentación externa. Tienen un motor a bordo que también puede recargar la misma batería. El tiempo que el bus funcionará en modo eléctrico será dependiente de las características del itinerario, la frecuencia de carga y de la configuración del vehículo y los sistemas de energía. Plug-in híbridos son una tecnología relativamente nueva, pero ciudades como Zhengzhou o Shenzhen ya operan grandes flotas de vehículos híbridos enchufables desde aproximadamente dos años.

Híbridos convencionales utilizan en su mayoría super-condensadores, mientras que los híbridos enchufables usan baterías⁸.

3.3. Buses Eléctricos

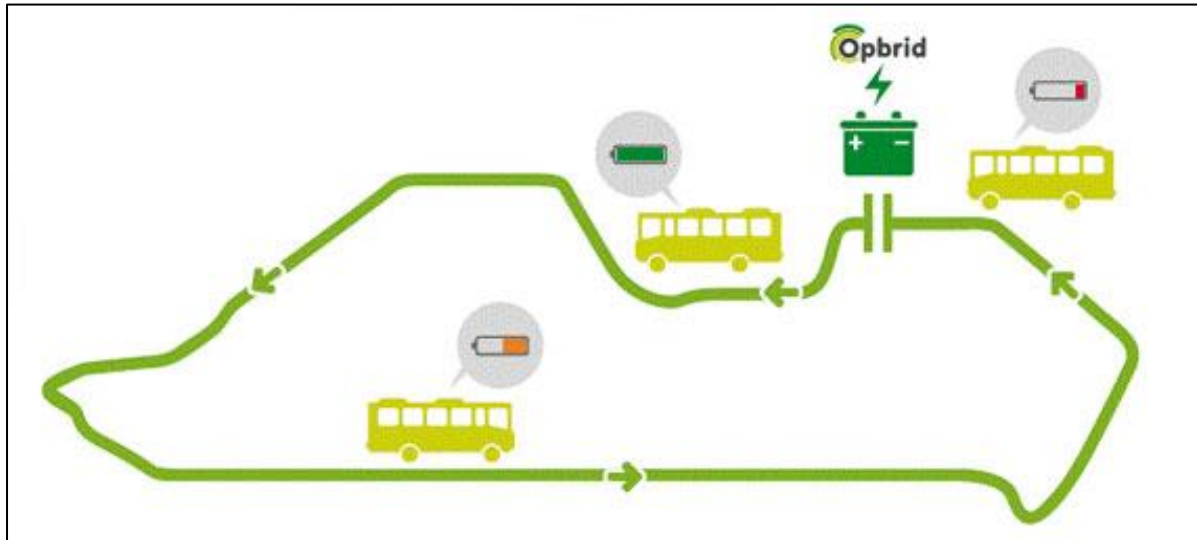
Buses eléctricos incluidos en este informe son aquellos que funcionan con una batería recargable. Los buses eléctricos en general, tienen una gran cantidad de baterías a bordo para conseguir una distancia de recorrido suficientemente larga. Eso resulta en un peso adicional considerable por las baterías y la necesidad de espacio para ubicarlos. Para resolver este problema algunos fabricantes de buses eléctricas han optado por un sistema de cambio rápido de baterías.

Buses eléctricos de “oportunidad” se cargan en la ruta, ya sea en puntos de recarga en todo el circuito del bus o en la primera y última parada (véase la figura de abajo para un sistema de este tipo). En Ginebra un sistema de carga ultra-rápida llamada “flash charge” se está probando con buses articulados (vea foto abajo). Sin embargo, este tipo de sistema, aunque prometedor para el futuro, se encuentra todavía en su etapa piloto sin flotas grandes en operación. Por lo tanto, no se incluye en este informe.

⁸ Los capacitadores actúan como un acumulador de energía, como las baterías. Debido a que los capacitadores clásicos son electrostáticos, pueden liberar su carga muy rápidamente. Baterías se basan en un proceso químico, que evoluciona más lentamente. Baterías tienen una mayor densidad de energía y los capacitadores pueden tener una densidad de potencia superior.

Buses Eléctricos e Híbridos

Figura 6: Carga Rápida de Buses Eléctricos



Fuente: <http://hybricon.se/word/projects/service-modules/>; con 13km de ruta requiere 3 minutos de carga en un sitio.

Foto 1: Bus TOSA⁹ 18m Carga de Oportunidad en Ginebra, Suiza



Fuente: Grütter

La Asociación Internacional de Transporte Público (UITP), coordina un consorcio de cuarenta empresas para trabajar en proyectos de demostración de buses de 0 emisiones (ZeEUS), durante cuatro años con el objetivo de utilizar más buses eléctricos en toda la red urbana. El proyecto fue lanzado en enero de 2014 y abarca soluciones de buses eléctricos innovadores con diferentes sistemas de propulsión eléctrica en ocho ciudades Europeas con treinta y cinco buses eléctricos de 12m (incluye también híbridos enchufables).

3.4. El Mercado de Buses Urbanos Híbridos y Eléctricos

La cantidad de buses en operación en el año 2010 es de unos 16 millones de unidades y se espera que aumente a alrededor de 18 millones de unidades para el año 2020 y a 20 millones de unidades para el año 2030. En el año 2010 alrededor del 17% de los buses estaban operando en China, 12% en Corea, 6% en Estados Unidos, 6% en Rusia y 4% en la India siendo los cinco países con mayor cantidad de buses. 2030 se espera que China, India y Corea sean los tres países con mayor cantidad de buses¹⁰. Las cifras del ICCT (Consejo Internacional sobre Transporte Limpio), incluyen no sólo los

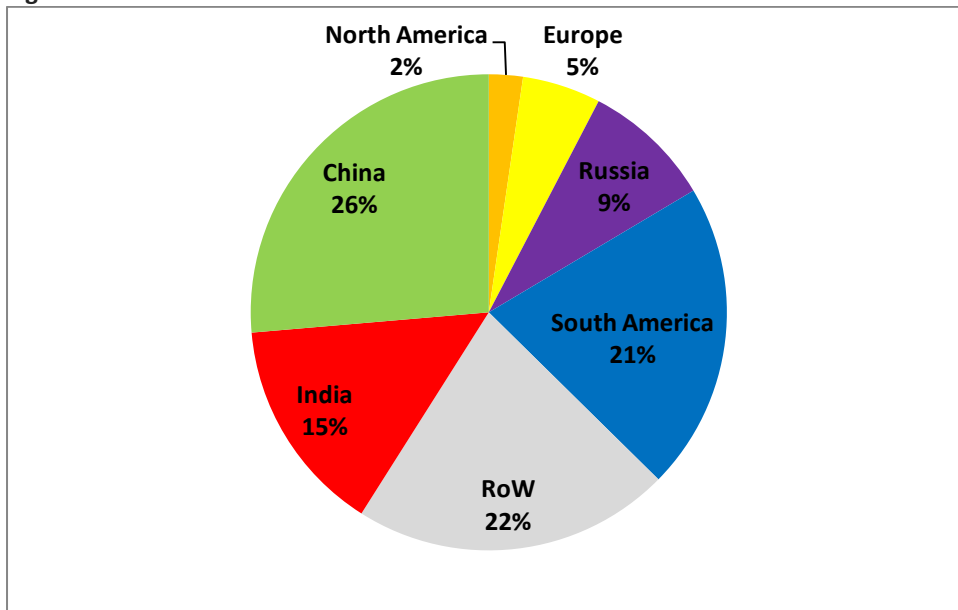
⁹ Trolleybus Optimisation System Alimentation

¹⁰ ICCT, Global Transportation Energy and Climate Roadmap, 2012, Appendix E

Buses Eléctricos e Híbridos

buses urbanos, sino también a los buses interurbanos y otros. A continuación, la atención se centra en los buses urbanos. Para el año 2020 se espera que se venda cerca de 300,000 buses. La siguiente figura muestra a los principales países y regiones compradores de buses.

Figura 7: Mercado Global de Buses Urbanos 2020



Fuente: Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 08/2013

China por sí sola tendrá una cuota de mercado global de más del 25% de los buses con más de 70,000 unidades comprados sólo en este año. Para América del Norte, por ejemplo, sólo se proyecta la venta de alrededor de 6,000 unidades para el mismo año. India y Rusia también tienen grandes cuotas de mercado. Europa y América del Norte tendrán conjuntamente una cuota del mercado inferior al 8%, y también con tasas de crecimiento mucho más bajas que otras regiones del mundo lo que significa que su importancia relativa en el mercado de buses se reducirá aún más.

La figura muestra claramente que las virtudes de la tecnología eléctrica e híbrida tendrán que ser demostrado en países como la China y la India y regiones como América del Sur, la ASEAN y los países Africanos. No es sorprendente que también se espere que los fabricantes chinos como Yutong, Wuzhoulong, Foton, Kinglong y BYD lideren el mercado de buses eléctricos e híbridos a nivel global. Volvo, ADL y Daimler serán los principales fabricantes fuera de los chinos.

A nivel mundial más de 250 sistemas BRT están en funcionamiento o bajo planeamiento. Esto crea un enorme potencial de mercado para la compra de buses nuevos. Frost & Sullivan espera que también por esta razón los buses híbridos y eléctricos tendrán una cuota de mercado de alrededor del 15% en el año 2020, lo que significa una tasa de crecimiento anual compuesto de casi el 20% en comparación con el año 2012, esta tasa de crecimiento es muy superior a la tasa de crecimiento de buses en total que se sitúa alrededor del 6%. Se espera que se vendan en el año 2020 unos 27,000 buses híbridos y eléctricos, comparado con unas 8,000 unidades vendidas en el año 2012.

La siguiente tabla muestra una comparación de los costos de inversión de buses urbanos de 12m en diferentes regiones del mundo.

Buses Eléctricos e Híbridos

Tabla 2: Comparación de Precios de Buses Urbanos de 12m (USD)

Mercado	Diesel convencional	Híbrido	Eléctrico	Costo adicional híbrido	Costo adicional eléctrico
China	\$60,000-\$90,000	\$125,000-\$200,000	\$280,000-\$350,000	115%	420%
India	\$75,000-\$110,000	\$175,000-\$255,000	\$325,000-\$410,000	130%	300%
Rusia	\$130,000-\$180,000	\$245,000-\$325,000	\$400,000-\$500,000	85%	190%
América Latina	\$200,000-\$225,000	\$280,000-\$340,000	\$410,000-\$500,000	45%	115%
Resto del Mundo	\$100,000-\$350,000	\$195,000-\$500,000	\$300,000-\$700,000	55%	120%
Europa	\$250,000-\$350,000	\$420,000-\$510,000	\$575,000-\$680,000	55%	110%
Norte América	\$300,000-\$400,000	\$485,000-\$540,000	\$595,000-\$690,000	45%	85%
Promedio	\$200,000	\$330,000	\$480,000	65%	140%

Fuente: Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 08/2013; basado en precios regionales del mercado en USD 2012

Cabe mencionar los siguientes elementos:

- El costo de inversión por bus varía mucho entre las regiones;
- Un bus eléctrico adquirido en China está en el rango del precio de un bus diesel convencional en América del Norte o en Europa.

Los costos adicionales en porcentaje de buses híbridos y eléctricos son mucho más altos en los mercados de precios bajos, como China, India y Rusia, y mucho más bajo en los mercados de alto precio, como Europa o América del Norte. En promedio el costo adicional para un bus híbrido es del orden de \$100,000 a \$150,000 y para un bus eléctrico de 250,000 a 300,000 dólares. Sin embargo, las diferencias de precios entre los buses convencionales e híbridos, así como eléctricos han reducido desde 2012 como los resultados de los siguientes capítulos mostrarán.

4. Rendimiento Buses Híbridos

4.1. Introducción

La comparación de las unidades híbridas y convencionales se realizó utilizando los siguientes criterios:

- Las comparaciones se realizan dentro de la misma ciudad, es decir, buses de tecnologías alternativas de Bogotá se comparan con los buses convencionales de Bogotá;
- Los buses convencionales y alternativos operan las mismas rutas o el mismo tipo de rutas;
- Los buses comparados son del mismo tamaño y tienen la misma capacidad de pasajeros;
- Los buses comparados son de la misma categoría Euro y de la misma edad;
- El rendimiento del bus se compara en el mismo período de tiempo.

El consumo de combustible en Zhengzhou y Bogotá se mide por bus por RFID (Radio Frequency Identification) o en base de informes de las estaciones de servicio. La distancia se mide por GPS.

Bogotá ha adquirido recientemente una flota de quinientas unidades híbridas de las cuales unas doscientas unidades están operando desde julio del 2014. Bogotá también opera una flota grande de buses diesel modernos comparables. Los buses híbridos de Bogotá son de la marca Volvo de 12m para ochenta pasajeros. No tienen híbridos plug-in. Los buses en Bogotá no cuentan con AC.

Buses Eléctricos e Híbridos

Foto 2: Buses Híbridos en Bogotá



Fotos: Grütter

Zhengzhou opera desde finales del año 2010, un número cada vez mayor de buses híbridos. En 2014 contaba con 2,800 buses híbridos. El siguiente cuadro muestra la información relativa a los híbridos utilizados en la ciudad.

Tabla 3: Características de Buses Híbridos en Zhengzhou

Parámetro	Buses Diesel-Híbridos	Buses GNC/GLN-Híbridos
Cantidad de híbridos en operación	2009: 20 buses 2010: 20 buses 2011: 460 buses 2012: 590 units 2013/14: 600 units	2012: 960 buses 2013/2014: 2,220 buses de los cuales unos 200 GNL
Híbridos plug-in (incluidas en la cantidad de híbridos arriba)	0 buses	1,300 buses (todos buses comprados desde 2013)
Tamaño y capacidad de pasajeros	12m para 80 pasajeros 14m para 110 pasajeros 18m para 150 pasajeros	12m para 80 pasajeros 14m para 110 pasajeros 18m para 150 pasajeros
Marca	Yutong	Yutong
Estandar Euro	IV and V	V

Fuente: Zhengzhou Bus Communication Company, 2014

Fotos 3: Híbridos de 12m y 14m de Zhengzhou



Fotos: Grütter

Buses Eléctricos e Híbridos

En total Zhengzhou opera unas 2,800 unidades híbridas que representan más del 50% de la flota total. Todos los buses híbridos tienen aire acondicionado y todos son híbridos paralelos. Alrededor del 50% de las unidades son híbridos enchufables. Los plug-in híbridos permiten la carga con un rango eléctrico de alrededor de 30 km con un tiempo de carga de 40 minutos. Están equipadas con baterías de litio, mientras que los híbridos convencionales tienen super-capacitores.

4.2. Desempeño Ambiental de Híbridos

4.2.1. Informes Publicados

Muchos ensayos han sido y continúan siendo realizados con buses híbridos por numerosos operadores de transporte en todo el mundo. Los datos sobre el ahorro de combustible y los costos financieros se basan a menudo en este tipo de pruebas, algunos sólo por un período corto y la mayoría sobre la base de una pequeña flota que opera rutas no necesariamente comparables. La siguiente tabla resume los hallazgos principales de los principales estudios con buses híbridos, donde, con excepción de los estudios C40 Cities, las flotas consideradas fueron significativas (más de 50 unidades, aunque en Alemania dispersos en muchas ciudades).

Tabla 4: Rendimientos Reportados de Buses Híbridos

País	Ahorros de combustible	Comentarios	Estudio
Alemania, varias ciudades	10-20% ahorros	Comparación con unidades diesel; basado en unos 60 buses híbridos de los cuales la mayoría eran unidades articuladas; resultados sólo son parcialmente comparables porque sólo 1-5 buses híbridos fueron operados por cada ciudad y no operaban necesariamente rutas similares a las unidades convencionales.	PE International, Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus, realized for BMVBS, 2011
Londres, UK	35-45% ahorros	TfL (Transporte para Londres) tiene 650 híbridos en operación y planea tener 1,700 unidades en funcionamiento para el año 2016 (20% de la flota de buses); básicamente buses de dos pisos.	TfL, 2013 y 2014 y EU Clean Fleets Program (www.clean-fleets.eu)
América Latina (3 ciudades)	15-35% ahorros	Basados en ensayos durante 2 días en Sao Paulo, Río de Janeiro, Santiago de Chile y Bogotá - los resultados deben ser tomados por lo tanto con cuidado	C40 Cities, Low Carbon Technologies can Transform Latin America's Bus Fleets, 2013
Nueva York, EEUU	20-30% ahorros	Nueva York tiene una de las flotas híbridas más grandes del mundo, con alrededor de 1,700 unidades, que sin embargo, ahora están siendo reemplazados parcialmente con unidades diesel; Híbridos relativamente antiguos (el programa comenzó hace 15 años); mejor economía de combustible de los híbridos en baja velocidad y stop-and-go tráfico; Uso de aire acondicionado en los meses de verano tiene un impacto fuerte sobre la economía de combustible de los híbridos.	NREL, Performance Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses and New York City Transit, 2008

Como se ha mencionado el estudio alemán tiene algunos aspectos interesantes. Sin embargo, no hay conclusiones sólidas en materia de ahorro de combustible o en la fiabilidad de buses híbridos por haberse hecho el estudio disperso en varias ciudades con diferentes condiciones de operación.

Buses Eléctricos e Híbridos

El estudio realizado por C40 Cities se basó en una muestra muy pequeña de buses nuevos (menos de 10 unidades repartidas en 4 ciudades), que funcionaban sólo durante algunos días en cada ciudad. Los datos por lo tanto son indicativos pero no se puede sacar conclusiones válidas relativas a fiabilidad o ahorro de combustible con pruebas singulares.

Los datos más confiables son de Londres y Nueva York ya que ambas ciudades operan un gran número de híbridos, junto con unidades diesel convencionales comparables que operan en las mismas o similares rutas durante un período de tiempo significativo.

Mientras que Nueva York tiene la mayor experiencia con una flota grande de buses híbridos, la relevancia de los datos es hoy en día menor por tratarse de buses híbridos de la primera generación.

Londres opera una flota de más de 600 buses híbridos (los primeros entraron a operaciones en el año 2006) y planea de adquirir más unidades para una flota de alrededor de 1,700 híbridos o el 20% de la flota total. Londres operaba a finales de 2013 cerca de 9,000 buses de los cuales el 40% son Euro 3 con DPF (filtro de partículas diesel), el 20% Euro 4, el 30% Euro 5 y el 10% EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicles). Alrededor del 30% de los buses son de un solo piso y el 70% de dos pisos. Básicamente se operan dos tipos de buses híbridos: los híbridos "tradicionales" y un bus de nuevo diseño específicamente para Londres, el "New Bus for London" producido por Wright bus.

Foto 4: New Bus for London



Foto: Grütter

La siguiente tabla y figura muestra los consumos de buses diesel, el bus híbrido "convencional" y el híbrido "New Bus for London".

Tabla 5: Rendimiento Buses Londres 2013 (todos de dos pisos Euro V)

Tipo de bus	Consumo de diesel (l/100km)	% ahorros relativo a bus diesel
Diesel convencional	49	
Híbrido "normal"	33	33%
New Bus for London híbrido	26	46%

Source: TFL, 2014; híbrido "normal" se refiere a un bus híbrido que no es un New Bus for London

Buses Eléctricos e Híbridos

4.2.2. Desempeño Ambiental de Híbridos en Bogotá

Rendimiento

La comparación del consumo de combustible se hace entre los híbridos diesel 12m Euro V y buses diesel Euro V 12m de las mismas características, de la misma empresa de operación y en el mismo plazo de tiempo. Buses en Bogotá (convencionales, así como híbridos), no tienen AC por lo cual, los rendimientos son bastante constantes durante todo el año. Existen diferencias significativas de rendimiento entre las empresas operadoras de TransMilenio, parcialmente explicado por operar en diferentes zonas con diferentes velocidades comerciales. Por lo tanto, los híbridos y unidades convencionales han sido comparados entre el mismo operador.

Tabla 6: Rendimiento Bus Híbrido y Bus Convencional de 12m Euro V en Bogotá

Operador	Bus Diesel	Bus Híbrido	% Ahorros Híbrido
A	39 l/100km	30 l/100km	25%
B	44 l/100km	33 l/100km	25%

Fuente: TransMilenio; revisión, control y cálculos por Grütter Consulting

El consumo de combustible entre los dos operadores, varía en en torno al 10%. Sin embargo, esto es cierto para los híbridos, así como para unidades diesel convencionales. Por lo tanto, el ahorro de combustible para los dos operadores es del orden del 25% con unidades híbridas.

Emisiones de GEI

Para determinar las emisiones de GEI factores de emisión estándar y métodos de cálculo basados en el IPCC se utilizan, es decir, la cantidad de combustible utilizado se multiplica por el valor calorífico neto (NCV) del combustible y el correspondiente factor de emisión de CO₂. La siguiente tabla muestra los parámetros utilizados.

Tabla 7: Parámetros para Determinar las Emisiones de GEI

Parámetro	Valor	Fuente
NCV de diesel	43 MJ/kg	IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 1.2
Factor de emisión de CO ₂ de diesel	74.1 gCO ₂ /MJ	IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 1.4
Densidad de diesel	0.844 kg/l	IEA, Energy Statistics Manual, 2005
Factor de aumento de emisiones "Well-to-tank" diesel	22%	JRC-Study study 22%, CEC 23%, GREET model 25%, GHGenius model 29% ¹¹

Emisiones "tank to wheel" (TTW) son causadas por la quema de combustibles es decir, son las emisiones directas causadas por el vehículo. Emisiones WTW incluyen las emisiones aguas arriba (extracción, refinería, transporte), causadas por los combustibles fósiles. WTW incluyen por ende las

¹¹JRC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context Version 3c, 2011 (used by EU RED); California Energy Commission, Full Fuel Cycle Assessment Well to Tank Energy Inputs, Emissions, and Water Impacts, 2007; LLC, Assessment of Direct and Indirect GHG Emissions Associated with Petroleum Fuels, 2009; Nylund et.al, Fuel and Technology Alternatives for Buses, VTT Technology 46, 2012; GHGenius was developed by Natural Resources Canada: NRC, GHGenius model version 4.02, 2013; <http://www.ghgenius.ca/>; GREET model was developed by the US Department of Energy: US DOE, GREET The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model Version GREET1 2012 rev2 <http://greet.es.anl.gov/>

Buses Eléctricos e Híbridos

emisiones indirectas causadas por el uso de combustibles fósiles y por lo tanto, muestran una imagen más completa de las emisiones totales de GEI causadas por diferentes tecnologías.

Tabla 8: Emisiones de GEI Bus de 12m Euro V en Bogotá en gCO₂/km

Operador	Diesel		Híbrido		Reducción de GEI
	TTW	WTT	TTW	WTW	
A	1,060	1,290	800	970	25%
B	1,200	1,460	890	1,090	25%

Fuente: cálculos por Grütter Consulting basados en Tabla 6 y 7

Las reducciones de emisiones de GEI son del 25% para los buses híbridos.

En promedio 12m auto buses estándar circulan por año alrededor de 65,000 kilómetros en Bogotá. Por bus, el ahorro de GEI son, por lo tanto, alrededor de 22 toneladas de CO₂/año. Con 500 híbridos que operan en Bogotá, se evita anualmente más de 10,000 toneladas de CO₂.

Impacto Ambiental Local

El impacto ambiental local evaluado, son las emisiones de NO_x y Material Particulado (PM). Las emisiones locales de los buses dependen básicamente de la categoría Euro. Allí las emisiones son fijados en g/kWh. Un litro de diesel es aproximadamente 10 kWh. Por ende se puede calcular que la reducción de emisiones locales es proporcional a la reducción de consumo de diesel¹².

4.2.3. Desempeño Ambiental de Híbridos en Zhengzhou.

Rendimiento

La comparación del consumo de combustible se hace entre los híbridos y buses diesel del mismo tamaño e híbridos de GNC y convencionales también del mismo tamaño. La información se basa en el rendimiento de todo el año 2013.

Tabla 9: Rendimiento Bus Híbrido y Bus Convencional Zhengzhou (promedio de 2013)

Bus	rendimiento en l/100km or m ³ /100km	% ahorros
Estandar (12m) Diesel híbrido	29.5	26%
Estandar (12m) Diesel convencional	40.0	
Articulado (18m) Diesel híbrido ¹³	43.9	34%
Articulado (18m) Diesel convencional ¹⁴	66.5	
Estandar (12-14m) GNC híbrido	39.0	19%
Estandar (10-11m) GNC convencional ¹⁵	47.9	

Fuente: Zhengzhou Bus Communication Company, 2014; cálculos por Grütter Consulting; basados en reportes mensuales por bus

Los buses híbridos son entre un 20% y un 35% más eficiente que los buses convencionales. La mejora de los buses híbridos GNC podría ser subestimado un poco como los buses híbridos GNC son entre

¹² Vea VBZ, Elektrobusse bei den Verkehrsbetrieben Zürich o A.M. Hallquist et.al., Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses, Atmos. Chem. Phys., 13, 5337-5350, 2013 or R. Pütz, Quo vadis Linienbusbetrieb?, VDV Jahrestagung 2014, 05/2014

¹³ En rutas BRT

¹⁴ En rutas BRT

¹⁵ Rendimiento ajustado por tamaño de bus

Buses Eléctricos e Híbridos

11.7m y 13.7m de largo con una capacidad de pasajeros de entre 86 y 112 pasajeros, mientras que las unidades convencionales de GNC son 10.2 a 10.6m de largo con una capacidad aproximadamente de 60 pasajeros. También los buses de GNC convencionales en Zhengzhou son sin aire acondicionado, mientras que las unidades híbridas tienen aire acondicionado. Sin embargo, en general un ahorro de combustible de 20 a 30% al usar buses híbridos puede ser confirmado por la experiencia de Zhengzhou.

Todos los buses experimentaron un consumo de combustible significativamente mayor, durante los meses calientes del verano. Las siguientes cifras contrastan las temperaturas medias mensuales en Zhengzhou con el consumo específico de combustible de los buses que muestran una clara correlación.

Figura 8: Temperaturas 2013 Zhengzhou (promedio mensual en Celsius)

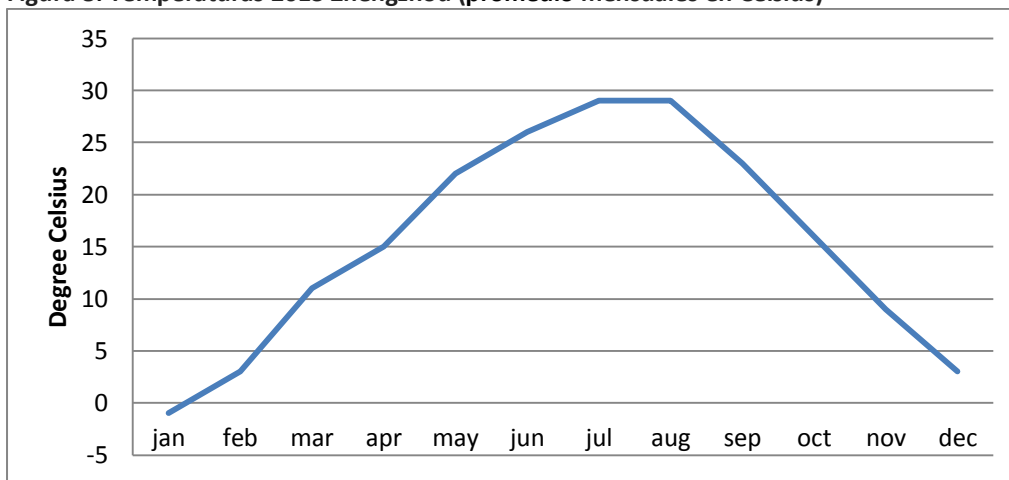
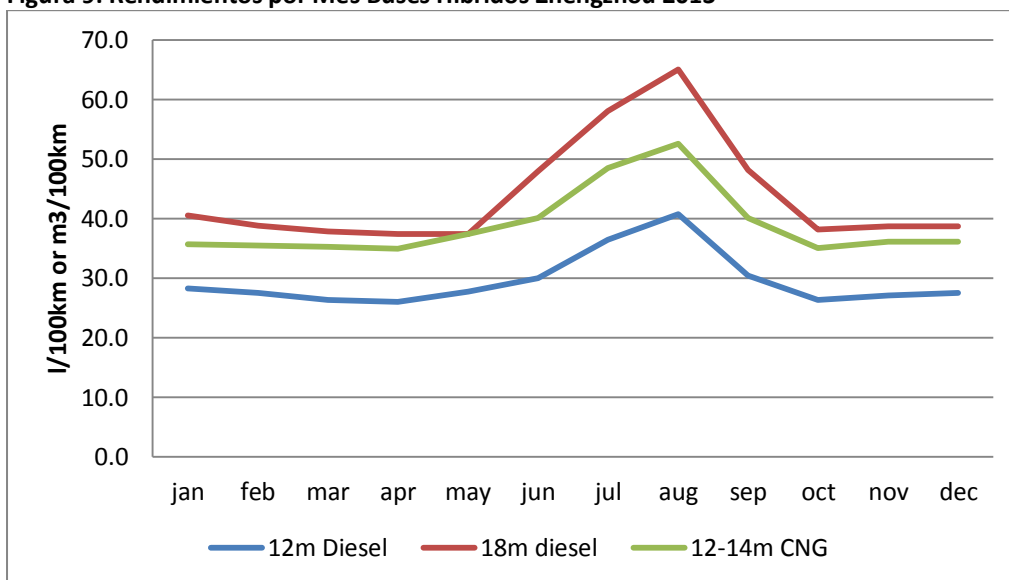


Figura 9: Rendimientos por Mes Buses Híbridos Zhengzhou 2013



Fuente: Zhengzhou Bus Communication Company, 2014; calculos por Grütter Consulting

Mientras que los buses híbridos en general, fueron 25-35% más eficientes que las unidades diesel en los meses de verano entre julio y agosto, la diferencia era sólo de 10-25%. Dos conclusiones se pueden sacar:

Buses Eléctricos e Híbridos

- En los países con altas temperaturas durante todo el año, que requieren el servicio de AC, el ahorro de combustible en buses híbridos serán más bajos que en los países en zonas de clima más moderado.
- La inversión en un buen aislamiento de buses incluyendo por ejemplo, ventanas con doble acristalamiento es muy importante en los países que tienen los meses calurosos de verano, especialmente para los buses híbridos.

Los híbridos enchufables, en servicio en Zhengzhou desde principios de 2014, pueden reducir el consumo de combustible en un 10-15% adicional, o sea, llegan a un ahorro de combustible en comparación con los buses diesel convencionales de 30-45%.

Emisiones de GEI

El mismo enfoque se utiliza como para Bogotá. La siguiente tabla muestra los parámetros utilizados y sus valores¹⁶.

Tabla 10: Parámetros para Determinar Emisiones de GEI

Parametro	Valor	Fuente
NCV de GNC	48 MJ/kg	IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 1.2
Factor de emisión de CO ₂ de GNC	56.1 gCO ₂ /MJ	IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 1.4
Factor de emisión de CH ₄ de buses GNC ¹⁷	25 gCO _{2e} /km	IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 3.2.5 based on EU Copert IV model for Euro IV and later for CH ₄ factor and GWP from IPCC AR5, 2013 ¹⁸
Densidad de GNC	0.714 kg/m ³	Based on molar mass
Emisiones "well-to-tank" GNC	11%	IPCC 1996 default Rest of the World 11% ¹⁹ , CEC 17-37% depending on pipeline length, GHGenius model 18%, JEC-Study 15-40% depending on pipeline length, GREET model 45%
Factor de emisión de CO ₂ por la producción eléctrica basada en "Combined Margin"	0.72 kgCO ₂ /kWh	NDRC China for Central China Power Grid, 2013

La siguiente gráfica, muestra las emisiones de GEI de tanque-a-rueda (TTW), de híbridos contra unidades de combustibles fósiles, es decir, las emisiones causadas únicamente por el proceso de la quema de combustibles fósiles en el motor.

¹⁶ Parámetros ya incluidos en la tabla 7 no son repetidos.

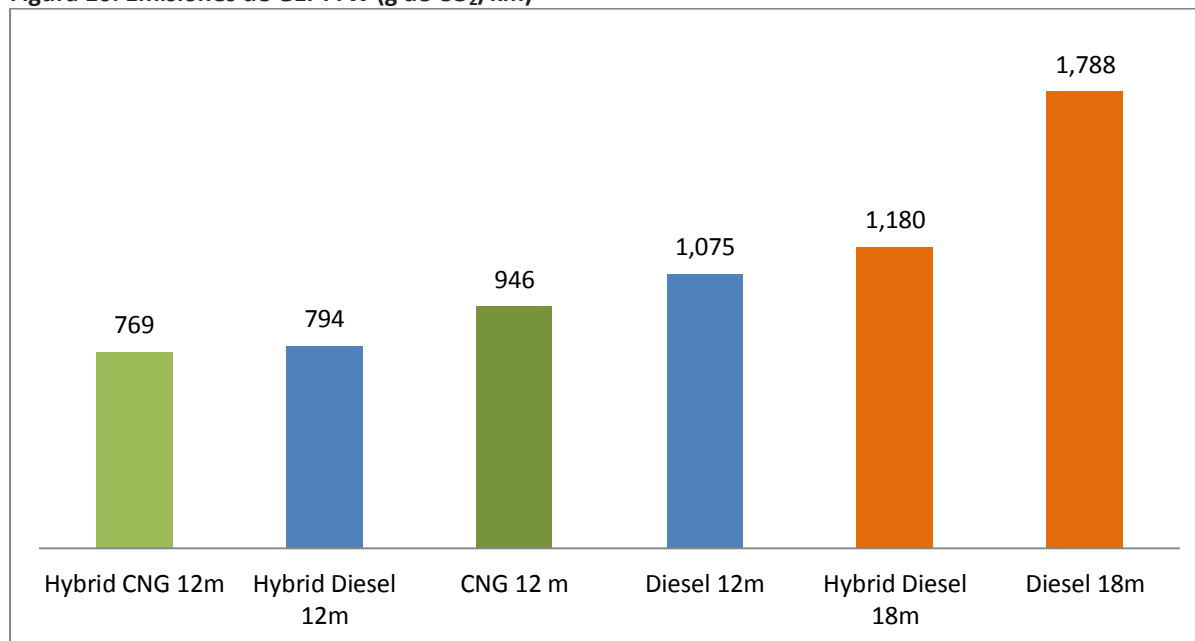
¹⁷ El factor de emisión de CH₄ no está incluido en buses diesel por ser marginal; El factor de emisión de N₂O no fue incluido para buses GNC y de diesel por ser marginal.

¹⁸ 900 mg CH₄/km con un Global Warming Potential (GWP) de 28 basado en 2013 IPCC AR5 p. 714 excluding climate-carbon feedbacks

¹⁹ 296 tCH₄/PJ Table 1-63 y 1-64; EF_{CO₂} para combustión de acuerdo a IPCC 56.1 gCO₂/MJ; GWP basado en UNFCCC es 21 for CH₄

Buses Eléctricos e Híbridos

Figura 10: Emisiones de GEI TTW (g de CO₂/km)



Fuente: Grütter Consulting basado en rendimientos del año 2013 proporcionados por Zhengzhou Bus Communication Company

La siguiente tabla muestra las emisiones de well to tank (WTW), es decir, esto incluye las emisiones aguas arriba causadas por los combustibles fósiles. La tabla también incluye GNC híbridos enchufables (plug-ins), como se usan en Zhengzhou desde principios del año 2014.

Tabla 11: Emisiones GEI WTW

Bus tipo y tecnología	Emisiones en gCO ₂ /km	Reducción de GEI
12 m convencional diesel	1,310	
12 m híbrido diesel (no plug-in)	970	26%
12 m convencional GNC	1,050	
12 m híbrido GNC	850	19%
12m híbrido GNC plug-in	720	31%
Articulado 18m convencional diesel	2,181	
Articulado 18m híbrido diesel (no plug-in)	1,440	34%

Fuente: Cálculos por Grütter Consulting basados en las tablas 9 y 10

Las reducciones de emisiones de GEI son en promedio entre el 20% y el 35% para los buses híbridos.

En promedio los buses de 12m circulan en Zhengzhou anualmente unos 55,000 kilómetros, mientras que los buses articulados circulan, alrededor de 65,000 kilómetros. Por lo tanto, cada bus híbrido de 12m GNC reduce unos 11 a 13 tCO₂/año, los híbridos-diesel unos 19 tCO₂/año y los híbridos diesel articulados unos 48 tCO₂/año. En base de este número las unidades híbridas en operación en Zhengzhou evitan unos 40,000 tCO₂ por año.

Impacto Ambiental Local

Como ya se ha mencionado, los buses híbridos tienen básicamente la misma reducción en emisiones locales que en consumo de diesel. Los híbridos enchufables pueden tener mas reducciones por poder funcionar en modo eléctrico puro a una distancia mayor, por ejemplo, en las áreas del centro. El

plug-in híbrido utilizado en Zhengzhou tiene una gama de accionamiento eléctrico de unos 30 km con una carga completa y por tanto pueden ser en esta área buses de 0-emisiones.

4.3. Desempeño Económico

4.3.1. Introducción

Se utilizan los siguientes componentes de costos para comparar los resultados financieros de buses híbridos frente a unidades convencionales:

- La tasa de disponibilidad de buses: Este criterio se basa en la cantidad de tiempo que el bus pasa en el taller o en uso no productivo. Una tasa de menor disponibilidad se transforma financieramente en una inversión adicional;
- La inversión;
- Los costos de mantenimiento;
- El costo del combustible.

El costo del conductor y el costo de gestión del bus no están incluidos por ser independientes del tipo de tecnología utilizada. Para realizar una comparación financiera, los costos son anualizados en base a las tasas de interés estándar y la vida útil utilizadas para buses en el país respectivo.

4.3.2. Disponibilidad del Bus

Los informes internacionales sobre buses híbridos, no ofrecen mucha información sobre la disponibilidad de buses. El estudio realizado en Alemania, indica una tasa de disponibilidad 10% inferior de los híbridos en comparación con los buses diesel²⁰. Esto no es sorprendente ya que sólo 2-5 buses híbridos, fueron desplegados por cada ciudad con lo que se requiere más tiempo en mantenimiento y en reparaciones debido a la falta de conocimientos técnicos y piezas de repuesto. En Londres, con una flota de buses híbridos mucho más grande (600 unidades), la disponibilidad de buses híbridos es idéntica a las unidades convencionales. Zhengzhou con una flota de buses híbridos de casi 3,000 unidades, también tiene la misma disponibilidad de buses híbridos como unidades convencionales. En Bogotá, sólo funcionan híbridos desde hace medio. Durante este tiempo no se podían registrar diferencias en las tasas de disponibilidad.

4.3.3. Inversión y Costo Operacional

Para hacer comparaciones significativas, se debe comparar el mismo bus de la misma marca y tipo y norma Euro. En el caso de Bogotá por ende se comparan buses de Volvo y en el caso de Zhengzhou buses Yutong. La siguiente tabla compara la inversión de buses en Bogotá sobre la base de unidades Volvo Euro V.

²⁰ PE International, Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus, realized for BMVBS, 2011

Buses Eléctricos e Híbridos

Tabla 12: Inversión Bus 12m Marca Volvo en Bogotá en USD (Euro V)

Diesel	Diesel Híbrido	Inversión adicional híbrido	Comentario
155,000	290,000	90%	Sin incluir la inversión en batería el bus costará unos USD 250,000. En el caso de Bogotá optaron por un sistema de leasing de la batería a un costo de 0.15 USD por km

Fuente: Basado en bus Volvo 12m Euro V con entradas en los dos lados; datos proporcionados por Volvo Colombia y confirmados por TransMilenio SA; costo excluye IVA

Buses Volvo usan baterías Litio-ion fosfato con un valor de inversión de USD 40,000.- por bus y con una vida útil de 4 años²¹. Operadores de buses híbridos en Bogotá, estiman que los costos de mantenimiento son comparables a las unidades convencionales. Esto excluye el mantenimiento de la batería ya que los operadores han optado por un acuerdo de arrendamiento para las baterías, es decir, las baterías no han sido adquiridas por el operador y se ha acordado un pago por kilómetro de USD 0.15.

La siguiente tabla, muestra la inversión para las unidades convencionales e híbridos 12m y 18m en Zhengzhou basado en unidades Yutong Euro V.

Tabla 13: Inversión Buses Yutong en Zhengzhou en USD (Bus Euro V)

Tipo de Bus	Diesel	Diesel Híbrido	Diesel Plug-In Híbrido	GNC	GNC Híbrido	GNCPlug -In Híbrido	Inversión adicional Híbrido	Inversión adicional Plug-In Híbrido
12m	145,000	185,000	210,000	155,000	200,000	230,000	25-30%	45%
18m	315,000	390,000	440,000	n.a.	n.a.	n.a.	25%	40%

Fuente: Basado en Yutong, 09/2014; tipo de cambio USD a RMB 1: 6.1; Híbridos GNL de 18m tienen la misma inversión como buses de 18m diesel híbridos

Las baterías o los capacitadores, tienen una vida útil de ocho años, que es equivalente a la vida útil de los buses en China (basado en las regulaciones nacionales). Por lo tanto, la inversión no contempla un costo de reemplazo de la batería. Las baterías usadas son de iones de litio. La inversión para una estación de carga para buses híbridos enchufables, es de alrededor de USD 3,000.- La estación puede cargar dos buses simultáneamente y se requieren 40 minutos por carga, es decir una estación es suficiente para alrededor de 20 a 30 buses, es decir, el costo de la inversión unitaria por bus es menos de 150 USD²².

De acuerdo con el operador de buses de Zhengzhou, el costo de mantenimiento de los híbridos y unidades convencionales es comparable. Esto incluye repuestos y reparaciones, así como el tiempo necesario para el mantenimiento.

4.3.4. Rentabilidad

La siguiente tabla muestra los principales parámetros tomados en consideración para la determinación de la rentabilidad de los híbridos frente a las unidades convencionales.

²¹ IDB, Análisis Económico para el Financiamiento de Autobuses Híbridos y Eléctricos en el Marco del “Sistema Integrado de Transporte” de la Ciudad de Bogotá, 2013

²² Adicionalmente la compañía de electricidad paga por la estación

Buses Eléctricos e Híbridos

Tabla 14: Parámetros para Determinar la Rentabilidad (costos junio 2014)

ID	Parámetro	Valor Zhengzhou	Valor Bogotá
1	Inversión	vea tabla 13	Vea tabla 12
2	Costo de mantenimiento anual	Idéntico híbrido y convencional y por ende no considerado	Costo de batería 0.15 USD/km ²³
3	Costo combustible	Diesel: 1.16 USD/l GNC: 0.52 USD/m ³ Electricidad: 0.08 USD/kWh	Diesel: 1.12 USD/l
4	Ahorros en combustible	vea tabla 9	vea tabla 6
5	Recorrido anual	12m: 55,000 km 18m: 65,000 km	65,000 km
6	Electricidad usado por día operacional de plug-ins	12m: 40 kWh 18m: 60 kWh	n.d.
7	Distancia recorrido en modo eléctrico por día de plug-ins	30 km	n.d.
8	Días operacionales por año por bus	300	No se requiere
9	Vida útil en años	8 ²⁴	12-15 ²⁵
10	Tasa de interés real ²⁶	3.4%	9%

Fuente: información coleccionado por Grütter Consulting de operadores

La siguiente tabla muestra la rentabilidad de buses híbridos frente a sus unidades convencionales en Bogotá.

Tabla 15: Rentabilidad de Buses 12m en Bogotá enUSD

Parámetro	Diesel	Híbrido-Diesel	Comentario
Inversión adicional		95,000	Excluye inversión en baterías
costo anualizado por km	0.80	0.98-1.03	Valor inferior con una vida útil de 15 años ²⁷

Fuente: Grütter Consulting basado en la tabla de arriba

Los costos de combustible más el mantenimiento para los híbridos que incluyen los gastos de alquiler de la batería, llevan a costos ligeramente mayores que los de unidades diesel convencional, sin incluir la inversión diferencial. La inversión adicional por ende, no se puede recuperar con la estructura actual de costos de kilometraje y de consumo de combustible en Bogotá.

La siguiente tabla muestra la rentabilidad de los diferentes tipos de híbridos en Zhengzhou.

²³ Basado en un contrato con Volvo.

²⁴ Fijado por el gobierno.

²⁵ Buses convencionales de diesel pueden operar por 12 años y unidades híbridas por 15 años.

²⁶ Basado en la tasa de interés nominal menos la tasa de inflación del 2013: vea:

<http://data.worldbank.org/indicador/FR.INR.LEND/countries> y:

<http://data.worldbank.org/indicador/FP.CPI.TOTL.ZG>

²⁷ Bogotá permite a los híbridos circular por 15 años.

Buses Eléctricos e Híbridos

Tabla 16: Rentabilidad de Híbridos de Zhengzhou en USD

Parámetro ²⁸	12m diesel	12m diesel-híbrido	12m diesel plug-in híbrido	12m GNC	12m GNC híbrido	12m GNC plug-in híbrido	18m diesel	18m diesel híbrido	18m diesel plug-in híbrido
Inversión adicional		40,000	65,000		45,000	70,000		75,000	120,000
Costos anualizados por km	0.85	0.83	0.86	0.66	0.73	0.79	1.47	1.38	1.44
Tiempo de retorno en años ²⁹		6	7		18	22		4	6

Fuente: Grütter Consulting

En el caso de Zhengzhou híbridos diesel son rentables con un plazo de amortización de entre 4 y 7 años. Los híbridos diesel de 18m son más rentables que los de 12m. Híbridos GNC no son rentables debido a que el precio de GNC es más bajo que el precio del diesel, lo que resulta en ahorros financieros, más bajos por ahorro de combustible. La Tasa Interna de Retorno TIR para los híbridos diesel de 12m, está entre 0% y 10% y para los híbridos diesel de 18m y entre 7% y 23%. Los híbridos enchufables tienen una tasa de rentabilidad más baja que los no plug-ins. Sin embargo, si los plug-ins se cargan dos veces al día, ej. al medio día y durante la noche, la rentabilidad sería del orden de los híbridos normales.

En general, se puede decir que los híbridos diesel, son rentables con un tiempo de recuperación de la inversión de alrededor de cinco años, si los recorridos son de 55,000 km/año o más, si el precio del diesel es de 1.2 USD o más y si la inversión diferencial entre los híbridos y las unidades convencionales es alrededor de 50,000 USD para las unidades de 12m u 80,000 USD para las unidades de 18m (para los plug-ins 40% más). Si los operadores circulan más o el precio del combustible es más alto, el diferencial de inversión puede ser mayor y un híbrido seguiría siendo rentable.

Los principales criterios que afectan a la rentabilidad de los híbridos son:

1. Inversión adicional en términos absolutos entre híbridos y no híbridos: Una reducción del diferencial de inversión entre una unidad convencional de 20% híbridos, disminuye el tiempo de recuperación de la inversión por un año.
2. Recorrido anual: Un aumento de la distancia recorrida en un 20% reduce el tiempo de recuperación de la inversión por un año.
3. Precio del combustible: Un aumento de los precios del combustible en un 20%, reduce el tiempo de recuperación de la inversión por 1.5 años.
4. Para plug-in híbridos, cargar electricidad dos veces al día en lugar de una sola vez, reduce el tiempo de recuperación de la inversión por un año.

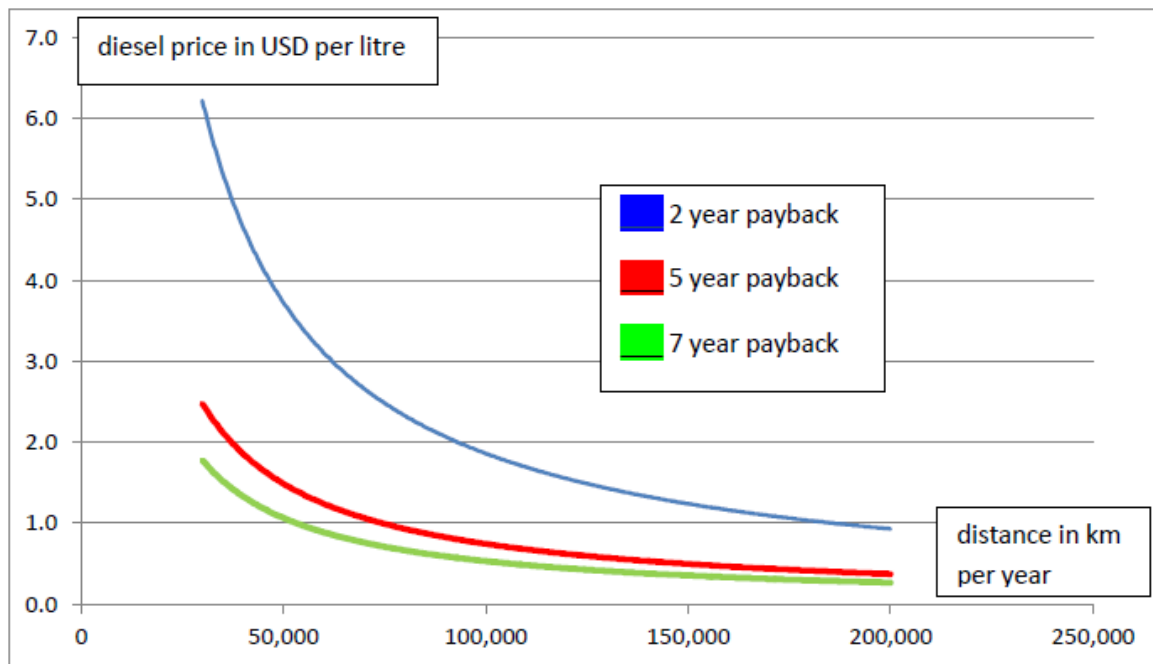
La siguiente figura, muestra para buses híbridos de 12m, las curvas de amortización constantes con variaciones de precio del diesel y del recorrido anual.

²⁸ Comparado con buses del mismo tipo de combustible y tamaño.

²⁹ Tiempo de retorno de la inversión comparado con buses del mismo tipo de combustible y del mismo tamaño.

Buses Eléctricos e Híbridos

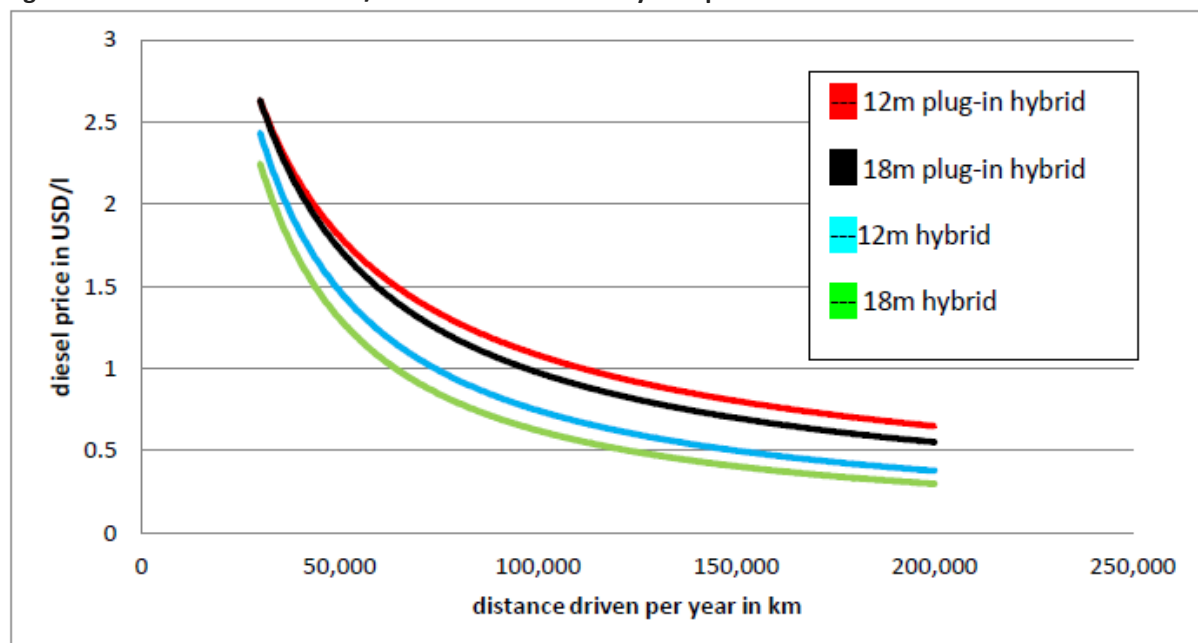
Figura 11: Bus 12m Híbrido-Diesel con Payback Constante y Combinaciones del Precio de Diesel Precio y Distancia Recorrida



Fuente: Grütter Consulting; basado en Zhengzhou

La siguiente figura, muestra para diferentes tipos de diesel híbridos, las combinaciones de precio del combustible/distancia recorrida que se traducen en un plazo de amortización de 5 años, es decir, cualquier combinación de precio del diesel y de la distancia anual expresada en cada curva, da como resultado un tiempo de amortización de 5 años. Todas las combinaciones de precio del diesel y la distancia por la derecha de la curva resultan en tiempos de amortización más cortos.

Figura 12: Combinaciones Precio/Distancia con 5 años Payback para Diesel Híbridos.



Fuente: Grütter Consulting; basado en Zhengzhou

Buses Eléctricos e Híbridos

La herramienta Excel³⁰, ofrece una base de cálculo para los operadores de buses para insertar los datos locales específicos (precios de los combustibles específicos de cada país, los costos de inversión de buses, precios de la electricidad y la distancia media recorrida de unidades), para determinar la rentabilidad de los híbridos en su país.

4.4. Conclusiones Buses Híbridos

Los buses híbridos ofrecen claramente un ahorro significativo de combustible. Esto es cierto para diferentes tamaños de bus (12m, 18m), diferentes combustibles (diesel, GNC y GNL), así como para diferentes fabricantes. El desempeño de los híbridos muestra un ahorro en combustible y GEI de 25-35%. Los híbridos enchufables, pueden reducir aún más, el consumo de combustible por 40 a 50% en comparación con las unidades convencionales. El ahorro de combustible de los plug-ins depende fundamentalmente, de la frecuencia de carga de las unidades (una o dos veces al día).

En términos económicos, los buses híbridos modernos, muestran la misma tasa de disponibilidad como unidades convencionales. Los costos de mantenimiento son comparables. Los costos de reemplazo de la batería o los gastos de alquiler de la batería, son un componente significativo de los costos. La inversión diferencial de híbridos, es el factor principal para determinar su rentabilidad. Las diferencias de precios entre los fabricantes de buses híbridos, son significativas e influyen, en gran medida la rentabilidad. En general, se puede decir, que la inversión adicional en buses híbridos, puede ser devuelta en 5-6 años, si el precio del diesel es de al menos 1,10 USD/litro y la distancia anual de recorrido es de 60,000 km o más.

5. Bús Eléctrico

5.1. Introducción

Buses eléctricos de 12m son todavía poco usados. No existe ningún estudio, que ha comparado el rendimiento operacional de una flota de buses grandes de sistema eléctrico, con unidades convencionales. El mayor productor de buses eléctricos de 12m es BYD y la flota más grande, se encuentra en Shenzhen, que comenzó a usar buses eléctricos en enero del 2011 y ahora opera básicamente, alrededor de 1,300 buses eléctricos producidos por BYD y Wuzhoulong. Flotas eléctricas consideradas en este informe son las de Shenzhen y Zhengzhou. Como se mencionó, Shenzhen opera la mayor flota de buses eléctricos en todo el mundo, mientras que Zhengzhou, opera desde 2011 una flota de 10 buses eléctricos que se amplió a 110 unidades a finales del 2013.

Zhengzhou opera desde 2011 10 buses eléctricos Yutong, con una longitud de 12 metros y una capacidad de 80 pasajeros. Estos buses no tienen aire acondicionado, lo que redunda en un uso limitado durante los meses de verano. El 2013, 100 nuevas unidades fueron adquiridas con AC. En condiciones de tráfico normales, los buses eléctricos, tienen una autonomía de 120 km con un tiempo de carga durante la noche de 8 horas. Los nuevos buses y sus estaciones de carga, permiten unacarga rápida con una duración de 2.5 horas. El sistema utilizado por Yutong, se basa en el cambio rápido de las baterías de iones de litio en un tiempo de unos 15 minutos, es decir, el bus cambia sus baterías y sigue funcionando mientras que las baterías son recargadas en una instalación central.

³⁰ Grütter Consulting, Tool to Determine Profitability of Hybrid and Electric Buses, 2014

Buses Eléctricos e Híbridos

Este sistema, utilizado también por otros fabricantes de buses eléctricos, tiene las siguientes ventajas principales:

- El costo total de bus se reduce de manera significativa ya que se requiere menos baterías.
- El peso del bus, se puede reducir considerablemente mientras que se aumenta el espacio disponible para los pasajeros. Un bus de 12 metros con un alcance de 200 kilómetros o más, incluye un peso de las baterías de unas 3 toneladas. El peso en sí mismo, puede reducir el número de pasajeros permitidos en el bus debido a las restricciones de peso por el eje. También la colocación de las baterías puede resultar en problemas estructurales o en la pérdida de espacio para los pasajeros (si las baterías se colocan dentro del vehículo).
- La recarga de las baterías se puede hacer con menos espacio en las mejores condiciones y así se optimiza el número de instalaciones de carga.
- El rango del bus ya no será cuestión central, ya que los buses pueden reemplazar sus baterías en unos 15 minutos.

Foto 5: Yutong Bus Eléctrico de 12m y Sistema Robotizado de Intercambio Rápido de Baterías (Zhengzhou, China)



Fuente: Grütter, 2014

Shenzhen, opera la mayor flota de buses en todo el mundo en base de baterías eléctricas. Cuenta actualmente con alrededor de 1,300 unidades de 12m. Las marcas de buses son básicamente BYD y Wuzhoulong. La oficina del gobierno para la promoción de vehículos de energía alterna de Shenzhen, ha sido fundamental para este logro. El gobierno central paga alrededor de una cuarta parte de la inversión, el gobierno local otro $\frac{1}{4}$ y el operador paga el 50% restante, lo que en términos de inversión, es similar a un bus diesel convencional. En los próximos 2 años, la ciudad planea introducir otros 2,000 buses eléctricos de segunda generación, con menor consumo de energía y más espacio para los pasajeros.

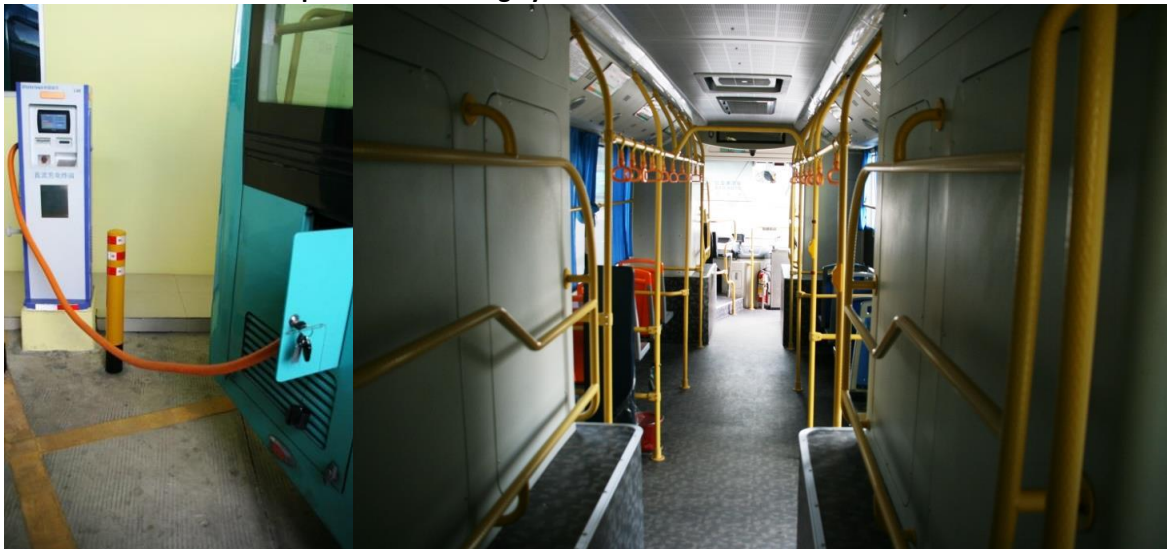
Buses Eléctricos e Híbridos

Foto 6: Bus BYD Eléctrico Operado por Shenzhen Bus Group



Fuente: Grütter

Foto 7: Shenzhen Bus Group: Estacion de Carga y Bus BYD Interior



Fuente: Grütter

La foto de arriba, muestra significativamente la disminución de espacio interior de la primera generación de buses eléctricos de BYD, que tienen su compartimiento de la batería en el bus reduciendo así, la capacidad de transporte de pasajeros, a alrededor de 50 pasajeros en comparación con 80 de una unidad diesel convencional. La nueva generación de buses eléctricos BYD, tiene las baterías principalmente en el techo y reduce por ende este problema. El peso de las baterías en el bus es de unas 3.5 toneladas. Las baterías son de litio-ion hierro-fosfato FE con un tiempo de carga de entre 2 y 4 horas y una autonomía de alrededor de 180 a 200km. con aire acondicionado, en base de la experiencia de Shenzhen Bus Group, mientras que el productor estima que el rango de distancia es de 250 a 280km. Las baterías no se pueden quitar rápidamente del bus. BYD estima que las baterías después de 3 años todavía tienen una capacidad mínima de 90% y después de 10 años todavía 80%. La experiencia del operador, sin embargo, ha sido que después de 3 años las baterías sólo conservan el 80% de su capacidad original, limitando así, también el rango de acción del bus³¹.

³¹ Mínimo 1,000 ciclos de recarga con 90% y 3,000 ciclos con 80% de capacidad

5.2. Desempeño Ambiental de Buses Eléctricos

5.2.1. Desempeño Ambiental de Buses Eléctricos en Zhengzhou

La siguiente tabla, compara el consumo de electricidad de los buses eléctricos de 12m, con el consumo de diesel de los buses convencionales comparables utilizados en Zhengzhou.

Tabla 17: Comparación Rendimiento Bus 12m Zhengzhou

	Bus electric	Bus diesel
Consumo de energía	100 kWh/100km	40 l/100km

Fuente: Zhengzhou Bus Communication Company, 2014; cálculos Grütter Consulting; basados en 3 años de monitoreo del 2011-2014

El consumo se basa en el modelo de bus eléctrico de la primera generación. Los nuevos modelos que también tienen AC, han entrado recientemente en servicio durante 2014 y por lo tanto, todavía no se dispone de datos de rendimiento.

Para determinar las emisiones de GEI, se utilizan los métodos de cálculo del IPCC. Para los buses eléctricos, se incluyen las emisiones de aguas arriba por la generación de electricidad. La cifra correcta para comparar el factor de emisión de carbono de la electricidad, sería con el factor promedio ponderado de emisiones, más las pérdidas por transmisión y distribución (TDL)³². El factor de emisión promedio ponderado, describe el promedio de CO₂ emitido por unidad de electricidad generada en la red. Este factor, en general, significativamente más bajo que el margen combinado (CM), que se utiliza con frecuencia para los proyectos de MDL, debido al hecho de que el CM se basa en el promedio del margen operativo (OM) y el margen de construcción (BM). El OM no incluye a las plantas hidroeléctricas. En otras palabras, el OM refleja la tasa promedio ponderada de emisiones de las centrales térmicas. Como ejemplo, en la India para el período 2011-2012, el factor de emisión promedio ponderado de la red, fue de 0.78 kgCO₂/kWh, mientras que el margen de operación, fue de 0.97, el Margen de Construcción 0.90 y el Margen Combinado 0.93 para el mismo período, es decir, la CM fue de alrededor de 20% por encima de la media ponderada³³. TDL es en promedio 5-10% en la mayoría de las redes, los valores más altos reflejan básicamente un problema de robo. Como datos de CM están ampliamente publicados, se utilizan como una primera aproximación para las emisiones de GEI. Sin embargo, el factor de emisión promedio ponderado, es significativamente más bajo que el CM en el caso de países que dependen básicamente de las energías renovables, es decir, las emisiones de GEI de buses eléctricos en dichos países, deben basarse en el factor ponderado y no en el CM. El CM utilizado para Zhengzhou es de 0.72 kgCO₂/kWh³⁴. La figura siguiente, compara los GEI WTW de los buses 12m en Zhengzhou para el año 2013.

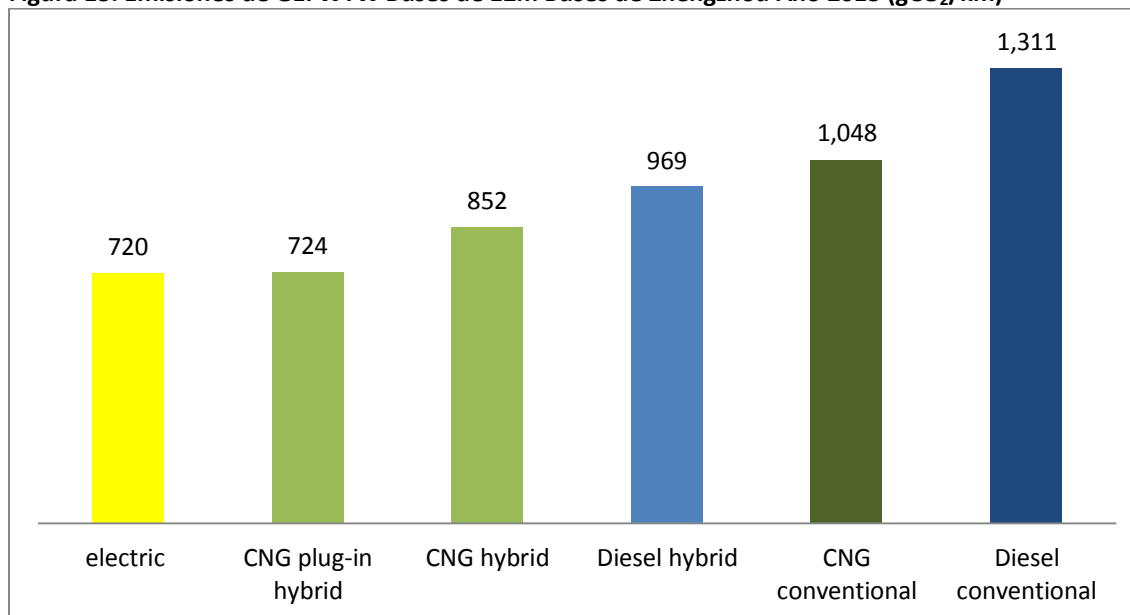
³² Eso es el procedimiento usado en el MDL para consumidores de electricidad vea p.ej. la metodología aprobada ACM0016 para sistemas masivos de transporte urbano.

³³GOI, Ministry of Power, Central Electricity Authority, CO₂ Baseline Database for the Indian Power Sector, Version 8.0, 2013

³⁴NDRC China for Central China Power Grid, 2013

Buses Eléctricos e Híbridos

Figura 13: Emisiones de GEI WTW Buses de 12m Buses de Zhengzhou Año 2013 (gCO₂/km)



Fuente: Grütter Consulting

Las emisiones de GEI para buses eléctricos en Zhengzhou, están entre 0% y 25% más bajas comparadas con unidades híbridas, y entre el 30% y el 45% más bajas comparadas con unidades convencionales. Se logra esta reducción aunque la generación de electricidad depende en gran medida del carbón.

Las emisiones locales de buses eléctricos son 0. Por lo tanto, tienen ventajas significativas en comparación con unidades fósiles en términos de PM, de NO_x, así como otros contaminantes locales y también ventajas significativas con respecto a los niveles de ruido. Sin embargo, híbridos enchufables también tienen la posibilidad, aunque dentro de un rango reducido, de funcionar como vehículos 0 emisiones.

Los buses eléctricos que se utilizan actualmente en Zhengzhou, básicamente cubren rutas cortas y también se utilizan en las horas pico y no con tanta frecuencia como los buses convencionales. Esto se refleja en su kilometraje medio anual, que es de 4,500 km/mes por buses diesel, 4,000 km/mes por buses GNC y sólo 2,000 km/mes para los buses eléctricos. Con los nuevos buses eléctricos disponibles, se espera que aumente el kilometraje de los buses eléctricos. Basado en el kilometraje anual actual el uso de 110 unidades electricas se traduce en una reducción de alrededor de 1,000 toneladas de CO₂ (unas 10 toneladas de CO₂ porbús³⁵), 10 toneladas de NO_x y 0,1t de material particulado³⁶.

5.2.2. Desempeño Ambiental de Buses Eléctricos en Shenzhen.

Los datos que se utilizan son del Bus Group Shenzhen, que opera alrededor de 500 de los 1,300 buses eléctricos en la ciudad actualmente existentes, todos ellos con aire acondicionado. El consumo de electricidad de los buses es de alrededor de 1.2 kWh/km. En comparación con el consumo promedio de combustible diesel de 40 l/100km y la red eléctrica del sur de China, que tiene un CM de 0.66

³⁵ Comparado con una flota convencional de 50% diesel y 50% GNC; basado en WTW; la reducción relativamente baja por bus se explica por el kilometraje bajo actual

³⁶ Comparado con unidades Euro V

Buses Eléctricos e Híbridos

kgCO₂/kWh esto resulta en emisiones, de unos 790 g de CO₂/km o sea, alrededor del 10% más que en el caso de Zhengzhou debido al consumo de electricidad más alto de los buses utilizados en Shenzhen. En comparación con las emisiones de WTW de unidades diesel esto resulta en una reducción de emisiones de alrededor del 40%. El desplazamiento de los 1,300 buses eléctricos que se utilizan en Shenzhen, reduce unos 27,000 tCO₂ al año, unas 2 toneladas de PM y unas 200 toneladas de NO_x.

5.2.3. Conclusión Desempeño Ambiental Buses Eléctricos.

Un elemento central en la determinación del impacto de GEI de buses eléctricos es cómo se produce la electricidad en el país y el resultante factor de emisión por la producción eléctrica. Por ende, se ve abajo una lista del factor de carbono según país, basado en el CM.

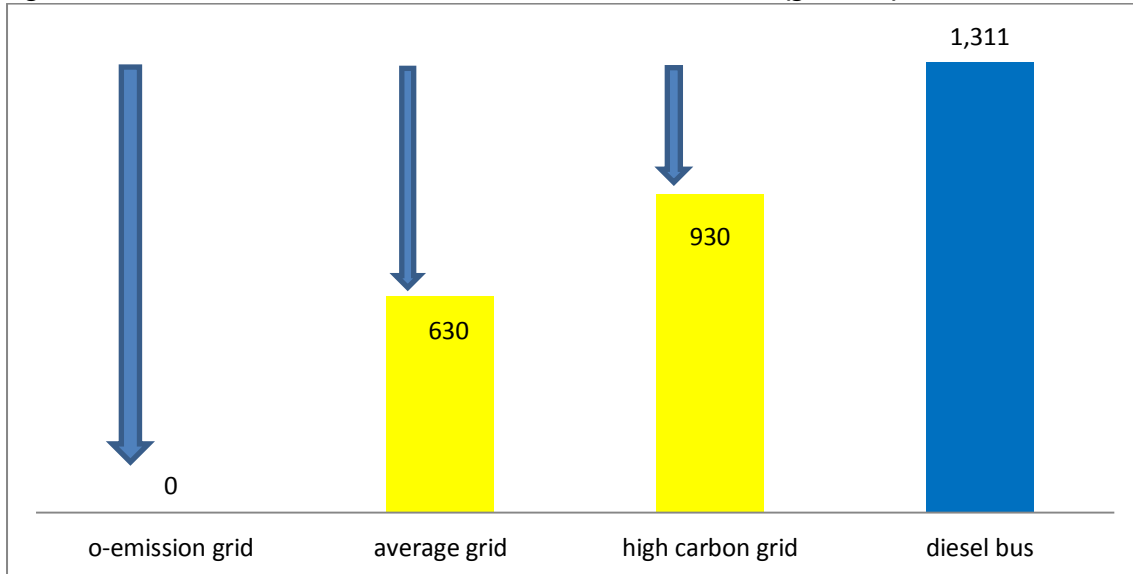
Tabla 18: CM Producción de Electricidad

Asia	EF kgCO ₂ /kWh	América	EF kgCO ₂ /kWh	Africa	EF kgCO ₂ /kWh
Bangladesh	0.64	Argentina	0.52	Egypt	0.54
Cambodia	0.67	Bolivia	0.58	Ghana	0.55
China	0.89	Brazil	0.30	Iran	0.61
India	0.90	Chile	0.60	Israel	0.72
Indonesia	0.76	Colombia	0.34	Ivory Coast	0.66
Malaysia	0.67	Cuba	0.87	Jordan	0.58
Mongolia	1.06	Dominican Republic	0.65	Kenya	0.60
Pakistan	0.54	Ecuador	0.59	Líbano	0.65
Filipinas	0.51	El Salvador	0.68	Libia	0.79
Corea del Sur	0.63	Guatemala	0.65	Madagascar	0.55
Singapur	0.49	Honduras	0.67	Marruecos	0.66
Sri Lanka	0.69	México	0.53	Namibia	0.92
Tailandia	0.55	Nicaragua	0.69	Nigeria	0.58
Vietnam	0.56	Panamá	0.62	Ruanda	0.65
		Perú	0.60	Arabia Saudita	0.65
		Uruguay	0.57	Senegal	0.68
				Sud Africa	0.95
				Tanzania	0.31
				Tunesia	0.53
				Uganda	0.55

Fuente: IGES database, 2014

Algunos países como Bhután, Costa Rica, República Democrática Popular Lao y Paraguay, tienen un factor de emisión ponderado de 0, debido a la producción de toda la electricidad basada en energías renovables. El siguiente gráfico muestra las emisiones de GEI de un bus eléctrico según la red eléctrica, comparado con un bus diesel en base de emisiones WTW.

Figura 14: Emisiones GEI WTW Bus Eléctrico versus Bus Diesel de 12m (gCO₂/km)



Las reducciones de emisiones de GEI, son altamente dependientes de la fuente de electricidad del país. Sin embargo, se puede esperar reducciones de emisión del 50% y más. Cabe destacar, que incluso con una producción eléctrica basada principalmente en carbón, siguen siendo los buses eléctricos mejores que unidades diesel.

Un aspecto importante a considerar es la capacidad de carga real de los buses eléctricos. Algunos fabricantes de buses utilizan el espacio interior para baterías reduciendo así la capacidad de transporte de pasajeros de manera significativa. Esto en efecto significa que un bus eléctrico de 12m, debe ser comparado con un bus convencional más pequeño con la misma capacidad de pasajeros. Sin embargo, la tendencia de los productores ha sido de poner baterías en el techo y así mantener un espacio comparable a buses convencionales.

5.3. Desempeño Económico de Buses Eléctricos

5.3.1. Introducción

Los mismos componentes de costos, se utilizan para comparar los resultados financieros de las unidades eléctricas con unidades convencionales.

5.3.2. Disponibilidad del Bus

Zhengzhou, así como Shenzhen muestran una tasa significativamente menor de disponibilidad de buses eléctricos en comparación con buses convencionales. Los buses eléctricos en promedio están sólo al 70% del tiempo disponible. Las razones se deben más a las averías del bus y a un mayor tiempo de parada para mantenimiento y reparación debido a la falta de piezas de repuesto. Buses eléctricos son todavía un producto "exótico", resultando en dificultades técnicas. Además, el personal de mantenimiento, es menos capacitado y los repuestos no están disponibles debido también a la cantidad limitada de unidades. Por ende, actualmente se requiere para cada bus diesel 1.4 buses eléctricos para garantizar el mismo nivel de operaciones.

Buses Eléctricos e Híbridos

5.3.3. Inversión y Costo Operativo

La inversión para un bus diesel de 12m en China, es de alrededor de 150,000 USD, mientras que un bus de igual tamaño eléctrico cuesta el doble, es decir, 300,000 USD. Los precios para un bus eléctrico, se basan en Yutong y BYD en China. Fuera de China el bus BYD puede ser vendido en 650,000 USD. La inversión para un conjunto de baterías, es por el orden del 50% de la inversión total en el bus. Las estaciones de carga rápida eléctricas son propiedad de las compañías eléctricas que posteriormente venden la electricidad.

En general, el fabricante de buses arrienda las baterías o incluso todo el bus al operador. Esto incluye también todo el servicio de mantenimiento. En teoría, los costos de mantenimiento deben ser más bajos para los buses eléctricos debido a menos piezas giratorias y menos requisitos de mantenimiento. En la práctica, sin embargo, la experiencia de los operadores ha sido que los costos de mantenimiento son más altos para los buses eléctricos, debido a un menor número de proveedores de buses eléctricos y piezas de repuesto no estandarizados que dan lugar a reparaciones más costosas. Más competencia y un mercado creciente para los buses eléctricos harán descender los costos diferenciales, pero en la etapa actual buses eléctricos en la práctica cuestan más de mantener y reparar que unidades diesel.

Las baterías tienen una duración de vida de un mínimo de 8 años que es equivalente a la vida útil de los buses en China (basado en los reglamentos nacionales). Para un uso más largo de los buses sería necesario incluir una sustitución de la batería después de alrededor de 10 años.

5.3.4. Rentabilidad

La siguiente tabla muestra los principales parámetros tomados en consideración para la determinación de la rentabilidad de las unidades eléctricas frente a buses convencionales.

Tabla 19: Parámetros Bus Eléctrico Versus Bus Diesel 12m de Shenzhen/Zhengzhou (junio 2014)³⁷

ID	Parámetro	Bus eléctrico	Bus diesel
1	Inversión	300,000	150,000
2	Disponibilidad (index)	70	100
3	Costos anuales de mantenimiento	Identico eléctrico y convencional y por ende no fue considerado (fue considerado en disponibilidad por el mayor tiempo en taller)	
4	Precio combustible	Electricidad: 0.08 USD/kWh	Diesel: 1.16 USD/l
5	Rendimiento	1.1 kWh/km	40 l/100km
6	Recorrido anual	60,000 km	60,000 km
7	Vida útil (años usados) ³⁸	8	8
8	Tasa de interés real	3.4%	3.4%
9	Inversión estandarizada ³⁹	430,000	150,000
10	Costo anualizada por km	1.12 USD/km	0.83 USD/km

Fuente: Grütter Consulting en base de operadores en Zhengzhou y Shenzhen

La inversión diferencial real para la misma disponibilidad de uso, es de unos 300,000 USD, es decir, el bus eléctrico significa en realidad una inversión 3 veces más alta que un bus diesel. Los ahorros operativos anuales por energía ascienden a unos 20,000 USD. Esta cifra es insuficiente para cubrir la

³⁷ Promedio de Zhengzhou y Shenzhen

³⁸ Fijado por el gobierno

³⁹ En base del mismo nivel de disponibilidad (indexado a 100)

Buses Eléctricos e Híbridos

inversión diferencial para un bus eléctrico. Costos anualizados por km⁴⁰, incluyendo el costo de inversión y el costo de energía, pero excluyendo los componentes de costos que son idénticos entre los dos buses (como el salario del conductor), son alrededor de 35% más altos para el bus eléctrico que para un bus diesel.

5.4. Conclusiones Buses Eléctricos

La principal ventaja de los buses eléctricos que tienen 0 emisiones de contaminantes son locales. Se produce una contaminación del aire, si se produce la electricidad con combustible fósil -sin embargo, las plantas de energía pueden controlar tales emisiones, con más eficacia que los motores pequeños en buses y también la contaminación de las plantas de energía, se produce en zonas de contaminación menos crítica que por donde circulan los buses. La ventaja de cero emisiones de GEI sólo está disponible en países con una producción eléctrica limpia. Sin embargo, en la gran mayoría de los países los buses eléctricos reducirán las emisiones de GEI.

Los buses eléctricos requieren de una inversión adicional importante. Los buses cuestan aproximadamente el doble de las unidades convencionales y tienen claramente una tasa de disponibilidad más baja debido a más averías y más tiempo necesarios para el mantenimiento y las reparaciones. Esto es típico de nuevas tecnologías y también se observó con las primeras generaciones de auto buses de GNC. Debido al peso de la batería el peso del vehículo aumenta considerablemente, lo que dependiendo de la solución elegida por el fabricante puede resultar en una capacidad menor de pasajeros (ya sea debido a las restricciones del permiso de peso o debido al espacio usado por las baterías). Los costos operativos anuales debido a los ahorros de energía, son más bajos para buses eléctricos que para unidades diesel. Los buses eléctricos, debido a sus limitaciones de rango, se utilizan más en rutas cortas en el centro y por lo tanto, en general, tienen un kilometraje anual inferior. Por ende, el costo anualizado por km. de un bus eléctrico es un 30-40% mayor, que el de un bus diesel convencional.

6. Oportunidades de Financiamiento por Carbono.

Buses híbridos y eléctricos actualmente reciben en varios países, financiación adicional, ya sea relacionado con el clima (por ejemplo, Reino Unido, Suiza⁴¹), impulsado por consideraciones ambientales (por ejemplo Bogotá) o en relación con las políticas industriales (por ejemplo, China). El MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio), solía ser un buen instrumento para atraer financiación por la venta de reducciones de emisiones de GEI pero ya no es un mercado atractivo por la caída de los precios de CO₂. Nuevos mecanismos de mercado como NAMAs (Nationally Appropriate Mitigation Actions), podrían ser atractivos y ya hay propuestas para vehículos eléctricos. Sin embargo, el instrumento es todavía nuevo y ninguna propuesta aún no ha logrado garantizar su financiación. La siguiente tabla, proporciona una visión general de algunos fondos financieros interesantes potencialmente disponibles para buses híbridos y eléctricos.

⁴⁰ Costos anualizados incluyen el costo de capital anualizada (basado en la tasa de interés real) y los costos operativos anuales

⁴¹ Se registró un programa por Myclimate y Grütter Consulting en Suiza donde se paga por tCO₂ reducido por cada bus híbrido o eléctrico dentro del sistema doméstico de reducción de emisiones.

Buses Eléctricos e Híbridos

Tabla 20: Oportunidades Financieras por Fondos de Cambio Climático.

ID	Nombre	Descripción	Link
1	NAMA facility	€120 millones para apoyar a los países en desarrollo para la implementación de NAMAs. En la primera ronda 2 NAMAs de transporte, recibieron aprobación (TOD Colombia y el transporte urbano sostenible en Indonesia)	http://www.nama-facility.org/news.html
2	Bancas regionales de desarrollo p.ej. BID, ADB, CAF	Ejemplo: Dentro de América Latina el BID está apoyando la formulación de diversas NAMAs de transporte y también está involucrado directamente en la promoción de los buses de tecnología alterna en Bogotá, así como en Quito	www.iadb.org
3	Clean Technology Fund	El CTF a través de BID financió por ejemplo los buses híbridos y eléctricos en Bogotá	https://www.climateinvestmentfunds.org/cif/node/2
4	Global Environment Facility	El FMAM ha identificado específicamente buses eléctricos e híbridos en su programa para el transporte sostenible; Se ha aprobado como ejemplo en Filipinas un programa que incluye la inversión para un número limitado de buses eléctricos/híbridos	http://www.thegef.org/gef/home
5	links para financiamiento de carbono se encuentran en: http://www.climatefinanceoptions.org/cfo/cfo_search/type%3Afunding_sources%20category%3A219 http://www3.unfccc.int/pls/apex/f?p=116:1:2895636133177913		

7. Conclusiones.

El rendimiento real de buses híbridos de flotas grandes, muestra claramente un ahorro de 25 a 35% de combustible y un 40% o más al usar híbridos enchufables. La fiabilidad de los híbridos es comparable a los buses convencionales de combustibles fósiles y también los costos de mantenimiento, con excepción de los costos de las baterías, son comparables. La inversión diferencial, dependiendo de la marca y el modelo. Sin embargo, puede ser significativo. Con precios del diesel de USD 1.20 o más por litro, los híbridos pueden ser rentables y pueden recuperar la inversión diferencial inicial dentro de 5-6 años. El financiamiento de carbono puede jugar un papel importante en la reducción del coste de la inversión diferencial de los híbridos y por lo tanto, hacer estos buses más populares.

Buses de baterías eléctricas, son todavía más nuevos. Varias opciones están siendo probadas para resolver el problema del peso y del costo de la batería; como buses que transportan una gran cantidad de baterías (por ejemplo BYD), buses con sistemas de cambio rápido de baterías (por ejemplo Yutong) o sistemas de bus de carga de oportunidad como TOSA. Estos sistemas tienen un buen potencial de reemplazar los trolleys buses eléctricos. Actualmente, la fiabilidad de buses eléctricos es todavía muy por debajo de las unidades diesel convencionales. También los costos de mantenimiento, que en teoría debería ser menor en comparación con unidades diesel, son en la práctica, más altas debido a la menor disponibilidad de piezas de repuesto, repuestos más caros y mayor tiempo para el mantenimiento. Estos problemas son típicos de nuevas tecnologías. El consumo de energía de los buses eléctricos es baja y el ahorro de combustible puede ser significativo. Sin embargo, los costos de la batería están siendo muy altos y la vida útil de las mismas, está limitado lo que resulta en costos adicionales significativos de buses eléctricos que no se pueden recuperar en la actualidad con el ahorro de energía. Por lo tanto, los buses eléctricos, incluso con la financiación del carbono no se consideran como económicamente viable en comparación con las unidades

Buses Eléctricos e Híbridos

convencionales. Sin embargo, los buses eléctricos en comparación con los trolés buses convencionales pueden ser una opción interesante. Al mismo tiempo, se prevee que el costo de los buses eléctricos bajará y que la capacidad de la batería aumentará. Con flotas más grandes, la fiabilidad también deberá mejorar y los costos de mantenimiento deberán disminuir.

Literatura

C40-CCI, Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets, 2013

Cambridge econometrics and Ricardo-AEA, an Economic Assessment of Low Carbon Vehicles, 2013

Embarq, Exhaust Emissions of Transit Buses, 2012

Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrids and Electric Heavy-Duty Transit Bus market, 2013

Fuel Cells and Hydrogen JU, urban buses: alternative powertrains for Europe, 2012

ICCT, Global Transportation Energy and Climate Roadmap, 2012

Landshut University of Applied Sciences, Report on Electrified Public Transport Bus Systems, EU project Ref. D.4.3.6, 2012

PE International, Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus, gefördert durch BMVBS, 2011

Ricardo plc, Air Quality Emissions of Low CO2 Technology for Buses, 2013