

EVALUACIÓN DE LA TRACCIÓN HÍBRIDA EN EL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO DE PASAJEROS

Andrés E. Díez*[†], Armando Bohórquez*, Jaime Rodríguez*, Fernando Roa, Pedro Almario**, Edder Velandia****

**Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, Medellín, Colombia*

***CODENSA S.A. ESP, Cr 13A #93-66, Bogotá, Colombia*

Recibido 05 Junio 2009; aceptado 26 Junio 2009

Disponible en línea: 30 Junio 2009

Resumen: En el presente artículo se exponen y analizan las tecnologías actuales de Buses Híbridos Eléctricos (HEB), según los reportes de estudios realizados a flotas en operación. Cada estudio trata un modelo comercial diferente de HEB, mostrando sus fortalezas y debilidades en contraste con otras tecnologías convencionales existentes en el mismo espacio geográfico. Al hacer un barrido de las experiencias documentadas, se identifican las opciones con mejores resultados ambientales y económicos, se analizan la frecuencia y los costos de reemplazo de las baterías utilizadas; y como particularidad de esta tecnología, se cuantifican los beneficios del frenado regenerativo. Se suponen ajustes necesarios para la operación en terrenos con gran altura sobre el nivel del mar y se valoran los costos de operación y mantenimiento de los HEB. Este trabajo busca brindar criterios de análisis para validar o desechar la implementación de HEB en Bogotá. *Copyright © 2007 UPB.*

Abstract: In this paper the current technologies of Hybrid Electrical Buses (HEB) are presented and assessed, according to the reports from studies carried out to fleets in operation. Each study deals with a different commercial model of HEB, revealing their strengths and weaknesses, in contrast with other conventional technologies existing in the same geographic space. When a swept of the documented experiences is made, the options with the best environmental and economic results are identified, the frequency and costs of used batteries replacement are analyzed, as special feature of this technology, benefits of the regenerating braking are quantified. Necessary fits are supposed to operation in cities placed at high altitude to rate the operation and maintenance costs of the HEB. This research provide analysis criterion to validate or reject the implementation of HEB in Bogota.

Keywords: Fuel economy, emissions reduction, hybrid buses, batteries, ultracapacitors, trolleybuses.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 3544522 ext 9020, fax 4118779.
E-mail: andresediez@yahoo.com (Andrés Díez).

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas de tracción híbrida en buses de transporte público ha sido de gran interés para la industria automotriz en la última década debido al mayor rendimiento energético de esta tecnología en comparación con sistemas de tracción en buses convencionales. De igual forma, los buses híbridos han sido adoptados como modelo tecnológico de transición hacia los vehículos de baterías y celdas de combustible por gobiernos y autoridades de transporte alineados con políticas de reducción de emisiones de gases efecto invernadero y mejoramiento de la calidad del aire en las ciudades.

La tracción híbrida es una tecnología que se ha estructurado con el fin de aumentar la participación del sistema eléctrico, asociado típicamente a las baterías recargables o no recargables, en el suministro de la potencia del vehículo. Bajo este esquema un sistema eléctrico y un sistema de combustión interna proveen, según las exigencias operativas, la energía requerida para desarrollar el desplazamiento aprovechando de manera articulada las ventajas de cada uno de estos sistemas.

En la actualidad, la tracción híbrida es una realidad y ha sido adoptada como la tecnología de punta en los programas de modernización de flotas de buses en ciudades con problemas de mala calidad del aire y altos consumos de combustibles fósiles. En algunos otros casos fue requerida la operación de flotas HEB debido a que las características del lugar (trayectos subterráneos, túneles y troncales cercanas a zonas residenciales) exigían mínimas concentraciones de emisiones que los buses a diesel y CNG convencionales no podían cumplir.

Bajo estos hechos, existen en la actualidad diversos modelos HEB en operación en distintas ciudades y con diversas condiciones operativas que permiten monitorear y evaluar el desempeño real de algunos tipos de HEB y compararlos con las tecnologías convencionales. Sobre este particular, es importante señalar que la información disponible corresponde a los primeros años de operación, sin que haya aún estudios que cubran completamente la vida útil de una flota.

Para este artículo, los estudios que se toman como referencia son publicaciones técnicas del National Renewable Energy Laboratory del Departamento Estadounidense de Energía (DOE) y permiten conocer información imparcial acerca del desempeño de cinco empresas operadoras: New York City Transit – NYCT- ([Barnitt, 2009a](#)), Long Beach Transit –LBT- ([Lammert, 2009](#)), King County Metro Transit KC Metro ([Chandler, 2009](#)), Indianapolis Transportation Corporation (IndyGo), y Knoxville Area Transit –KAT- ([Barnitt, 2009b](#)).

2. TECNOLOGÍA

Para el caso de estudio general, un Vehículo Híbrido Eléctrico (HEV) consta de un medio almacenamiento de energía eléctrica, máquinas eléctricas (conjunto motor y generador) y un motor de combustión interna (ICE) convencional, pero de menor tamaño al que tendría si no fuera híbrido. Todo lo anterior controlado por medios electrónicos, que determinan los flujos de potencia en el sistema - tanto mecánica como eléctrica- en función de los requerimientos de velocidad y del estado de carga del medio de almacenamiento de energía eléctrica.

2.1. *¿Qué es un Bus Eléctrico Híbrido (HEB)?*

Es aquel medio de transporte utilizado en la prestación del servicio de transporte público colectivo o masivo de mediana capacidad que se configura bajo las características de un HEV. Como se tratará más adelante, los medios de almacenamiento de energía para HEB pueden ser baterías de alta capacidad o bancos de alta capacitancia (ultracapacitores).

2.2. *Tipos de HEB.*

Como parte de los HEV los sistemas HEB pueden ser paralelo o serie.

Los HEB paralelo en tránsito lento utilizan exclusivamente la tracción eléctrica; en aceleraciones considerables se combinan ambas fuentes, y para altas velocidades sólo se utiliza la tracción del ICE. Un bus paralelo es mejor para

pocas paradas, velocidades constantes-superiores y terrenos escarpados.

La única empresa que operó HEB paralelos fue KC Metro. Se utilizó el mismo modelo híbrido para dos rutas con velocidades promedio diferentes: una de 17.8 y otra de 30.3 km/h. Para un estimado de costos por combustible en Colombia, los HEB de la ruta más lenta representaron 1225 COP/km, contra 1036 COP/km de la ruta más rápida. Los valores de combustible colombiano son los referentes a marzo de 2009.

Para el caso de los híbridos en serie, como el ICE no está conectado a la transmisión, usualmente opera en bajas revoluciones y sólo acelera cuando lo requiere el sistema eléctrico; es más, el ICE puede apagarse cuando no se necesita, siendo ideales para condiciones de tránsito en las que se presenten paradas continuas ([Environmental, 2009](#)) y rutas de operación de baja velocidad o en zonas congestionadas, en relieves relativamente planos.

Las flotas de NYCT y LBT operaron HEB en serie, a velocidades promedio de 9.8 y 22.2 km/h, respectivamente. Pero LBT presenta un dato de paradas aproximado de cada 200 m. Es decir que ambos operadores acertaron con el tipo de HEB aplicable a la ruta, lo que es evidenciado en los comparativos de costos de combustible. Teniendo en cuenta que el sistema de Buses de Tránsito Rápido (BRT) de Bogotá -Transmilenio- cuenta con paradas en promedio cada 500m, la alternativa serie es la más recomendable.

3. ECONOMÍA DE COMBUSTIBLE

El ahorro del combustible en HEV se debe al frenado por medios eléctricos que produce una energía almacenable, que luego se puede volver a aprovechar en tracción. De igual forma, la posibilidad de un control inteligente en el vehículo permite aprovechar las ventajas operativas de la tracción eléctrica durante bajas exigencias de potencia mientras que el sistema ICE soportará las altas exigencias de potencia.

3.1. Sistema de frenos

El aprovechamiento del frenado es la característica de mayor importancia en los HEV. De éste depende tanto la economía de combustible como la reducción de costos de mantenimiento del propio sistema.

El sistema de frenos se divide en dos subsistemas: el eléctrico y el mecánico. El frenado por medios eléctricos se logra al conectar impedancia variable al generador (que es el mismo motor) acoplado a la transmisión, logrando desaceleraciones graduales, dependientes de la velocidad y de la posición del pedal del freno. El efecto del “frenado regenerativo”, como es conocido, es mayor al disminuir la impedancia conectada. Dicha impedancia tiene un valor límite mínimo, a partir del cual el frenado mecánico entra a operar.

No sobra recordar que la naturaleza del par frenante es electromagnética.

3.2. Reaprovechamiento de la energía

En el frenado la energía recuperada por el generador se envía a un medio de almacenamiento de energía eléctrica, quedando disponible para alimentar la misma máquina actuando ahora como motor, en una próxima aceleración. Así se utilizando lo recuperado, permitiendo obtener un mayor rendimiento de combustible.

Al alcanzar el estado de carga completo, el medio de almacenamiento no representa una carga para la regeneración. En algunos modelos se adiciona un circuito resistivo variable, el cual entra a reemplazar al medio de almacenamiento como carga, pero en este caso la energía se disipa en forma de calor, sin embargo se debe recurrir sólo en contadas ocasiones al frenado mecánico convencional.

3.3. Logros adicionales

Aunque el desgaste de los frenos es función del ciclo de trabajo, del comportamiento del conductor, del ajuste y del tipo de retardo de la transmisión; al incluir el frenado regenerativo se reduce la carga sobre el sistema de retardo convencional, aumentando su duración; lo que representa ahorros en tiempo de mantenimiento y en repuestos.

Para el modelo de HEB operado por NYCT el peso adicional (comparado con CNG) es de 440 lb, debido a los sistemas adicionales requeridos en los híbridos. Aún así, gracias al freno regenerativo, la vida del sistema de frenos es mayor. Una de las flotas de HEB de esta empresa acumuló más de dos veces del recorrido hecho por los buses a CNG antes de requerir mantenimiento del sistema de frenos.

En el modelo operado por LBT la desaceleración por freno regenerativo se logra al crear un camino de carga a un banco de ultracapacitores. Las ventajas de los capacitores es son su gran velocidad de carga y descarga, y su vida útil en comparación con las baterías. Esta tecnología arrojó costos de mantenimiento del sistema de frenos alrededor del 90% inferiores para los HEB durante el estudio, en comparación con el frenado convencional, aunque cabe anotar que los buses a diesel no tenían frenos nuevos al inicio del estudio ([Lammert, 2009](#)).

4. IMPACTO AMBIENTAL

La tecnología HEV aplicada arroja además resultados ambientales satisfactorios en comparación a las tecnologías convencionales, en cuanto a contaminación química y contaminación auditiva.

Los HEB pueden tener emisiones hasta 75% más bajas que los buses a diesel convencionales debido a la gran participación del sistema eléctrico, menor consumo de combustible y uso de filtros especiales para la captura del material particulado (PM) producto de la combustión. Comparativamente, un HEB con filtro puede llegar casi al 90% de reducción de PM comparado con un bus a diesel convencional que no lo tenga.

Adicionalmente, la Northeast Advanced Vehicle Coalition (NAVC) estima que los HEB generan entre el 30% al 40% menos emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) comparado con un bus diesel convencional. De igual forma, los HEB han demostrado una reducción importante de las emisiones de dióxido de carbono (CO2), incluso comparados con buses de CNG.

En otro estudio hecho por el NYCT, con buses Orion VII equipados con sistemas serie de la BAE, se reportan reducciones significativas en emisiones comparados con buses a diésel y a CNG ([Environmental, 2009](#)).

El uso de válvulas EGR (Exhaust Gas Recirculation) en la Generación II de buses Orion de NYCT, sacrifica durabilidad del motor y rendimiento de combustible, pero ayuda a reducir los niveles de emisión de NOx en motores a diésel. Según Spokane Transit, un HEB genera en total, 352 toneladas menos de CO2 que un bus a diésel durante su vida útil ([STA, 2009](#)).

5. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Sobresalen dos opciones para almacenar la energía generada por el freno regenerativo: baterías y ultracapacitores. Las baterías más comúnmente usadas en HEV son de NiCd (Níquel-Cadmio) y Ni-MH (Níquel metal hidruro), no obstante, algunos nuevos HEB se están diseñando para operar con Li-Ion ([Barnitt, 2009c](#)).

Por otro lado, están los ultracapacitores, que presentan un buen comportamiento en ciclos de alta carga y descarga, y el doble de vida útil esperada que la de las baterías de Ni-MH (12 y 6 años, respectivamente) ([Lammert, 2009](#)).

Cualquiera que sea el medio de almacenamiento de energía, es el tema que presenta la mayor restricción a los vehículos con tracción híbrida y eléctrica, debido a las grandes limitaciones de densidad de energía y energía específica de los sistemas de almacenamiento que conllevan al uso de múltiples paneles, con gran volumen y peso.

5.1. Reemplazo de las baterías

Una batería con la tecnología actual, independientemente de su naturaleza, tiene una relativa corta vida útil respecto a la del sistema que la utiliza, en este caso el HEB. Así para cubrir típicamente el ciclo de un HEB, se requiere de tres baterías, es decir, dos reemplazos.

Al encontrarse el precio de un banco de baterías alrededor de los 35.000 USD la principal desventaja

económica del modelo se evidencia. Al revisar los estudios de experiencias de operadores hechas por el NREL, estos importantes costos obligatorios no se encuentran previstos, ya que se tratan sólo los primeros años de operación.

6. COSTOS PARA COLOMBIA

6.1. Costos de combustible

Al convertir los datos de los reportes técnicos del NREL a precios de combustible local -de marzo de 2009 - se obtuvieron los siguientes valores mostrados en la [Fig. 1](#).

Tabla 1. Datos de rendimiento de combustible.

Tecnología	Modelo	Rendimiento	Costo del combustible
		[km/gal]	[COP/km]
Diesel	Orion V	3,7497	1667
CNG	Orion VII	0,0026	2138
Gen I Híbrido Diesel	Orion VII	5,1337	1217
Gen II Híbrido Diesel	Orion VII	4,8279	1295
Diesel	D40LF	5,6326	1110
Híbrido Gasolina	GE40LF	5,3912	1387
Diesel	D60LF	4,0233	1553
Híbrido Diesel	DE60LF	5,1015	1225
Híbrido Diesel	DE60LF	6,0349	1036
Híbrido Turbina Diesel	Ebus	7,0326	889

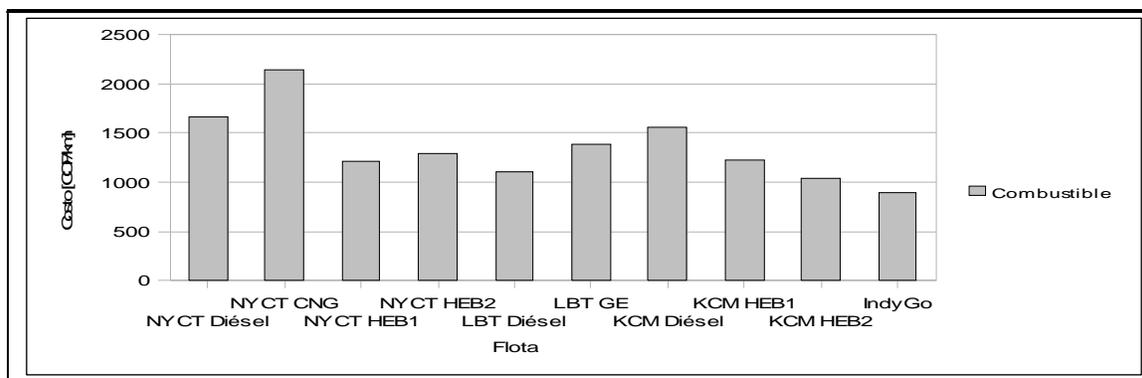


Fig. 1. Comparativo de costos locales de combustible

En las cuatro primeras columnas de la gráfica anterior, correspondientes a las flotas de NYCT, se observa que con una operación similar, la Generación I mostró un rendimiento 6% menor que la Generación II; esto debido a la introducción de la válvula EGR y a las diferencias en los sistemas de propulsión en la nueva tecnología. Pero aún así, la Generación II mostró un rendimiento 65% y 29% mayor que los buses a CNG y a diesel, respectivamente.

Como el mejor de los resultados, las flotas de HEB articulados de KC Metro, mostraron un rendimiento 27% y 50% mayor con respecto a su contraparte convencional. Es decir, un costo de combustible 21% y 33% menor que los articulados a diesel, respectivamente. Es más, al ser el equipo con mayor capacidad de pasajeros, cualquiera de los articulados de KC Metro resulta con una mayor ventaja al analizar el costo distribuido de combustible visto en la Fig. 2:

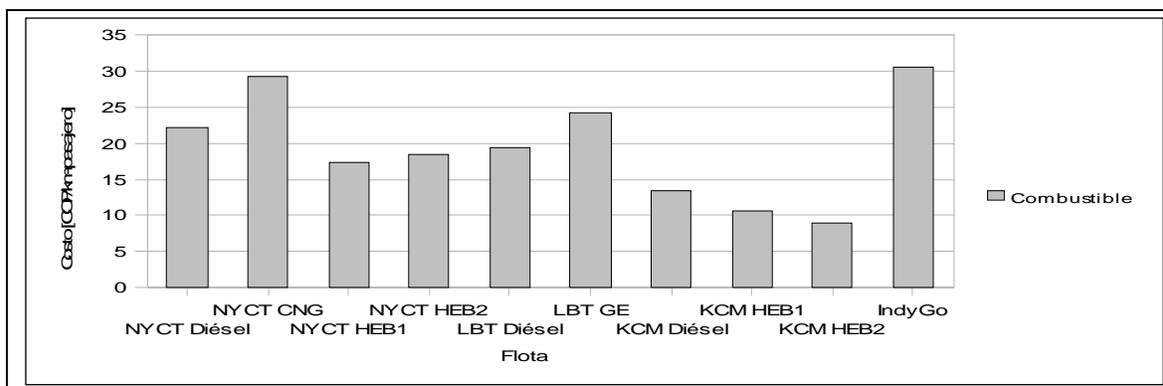


Fig. 2. Comparativo del costo local distribuido de combustible

ejemplo de 50.000 COP/h que puede ser modificado en el modelo según la empresa.

Por otro lado, se nota el alto costo de la flota de IndyGo, debido a un incendio en los talleres, que averió dos cargadores, la recarga nocturna de dos de los HEB se hizo con el ICE durante tres meses. Esto, para que al día siguiente comenzaran operación con SOC del 100%. Lo anterior obviamente rebajó el rendimiento de combustible. Además, por tratarse del equipo con menor capacidad de pasajeros se obtiene la peor economía de combustible relativa de las experiencias.

Es de resaltar que en ninguno de los reportes técnicos analizados se incluyen los costos de mantenimiento cubiertos por la garantía, pues se asumen como parte del costo total del bus. Los reportes tampoco incluyen los costos de las baterías de reemplazo necesarias para cumplir con la vida útil del HEB; pero en el presente informe se tendrán en cuenta por tratarse de un estudio preliminar del ciclo de vida completo.

En KAT, la recarga nocturna de dos de los HEB también se hizo con el ICE durante tres meses; esto debido al daño de uno de los dos cargadores por defecto de fabricación. De cualquier modo, debido a los altos costos locales del LPG, no se considera como opción.

El extra-costo de nacionalización para los repuestos necesarios se trabajó con un 10% adicional al valor registrado en los reportes del NREL.

Los sistemas HVAC por ser carga directa del motor a diésel, tienen gran impacto sobre el rendimiento los relativamente pequeños ICE con los que cuentan los HEB. Uno de los informes de NREL ([Barnitt, 2009c](#)) muestra la variación del rendimiento de combustible por milla de las flotas de NYCT, evidencia el gran efecto de los sistemas de HVAC en los ICE de HEB según la época del año.

El cambio de USD a COP para los cálculos de repuestos se tomó a 2596,37 COP/USD. Dicho dato corresponde al día 25 de febrero de 2009. De cualquier manera, la simulación permite ingresar cualquier otro valor, arrojando cambios sutiles en los resultados de costos. Es por esto que se prefiere llevar a cabo un estudio porcentual.

6.2. Costos de mantenimiento

Costos de mantenimiento relacionado a la tracción. Es de interés conocer los verdaderos valores detrás del conjunto de tracción. El cual está comprendido por varios sistemas y subsistemas, y que en realidad es el que indica la importancia y el avance de una tecnología y de un fabricante específico. A continuación, el gráfico comparativo de costos de mantenimiento de los sistemas de propulsión en [COP/km] según flota. Los costos corresponden a operación local en Estados Unidos, pues no se suministró información discretizada que pudiera ser

Para obtener el costo de mantenimiento por unidad de recorrido se toma un período a evaluar, se multiplican las horas laboradas por el costo de cada hora, luego se suman los costos de los repuestos, y todo el resultado se divide por la distancia recorrida. Los costos de estudios utilizan un valor-

empleada en cálculos para Colombia. Al convertir los datos de los reportes técnicos del NREL a

moneda local se obtuvieron los siguientes valores mostrados en la Fig. 3:

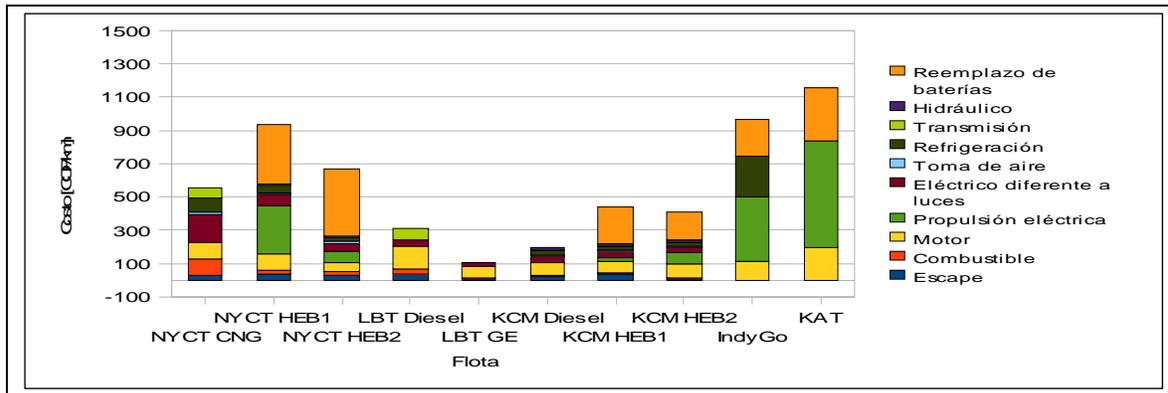


Fig. 3. Comparativo de costos de mantenimiento de sistemas de propulsión

Como principal gasto en HEV se tienen los reemplazos de baterías. Para los 12 años de vida útil promedio, se requieren:

-Baterías de plomo-ácido (ej. NYCT): 3 cambios de 25.000 USD, cada uno.

-Baterías de Ni-MH (ej. KC Metro): 1,5 cambios de 40.000 USD, cada uno.

Así, a los costos observados hay que añadirle 75.000 USD a cada bus que opere con plomo-ácido y 60.000 USD a cada bus con Ni-MH.

Como se puede apreciar, el mejor resultado lo obtiene la flota de HEB a gasolina y ultracapacitores de LBT. El gráfico confirma el bajo costo de mantenimiento de un motor a gasolina y supone además que no se requiere reemplazar a los bancos de utracapacitores, pues su vida útil esperada es la misma que la del bus.

Por último en KAT, el sistema de combustible, el ICE y el sistema eléctrico de propulsión, representaron el 3%, 3% y 12% del total de costos de mantenimiento, respectivamente. El 87% de los costos relacionados a sistemas de propulsión se debió a “bajo SOC” y a códigos de falla de las turbinas. El problema de “bajo SOC” se refiere a que el HEB queda operando en

modo eléctrico hasta que la batería alcanza un nivel de carga tan

bajo que no tiene la capacidad de encender al ICE. Esto sucede porque el sistema de encendido del ICE, que lo debe arrancar en el 60% de SOC, queda aislado debido a una manipulación inadecuada del sistema por parte del conductor. Lo anterior evidencia una falla considerable en el diseño del HEB.

Costos generales de mantenimiento. Se incluyen los costos de mantenimiento de los demás sistemas sumándolos con los referentes a sistemas de propulsión, citados anteriormente.

Para este punto, se dispone de dos perspectivas: la suma directa para complementar los costos en EEUU (Fig. 4) y el caso llevado a costos colombianos (Fig. 5).

Para NYCT, la Generación II tuvo costos generales de mantenimiento 39% y 42% menores que la Generación I y que los buses a CNG, respectivamente.

En LBT, el costo promedio de mantenimiento por milla resultó 42% menor para los HEB que para los buses a diesel. Cabe anotar que al principio de la evaluación, los HEB estaban en garantía mientras que los buses a diesel no.

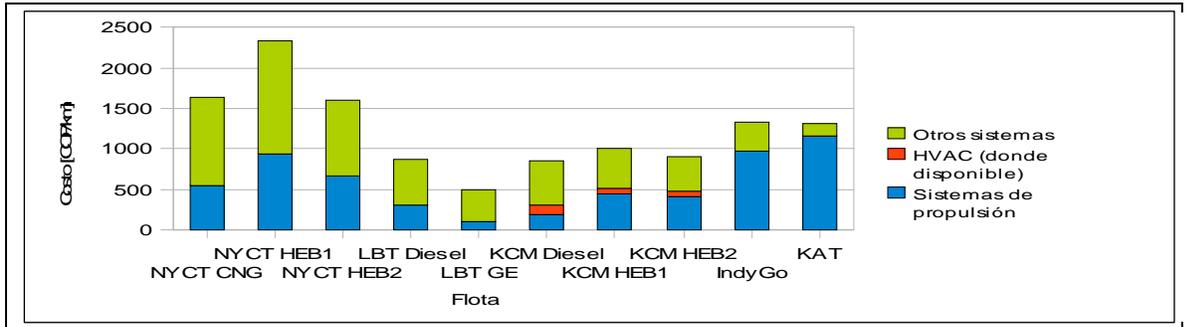


Fig. 4.

Comparativo de costos de mantenimiento en EEUU

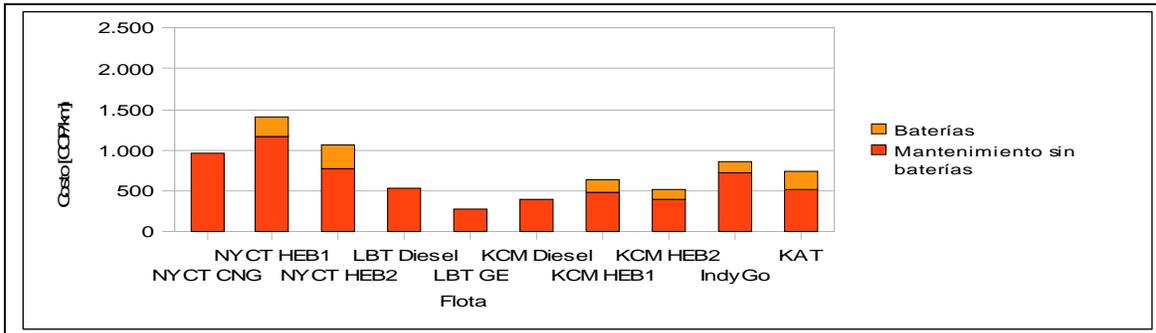


Fig. 5. Comparativo de costos de mantenimiento en Colombia

En KC Metro, se obtuvo un costo de mantenimiento, relacionado a sistemas de propulsión, 8% mayor en los HEB, y un costo general de mantenimiento 4% menor en los HEB.

En KAT, el 64% de las horas de mantenimiento (3,5 horas mensuales por bus) fueron dedicadas a mantenimiento preventivo de las baterías, consistente en lavado exterior.

6.3. Costos de operación

Teniendo los resultados definidos del rendimiento de combustible y del costo de mantenimiento promedio para cada HEB se conoce el costo de operación. Esta variable es la más significativa, pues compara de manera total un tipo de tecnología o de modelo con otro mostrados en la Fig. 6.

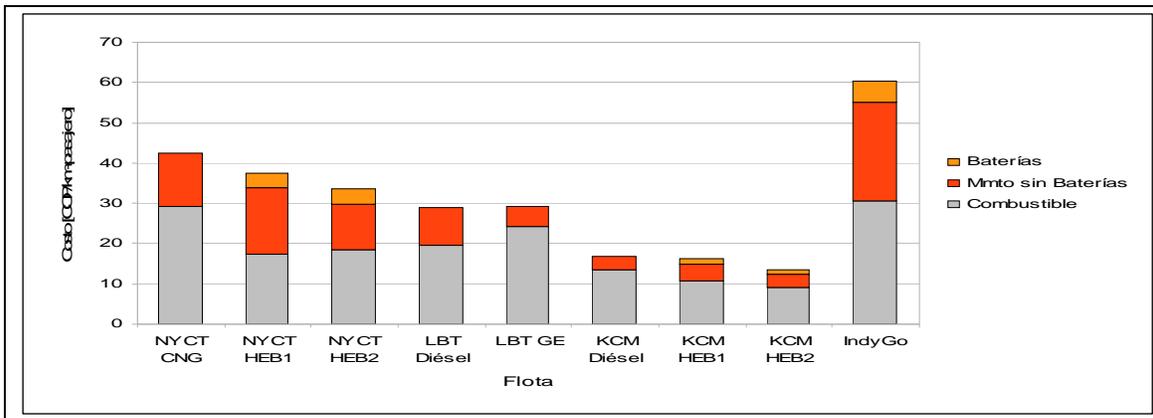


Fig. 6. Comparativo de costos distribuidos de operación

Para NYCT, debido a los bajos costos en mantenimiento, el costo total de operación de la Generación II resultó 24% y 39% menor que el de la Generación I y que el de los buses a CNG, respectivamente.

El costo de los HEB a gasolina por milla fue 11.7% menor que el de los buses a diesel, en LBT.

Los costos de operación fueron 15% menores en los HEB de KC Metro que en sus articulados a diesel.

6.4. Costos totales generales

Al incluir los costos anteriores a los costos por km de los equipos disponibles en los reportes técnicos del NREL, a los costos de operación de las experiencias observadas, se obtienen los costos totales reflejados en la Fig. 7. La información se presenta de manera distribuida por la capacidad de pasajeros, se evidencian, tanto las grandes ventajas de los buses de gran capacidad.

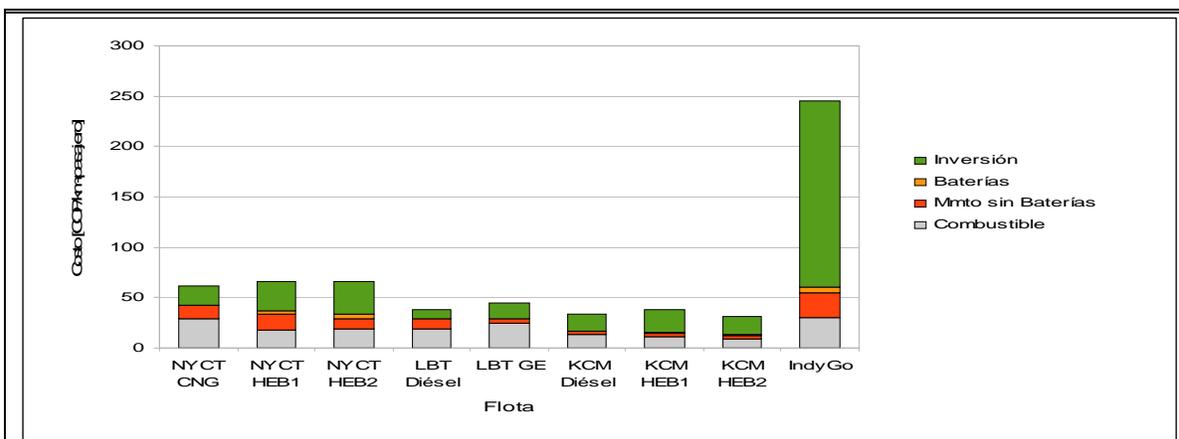


Fig. 7. Costos totales distribuidos.

Si se La información se presenta de manera distribuida por la capacidad de pasajeros, se evidencian, tanto las grandes ventajas de los buses de gran capacidad, como las graves falencias del modelo Ebus para 30 pasajeros, operado por IndyGo.

Desde esta perspectiva es clara la superioridad de las flotas articuladas de KC Metro. Siendo la más económica la segunda flota híbrida, que aunque tiene la misma inversión inicial neta que la primer flota, resulta mejor debido a su mayor recorrido (76.411 km/año vs. 59.794 km/año).

6. CONCLUSIONES

Las siguientes son las ventajas al emplear HEB contra otras tecnologías:

-Incremento de la economía de combustible, hasta del 27% en el modelo HEB articulado con respecto a su contraparte convencional a diesel.

-Utilización de la infraestructura existente de abastecimiento.

-Gran reducción en frecuencia y costos de mantenimiento del sistema de frenos.

-Menor contaminación.

-Mayor aceleración debido al gran torque de los motores eléctricos.

Desventajas:

-Alto costo inicial de los equipos.

-La economía de combustible depende del uso adecuado de cada tipo de híbrido. Cada configuración presenta unas características de ruta (relieve y número de paradas) para alcanzar el desempeño óptimo.

-La limitante del cambio de baterías representa el mayor costo de mantenimiento.

En detalle y comparando entre modelos HEB:

-Un bus serie tiene mejor desempeño en rutas con muchas paradas y bajas velocidades en relieves relativamente planos; mientras que un bus paralelo es mejor para pocas paradas, velocidades constantes superiores y terrenos escarpados.

-Las baterías usadas en HEB son plomo-ácido, Ni/MH y Li-Ion. Éstas últimas aún no han sido evaluadas en

operación, pues las primeras entrarán en funcionamiento en NYCT en 2010.

-Llevando el caso comparativo de HEB a gasolina a precios colombianos, se invierten las diferencias de costo de combustible respecto a diesel, siendo la opción a gasolina la menos económica.

-La operación con ultracapacitores resulta teóricamente más económica que con baterías; pues no se requieren reemplazos de bancos, lo que es para los modelos a baterías la principal debilidad en costos de mantenimiento.

-Los resultados de los estudios de los Ebus no son directamente comparables, pues las flotas no se operaban en las mismas condiciones. Las rutas de KAT tenía terrenos más demandantes y períodos más cortos.

-Comparando costos totales llevados al caso colombiano, la mejor opción resulta ser el modelo HEB articulado de New Flyer operado por KCMetro. Arroja las mejores cifras de en operación, aunque con un margen muy estrecho comparado con el articulado a diesel, debido al elevado precio del equipo, y a los altos costos del reemplazo de las baterías.

-Si el valor adicional por nacionalización de repuestos supera el 10% supuesto, la tecnología de HEB quedaría en desventaja económica de operación contra la opción a diesel.-No se encontraron experiencias exitosas de buses híbridos conectables (PHEV) en Norte América, estos en principio tiene el atractivo de posibilitar el aprovechamiento de energías renovables, al cargar las baterías con electricidad de la red. En este caso es necesario evaluar el costo de la energía en cada carga, la subsecuente afectación en la vida útil de la batería, el costo de la infraestructura para la carga, y las pérdidas asociadas al proceso.

-Para los sistema tipo BRT como Transmilenio Se recomienda considerar la alternativa trolebús, los cuales ahora pueden ser considerados vehículos eléctricos operables en conexión, permitiendo el aprovechamiento más eficiente de energía proveniente de recursos renovables, y ofreciendo cero emisiones en la ciudad.

-Los sistemas HEB han sido implementados, más que por aumento del índice de B/C, por una política de desarrollo del sector transporte que propende por una reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, aumento de la confiabilidad del suministro

de energía para el sector transporte de pasajeros en áreas urbanas/metropolitanas y reducción de emisiones. De igual forma, estados como California, US, proyectan esta tecnología a mediano plazo pensando en los programas de desarrollo de los sistemas de tracción eléctrica soportadas por celdas de hidrógeno.

-En un análisis económico para la selección entre alternativas híbridas y convencionales es indispensable cuantificar el valor de la reducción de emisiones causantes de la mala calidad del aire en las ciudades y de las emisiones GHG. Estos efectos del uso de sistemas de combustión interna en medios de transporte urbano traen consigo una serie de costos colaterales que asumen la ciudad directa e indirectamente, los cuales, pueden ser absorbidos parcialmente por la implementación de sistemas HEB en el transporte público de pasajeros.

AGRADECIMIENTO

Agradecimientos especiales a Colciencias y a Codensa que han hecho posible esta investigación a través del Programa Nacional de Investigaciones en Energía y Minería, y a los ingenieros Mauricio Figueroa y Jesús Andrés Velásquez de la UPB.

Al Doctor profesor Helmuth Biechl, del Departamento Ingeniería Eléctrica y Mecatrónica, University of Kempten, Alemania; por sus valiosos aportes a este esfuerzo investigativo.

REFERENCIAS

- Barnitt, Rob (2009). *In-Use Performance Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses at New York City Transit*. [En línea] <<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/fleetttest/pdfs/42534.pdf>> [Consulta: 28 Ene. 2009]
- Lammert, M. (2009). *Long Beach Transit: Two-Year Evaluation of Gasoline-Electric Hybrid Transit Buses*. [En línea]: <<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42226.pdf>> [Consulta: 15 Feb. 2009]
- Chandler, K. (2009). *King County Metro Transit Hybrid Articulated Buses: Final Evaluation Results*. [En línea]: <<http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40585.pdf>> [Consulta: 15 Feb. 2009]
- Barnitt, R. (2009). *Case Study: Ebus Hybrid Electric Buses and Trolleys*. [En línea]: <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/38749.pdf>> [Consulta: 13 Feb. 2009]
- Environmental and Energy Study Institute (2009). *Hybrid Buses Costs and Benefits*. [En línea]

<http://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf> [Consulta: 15 Feb. 2009]

STA (2009). *Spokane Transit Hybrid Coaches*. [En línea]<http://www.spokanetransit.com/documents/Hybrid_FactSheet_1.pdf> [Consulta: 17 Feb. 2009]

Barnitt, R. (2009). *BAE/Orion Hybrid Electric Buses at New York City Transit: A Generational Comparison*. [En línea]: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/pdfs/heavy/bae-orion_he_buses.pdf> [Consulta: 19 Feb. 2009]

SOBRE LOS AUTORES

Andrés E. Díez

Ingeniero electricista, profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana. Magister en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la UPB. Área de interés investigativo: Calidad de la Potencia Eléctrica y Sistemas Eléctricos de Transporte.

Luis Fernando Roa

Ingeniero electricista egresado de la Universidad Nacional. MBA en Administración de Empresas y candidato a Magister en economía de la Pontificia Universidad Javeriana. Actualmente labora en la gerencia técnica de CODENSA.

Pedro Almario

Ingeniero electricista egresado de la Universidad de los Andes. Actualmente labora en la gerencia de regulación de CODENSA.

Edder Velandia

Ingeniero civil egresado de la Universidad Francisco de Paula Santander. Magister en ingeniería civil e ingeniería industrial de la Universidad de los Andes.

Jaime Rodríguez

Ingeniero electricista, egresado de la UPB. Área de interés investigativo: Calidad de la Potencia Eléctrica y Sistemas Eléctricos de Transporte.