

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Determinación de la configuración básica para el diseño del sistema motriz
de un ómnibus eléctrico para Corredor de Lima Metropolitana**
**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL
GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTOR

Sebastián Mauricio Morón Silva

ASESOR:

Fernando Octavio Jiménez Ugarte

Lima, enero, 2021

RESUMEN

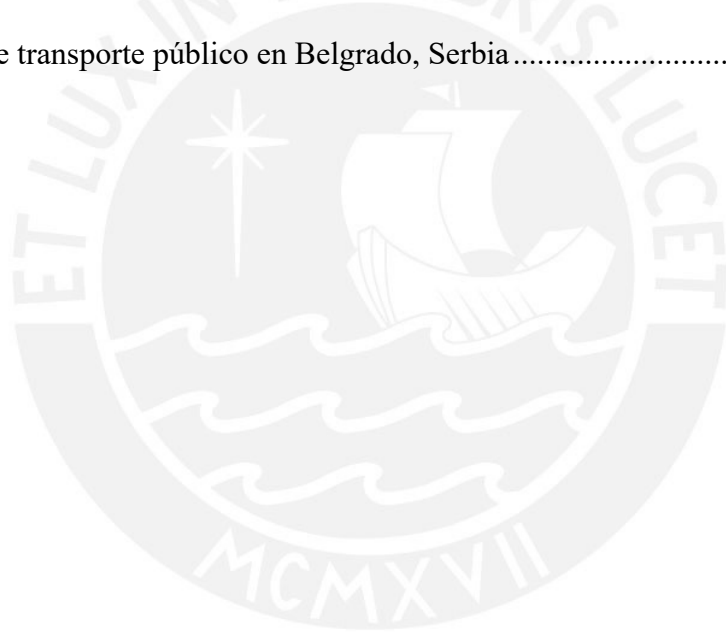
El presente trabajo de investigación estudia el estado de la tecnología de los vehículos eléctricos con el objetivo de determinar qué tecnología emplear en el diseño de un bus eléctrico para cubrir la ruta del Corredor Rojo planteada por la Autoridad de Transporte Urbano en la ciudad de Lima. En primer lugar, se determina qué tipos de vehículo eléctrico se tomará en cuenta y se realiza una breve descripción de estos y su uso como buses de transporte público. Luego se compara cada una de las tecnologías estudiadas tomando en cuenta tres aspectos importantes: autonomía del vehículo, tiempo de recarga de la fuente de energía e infraestructura requerida para la implementación de cada uno de estos vehículos. Finalmente, considerando las ventajas y desventajas de cada tecnología y las características del lugar del proyecto (ciudad de Lima), se determina cuál de ellas es la mejor alternativa para cumplir con el objetivo planteado.

Índice

Introducción	4
1. Estado de la tecnología y tipos de vehículos eléctricos	5
1.1. Vehículos eléctricos a batería	6
1.2. Vehículos eléctricos híbridos	9
1.3. Vehículos eléctricos con celda de combustible.....	12
1.4. Vehículos eléctricos energizados por línea de suministro	14
1.5. Vehículos eléctricos con supercondensadores	15
2. Comparación de los vehículos eléctricos	17
2.1. Autonomía.....	17
2.2. Tiempo de recarga.....	19
2.3. Infraestructura requerida.....	21
3. Condiciones de operación	24
3.1. Ruta de operación	24
3.2. Determinación de la tecnología óptima.....	25
4. Conclusiones.....	27
Bibliografía	29

Índice de figuras

Figura 1: Componentes principales de un vehículo eléctrico a batería	8
Figura 2: Configuración vehículo híbrido en serie	10
Figura 3: Configuración vehículo híbrido en paralelo.....	10
Figura 4: Configuración vehículo híbrido serie-paralelo.....	11
Figura 5: Configuración vehículo híbrido complejo.....	11
Figura 6: Esquema de una celda de combustible (PEMFC)	13
Figura 7: Sistema de transporte público en Vancouver, Canadá	15
Figura 8: Sistema de transporte público en Belgrado, Serbia	16



Introducción

Actualmente en Lima se tiene un transporte público desordenado, informal y que genera una gran contaminación. Esto se debe a que hay muchas líneas de transporte independientes que suelen usar buses y combis antiguas lo cual se demuestra en la antigüedad promedio de los vehículos de transporte público en Lima y Callao que es de 12.5 años (Fundación Transitemos, 2018) y en su mayoría se encuentran en mal estado de mantenimiento por lo cual tienen elevados niveles de emisiones contaminantes. Para solucionar esto, la Municipalidad de Lima, por medio de la Autoridad de Transporte Urbano (ATU), tiene como objetivo ordenar el transporte público. Esto implica organizar las líneas de transporte y renovar la flota vehicular. Esto se viene realizando los últimos años creando corredores viales en los que operan exclusivamente buses del Sistema Integrado de Transporte y se retiran las líneas informales (ATU s/f). Esto soluciona en parte el problema del desorden, sin embargo, el problema de la contaminación sigue presente pues estos corredores viales han sido cedidos en concesión a algunas de las empresas que operaban anteriormente, las cuales, en algunos casos, han reutilizado los buses que usaban anteriormente y en otros casos se usan buses a gas natural (Instituto Metropolitano Protransporte de Lima 2014), que si bien tiene una combustión más limpia que el diésel usado por los buses más antiguos, igual genera dióxido de carbono (un gas de efecto invernadero) que contribuye a la contaminación.

Es por ello que se desea diseñar un ómnibus eléctrico para operar en una de las rutas establecidas por la ATU. En el presente trabajo se realizará el estudio de las diferentes tecnologías de vehículos

eléctricos disponibles en el mercado actualmente para determinar cual de estas es la mejor para implementar el proyecto planteado. Para esto se debe revisar literatura sobre el estado de la tecnología de cada una de las tecnologías a considerar, las cuales son: vehículos eléctricos a batería, vehículos eléctricos híbridos, vehículos eléctricos con celda de combustible, vehículos eléctricos energizados por línea de suministro y vehículos eléctricos con supercondensadores. Luego se deben comparar las ventajas y desventajas de cada una de estas tecnologías y analizar la viabilidad de implementarlas en la ciudad de Lima para la ruta planteada y decidir cuál sería la mejor alternativa.

1. Estado de la tecnología y tipos de vehículos eléctricos

En el pasado, los vehículos eléctricos no presentaban una alternativa viable pues tenían un rango de kilometraje muy limitado, baterías pesadas y dificultad en la recarga. Como se puede apreciar, todos estos problemas están relacionados a las baterías. Sin embargo, en los últimos años se han tenido grandes avances tecnológicos en las baterías que han logrado mejorar su vida útil, la densidad energética, la capacidad de carga, el voltaje de salida y la eficiencia. Además, ahora también se poseen mejores sistemas de carga que logran recargar las baterías en menor tiempo (He, Xie y Luo 2020). Es por esto que ahora los vehículos eléctricos sí se presentan como una opción atractiva para reemplazar a los motores de combustión interna pues además de haber superado sus principales desventajas, presentan otras ventajas como menor costo energético, los motores eléctricos generan mayor torque a bajas velocidades y requieren menos mantenimiento,

además que, dependiendo de que fuente provenga la corriente eléctrica, pueden llegar a generar cero emisiones contaminantes. Por otra parte, existen algunos tipos de vehículos eléctricos que no dependen de baterías para su funcionamiento los cuales también se incluirán en el presente estudio.

A continuación, se presentarán las distintas tecnologías utilizadas en los vehículos eléctricos actualmente. Cabe resaltar que lo que difiere en cada tecnología es la forma en la que se genera o almacena la energía eléctrica ya que los motores en sí pueden ser los mismos para cada tipo de vehículo y para decidir qué tipo de motor usar se debe estudiar el estado de la tecnología de los motores eléctricos.

1.1. Vehículos eléctricos a batería

Entre los vehículos eléctricos más usados (y vendidos) a nivel mundial están los vehículos eléctricos a batería (battery electric vehicle, BEV) y los vehículos híbridos. Los primeros son los puramente eléctricos que dependen de una batería como fuente de energía única y se tienen que conectar a una red de suministro eléctrico para recargar dicha batería (a parte del frenado regenerativo que recarga parcialmente la batería). En un principio se usaban las baterías de ácido-plomo, pero en la actualidad el tipo de batería más usado son las baterías de iones de litio dado que tienen una alta energía específica (lo cual quiere decir que pueden almacenar una mayor carga en menos peso), una mayor vida útil y una baja auto descarga. Los motores eléctricos en este tipo de vehículos pueden tener distintas configuraciones. Una configuración típica es un solo motor conectado a las ruedas delanteras mediante una transmisión de una sola velocidad. También se

tienen configuraciones de dos, tres o hasta cuatro motores que pueden estar conectados a los ejes mediante transmisiones o incluso se pueden conectar directamente a las ruedas y pueden tener controles independientes. Los motores más usuales son los motores de inducción y los motores de imanes permanentes ya que estos son más compactos y requieren menos mantenimiento que los motores de corriente continua (Husain 2003).

Además de los motores, la batería y la transmisión, otros componentes no menos importantes de los vehículos eléctricos a batería son: el sistema de gestión de las baterías, el cual monitorea el estado de carga y la vida útil restante de las baterías y se encarga de que se usen de manera segura y sin que se dañen; la electrónica de potencia, que consta de un inversor de corriente para convertir la corriente directa suministrada por la batería en corriente alterna para alimentar a los motores; el controlador del motor, que se encarga de regular el torque y velocidad entregados por el motor según los comandos recibidos en los pedales; el convertidor DC-DC, el cual convierte el alto voltaje de las baterías en bajo voltaje para su uso en sistemas auxiliares y el sistema de refrigeración, que se encarga de mantener al motor, baterías y otros componentes en su temperatura óptima de funcionamiento (Alternative Fuels Data Center). La figura 1 muestra un diagrama de los componentes principales de un vehículo eléctrico a batería y como se conectan entre ellos.

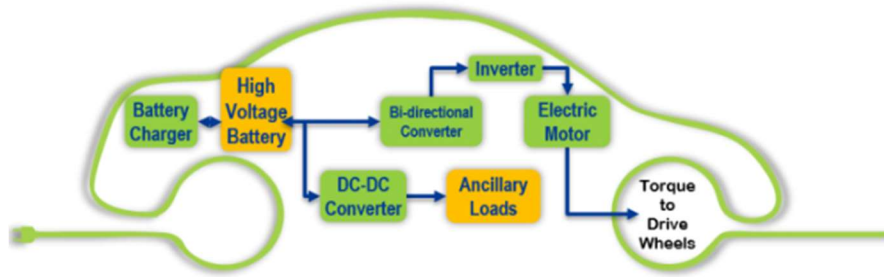


Figura 1: Componentes principales de un vehículo eléctrico a batería

Fuente: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-electric-drive-systems>.

Consulta: 5 de mayo de 2020.

El mercado de vehículos eléctricos a batería para transporte privado es un mercado que se ha venido desarrollando extensamente los últimos años en los países desarrollados. Sin embargo, no pasa lo mismo con el transporte público pues este tiene otras exigencias como que su ciclo de conducción es más exigente ya que recorre calles de ciudad durante todo el día y el recorrido diario de un bus es mucho mayor al de un auto particular por lo cual requeriría baterías de mucho mayor capacidad. Otro inconveniente con las baterías por lo cual no muchas ciudades implementan buses a batería, es que estas disminuyen su rendimiento en temperaturas extremas (frío o calor) y cuando se las exigen demasiado en pendientes muy pronunciadas (Levy 2019). Sin embargo, en una ciudad como Lima esto no sería un inconveniente pues el clima es constante durante el año (la temperatura no alcanza extremos) y al ser una ciudad costera, su geografía es casi plana por lo que no tiene pendientes pronunciadas.

1.2. Vehículos eléctricos híbridos

Los vehículos híbridos poseen dos tipos de motores: un motor de combustión interna y un motor eléctrico. Se tienen cuatro tipos de vehículo híbrido según cómo se configuren los motores: en serie, en paralelo, en serie-paralelo y complejo, además de dos categorías dependiendo de la forma de carga de la batería: en los híbridos no enchufables, la única fuente principal de energía es el combustible que emplea el motor de combustión interna, y en los híbridos enchufables la batería se puede recargar con el motor de combustión interna o conectando el vehículo a la red eléctrica.

En la configuración en serie (figura 2) la energía mecánica generada por el motor de combustión interna es convertida en energía eléctrica en el generador y esta es usada ya sea para alimentar al motor eléctrico o para recargar la batería. En esta configuración el motor de combustión interna siempre trabaja en su región de máxima eficiencia por lo que se puede usar un motor de menor potencia y tamaño. En la configuración en paralelo (figura 3) ambos motores se encargan de entregar potencia a las ruedas mediante un acoplamiento mecánico. En este caso las potencias de ambos motores se suman, pero debido a que el motor de combustión interna también va acoplado a las ruedas, no siempre trabaja en su región óptima. Además, en este caso la batería solo es recargada por el motor eléctrico cuando funciona como generador durante la frenada regenerativa.

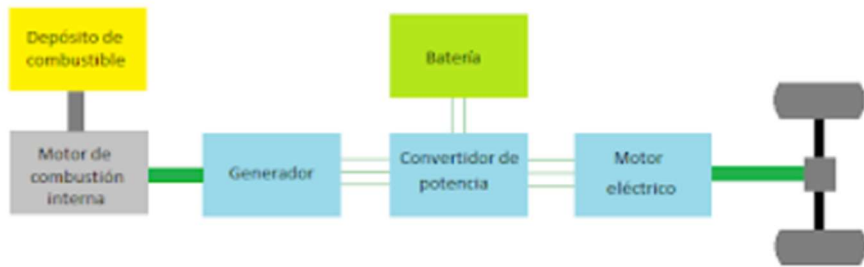


Figura 2: Configuración vehículo híbrido en serie

Fuente: <http://energiayrealidad.blogspot.com/2013/11/que-es-un-vehiculo-hibrido.html>.

Consulta: 6 de mayo de 2020.

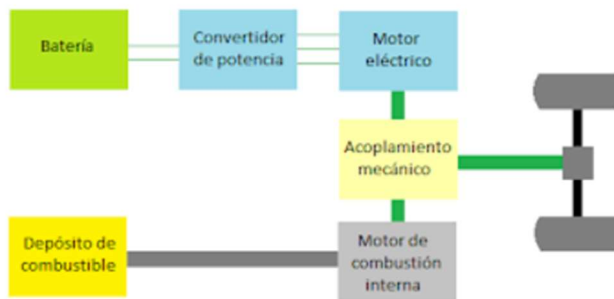


Figura 3: Configuración vehículo híbrido en paralelo

Fuente: <http://energiayrealidad.blogspot.com/2013/11/que-es-un-vehiculo-hibrido.html>.

Consulta: 6 de mayo de 2020.

En los vehículos híbridos con configuración serie-paralelo (figura 4) se incorporan características de los dos sistemas anteriores: el motor de combustión interna es conectado a un generador eléctrico, que alimenta al motor eléctrico y recarga la batería, como en la configuración en serie, pero también entrega potencia a las ruedas, como en la configuración en paralelo y el motor eléctrico recibe energía de la batería y el generador y entrega potencia mecánica a las ruedas. En este caso el motor eléctrico también funciona como freno regenerativo. Finalmente, la configuración compleja (figura 5) es similar a la serie-paralelo, pero tiene un convertidor de

potencia adicional pues en este caso el generador eléctrico conectado al motor de combustión interna puede funcionar también como motor. Para esto, este generador está conectado a la batería mediante un convertidor de potencia individual.

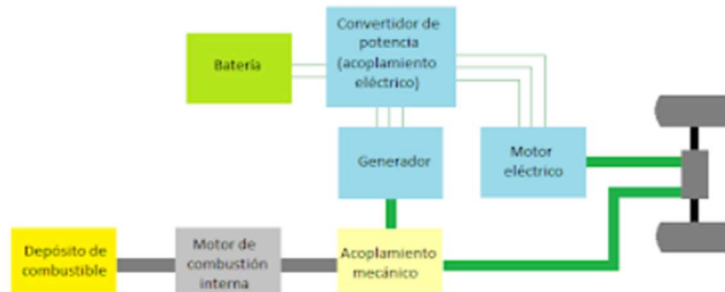


Figura 4: Configuración vehículo híbrido serie-paralelo

Fuente: <http://energiayrealidad.blogspot.com/2013/11/que-es-un-vehiculo-hibrido.html>.

Consulta: 6 de mayo de 2020.

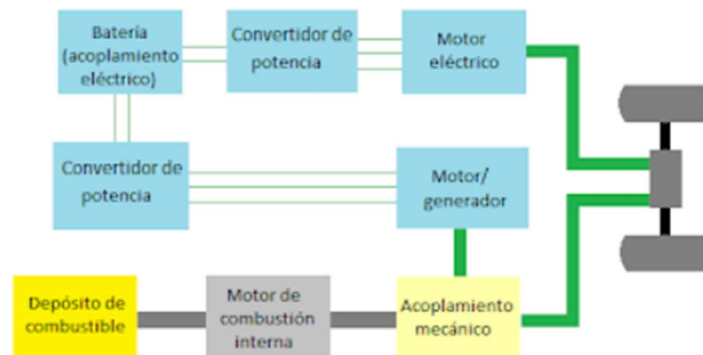


Figura 5: Configuración vehículo híbrido complejo

Fuente: <http://energiayrealidad.blogspot.com/2013/11/que-es-un-vehiculo-hibrido.html>.

Consulta: 6 de mayo de 2020.

En países como el Perú, donde no hay una red de carga de baterías ampliamente desarrollada, los vehículos híbridos no enchufables son el tipo de vehículo eléctrico más común pues no requieren un lugar donde cargar sus baterías. Para el caso de buses de transporte público, en un entorno urbano con paradas y arranques frecuentes, tal como la ruta en cuestión en la ciudad de Lima, la configuración en serie presenta una mejor eficiencia ya que el motor de combustión interna se mantiene funcionando en un punto óptimo independientemente de la velocidad del motor eléctrico de la cual depende la velocidad del vehículo. Los buses híbridos reducen las emisiones contaminantes hasta en un 75% comparado a un bus con motor de combustión interna y fueron un inicio para la electrificación del transporte público (Environmental and Energy Study Institute 2007), sin embargo, en el presente proyecto lo que se desea es eliminar por completo las emisiones lo cual mientras se tenga un motor de combustión interna en uso, no se dará.

1.3. Vehículos eléctricos con celda de combustible

Otro tipo de vehículo eléctrico son los vehículos eléctricos con celda de combustible (fuel cell electric vehicle, FCEV). Estos vehículos usan una celda de combustible en lugar de una batería para generar corriente eléctrica. La celda consiste de un ánodo y un cátodo separados por un material electrolito no conductor. El tipo de celda de combustible más usado en vehículos eléctricos es la celda de membrana de intercambio de protones (proton-exchange membrane fuel cell, PEMFC) y su funcionamiento (figura 6) es el siguiente: en el ánodo el combustible, hidrógeno en este caso, se descompone en electrones e iones H^+ . Los iones fluyen a través del electrolito hacia el cátodo y los electrones viajan por un circuito eléctrico externo, donde está conectado el motor. En el cátodo los iones de hidrógeno se combinan con oxígeno del aire para formar agua

(Pollet y otros 2014). Para que todo este proceso pueda ocurrir, tiene que haber un flujo continuo de hidrógeno al ánodo y oxígeno al cátodo, por eso es que el hidrógeno se va consumiendo y requiere ser recargado como cualquier combustible. El hidrógeno se almacena en tanques y puede ser almacenado como hidrógeno líquido o hidrógeno comprimido. Aparte del tanque de hidrógeno y la celda de combustible, todos los demás componentes de FCEV son iguales a los de un vehículo eléctrico a batería. Estos vehículos también cuentan con una batería, pero de menor tamaño para almacenar la energía producida por el freno regenerativo.

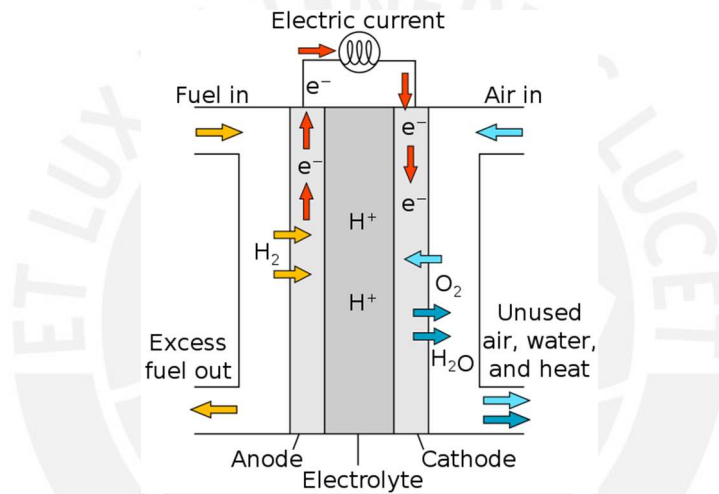


Figura 6: Esquema de una celda de combustible (PEMFC)

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Proton_Exchange_Fuel_Cell_Diagram.svg.

Consulta: 6 de mayo de 2020.

Esta tecnología de vehículos eléctricos se viene desarrollando tanto para transporte privado como público. Los buses eléctricos están en pruebas principalmente en algunas ciudades de Europa y presentan el problema de costos elevados en la adquisición del vehículo y en la construcción de la infraestructura requerida para el transporte y almacenamiento de hidrógeno (Berger 2015). En el

caso de Perú, aún no se tiene la infraestructura requerida para una distribución masiva de hidrógeno lo cual significaría una mayor inversión. Cabe resaltar que la producción de hidrógeno requiere de grandes cantidades de energía por lo que, dependiendo de que fuentes se utilicen para obtener dicha energía, los vehículos con celda de combustible pueden igual tener emisiones indirectas.

1.4. Vehículos eléctricos energizados por línea de suministro

Los vehículos eléctricos energizados por líneas de suministro eléctrico son vehículos que, si bien tienen una pequeña batería en caso de emergencia, no requieren de esta para funcionar pues se conectan directamente a la red de suministro eléctrico de la ciudad mediante cables instalados a lo largo de su ruta. Debido a esto, estos vehículos pueden tener una operación continua sin tener que parar a recargar las baterías o rellenar combustible. Sin embargo, estos vehículos sólo pueden operar en una ruta predeterminada donde estén instalados los cables de suministro, por esto, este tipo de vehículos sólo podrían servir para transporte público que recorren rutas fijas y no para transporte privado o transporte público con rutas variables. Los tranvías pertenecen a esta categoría de vehículos que eran más usados en el pasado pues, al ya tener su ruta restringida por los rieles por donde circulaban, el cableado no presentaba una restricción adicional, pero se dejaron de usar en favor de buses a Diesel pues presentaban una opción más económica. El tren eléctrico de Lima también es un ejemplo de este tipo de vehículo, pero al igual que los tranvías este va sobre rieles en una ruta definida. Si hablamos de buses que usan esta tecnología, se tiene por ejemplo el “Trolley Bus” usado para transporte público en Vancouver que sí es un bus convencional (no va sobre rieles) y comparte la ruta con los demás vehículos, pero va conectado a las líneas de suministro. Para el caso de implementar este tipo de vehículos en una ciudad como Lima, además

de diseñar el bus en sí, se tendría que diseñar toda la red de cableado de suministro a lo largo de la ruta recorrida (Levy 2019). Sin bien, al igual que los demás vehículos eléctricos, estos vehículos requieren de menos mantenimiento en comparación a un vehículo con motor de combustión interna, las líneas de suministro si requieren de mantenimiento periódico para que se mantengan en buen estado (Larminie y Lowry 2012).



Figura 7: Sistema de transporte público en Vancouver, Canadá

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vancouver_E40LFR_trolleybus_2214.jpg.

Consulta: 6 de mayo de 2020

1.5. Vehículos eléctricos con supercondensadores

Finalmente, están los vehículos eléctricos que usan supercondensadores para almacenar la energía en lugar de baterías. Los condensadores tradicionales tienen una gran densidad de potencia, es decir pueden recibir y entregar energía de forma muy rápida, pero tienen una baja densidad de energía, es decir no pueden almacenar una gran cantidad de energía. En los supercondensadores se sacrifica un poco la densidad de potencia (comparado a los condensadores tradicionales) para

lograr aumentar la densidad de energía, pero aun así no se logra obtener una densidad de energía comparable a la de las baterías (Husain 2003). Por eso, los supercondensadores no se usan normalmente como el medio principal para almacenar energía en los vehículos eléctricos, sino que en ocasiones se adicionan a las baterías para poder entregar una alta potencia inicial (buena aceleración desde el reposo) y además ayudan al frenado regenerativo en las frenadas fuertes pues pueden recibir una mayor potencia que las baterías. Sin embargo, en algunas ciudades se están implementando buses de transporte público con supercondensadores como único medio para almacenar la energía. Esto es posible debido a que estos buses, al tener paradas preestablecidas, pueden recargar los supercondensadores, que se recargan mucho más rápido que las baterías, en cada paradero mientras recogen o dejan pasajeros y la energía que puede almacenar un supercondensador sí alcanzaría para llegar al siguiente paradero, ya que se trata de un recorrido corto. Para este sistema, se requiere que en los paraderos se instale un sistema de carga que le provea de energía eléctrica a los buses. Un ejemplo de este tipo de buses es el “Capabus” usados para transporte público en Belgrado.



Figura 8: Sistema de transporte público en Belgrado, Serbia

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Higer_GSP_2101.jpg

Consulta: 6 de mayo de 2020

2. Comparación de los vehículos eléctricos

2.1. Autonomía

Se podría decir que esta es la principal desventaja de los vehículos eléctricos a batería, tienen una autonomía limitada que depende del tamaño de la batería. La autonomía promedio de los vehículos (BEV) de pasajeros es de alrededor de 290 kilómetros (Newmotion), que, si bien sí cubre las necesidades promedio diarias en ciudad, es menor a la autonomía de un vehículo con motor de combustión interna. Los vehículos eléctricos híbridos tienen una mayor autonomía (pueden sobrepasar los 500 km) que los de batería pues tienen dos fuentes de energía. Sin embargo, la capacidad de la batería es mucho menor que el caso anterior y solo provee una autonomía de unos 50 kilómetros (Newmotion) mientras que el resto del recorrido se realiza con el motor de combustión interna. Para el caso de buses eléctricos a batería, se debe tener en cuenta el peso de las baterías pues estas son el componente más pesado del vehículo y al aumentar su capacidad, se puede alcanzar una mayor autonomía, pero a costa de sacrificar peso y carga útil. Además, se debe tener en cuenta cuanto se desea que dure la batería pues en la ruta analizada, los buses dan alrededor de cinco vueltas al día por lo que se podría optar por una batería que dure todo el día o una batería que sólo dure para una vuelta de recorrido y que no aumente tanto el peso del vehículo.

Los vehículos eléctricos con celda de combustible tienen una autonomía similar a la de los vehículos con motor de combustión interna y los híbridos ya que dependen de la cantidad de hidrógeno que se pueda almacenar en su tanque (Alternative Fuels Data Center). Cabe resaltar que

para todas las comparaciones se toma la autonomía promedio de diversos vehículos la cual puede variar bastante de acuerdo al fabricante y modelo de vehículo. Por otra parte, la autonomía es una ventaja de los vehículos eléctricos energizados por línea de suministro ya que esta es ilimitada pues no dependen de su batería (ni combustible) sino que se mantienen conectados a la red eléctrica y pueden operar de manera continua. Sin embargo, una desventaja es que tienen que mantenerse en su ruta preestablecida donde están instalados los cables de suministro eléctrico especiales ya que sus baterías sólo alcanzan para un par de kilómetros, pero esto no presenta problema si se trata de transporte público que siempre sigue la misma ruta. Finalmente, los vehículos eléctricos con supercondensadores son los que tienen la peor autonomía pues la energía que pueden almacenar los supercondensadores solo alcanza para que estos vehículos se puedan movilizar unos pocos kilómetros. Por esto es que los buses con supercondensadores se deben recargar frecuentemente en cada paradero.

Para la implementación de un bus eléctrico, lo ideal sería una tecnología en la que no se tenga que preocuparse por la autonomía. Los buses actuales del Sistema Integrado de Transporte en usan gas natural como combustible lo cual alcanza para más de un ciclo completo de conducción. Los buses eléctricos energizados por líneas de suministro son los únicos tienen autonomía ilimitada, aunque si se considera la restricción que tienen que deben permanecer en su ruta establecida, se puede decir que los buses con supercondensadores también cumplen con una operación ininterrumpida pues sólo deben detenerse en cada paradero para recargarse.

2.2. Tiempo de recarga

Otro punto importante a tomar en cuenta al determinar que tecnología de vehículo eléctrico se va a emplear es el tiempo que se tarda en recargar la fuente de energía (eléctrica o combustible). Dependiendo del tipo de recarga de batería que se realice, el tiempo de recarga puede ser una desventaja importante de los vehículos eléctricos a batería, pero este tiene una gran variación dependiendo de cómo se realice. Para una carga en una casa, la batería de un vehículo de transporte privado puede demorar entre 4 y 8 horas en cargar con una tensión de 240V. Sin embargo, en ciertas ciudades que ya tienen un gran mercado de vehículos eléctrico, existen redes de cargadores rápidos, que recargan las baterías en un tiempo mucho menor y, dependiendo de la capacidad de la batería, puede recargarse hasta 80% en unos 20 minutos, pero este tipo de infraestructura no está aún desarrollada en Lima (Plug-in hybrid & electric vehicle research center). Tiempos igual de largos se tendrían para el caso de baterías de buses dependiendo de su capacidad. Sin embargo, se puede optar por un diseño con la posibilidad de intercambiar las baterías para así poner un paquete de baterías con carga completa mientras el paquete sin carga se recarga en una estación de recarga, lo cual presenta una opción mucho más rápida que tener el vehículo detenido mientras se recarga la batería (Kim, Song y Choi 2015). Para el caso de los vehículos híbridos, hay dos formas de recargar la batería: sólo con el motor de combustión interna o conectándose a cargadores, aunque no todos los híbridos presentan la segunda opción. En el caso recargar la batería conectándose a un cargador se tienen las mismas limitaciones que la carga de un BEV, aunque en este caso la batería es de menor capacidad y por ende la carga tomará menos tiempo. Y en cuanto al motor de combustión interna, el rellenado del tanque de combustible toma unos pocos minutos.

La fuente de energía en los vehículos eléctricos con celda de combustible es el hidrógeno y este se rellena de manera similar al combustible tradicional por lo cual su recarga solo toma unos pocos minutos (Alternative Fuels Data Center). Por otro lado, los vehículos eléctricos energizados por líneas de suministro no requieren ser recargados y su operación es continua. Finalmente, los vehículos eléctricos con supercondensadores se recargan de manera muy rápida, en lo que demora una parada de bus, pues los condensadores tienen una baja capacidad de energía, pero además pueden absorber la energía muy rápidamente por lo cual se pueden emplear elevadas potencias para la recarga.

En el caso de los buses que operan en Lima actualmente, la fuente de energía más parecida al gas natural en cuanto a tiempo de recarga sería el hidrógeno usado en los vehículos eléctricos con celda de combustible con la diferencia que actualmente la recarga de combustible la realizan en estaciones de servicio públicas, las cuales no tienen suministro de hidrógeno. Por esto, de optar por la tecnología de celda de combustible, la recarga se debería realizar en el patio estacionamiento de los buses donde se instalaría un suministro de hidrógeno. En el caso de buses con baterías intercambiables, se puede obtener un tiempo similar al tiempo de recarga de combustible en el tiempo de cambio de baterías, pero, al igual que el hidrógeno, este cambio de baterías se realizaría en el patio estacionamiento en lugar de en una estación de servicio. Si se empleasen las tecnologías de líneas de suministro o supercondensadores, se podría eliminar por completo el tiempo de recarga, aunque en el caso de supercondensadores el bus estaría obligado a detenerse en todos los paraderos para recargar los condensadores, pero se requeriría infraestructura adicional como se verá a continuación.

2.3. Infraestructura requerida

Otro punto de comparación de los vehículos eléctricos es la infraestructura que estos requieren para poder funcionar. Este punto es un tema que generalmente no se piensa cuando se desea adquirir un vehículo con motor de combustión interna pues las redes de estaciones de combustible es algo que se da por hecho que existen y no se tienen que pensar en un lugar específico donde se vaya a realizar la recarga de combustible. Sin embargo, en el caso de los buses eléctricos, para cada una de las tecnologías mencionadas, se tendría que implementar una infraestructura para su operación.

En el caso de los vehículos eléctricos a batería, la infraestructura que se requiere son estaciones de carga para las baterías. Si se tratase de vehículos particulares se podría implementar una red de estaciones de carga rápida a través de la ciudad tal como existen las estaciones de gasolina actualmente o cada propietario podría tener su propia estación de carga en su casa o estacionamiento. Para el caso de buses eléctricos para transporte público, las estaciones de carga se pueden ubicar en el paradero inicial o final o en el patio estacionamiento que tienen los buses de la ruta seleccionada en Lima. Es por esto que la implementación de esta red de carga sería relativamente sencilla ya que no se necesitaría adaptar ningún espacio físico adicional para ella. En dicho espacio, también se podría implementar el sistema de cambio de baterías y cargadores para las baterías por sí solas sin tener que estar el vehículo detenido mientras se cargan estas (Kim, Song y Choi 2015). Para los buses híbridos se tienen dos posibilidades dependiendo del tipo. Los vehículos híbridos que recargan su batería únicamente con el freno regenerativo no requerirían de ninguna infraestructura adicional ya que su única fuente de energía principal sería el combustible

que usa el motor de combustión interna y, como se mencionó, la red de estaciones de combustible está ampliamente desarrollada. Por otra parte, para los buses híbridos que además de recargar combustible pueden ser enchufados para recargar sus baterías se tendría que implementar estaciones de carga de la misma manera que para los vehículos eléctricos a batería.

Los vehículos eléctricos con celda de combustible utilizan hidrógeno como combustible y para poder suministrarlo se requiere de una gran infraestructura. Si se quiere para uso en vehículos particulares (de uso masivo), se necesita implementar una red de estaciones de llenado ya sea en las estaciones de combustible existentes o en estaciones independientes. En el caso de su uso en buses de transporte público, los puntos de llenado se podrían implementar en los mismos puntos donde se implementaría las estaciones de recarga de baterías. Sin embargo, para el hidrógeno, además de los puntos de recarga, se requiere un sistema de distribución entre las plantas de producción y los puntos de recarga y un sistema de almacenamiento. El hidrógeno se puede transportar y almacenar como líquido o como gas comprimido ya que a presión atmosférica tiene una densidad de energía muy baja. Para comprimir el hidrógeno se requiere una gran cantidad de energía ya que para un almacenamiento viable se requiere una presión de varios cientos de atmósferas. Por otra parte, para licuar el hidrógeno, se requiere aun mayor presión y temperaturas criogénicas por lo cual no es una forma viable de almacenamiento (Husain 2003). Para grandes cantidades de hidrógeno comprimido la mejor de manera de transportarlo es por gaseoductos lo cual requiere de grandes proyectos de construcción ya que en Lima no se tiene dicho sistema de distribución implementado.

Los vehículos eléctricos energizados por línea de suministro requieren de una red de cableado eléctrico a lo largo de toda su ruta. Esto, además de presentar un proyecto de construcción adicional y requerir mantenimiento periódico, aumentaría la contaminación visual de Lima que actualmente ya tiene un gran desorden de cables aéreos en varios puntos de la ciudad. Además, dado que este tipo de buses tiene que ir conectado en todo momento a las líneas eléctricas (como se observa en la figura 7), se generarían problemas pues la red de suministro podría cruzarse con los demás cables que ya se tienen.

Finalmente, los vehículos eléctricos con supercondensadores requieren la implementación de paraderos especiales que puedan recargar los condensadores en cada parada. El inconveniente con estos, es que dado que los buses de transporte público que se están analizando no operan en una ruta exclusiva sino comparten carriles con los vehículos privados, su punto de parada no siempre es el mismo. Es decir, sí tienen paraderos específicos, pero pueden detenerse unos metros antes o unos metros más adelante debido a que puede haber algún otro vehículo obstruyendo el paradero exacto y con esto, al no detenerse en el un punto exacto, los condensadores no se recargarían.

Así, si se trata de comparar la infraestructura requerida para la implementación de buses eléctricos en Lima, son los buses eléctricos a batería y los híbridos los que requieren de menor infraestructura y de menos costo. Estos sólo necesitarían una estación de cambio de baterías y de recarga de estas que se puede implementar en los patios almacenes que ya se tiene. En el caso de las tecnologías de líneas de suministro y supercondensadores, estas requieren una infraestructura a lo largo de toda

su ruta y esta requiere mantenimiento lo cual no es conveniente. Finalmente, para el caso de buses con celda de combustible, la infraestructura también se podría instalar solamente en el patio estacionamiento, pero esta infraestructura es mucho mayor a la de las cargas de baterías y además se requiere una red de distribución de hidrógeno.

3. Condiciones de operación

3.1. Ruta de operación

Como se mencionó en la introducción del presente trabajo, el bus que se va a diseñar debe recorrer una ruta planteada por la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU) la cual corresponde al Corredor Complementario N°2 (comúnmente llamado Corredor Rojo) cuya ruta está conformada por toda la Avenida Javier Prado y gran parte de la Avenida La Marina. Se tratan de las principales avenidas trocales que atraviesan Lima Metropolitana en la dirección de este a oeste. Esta ruta es cubierta principalmente por los servicios 201 y 209 que difieren solamente en sus paraderos iniciales y finales, pero mayor parte de sus recorridos es la misma y ambos cubren los mismos distritos (desde Ate hasta San Miguel). El recorrido del bus tiene en promedio 25 kilómetros en cada sentido o 50 kilómetros el recorrido completo de ida y vuelta (Municipalidad Metropolitana de Lima Alcaldía 2017). Las avenidas por donde circulan los buses del Corredor Rojo son avenidas compartidas con otros vehículos privados, es decir los buses no tienen un carril exclusivo por donde circular. Además, al Lima ser una ciudad costera, no presenta ningún cambio pronunciado de elevación, y la ruta en específico no tiene ninguna pendiente muy empinada.

Por otra parte, en cuanto a la infraestructura actual de la ciudad de Lima para la operación de vehículos eléctricos se podría decir que es casi nula. No se tiene una red de cargadores para baterías vehiculares y tampoco se tiene un sistema de distribución de hidrógeno desarrollado. El único sistema de transporte masivo eléctrico es la Línea Uno del metro de Lima. Este tiene una vía exclusiva por donde circular y tiene la instalación de cables aéreos de suministro a lo largo de su ruta. La implementación de infraestructura adicional a lo largo de la ruta requeriría de un proyecto adicional y además, como se mencionó en el caso de líneas de suministro y supercondensadores, presentan inconvenientes en la ruta planteada. Sin embargo, un lugar donde sí se puede instalar algún tipo de infraestructura sin inconvenientes, es el patio estacionamiento de los buses que recorren la ruta, ya que cuando se licitó la ruta del Corredor Rojo, se requirió a las empresas que tengan un patio estacionamiento con espacio para un mantenimiento básico por lo cual en él se podría instalar una estación de carga de baterías, una estación de recambio de batería o una estación de llenado de hidrógeno según se requiera (Instituto Metropolitano Protransporte de Lima 2014).

3.2. Determinación de la tecnología óptima

Como se puede ver, cada tecnología expuestas de buses eléctricos tiene sus ventajas y desventajas y cada una de estas se ha implementado para uso en transporte público en distintas ciudades alrededor del mundo. Por ende, la determinación de una tecnología óptima depende principalmente del lugar de implementación. Para el caso del Corredor Rojo en Lima, se busca un diseñar un bus que pueda reemplazar a los actualmente existentes con una implementación de infraestructura

adicional mínima. Así, la tecnología óptima para del diseño del bus en Lima sería un bus eléctrico a baterías ya que este cumple con requerir poca infraestructura adicional y, además, la infraestructura requerida puede ser instalada en los patios estacionamiento que ya se tienen. Si bien se sabe que esta tecnología presenta desventajas en su autonomía y tiempo de recarga, estas se pueden superar en la fase de diseño: se selecciona las baterías necesarias para una vuelta completa de la ruta (o más de una vuelta si eso no aumenta el peso considerablemente) y se incorpora el sistema de recambio de baterías para que el bus no esté detenido durante el tiempo de carga. De este modo se evita tener que lidiar con los inconvenientes presentados por la implementación de las infraestructuras adicionales requeridas por las otras tecnologías y también presenta una inversión menor ya que a mayor infraestructura, mayor costo tanto de implementación como de mantenimiento.

Ya sabiendo que se empleará la tecnología de bus eléctricos a batería, se deben identificar los principales componentes requeridos por un vehículo de este tipo para su funcionamiento. Los tres componentes principales que se deberán seleccionar en el proyecto de diseño son: el o los motores eléctricos, la transmisión y las baterías. Para seleccionar el motor se debe calcular la potencia requerida, tanto de manera continua cómo máxima, por el bus durante su recorrido en la ruta planteada y se debe determinar cuál es el mejor tipo de motor que cumpla con dichos requerimientos. También se debe determinar si se empleará una distribución de un solo motor o dos motores. Para seleccionar la transmisión se debe estudiar si es más conveniente una reducción de una sola velocidad o una caja de múltiples velocidades y la relación de transmisión se debe seleccionar tomando en cuenta la curva característica del motor. Además, si se determina que se

usará una configuración con un solo motor, se debe tener en cuenta la transmisión en el diferencial. Finalmente, para seleccionar la batería se debe calcular la energía requerida durante un ciclo de conducción y determinar si la batería a emplear cubrirá una o más vueltas de la ruta teniendo en cuenta su capacidad y su peso. Por otra parte, los sistemas adicionales que se requerirán para el funcionamiento del bus eléctrico son: el sistema de gestión de las baterías, la electrónica de potencia, convertidor DC-DC, sistema de refrigeración y, en este caso, el sistema de cambio rápido de baterías.

4. Conclusiones

- A pesar de que un vehículo eléctrico a baterías presenta desventajas importantes como la autonomía y el tiempo de recarga de baterías, sigue siendo la mejor opción para un bus eléctrico en la ciudad de Lima pues es el sistema más conveniente de implementar. Esto se debe a que las otras tecnologías revisadas requieren de infraestructura adicional a lo largo de la ruta en el caso de los vehículos energizados por líneas de suministro o vehículos con supercondensadores, o infraestructura bastante compleja para transporte y almacenamiento de hidrógeno en el caso de vehículos con celda de combustible. Además, los vehículos híbridos quedan descartados pues al tener un motor de combustión interna generan emisiones contaminantes que es lo que se desea evitar con la implementación de un bus eléctrico.
- Las dos principales desventajas de un vehículo eléctrico a batería, autonomía reducida y extenso tiempo de carga de energía, se pueden superar con la implementación en el diseño del bus de un sistema de intercambio de baterías. De esta manera se puede optar por una

batería con la capacidad necesaria para un solo recorrido de la ruta del bus y luego se intercambia por una con carga completa al llegar al paradero final. Esto hace que el peso total del vehículo se vea reducido y más importante, el vehículo no tiene que estar detenido perdiendo tiempo de trabajo mientras se cargan las baterías.

- Si bien dos de las tecnologías revisadas (vehículos eléctricos energizados por líneas de suministro y vehículos eléctricos con supercondensadores) ya se utilizan en algunas ciudades del mundo en buses de transporte público, para la ciudad de Lima no se presentan como una opción viable pues requieren de implementación de infraestructura a lo largo de toda la ruta que interfiere con problemas específicos de la ciudad como contaminación visual por exceso de cables aéreos o la interrupción de paraderos por otros vehículos que circulan en la misma ruta.
- Los vehículos eléctricos a batería ya se presentan como una opción viable para su implementación en sistemas de transporte público en Lima pues la infraestructura que estos requieren se puede instalar en los patios estacionamiento de los buses. Sin embargo, aún no es conveniente el uso de vehículos eléctrico para uso particular pues en Lima no hay una red de lugares de carga donde los propietarios puedan cargar sus vehículos, así como recargan combustible, sino que estos tendrían que instalar cargadores en sus casas lo cual no es conveniente.

Bibliografía

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER DEL U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

Fuel cell electric vehicles. Consulta: 5 de junio de 2020.

https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER DEL U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

How Do All-Electric Cars Work? Consulta: 5 de junio de 2020.

<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>

AUTORIDAD DE TRANSPORTE URBANO PARA LIMA Y CALLAO.

Corredores Complementarios. Consulta: 30 de abril de 2020.

<https://www.atu.gob.pe/corredor-complementario/>

BERGER Roland

2015 *Fuel Cell Electric Buses –Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*. Munich, septiembre.

https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF

CHAN, C. C.

2007 "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," en *Proceedings of the IEEE*. Volumen 95, número 4, pp. 704-718.

<https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>

ENVIRONMENTAL AND ENERGY STUDY INSTITUTE

2007 *Hybrid buses costs and benefits*. Washington.

https://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf

FUNDACIÓN TRANSITEMOS

2018 *Informe de observancia. Situación del transporte urbano en Lima y Callao - 2018*. Lima.

HE, Feng, Guoxin XIE y Jianbin LUO

2020 "Electrical bearing failures in electric vehicles". En *Friction*. Volumen 8, número 1, pp. 4-28. Consulta: 2 de mayo de 2020.

<https://doi.org/10.1007/s40544-019-0356-5>

HUSAIN, Iqbal

2003 *Electric and hybrid vehicles. Design fundamentals*. Boca Ratón: CRC Press.

INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA

2014 *Contrato de concesión del servicio público de transporte de pasajeros en los corredores complementarios del Sistema Integrado de Transporte de Lima*. Consulta: 30 de abril de 2020.

http://www.invermet.gob.pe/transparencia/Proyectos_de_Inversion_e_Infobras/Supervision_de_Contratos/Concesiones_Supervisadas/CONTRATO%20CORREDOR%20JAVIER%20PRADO%20PAQUETE%202.1.pdf

KIM, Jeongyong, Inho SONG y Woongchul CHOI

2015 “An Electric Bus with a Battery Exchange System”. En *Energies*. Volumen 8, número 7, pp. 6806-6819.

<https://doi.org/10.3390/en8076806>

LARMINIE James y John LOWRY

2012 *Electric vehicle technology explained*. Segunda edición. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

LEVY Alon

2019 “The Verdict's Still Out on Battery-Electric Buses”. *Bloomberg CityLab*. s/l, 7 de enero. Consulta: 8 de enero de 2021

<https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-01-17/battery-electric-buses-yield-mixed-results-for-cities>

MAHMOUDZADEH ANDWARI, Amin y otros

2017 “A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels”. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 78, pp. 414-430.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>

MUNICIPALIDAD METROPOLITANA DE LIMA ALCALDÍA

2017 *Acuerdo de concejo N°345*. Lima, 28 de setiembre. Consulta: 20 de mayo de 2020.

https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_privada/app/IMI_APP_MML_2017.pdf

NEWMOTION

The Electric Range of an EV. Consulta: 5 de junio de 2020.

https://newmotion.com/en_GB/the-electric-range-of-an-ev/

NPTEL

Introduction to hybrid and electrical vehicle (web). Consulta: 2 de mayo de 2020.

<https://nptel.ac.in/courses/108/103/108103009/>

PLUG-IN HYBRID & ELECTRIC VEHICLE RESEARCH CENTER OF THE INSTITUTE OF
TRANSPORTATION STUDIES DE LA UNIVERSITY OF CALIFORNIA, DAVIS

Frequently Asked Questions. Consulta: 6 de junio de 2020.

<https://phev.ucdavis.edu/about/faq-phev/>

POLLET, B. G. y otros

2014 “Fuel-cell (hydrogen) electric hybrid vehicles”. En FOLKSON, Richard (editor). *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, pp. 685- 735.

<https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.685>

