

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OMNIBUS ELECTRICO PARA LA UNIVERSIDAD DE VILLA MARIA

Pierantonelli Mario¹, Quintilla Tomás²

Licenciatura en Ambiente y Energías Renovables (LAER)- Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas- Universidad Nacional de Villa María (UNVM)- Arturo Jauretche 1555- V. María- Cba- CP 5900
Tel. 0353-4539106- e-mail: mpierantonelli@unvm.edu.ar

Recibido 14/08/19, aceptado 23/10/19

RESUMEN. El proyecto que se pretende llevar a cabo, se basa en estudios y desarrollos anteriores sobre móviles eléctricos que arrojan resultados satisfactorios en cuanto a consumo energético, contaminación del aire y acústica, y costos. Por lo que se pretende investigar la factibilidad de implementar un transporte público basado en estos móviles para cubrir el trayecto Campus UNVM - Terminal de ómnibus de Villa María. Para ello se consideran diferentes alternativas de trayecto, compra de rodados eléctricos que existen en el mercado, el desarrollo de prototipo de ómnibus eléctrico mediante la adaptación de un ómnibus de combustión. Una vez realizado el estudio de factibilidad, se realizará un anteproyecto para presentar a los organismos involucrados: UNVM, Municipalidad de Villa María y eventuales fabricantes o desarrolladores interesados.

Palabras clave- bus eléctrico, transporte, sustentable, baterías de litio.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, según la Agencia Internacional de Energía (AIE) el sector transporte fue el responsable del 25% en el año 2017 de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por consumo de combustible fósil (IEA, 2017). Este sector experimentó un gran incremento de las emisiones en las últimas dos décadas, el cual se debió al gran aumento del parque automotor mundial, principalmente en los países desarrollados. En Argentina, en el año 2016 según el informe de Balance Energético Nacional del Ministerio de Energía y Minería (BAN, 2018), el transporte consumió el 30% de la energía primaria del país. Esta energía provino principalmente de derivados de petróleo (86%) y gas natural (14%), y fue consumida según el informe 2016 de la AFAC por los 12.503.912 vehículos que circulan en el parque automotor del país, el 3.5% del total está compuesto por vehículos pesados (camiones y buses), teniendo este grupo un promedio de 15 años de antigüedad, siendo la antigüedad un indicador de vehículos de mayores emisiones y de baja eficiencia en la transformación del combustible en energía en comparación con vehículos nuevos (AFAC,2016).

En la actualidad, la movilidad eléctrica presenta una serie de ventajas con respecto a los vehículos con motores de combustión interna tanto, en eficiencia energética como en el objetivo de cero emisiones de contaminantes locales, además de un gran potencial en integración con energías renovables, generando la posibilidad de muy bajas emisiones en un análisis de ciclo de vida. Argentina presenta las mejores condiciones para que los vehículos eléctricos entreguen sus mayores beneficios en términos de cambio climático, ya que, la electricidad tiene un alto potencial para ser generada en gran medida con energías renovables, principalmente solar y eólica (López, 2016).

La utilización de buses eléctricos supone una reducción en el consumo de combustible pudiendo generar un importante ahorro para el Estado en la importación de combustible fósil y brindando una

¹ Ingeniero, Profesor LAER- UNVM

²Estudiante LAER- UNVM

independencia de las variables internacionales vinculadas al mercado del petróleo. La disminución del consumo traería consigo una reducción de las emisiones de GEI y de contaminantes locales como NOx (óxidos de nitrógeno) y material particulado, entre otros. Además, los motores eléctricos a diferencia de los motores a combustión no emiten ruidos al exterior, de modo que, disminuyen la contaminación sonora del sector urbano (López, 2016).

Para llevar a cabo esta investigación se tiene en cuenta la apertura de la prolongación del Boulevard España hasta el Campus de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) lo que beneficia al tipo de transporte en discusión haciendo el trayecto recto y más corto, con aproximadamente 5 km de recorrido desde la Terminal de Ómnibus de la ciudad hasta el Campus de la UNVM. El uso de estas tecnologías en conjunto con medidas de eficiencia energética (pesos, rendimientos) ayudará a fomentar el uso de energías renovables ya que, existe una gran sinergia con la generación de energía mediante fuentes renovables, potenciándose mutuamente los beneficios ambientales y económicos para la sociedad.

Es necesario, en orden de alcanzar la sustentabilidad, reemplazar el paradigma de movilidad urbana dependiente del combustible fósil con vehículos eléctricos, ya que éstos extraen su potencial máximo en el circuito urbano, donde las distancias son cortas, las frenadas son muy frecuentes y las velocidades relativamente bajas, logrando reducir los costos ambientales y económicos del transporte urbano y dando un paso hacia la independencia de los combustibles fósiles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diagnóstico de la situación de transporte actual en el trayecto en estudio

En primer lugar, se realizó una recopilación y análisis de datos técnicos y de operación del medio de transporte actual a través de fuentes de información primarias (Contacto con la empresa, contacto con la Secretaría de Transporte de la ciudad, fichas técnicas de los fabricantes de buses).

Por medio de una entrevista con la empresa TRANSBUS que, ofrece servicio en el trayecto, se obtuvo: la ficha técnica de los ómnibus utilizados, cuánto combustible se consume, cuántos kilómetros recorren por vehículo por día y número de pasajeros mensuales. Se complementó con acciones de cooperación mediante entrevistas con la Municipalidad de Villa María y la Dirección de Infraestructura y Planificación de la UNVM y se obtuvieron datos de transporte e infraestructura actuales y proyectados sobre el área de estudio. Se analizaron encuestas de transporte elaboradas por proyectos de investigación del Instituto de Ciencias Sociales de la UNVM.

A partir de los datos obtenidos, se estudiaron las características de los vehículos que están en funcionamiento en el trayecto. Se resumen los resultados obtenidos en indicadores, tablas y gráficos a fines de facilitar la comprensión y la posterior comparación de los sistemas estudiados.

Comparación de alternativas buses eléctricos disponibles en el mercado.

Se analizó la información obtenida a partir de fuentes primarias sobre las alternativas de ómnibus eléctricos disponibles en el mercado nacional e internacional. Debido a que existen algunos fabricantes de ómnibus eléctricos que instalarán plantas de ensamblado en el país, se evaluaron los costos de estos móviles comparados con las alternativas propuestas de acuerdo al recorrido acotado.

Proponer un prototipo de bus eléctrico adaptado a las necesidades del caso de estudio optimizando el tamaño de la batería.

Para idear el prototipo de ómnibus eléctrico, se realizó una exhaustiva investigación documental sobre experiencias análogas de otras universidades y ciudades. Además, se cuenta con móviles eléctricos e instalaciones de generación distribuida fotovoltaica de proyectos de investigación realizados previamente en la Universidad Nacional de Villa María, los cuales se utilizaron como base de experimentación para la obtención inicial de datos que pueden extrapolarse a móviles de mayor tamaño. Se investigaron las distintas posibilidades de conversión de ómnibus existentes a eléctricos.

Se optimizó el diseño de la batería del prototipo con el objetivo de reducir los costos iniciales de inversión y maximizar la eficiencia total del vehículo. Esta optimización requirió un estudio de las

características del trayecto combinado con un análisis de las características del vehículo propuesto y de las baterías disponibles en el mercado.

Las dimensiones analizadas son: distancia por recorrido, paradas, cantidad de recorridos diarios, características del prototipo, cantidad de pasajeros, tipo de batería, capacidad y peso de baterías, tecnología de frenado, autonomía, entre otras. Se evaluaron las dimensiones y se optó por la solución óptima para brindar un servicio sin inconvenientes (como podría ser que se agotase la batería o que debiera estar parado mucho tiempo recargando), del menor costo posible, eficiente y amigable con el ambiente.

Se estudió la conveniencia de aplicar paneles fotovoltaicos en el techo del móvil para aumentar la autonomía cuando el sol esté disponible y para que la energía que se utiliza provenga en parte de energías renovables. Se evaluaron precios y tecnologías de estaciones de recarga comerciales, considerando la posibilidad de fabricación nacional y/o local de las mismas.

Costo Ambiental de los vehículos

Para calcular las emisiones de GEI se utilizaron factores estandarizados y métodos de cálculo del IPCC.

Para obtener las emisiones directas causadas por el vehículo se multiplicó la cantidad de combustible utilizado en el trayecto por el factor de emisión de CO₂ correspondiente.

Parámetro	Valor
Valor calorífico neto del combustible diésel	43 MJ/kg
Factor de emisión de CO ₂ del combustible diésel	74,1 g CO ₂ / MJ
Densidad del combustible diésel	0,844 kg/l
Emisión por litro	2,69 kg/l

Tabla 1. Características del diesel

A partir de estos datos se realizó una tabla comparativa de las emisiones de cada vehículo estudiado. Se evaluó el impacto ambiental local, teniendo en cuenta las emisiones de NO_x y material particulado. Para calcular las emisiones locales se tuvo en cuenta la resolución 1464/2014 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, que clasifica y certifica los vehículos según sus emisiones. Además, se realizó una investigación sobre los contaminantes no incluidos en la legislación como lo son los compuestos orgánicos volátiles, la contaminación del suelo producida por el desgaste de los neumáticos y en algunos casos las pequeñas cantidades de amianto liberadas por los sistemas de frenado de algunos vehículos.

Evaluación del impacto del transporte propuesto en la matriz energética

Se evaluó el impacto de la propuesta en la matriz energética tanto en energía como en potencia. Para ello se reemplazó los buses convencionales por las alternativas estudiadas y se insertaron en la matriz energética a fines de compararlos con la matriz actual y entre sí.

3-ANALISIS

Diagnostico situación actual

El trayecto estudiado se encuentra en la Ciudad de Villa María, provincia de Córdoba. Comienza en la terminal de Ómnibus de la ciudad y conecta con el Campus de la Universidad Nacional de Villa María siendo una de las líneas más utilizadas en la ciudad. Para realizar este trabajo es fundamental tener en cuenta la obra de apertura de la prolongación del Bvard. España llevada a cabo por el Municipio de la Ciudad. La distancia recorrida en el trayecto, teniendo en cuenta esta prolongación, es de aproximadamente 5 km.

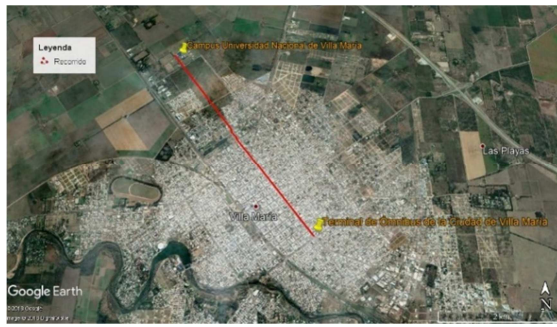


Figura 1. Trayecto propuesto.

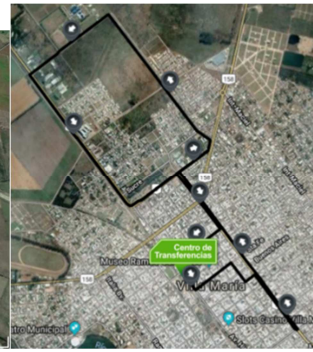


Figura 2. Trayecto líneas 102,104,106.

A partir de reportes otorgados por la empresa TRANSBUS SA se obtiene la siguiente información:
Vehículos Líneas 102, 104, 106: Agrale M. T. 12 LE

Chasis	Agrale M.T. 12 LE
Motor	Cummins ISF 3,8
Nivel de emisiones	Euro V
Año	2007 a 2012
Potencia Máxima	162 CV a 2200 rpm
Torque Máximo	600 Nm a 1700 rpm
Transmisión	Automática
Tanque de combustible diésel	170 litros
Largo Total	9,685 m
Ancho	2,445 m
Peso Bruto Total	12000 kg

Tabla 2. Características bus Agrale M.T. 12 LE



Figura 3. Bus de línea transbus.

A partir de tablas otorgadas por la empresa TRANSBUS se resume el siguiente cuadro.

Línea	Km Prod.	Km Enlace	Km Total	Tiemp hs:min	Pasajeros	VelocPr om (Km/h)
102	4767,34	990,22	5757,56	252:55	10019	18,85
104	4701,23	1169,96	5871,19	246:36	10903	19,004
106	4817,25	536,21	5353,46	251:03	10064	19,19

Tabla 3. Datos empresa transbus junio 2018

Hay que tener en cuenta que los tramos de enlace implican casi un 20% del recorrido útil promedio, esto se debe a la lejanía de los talleres donde se guardan los coches en el Parque Industrial de la ciudad, y conspira contra la sustentabilidad del esquema.

En una reunión llevada a cabo con el personal a cargo de la Empresa Municipal de Transporte Urbano de Pasajeros SEM, la cual contrata a la empresa TRANSBUS para el servicio de transporte público, se obtuvo que a partir del año 2019 la empresa no cuenta con ningún subsidio, y el valor del combustible es el valor de surtidor con un descuento para grandes clientes del 15%.

El consumo promedio de un bus diésel de 12 metros es de 2,5 km / litro variando de acuerdo al tipo de manejo de cada chofer (Grutter, 2014).

Mercado de Buses Eléctricos

Según datos publicados por la GEVO 2018, se puede observar que China concentra la mayoría de las ventas mundiales de autobuses eléctricos, que incluye buses a batería e híbridos plug in, que a pesar de un ligero descenso en las ventas en el año 2017 se estima que fueron ligeramente superiores a las 100 000 unidades, de las cuales el 85% fue de vehículos eléctricos puros.

A finales de 2017, la flota de autobuses eléctricos puros e híbridos en China alcanzó casi 370 000 unidades. Ventas acumuladas disponibles para otros países, sugieren que 2100 autobuses eléctricos adicionales están actualmente en circulación en Europa, Japón y los Estados Unidos.

La mayoría de los autobuses eléctricos vendidos hasta la fecha se han realizado por fabricantes chinos para el mercado interno. Aunque los dos fabricantes principales chinos (BYD y Yutong), también han sido activos en el mercado internacional de autobuses eléctricos. Ambas empresas producen autobuses urbanos eléctricos en una variedad de tamaños, y cada uno hace un modelo de autobús eléctrico interurbano. El más vendido fue el BYD de 12 metros urbano que tiene una capacidad de batería de alrededor de 330 kWh que le permite recorrer más de 250 km (BYD, 2018) y diferentes configuraciones están disponibles.

En Europa hay una gran variedad de fabricantes de autobuses eléctricos, como Volvo, Solaris y VDL. La diversidad de fabricantes de autobuses se traduce en una gran variedad de modelos disponibles en el mercado europeo, por ejemplo, algunas de ellas utilizando aluminio para la reducción del peso del vehículo, o reduciendo los tamaños del paquete de baterías. En los Estados Unidos, el protagonista es Proterra, fundado por un ex empleado de Tesla que se especializa exclusivamente en autobuses eléctricos. Proterra fabrica componentes del cuerpo del autobús utilizando fibra de carbono y puede entregar autobuses con hasta 440 kWh de capacidad de la batería, que equivale a 480 kilómetros de rango (GEVO, 2018).

En Latinoamérica BYD ya ha vendido varias flotas en Uruguay, Brasil, Ecuador, Colombia y Chile. Chile desde marzo del 2019 ha sumado 100 buses Yutong E12 a su flota de buses eléctricos, la cual ya contaba con 100 buses BYD K9 y uno Yutong E12 de prueba. Colocando a Chile entre los países con la flota más grande de buses eléctricos para transporte público en el mundo y la más grande de Latinoamérica. Además, la ciudad colombiana de Medellín incorporo 64 buses de la empresa BYD, dando los primeros pasos en Latinoamérica hacia una movilidad de emisiones cero.

En Argentina, la empresa BYD se encuentra en negociaciones para abrir una ensambladora, y la provincia de Mendoza adjudicó una licitación para importar 12 buses BYD y 6 estaciones de carga en conjunto con Zhongtong que aportaría 6 buses y 3 estaciones de carga. A principios de marzo de 2019, están haciendo recorridos experimentales dos colectivos en la línea Mendoza- Godoy Cruz. En mayo, luego una postergación de un año, Buenos Aires evaluará el funcionamiento de 8 colectivos eléctricos de cuatro fabricantes diferentes, 4 de ellos con baterías de carga rápida y 4 baterías de carga lenta. Las empresas son Zhongtong, Yutong, Higer, Xiamen King Long, todas procedentes de china, y los modelos que han presentado son todos de 12 m de largo.

Mercado	Diésel convencional	Eléctrico	Costo adicional eléctrico
China	\$60,000-\$90,000	\$280,000-\$350,000	420%
India	\$75,000-\$110,000	\$325,000-\$410,000	300%
Rusia	\$130,000-\$180,000	\$400,000-\$500,000	190%
América Latina	\$200,000-\$225,000	\$410,000-\$500,000	115%
Resto del Mundo	\$100,000-\$350,000	\$300,000-\$700,000	120%
Europa	\$250,000-\$350,000	\$575,000-\$680,000	110%
Norte América	\$300,000-\$400,000	\$595,000-\$690,000	85%
Promedio	\$200,000	\$480,000	140%

Tabla 4. Precios en USD de buses mercado internacional (frost, 2017)

En la tabla anterior, podemos observar los precios en distintos mercados de buses eléctricos y diésel, cabe destacar que por ejemplo un bus BYD chino puede valer más del doble fuera de su país de origen.

Modelo	E12	BYD K9G
Costo	USD 450 000	USD 500 000
Largo	12 metros	12.5 metros
Ancho	2.55 metros	2.55 metros
Alto	3.34 metros	3.44 metros
Peso	13000 kg	14130 kg
Consumo	1 kWh/km (Fuente: experiencia Chile)	1,2 kWh/km (Fuente: Experiencia Uruguay, Chile)
Tipo de cuerpo	Estructura monocasco de acero	Estructura monocasco de acero
Motor	Motor eléctrico PMSM Yutong YTM280-CV9-H único.	AC síncrono de imanes permanentes. Dos motores en rueda.
Potencia del motor	Pmax: 350 kW. El motor está refrigerado por agua con su propio radiador.	P max 150 kW x 2 (201 HP x 2).
Torque	2.400 Nm	550 Nm x 2
Frenado	Sistema de frenos de aire de doble circuito con frenos de disco delanteros y traseros. Sistema de frenado regenerativo. Suministro de aire del compresor de accionamiento eléctrico.	Freno de disco, freno neumático. Sistema de frenado regenerativo.
Paquete de Baterías	12 paquetes de baterías LFP (fosfato de hierro y litio), capacidad total de 324kWh. El sistema de gestión de la batería es exclusivo de Yutong y monitorea constantemente la temperatura, el voltaje, la corriente y la capacidad de las baterías. Cada paquete pesa 180kgs. El diseño modular de los paquetes de baterías significa que se pueden cambiar fácilmente en el futuro si hay una mejor tecnología de baterías disponible a mitad de la vida útil del vehículo.	Baterías LFP (fosfato de hierro y litio). Capacidad 324 kWh.
Rango	220 km	250 km
Cant. de pasajeros	92 (32 sentados y 60 parados)	81 (32 sentados y 49 parados)
Confort	Aire acondicionado, calefacción, puertos USB para pasajeros, área de silla de ruedas, entre otros.	Aire acondicionado, calefacción, silla de ruedas, entre otros.

Tabla 5. Características buses chinos disponibles en el mercado latinoamericano

Prototipo Bus Eléctrico

El bus eléctrico propuesto se basa en la conversión a eléctrico de un bus convencional similar a los que se encuentran circulando en el recorrido. El chasis Agrale MT 12 LE tiene 10 metros de largo y 2,45 metros de ancho, con un peso aproximado con carga completa de 12 toneladas. Cuenta con una caja de velocidades manual de 5 al frente y 1 en reversa que será utilizada para buscar relaciones que optimicen el rendimiento del motor eléctrico. La potencia del motor eléctrico necesaria estimada es de 60 kW continuos con picos de 100 KW, mínimos para un manejo austero. Se analizaron los siguientes motores disponibles en el mercado:

Motor	ALPHA ELECTRIC APEV60/8	Foshan Uni Technology 80kW PMSM MDEV	WEG Motor Industrial
Procedencia	China	China	Nacional
Costo	USD 3000 (FOB China)	5000 USD (FOB China)	5000 USD
Tipo	Inducción, asincrónico, velocidad variable	IMP, síncrono, velocidad variable	Inducción
Voltaje nominal (V)	312	540	380
Potencia nominal (kW)	60	80	75
Potencia máxima (kW)	100	123	-
Velocidad nominal (RPM)	1.600	1.550	1500
Velocidad máxima (RPM)	3.600	4500	4000
Par nominal (N. m)	360	500	477
Par máximo (N. m)	1.000	1.000	-
Sistema De refrigeración	Agua	Agua	Aire. Forzada
Peso (Kg)	140	128	500
Carcasa	De aluminio	De aluminio	Hierro

Tabla 6. Motores eléctricos

La capacidad de baterías de 60 kWh proporciona la autonomía necesaria teniendo en cuenta un consumo aproximado de 0.8 kWh/km y un sistema de cargas de oportunidad para completar todo un día de trabajo. Estas cargas se realizarían en paradas donde debido a que la cantidad de usuarios es mayor y el vehículo se encuentra detenido más tiempo, se puede aprovechar este lapso para realizar pequeñas cargas, estas paradas se dan en la UNVM y en la Terminal de ómnibus de la ciudad.

Para el sistema planteado de carga en oportunidad es necesario contar con cargadores eléctricos ubicados en los extremos del trayecto, los cuales coinciden con las paradas más largas. Además, en estos puntos se encuentran 2 instituciones públicas que cuentan con instalaciones eléctricas de mayor potencia, la terminal de ómnibus de Villa María y UNVM.

En Argentina, actualmente las empresas QEV Argentina en asociación con el grupo ABB (ASEA Brown Boveri), se encuentran en producción de cargadores rápidos para instalar en las estaciones de servicio YPF, que cuentan con una potencia de 50 kW, este cargador es muy grande para el caso de estudio, ya que en 5 minutos entregaría más energía de la que se gastó en el trayecto. Se estima que por cada trayecto recorrido el bus prototipo gastaría aproximadamente 4 kWh. Con un cargador de 32 kW que equivale a 0.53C, en 6 minutos podemos recargar 3,2 kWh que equivale al 80% de lo consumido en el recorrido, quedando un resto de 0.8 kWh que los absorbería la capacidad de baterías. El cargador propuesto se incluiría en el vehículo, esto implica un peso extra de 50 kg aproximadamente pero un ahorro en el costo del 50% con respecto a la opción de poner cargadores en los extremos del recorrido. Suponiendo que se realizan 22 vueltas diarias (el servicio que ofrece actualmente la empresa), si el servicio se inicia con la batería completamente cargada, por cada vuelta la batería gastaría 1.6 kWh dejando un déficit diario de 35,2 kWh que equivale a una profundidad de descarga cercana al 60%, que se completarían en una carga nocturna, por lo cual no se pondría en riesgo el servicio y las descargas no serían tan agresivas para la vida útil de la batería.

En cuanto a la química de las baterías de litio, se evalúan las siguientes opciones que se adaptan al sistema de estudio:

Las baterías NMC están compuestas por Litio Níquel Manganeso Cobalto (LiNiMnCoO_2) y es uno de los sistemas de iones de litio más exitosos debido a su combinación de níquel con manganeso. El níquel es conocido por su alta energía específica pero poca estabilidad; el manganeso tiene la ventaja de tener una baja resistencia interna pero una baja energía específica, al combinarlos se logra mejorar mutuamente las fortalezas de los metales. El voltaje nominal de una celda es de 3,7 V por lo que ofrece una mayor densidad energética que las demás opciones evaluadas. Las grandes cargas causan elevaciones de temperatura peligrosas para la batería (BatteryUniversity, 2019).

Las baterías LFP- Litio hierro fosfato (LiFePO_4) es más tolerante a las condiciones de cargas completas y se estresa menos al estar expuestas a altos voltajes por un tiempo prologado en comparación con otras composiciones de iones de litio. Posee un voltaje nominal de 3,2V por lo que la energía específica se encuentra por debajo de las baterías NMC. En cuanto a las resistencias térmica, las bajas temperaturas afectan el rendimiento, mientras que las altas reducen la vida útil de la misma. Es una batería muy segura incluso cuando se encuentra completamente cargada (BatteryUniversity, 2019).

En cuanto a las baterías LTO - Titanato de Litio (Li_2TiO_3) se conocen desde la década de 1980. El titanato de litio reemplaza al grafito en el ánodo de una batería típica de iones de litio y el material se forma en una estructura de espinela. El titanato de litio tiene un voltaje de celda nominal de 2,40 V. Esta puede cargarse rápidamente y ofrece una alta corriente de descarga de 10C, o 10 veces la capacidad nominal. Además, este tipo de baterías posee una cantidad de ciclos considerablemente mayor que las demás alternativas de litio. El titanato de litio es seguro, tiene excelentes características de descarga a baja temperatura y obtiene una capacidad del 80 por ciento a -30°C . La batería LTO tiene ventajas sobre el ion de litio mezclado con cobalto convencional con ánodo de grafito al lograr una propiedad de deformación cero, sin recubrimiento de litio cuando se carga rápidamente a baja temperatura. La estabilidad térmica a alta temperatura también es mejor que otros sistemas de iones de

litio; Sin embargo, la batería es cara. Con solo 80Wh / kg en el mejor de los casos, la densidad energética es baja comparado con las alternativas estudiadas (BatteryUniversity, 2019).

Tipo	LFP	LTO	NMC
Densidad Energética	120 Wh/kg	80 Wh/kg	220 Wh/kg
Corriente de carga	1 C	1C a 5C	0,7C a 1C
Ciclo de vida	2000+	7000	2000
Capacidad Total	60 kWh	60 kWh	60 kWh
Peso total	500 kg	750 kg	273 kg
Precio Total	34800 USD	60300 USD	25200 USD

Tabla7. Baterías sistema de carga oportunidad

En el caso de no utilizar el sistema de carga en oportunidad, se utilizaría un paquete de baterías que cubra la energía total de un día de trabajo. Al poner un paquete de baterías de mayor capacidad también se aumentará el peso del vehículo considerablemente por lo que el consumo se verá afectado produciendo un aumento estimado de 0.8 kWh/km a 1 kWh/km. El consumo de un día de trabajo para este sistema se estima en 220 kWh. Teniendo en cuenta una profundidad de descarga del 70% para no atentar con la vida útil de las baterías, se necesita un paquete de baterías con una capacidad de 315 kWh. Eventualmente, al realizar ciclados más largos como ocurre en este sistema, la vida útil de la batería podría verse afectada. En este caso se descartan las baterías LTO que son más ventajosas en cargas rápidas y que tienen un peso mayor debido a la densidad energética menor comparado con las alternativas de LFP y NMC.

Tipo	LFP	NMC
Densidad Energética	120 Wh/kg	220 Wh/kg
Corriente de carga	1 C	0,7C a 1C
Capacidad Total	315 kWh	315 kWh
Ciclo de vida	2000	2000
Peso total	2625 kg	1431,81 kg
Precio Total	182700 USD	132000 USD

Tabla8. Sistema de carga única.

En la tabla anterior podemos ver como varía considerablemente el peso y el costo del paquete de baterías razón por la cual en un principio se descartó esta posibilidad en la planificación del prototipo.

Por otra parte, se cuenta con aproximadamente 24 metros cuadrados de techo disponible donde se colocarán paneles solares fotovoltaicos flexibles para cargar las baterías. El tamaño aproximado de un panel flexible de 170W es de 1,15m de largo por 0,81 de ancho (SUNPOWER), el espacio disponible permite colocar 18 paneles de este tipo logrando una potencia de 3 kWp.



Figura 7. Esquema techo desde arriba



Figura 8. Ejemplo Bus con techo solar.

Chasis y carrocería	0 USD (Bus usado cedido por la empresa de transporte)
Controlador Sinovo	3000 USD
Controlador Siemens	5500 USD
Controlador FOSHAN	3500 USD (FOB China)
Cargador para VE WenzhouBluesky32 kW	4200 USD (FOB China)
18 Paneles Solares SunPower 170Wp	2790 USD (FOB China)
Regulador de carga	300 USD (FOB China)
Mano de obra	5000 USD
Materiales Extra Locales	5000 USD

Tabla9. Costos adicionales asociados estimados

Para la conversión de un bus Agrale mt 12 de caja manual a eléctrico se optaría por la opción de baterías de NMC que cuentan con 2000 ciclos al 80% DOD que a razón de 5 días a la semana

equivalen a 260 ciclos anuales, pero en el caso de estudio con una profundidad del 60% se obtendrían mayor cantidad de ciclos superando los 8 años de vida útil. Si se tiene en cuenta el aporte de los 3 kWp paneles solares que con una insolación promedio anual de 5 horas equivalentes entregarían 15 kWh al día lo que representa un valor cercano al 10% del consumo diario otorgando mayor autonomía y alargando la vida útil en ese porcentaje.

En cuanto a la selección de motores, se puede utilizar el motor asincrónico industrial WEG de origen nacional con el controlador Sinovo o Siemens que pueden obtenerse de proveedores locales pero este motor tiene un peso de 500 kg que conspira contra la eficiencia del vehículo. Si se opta por el motor Foshan el peso es de 128 kg con mejores características de potencia y torque por ser un motor sincrónico de imanes permanentes fabricado especialmente para vehículos eléctricos, pero se elevarían los costos asociados ya que los precios son FOB China.

Considerando lo nombrado anteriormente más un cargador de 32 kW y la infraestructura necesaria en los establecimientos, más mano de obra, materiales del mercado local y los costos asociados al flete y a impuestos se estima un costo total aproximado a USD 100.000 que es cinco veces menor al precio de un bus BYD en Argentina aproximado a USD 500.000.

Bus	UNVM	BYD	Diésel
Costo bus	100000 USD	500000 USD	-
Consumo	0,8 kWh	1,2 kWh	2,5 km/litro
Capacidad de las Baterías	60 kWh	324 kWh	-
Química de las Baterías	NMC	LFP	-
Peso del paquete de Baterías	273 kg	2700 kg	-
Distancia mensual recorrida	4400 km	4400 km	4400 km
Consumo Mensual	3520 kWh	5280 kWh	1760 litros
Energía Solar Generada Promedio Anual	3960 kWh	-	-
Vida Útil	Baterías NMC 8 años+	Baterías LFP 8 años+	10 años
Costo Gas Oil	-	-	0,65 USD/litro
Costo Energía Eléctrica (Unvm)	0,057 USD/kWh	0,057 USD/kWh	-
Ahorro Anual por Generación Solar	225,7 USD	-	-
Costo Total de Energía Anual	2182 USD	3611,5 USD	13278 USD

Tabla 10. Factibilidad económica

Para el costo del gas oil se utiliza el valor del surtidor que es \$ 43,56 pesos argentinos (21/8/19) con un descuento para grandes consumidores del 15%, esto con un precio del dólar de \$ 57,31 (25/8/19) equivale a 0,68 USD por litro de gas oil.

En cuanto al costo de la energía eléctrica, se toma el valor del kWh promedio de la boleta de EPEC de la Universidad Nacional de Villa María del mes de Julio del 2019 que fue de \$ 3,27 pesos argentinos y equivale a 0,057 USD.

En la tabla 18 podemos observar que el ahorro anual utilizando el prototipo propuesto en el trayecto sería aproximadamente de 11000 USD. Debido a la situación de depreciación de la moneda ocurrida los costos relativos quedaron desfasados resultando de una mayor dificultad para amortizar los productos importados. Además, existe una diferencia considerable en favor de los vehículos eléctricos en los gastos de mantenimiento y en el ahorro de lubricantes que no fueron incluidos en el estudio.

IMPACTO AMBIENTAL

En Argentina con el objetivo de reducir la contaminación en las ciudades, se adoptó, a partir de enero del 2016, la normativa europea conocida por Euro V que establece los valores máximos permitidos por los vehículos. El valor de NOx máximo permitido es de 3,6 gramos por kilómetro recorrido, de material particulado es de 0.036 gramos por kilómetro recorrido y de hidrocarburos sin quemar (HCT) de 0.828 gramos por kilómetro recorrido. En el caso de estudio los valores de emisión no fueron medidos, pero se estima que están en el límite de lo establecido por la ley ya que los vehículos tienen en algunos casos 10 años de antigüedad.

En la siguiente tabla, podemos observar la evolución de la normativa europea para transporte público. Datos en gramos por kilómetro recorrido.

Línea	Km mensuales	Litros	KG CO2 liberados	Kg NOx Max.	Gramos MP Max.
102	5757,56	2303	6195,07	20,7	207,2
104	5871,19	2348	6316,12	21,14	211,36
106	5353,46	2141	5759,29	19,27	192,7
Promedio	5660,74	2264,3	6090,95	20,38	203,79

Tabla 11. Emisiones directas mensuales por línea

En cuanto a las emisiones de un colectivo diésel en el trayecto propuesto, consideramos una distancia mensual de 4400 km en el cual el bus diésel con un consumo promedio de 2,5 km/litro consumiría 1760 litros de gas oil y una tasa de emisión del gas oil de 2,69 kg de CO2/litro emitiría a la atmosfera 4734,4 kg de CO2 mensuales.

Emisiones indirectas de buses eléctricos

Para realizar el cálculo de las emisiones de CO2 indirectas de los buses eléctricos partimos de la base de que la energía utilizada para la carga de las baterías proviene de la red eléctrica. De los informes anuales de la Secretaria de Energía de la Nación y de CAMMESA (Compañía administradora del mercado eléctrico mayorista sociedad anónima) se obtiene que la matriz energética nacional en el año 2017 estaba compuesta en un 65% por generación térmica a partir de combustibles fósiles (Fuel oil, gas natural, gas oil y carbón mineral). Se calcula que el rendimiento promedio de las centrales térmicas es del 44% y el factor de emisión de CO2 de la red nacional es de 0,48 kg de CO2 eq/ kWh generado. Se utiliza para el cálculo el Método Simple de la metodología ACM0002 aprobada por la junta Ejecutiva del Mecanismo para un Desarrollo Limpio que consiste en utilizar el promedio de las maquinas térmicas (CAMMESA, 2018).

A partir del sistema planeado de buses eléctricos para el trayecto estudiado, que cuenta con un servicio de lunes a viernes de 22 vueltas por día. Se puede establecer que se recorrerían mensualmente 4400 km sin contar los kilómetros de enlace. De la energía generada necesaria para cubrir esta distancia con los buses eléctricos el 65% proviene de fuentes térmicas en base a combustibles fósiles, por lo que el 35% restante no generaría emisiones.

Bus	BYD K9	Yutong	Bus Unvm
Consumo kWh/km	1,2	1	0,8
Km mensuales recorridos	4400	4400	4400
Consumo Mensual kWh	5280	4400	3520
Energía Térmica generada. kWh (65%)	3432	2860	2288
Emisión de CO2 kg/mes	1647,4	1372,8	1098,2

Tabla 12. Emisiones de CO2 de los buses eléctricos

Si comparamos los buses eléctricos con el diésel en el trayecto propuesto podemos observar como la peor de las opciones eléctricas emite aproximadamente un tercio de lo que emite el diésel y el prototipo propuesto reduce a menos de un cuarto las emisiones.

Bus	BYD K9	Yutong	Bus Unvm	Diésel
Emisión de CO2 kg/mes	1647,4	1372,8	1098,2	4734,4

Tabla 13. Comparación de emisiones de buses eléctricos con el bus diesel

IMPACTO EN LA RED ELECTRICA

El impacto en la red eléctrica del sistema propuesto se puede considerar desde el punto de vista de energía o de potencia. En cuanto a la potencia, con el cargador de 32 kW incluido en el vehículo, es necesario en los extremos del trayecto y lugar de almacenamiento un punto de suministro trifásico de 380V y 80A con protecciones termo magnéticas y disyuntor diferencial. Desde el punto de vista de la red se debe prever una acometida equivalente a un consumo de una industria pequeña o edificio de 7 departamentos. Con respecto a la calidad del servicio, los rectificadores de switching poseen control

de modo de corriente incorporado que implican un factor de potencia prácticamente unitario y filtros de línea que evitan interferencias.

En relación a la energía, si la línea 104 diésel adopta el trayecto propuesto gastaría mensualmente 1760 litros de gas oíl que equivalen a 17639 kWh, con el prototipo eléctrico propuesto el gasto mensual de energía eléctrica desde la red es de 3520 kWh, que con la eficiencia promedio en generación de la red (44%) darían 8000 kWh equivalentes a 798 litros de gas oíl sin considerar las pérdidas de transmisión ni el transporte del combustible hasta los vehículos. Desde el punto de vista energético global se ahorran 962 litros de gas oíl con sus correspondientes emisiones.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista ambiental, se concluye que la utilización de vehículos eléctricos para transporte público es muy favorable para la calidad de vida de la sociedad, ya que las emisiones de contaminantes locales son nulas, al mismo tiempo, las emisiones de CO₂ indirectas por generación de energía son menores que las producidas por un vehículo diésel equivalente. Otro de los beneficios ambientales es la reducción de la contaminación sonora, ya que los vehículos eléctricos no emiten ruidos en su funcionamiento. Puede darse un pequeño aumento de la contaminación por radiación electromagnética en las proximidades del cargador, pero el sistema deberá cumplir con los parámetros mínimos establecidos por la ley.

Desde el punto de vista técnico, considerando que en un bus eléctrico el elemento de recambio es el paquete de baterías y que el resto de las partes tienen una vida útil muy prolongada, se puede inferir que con el ahorro de 11000 USD anuales del prototipo propuesto con respecto al colectivo diésel, en menos de 3 años se puede amortizar el costo del paquete de baterías, lo cual habla en favor de la opción elegida. En cambio, con los buses eléctricos comerciales debido a la dimensión del paquete de baterías, el tiempo de amortización excede con mucho la vida útil de las mismas. Otra ventaja técnica, es que, en comparación con las alternativas del mercado, el prototipo tiene aproximadamente 2400 kg menos de peso de baterías, lo que se traduce en ahorro energético y mayor agilidad. Además, una característica positiva del modo de trabajo con pequeños ciclos de carga y descarga alrededor de un punto de equilibrio de $\frac{3}{4} C$ es que en ese intervalo se garantiza una mayor duración de esta tecnología de baterías.

Se puede observar una diferencia de 5 a 1 en el valor inicial a favor del prototipo propuesto en este estudio, por lo que el ahorro anual significa un 11% de la inversión. En cambio, en el caso de los buses comerciales debido a su elevado precio el ahorro anual significa aproximadamente 2% del costo inicial.

Considerando un consumo total diario del prototipo propuesto de 176 kWh, para obtener un balance neto de emisiones cero a partir de la generación de energía renovable, se deberá contar con un parque solar fotovoltaico de 35 kW que ocupa aproximadamente 250 metros cuadrados, los cuales estarían disponibles en los techos de la Universidad. Este sistema de generación distribuida inyecta la energía a la red eléctrica de la institución para el autoconsumo.

Si se realizara una inversión extra de aproximadamente 70000 USD en un parque solar fotovoltaico de 35 kWp se podría obtener un balance neto de cero energías y cero emisiones, ya que alcanzaría para cubrir el consumo diario del prototipo propuesto. Esta energía sería inyectada en las instituciones asociadas al proyecto para luego realizar el balance con la energía consumida por el bus eléctrico. Este balance depende del esquema de generación distribuida adoptado, en el caso de ser Net Metering el ahorro es directo, en cambio, en el caso de la provincia de Córdoba el sistema legal es Net Billing por lo que solo en el caso de que haya simultaneidad entre la generación y el consumo se pueden descontar los costos completos de la tarifa eléctrica en este esquema de autofinanciación, siendo este el caso más probable por la magnitud de los consumos de la UNVM. Esta institución cuenta con techos disponibles suficientes para la colocación de los paneles solares por lo que estos no competirían en el uso del espacio.

Por último, están los paneles solares incluidos en el vehículo, que pueden cubrir hasta un 20% de la energía en trayectos diurnos en las mejores condiciones de insolación y el frenado regenerativo que con ajuste liviano para evitar sobre corrientes en las baterías puede ahorrar hasta un 12% según mediciones propias de trabajos anteriores. También, se puede considerar la incorporación de supercapacitores que permitan un frenado regenerativo más agresivo con mayor ahorro.

Desde el punto de vista social, al utilizar el vehículo propuesto, se obtendrá un transporte económico e inclusivo, reduciendo los costos de operación al permitir abaratar el boleto en beneficio del usuario, y, al ser este tipo de transporte amigable con el medio ambiente, en tiempos de preocupación por los efectos del cambio climático, sería noblemente aceptado por la sociedad en su conjunto.

Además, la conversión de buses convencionales a eléctricos generaría puestos de trabajo locales, promovería el reciclado y la reutilización de materiales extendiendo el ciclo de vida de los chasis con el consecuente ahorro de energía necesaria para la producción de vehículos nuevos.

REFERENCIAS

- Battery University. 08/2019. BU-205: Types of Lithium-ion. <https://batteryuniversity.com/learn/article/typesoflithiumion>. Consulta Agosto 2019.
- International Energy Agency. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2017. 2018
- Secretaría de Energía de la Nación. Balance Energético Nacional año 2018, revisión 2. 2019.
- Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes, Informe flota circulante en Argentina 2016. 2017.
- Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima. Balance Energético Anual 2018. 07/2019.
- International Energy Agency, Global EV Outlook 2018, towards cross-modal electrification. Mayo 2018.
- Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 08/2013.
- FURMANIAK, Thomas y SCHUMANN, John. Light rail & streetcar systems how they differ; how they overlap. American Public Transportation Association APTA. Washington D.C.: LTK Engineering Services. 20 p. 2010.
- Gonzalo Márquez. Evaluación de los primeros vehículos eléctricos funcionando en el Sistema de Transporte Metropolitano
- GrutterJurg, Rendimiento real de buses híbridos y eléctricos, diciembre 2014. REPIC Platform c/o NET Nowak Energy & Technology AG Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen.
- López Gianni, Galarza Sebastián, “Movilidad Eléctrica, oportunidades para Latinoamérica “, PNUMA, ONU, 2016.

ELECTRIC BUS FACTIBILITY STUDY FOR THE UNIVERSITY OF VILLA MARIA

Summary. The project to be carried out is based on previous studies and developments on electric mobiles that yield satisfactory results in terms of energy consumption, air pollution and acoustics, and costs. Therefore, it is intended to investigate the feasibility of implementing public transport based on these mobiles to cover the route Campus UNVM - Bus Terminal of Villa María. For this they are considered different road alternatives, purchase of electric rolling that exist the market, layout of networks for trolleybuses, the development of prototype electric buses, as well as the adaptation of a combustion bus. Once the feasibility study has been carried out, a preliminary draft will be carried out to present to the agencies involved: UNVM, Municipality of Villa María and possible manufacturers or developers interested.

Keywords- electric bus, transport, sustainable, lithium batteries.