

Estrategia de Optimización Para la Migración Parcial de una Flota de Transporte Público de Buses Diésel a Buses Eléctricos

Luis Ramírez Vera¹, Sebastián Solache¹, Carlos Sauer²

¹Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Asunción

²Administración Nacional de Electricidad

Paraguay

1.1 Resumen

La producción energética del Paraguay está compuesta mayoritariamente por energía hidroeléctrica (40%). Sin embargo, esto no se ve reflejado en el consumo que está fuertemente influenciado por derivados del petróleo (39%) siendo el sector de transporte uno de los principales contribuyentes. Además, los derivados del petróleo son importados en su totalidad y su costo es altamente sensible a un mercado internacional con sus vaivenes geopolíticos.

A nivel global el fomento del transporte eléctrico es un tema central como una oportunidad de disminuir la huella de carbono y buscar un desarrollo sustentable para los estados. Hoy en día prácticamente toda la flota de transporte público del país opera a base de buses diésel. Atendiendo a que Paraguay cuenta con la tarifa de electricidad más baja de la región, se plantea la oportunidad de capitalizar los recursos energéticos paraguayos mediante la posibilidad de migrar de buses diésel a eléctricos. Esto conduce a desarrollar un estudio donde se evalúe el beneficio económico para una empresa de transporte público paraguaya, de utilizar buses eléctricos en comparación a los buses diésel atendiendo a la naturaleza de sus recorridos y a los altos costos de inversión inicial para la infraestructura de recarga y la adquisición de los buses eléctricos. La migración total de una flota diésel a una flota eléctrica, aunque interesante desde el punto de vista ambiental y de soberanía, puede ser inviable económicamente, por lo cual se estudian también la posibilidad de migraciones parciales y sus efectos.

El presente trabajo propone una estrategia de optimización para la migración parcial de una flota de una empresa de transporte público de buses diésel a buses eléctricos. El dimensionamiento de la flota eléctrica vs la flota diesel se sustenta en un algoritmo de ruteo para minimizar la flota global de buses requerida, combinada con un algoritmo de asignación para optimizar el dimensionamiento de la infraestructura eléctrica y la operación de recarga de los buses eléctricos.

Esta metodología se aplica a los datos proveídos por una empresa local de transporte público. Esto permite proponer a la empresa una estrategia de operación balanceada de la flota eléctrica y la flota diésel para atender los requerimientos de las rutas, la limitada disponibilidad de cargadores y los costos de recarga. Mediante análisis de sensibilidad, se demuestra que la solución obtenida es robusta ante los principales componentes variables, como lo serían el costo del combustible y electricidad. Un análisis financiero comparativo permite evaluar la factibilidad económica de esta estrategia, así como delinear propuestas de políticas públicas que puedan incentivar la inversión privada para acelerar la incorporación de buses eléctricos en las flotas de transporte público.

1.2 Palabras clave: Buses eléctricos, migración, transporte, optimización, costos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1.3 Cuerpo del trabajo

1. INTRODUCCIÓN

La producción energética del Paraguay está compuesta mayoritariamente por energía hidroeléctrica (40%), sin embargo, esto no se ve reflejado en el consumo, la cual está liderada en gran parte por derivados del petróleo (39%) siendo el sector de transporte uno de los principales contribuyentes. [1] La gran diferencia entre oferta y demanda sitúa al Paraguay con la tarifa eléctrica más baja de la región. [2]

Pudiendo capitalizar esta oportunidad, se observó que el 99% de la flota del país opera con buses diésel, de toda la flota nacional, solamente dos buses son eléctricos dejando una oportunidad para explorar la viabilidad de los buses eléctricos bastante amplia.

El objetivo general de este trabajo es determinar la factibilidad de la migración de una flota de buses diésel a buses eléctricos de una empresa de transporte paraguayo. Para el efecto se contrastan los costos tanto de inversión como operación y se analiza la viabilidad logística atendiendo a las limitaciones de los buses eléctricos, como la autonomía y los procesos de recarga. El desafío consiste en proponer la relación óptima entre buses a combustión interna y eléctricos de la flota a la que debe operar la empresa en el largo plazo, minimizando los costos sin sacrificar en lo posible la flexibilidad operativa de la flota. En este sentido, se propone un cronograma de cargas para los buses eléctricos que optimice la cantidad de cargadores necesarios, así como el costo del consumo eléctrico generado por los mismos.

2. MARCO TEÓRICO

Un bus eléctrico es un bus alimentado por energía eléctrica. Para el efecto los buses pueden almacenar la energía a bordo, o pueden ser alimentados de forma continua por una fuente externa.

El bus eléctrico cuyos datos se consideran para ilustrar los ejemplos en este trabajo es de la marca Zhongthong. Entre sus características principales se puede citar: la Batería de 324 kWh y un motor de 402 HP. La tensión de carga y frecuencia es de 440V – 60 Hz. En cuanto a la autonomía, la misma es de 300 km mientras que el tiempo de carga bajo una potencia de 150 KW es de 2 hs 30 min [3].

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El trabajo se divide en 7 subcapítulos principales:

En primer lugar, se realiza una recopilación y estructuración de costos asociados al bus diésel y bus eléctrico, ambos de capacidades iguales en cuanto a pasajeros, teniendo esta información se pueden evaluar los distintos escenarios genéricos se pretende calcular el punto de equilibrio para el cual los costos del bus eléctrico son iguales a los del bus diésel.

En una siguiente instancia, se consideran los itinerarios que fueron asignados a la empresa y se optimiza la cantidad de buses necesaria para cubrir dichas rutas, independientemente de si se trate de buses diésel o eléctricos. Así se obtienen las rutas que deben ser cubiertas por cada bus para luego aplicar un criterio de selección de cuáles rutas pueden ser cubiertas con un bus eléctrico debido a la limitación de autonomía. Esto permite dimensionar la flota eléctrica tentativa con el resultado del algoritmo de ruteo previamente realizado.

Una vez dimensionada la flota eléctrica, es importante dimensionar la infraestructura de recarga eléctrica. Para ello, se desarrolla un algoritmo de optimización de la cantidad de cargadores necesaria para

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

suministrar de energía a todos los buses de la flota eléctrica según las rutas asignadas, su extensión, los tiempos ociosos y los costos tarifarios de potencia y energía del Pliego Tarifario de la ANDE.

Finalmente, se realiza un flujo de caja comparativo contrastando el escenario entre la flota parcial eléctrica-diesel y el escenario de flota completamente diésel. Para garantizar la robustez de los resultados, se realizan análisis de sensibilidad antes las variables con mayor incertidumbre a lo largo del proyecto.

3.1 Costos asociados a los buses

Para los flujos de caja se tienen en cuenta solamente los costos. Es decir, se analizan sólo los costos de inversión, operación, mantenimiento, gastos por impuestos y registros entre otros. Por ejemplo, no se introducen a los flujos de caja las entradas como ganancias por pasaje u otros conceptos. La tasa de descuento adoptada es del 7% (dolarizada) con un horizonte de 20 años ya que para los buses eléctricos la vida útil estimada es de 20 años, con un cambio de batería a los 10 años, mientras que para los buses diésel se prevé un cambio total de la flota a los 10 años. Se parte de la compra de una cantidad igual de buses nuevos, siendo en el primer escenario todos los buses de tipo diésel y en el otro escenario todos eléctricos.

3.1.1 Inversión inicial

Los modelos que se consideran son el BUS ZHONG TONG modelo LCK6 120EVG, de propulsión 100% eléctrica; y el BUS ZHONG TONG modelo LCK6125 G, con motor trasero a combustión interna (diésel). Ambos poseen la misma capacidad de pasajeros (40 personas sentadas). El costo de inversión en un bus eléctrico es de 325.000 usd, por otro lado, el costo de inversión en un bus diésel es de 135.000 usd. [3]

3.1.2 Combustible

Las empresas de transporte en Paraguay tienen un acuerdo de precios preferenciales. Para este trabajo se adoptó 4.530 Gs por litro de diésel, dato provisto por la empresa. En cuanto a consumo, se utilizó el histórico de la flota actual, de aproximadamente 50 litros cada 100km. Dentro del flujo de caja para el costo de combustible se tendrá la proyección del valor inicial con una tasa de crecimiento igual a la pronosticada por la Agencia Internacional de Energía para el precio del barril de petróleo. [4]

3.1.3 Energía eléctrica

La energía eléctrica en Paraguay es comercializada y distribuida por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE). Las tarifas de la ANDE se rigen por el “Pliego de Tarifas Nro. 21”. Para este trabajo se opta por la tarifa 732, denominada “Tarifa binómica diferencial en media tensión - línea”, debido a que esta presenta un precio diferencial en los horarios fuera de punta de carga, tanto en el costo de la energía consumida como de la contratación de potencia reservada. [5] La programación de cargas dentro del trabajo está restringida a los horarios fuera de punta de carga, lo cual permite reducir significativamente los costos.

3.1.4 Baterías

El cálculo base se hará teniendo en cuenta que un autobús eléctrico tiene 20 años de vida útil pero teniendo en cuenta un cambio de baterías a los 10 años debido a que según las especificaciones técnicas, estas tienen una vida útil de aproximadamente 4.000 ciclos de carga, y, asumiendo que consumimos un ciclo por día, en 10 años totalizan 3650 ciclos. [3]

Para maximizar la vida útil de las baterías de litio, es importante resaltar que el nivel de las mismas no debe bajar idealmente del 20% [3], lo que implica que si el 100% de la batería rinde por 300 km, en pos de alargar su vida útil, el recorrido máximo que se tendrá en cuenta para cada bus será de 250 km. El costo de la batería representa actualmente el 46% del costo del vehículo, 150.000 usd.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

3.1.5 Mantenimiento

De acuerdo con los cálculos realizados por el Jefe de Operaciones de la empresa de Magno S.A., con base en los manuales de la empresa Zhong Thong y proyectando la necesidad de mantenimientos a 100.000 km, se concluye que el BEB (Bus eléctrico a baterías) posee un mantenimiento más simple y 86% más económico que el BCI (Bus a combustión interna), debido principalmente a que posee una menor cantidad de piezas móviles

Los costos en función a los km recorridos son:

- BEB: 35 Gs/km. - BCI: 255 Gs/km.

3.1.5 Cargadores e infraestructura de carga

El costo de los cargadores es de 45.000 usd, mientras que el costo de la infraestructura de carga dimensionada para 5 cargadores se estima en un monto de 244.288.484 Gs.

3.1.6 Otros Costos Asociados

Dentro de otros costos asociados se pueden citar: registro del vehículo, seguros, impuestos.

3.2 Punto de Equilibrio

En este capítulo el objetivo es poder determinar a partir de qué punto un bus eléctrico es económicamente favorable en comparación con un bus diésel considerando un caso genérico. Para realizar la comparativa entre ambos, se establece la cantidad mínima de km que debe de recorrer un bus eléctrico para que sus costos al final de 20 años sean igual al del bus diésel. Mientras más km sean recorridos el ahorro operativo será mayor hasta el punto donde sopesa la diferencia en inversión entre ambos.

Se analizan los escenarios de 1 bus suministrado por 1 cargador, hasta 8 buses administrados por 1 cargador, que sería el caso extremo teniendo en cuenta la cantidad de horas por día. A mayor cantidad de buses se diluyen los costos relacionados al cargador y la potencia reservada. Los resultados se detallan en la Figura 1:

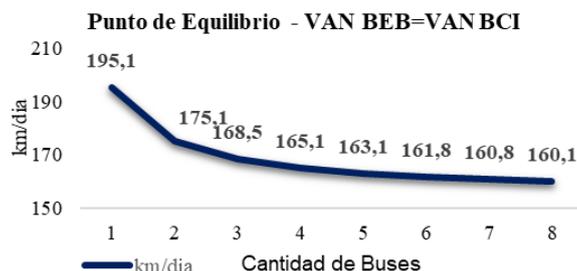


Figura 1: Punto de equilibrio

Observamos que la disminución de km mínimos es significativa hasta aproximadamente 4 buses, donde ya la cantidad diferencial de km que disminuye al optimizar las cargas incluyendo un bus más ya es de solo 2 km.

3.3 Optimización de rutas

Para contextualizar se presentan primeramente las siguientes definiciones:

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

- Itinerario: segmento de ruta que debe ser circulado.
- Recorrido: itinerario que debe ser circulado en un horario específico, indicado por la hora de salida del bus. Cada itinerario tiene varios recorridos por día, donde los de mayor demanda, tienen mayor frecuencia.
- Ruta: suma de recorridos que realiza un mismo bus en un día, por lo general un bus tiene 3 a 4 recorridos en un día y estos pueden corresponder a distintos itinerarios.

Partiendo de la premisa que en el sistema de transporte público del área metropolitana de Paraguay los recorridos son asignados de forma preestablecida para cada una de las empresas, en esta etapa se busca poder diseñar las rutas óptimas para cada bus hallando la cantidad mínima de ellos que permita cubrir todos los recorridos asignados, independientemente estos sean eléctricos o no.

Para encontrar la cantidad mínima de buses solo debe analizarse el horario donde más recorridos están siendo realizados de forma simultánea. Además, para el trabajo se necesita también como resultado saber qué bus asumirá qué recorrido, con ello se podrá dimensionar la cantidad de kilómetros que recorrerá cada bus y en qué horarios del día los mismos podrían estar disponibles para ser cargados en el caso que se opte por que los mismos sean eléctricos.

Se diseñó un algoritmo de ruteo, basado en programación lineal, el cual tiene como entrada las siguientes informaciones sobre los recorridos: cantidad, hora de salida, longitud en km y el tiempo estimado de cada recorrido según histórico de la empresa. Este tiene por objetivo es minimizar la cantidad de buses, teniendo en cuenta las siguientes restricciones:

- Un mismo bus no puede asumir dos recorridos que se superponen en un mismo horario.
- Todos los recorridos deben ser asumidos por un único bus.

Con esta información se obtuvo: cantidad mínima de buses, qué recorrido es asumido por qué bus, en qué horario cada bus está ocupado en qué recorrido y km totales diarios recorridos por cada bus. Dentro de estos resultados se observa que la cantidad mínima de buses es de 92.

3.4 Definición de la flota eléctrica y diésel

Considerando el tiempo promedio de los buses en el patio y el hecho de que a partir de 4 cargadores la relevancia en la variación km/día para el recorrido mínimo no es mucha se toma como punto de partida que un cargador puede abastecer a 4 buses, es decir que el requisito mínimo será de 165 km/día. En cuanto a la cantidad máxima de km, este será de 250 km por una limitante de la capacidad de la batería.

Teniendo en cuenta la cantidad mínima y máxima de km, de los 92 buses que eran requeridos para cumplir con todos los itinerarios asignados a la empresa, 45 de ellos deberían ser eléctricos por el beneficio económico que podrían aportar, es decir el 48% de la flota.

3.5 Cálculo de cargadores y de horario de carga

Una vez definida la cantidad de buses que serán eléctricos, se procedió al análisis del esquema de carga de los buses. Para ello se diseñó un algoritmo que tiene como entrada: el tiempo necesario de carga igual 2 hs 30 min y la matriz de horario de disponibilidad de carga de los buses en el patio.

El objetivo es minimizar la cantidad de cargadores necesarios, contemplando las siguientes restricciones:

- La cantidad de buses cargándose en simultáneo en un horario dado tiene que ser menor o igual a la cantidad de cargadores.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- La matriz de carga debe adaptarse a la de disponibilidad, es decir, un bus solamente puede cargarse si el mismo está estacionado en el patio.
- Debe cumplirse el tiempo requerido para una carga completa.

Es importante destacar que dentro de la disponibilidad de carga de los buses se eliminan las alternativas de 18:00 a 22:00 hs ya que este es considerado el horario de punta de la ANDE, bajo el cual no se prevén cargas a modo de reducir los costos. El algoritmo da como resultado:

- La cantidad mínima de cargadores para completar el esquema diario de cargas de todos los buses es de 8 para los 45 buses eléctricos previstos, promediando 5,6 buses por cargado. Se valida la cantidad de km mínimos que se había supuesto al inicio del ejercicio
- Qué bus se cargará en qué hora.

En la Figura 2 se puede ver un resumen de la cantidad de cargadores siendo utilizados por hora como resumen del algoritmo:

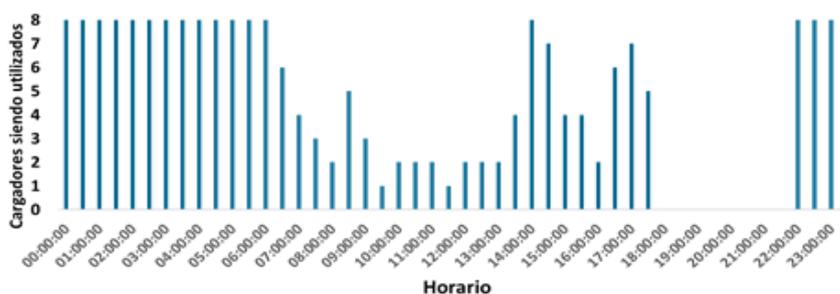


Figura 2: Utilización de cargadores

3.6 Flujo de caja de la flota resultante

Para el análisis de factibilidad económico final se tendrá en cuenta sólo la cantidad de buses que pueden formar parte de la flota eléctrica, es decir, se contrastará la alternativa de tener 45 buses eléctricos contra la posibilidad de que estos sean 45 buses diésel. Para el caso base de este análisis se optará por la financiación de los buses con la que la compañía cuenta hoy en día, con pago del 20% al inicio y el 80% a 5 años con una tasa de interés del 15%.

Bajo este caso se obtiene:

- VAN flota diésel: -22.622.159 usd.
- VAN flota eléctrica: -20.142.519 usd

Con esto se puede constatar que efectivamente bajo este esquema, con esta flota de buses, se obtiene un ahorro al optar por una flota eléctrica. Con un CAUE de 1.131.108 usd contra 1.007.126 usd el ahorro es del 12%. Observando el flujo de caja acumulado año a año se obtiene la Figura 3:

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

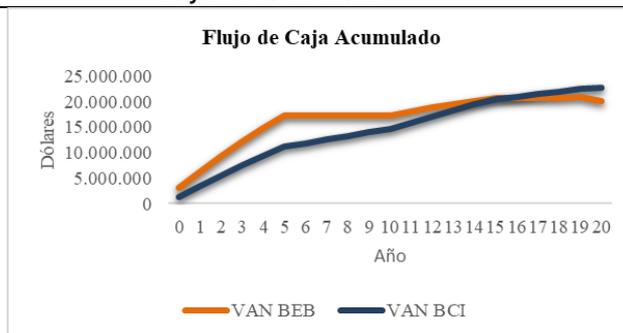


Figura 3: Flujo de caja acumulado sin préstamo

Si bien el resultado final es positivo para los buses eléctricos, estos requieren de una inversión inicial más grande que recién logra igualarse al año 15, lo que implica que el nivel de liquidez requerido para optar por esta alternativa es mayor. Por este motivo, se plantea una posible alternativa a través de una financiación que pueda eliminar esa barrera de entrada. Con un préstamo francés con una tasa del 7,5% anual a 10 años se observa un claro impacto en el siguiente flujo de caja de la Figura 4.

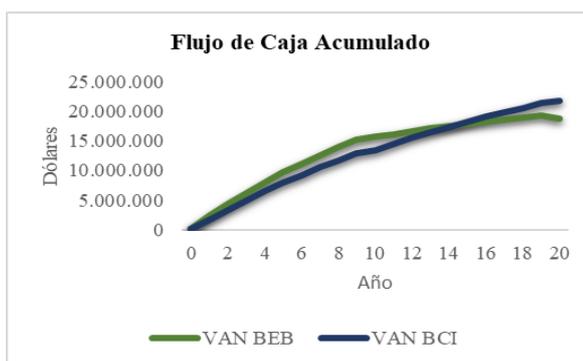


Figura 4: Flujo de caja acumulado con préstamo

La diferencia en el flujo acumulado se reduce drásticamente año a año, lo que permite que empresas que no tienen el capital inicial necesario para solventar una inversión inicial de buses eléctricos pueda hacerlo sin sentir una gran diferencia contra la alternativa de buses diésel.

3.7 Análisis de sensibilidad

3.7.1 Análisis de sensibilidad ante la variación en el precio del combustible.

Para este trabajo es importante determinar el punto de inflexión en el crecimiento del precio del combustible para el cual la diferencia del VAN de los buses eléctricos y diésel es 0, y en consecuencia, el punto en el que el proyecto de buses eléctricos deja de ser más rentable. Dentro de este análisis se asumió una tasa de crecimiento anual constante para el combustible para determinar el mínimo % de crecimiento anual bajo el cual aún es rentable la alternativa de buses eléctricos. En la Figura 5 se puede observar el VAN diferencial que traería una variación en la tasa de crecimiento anual del combustible:

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

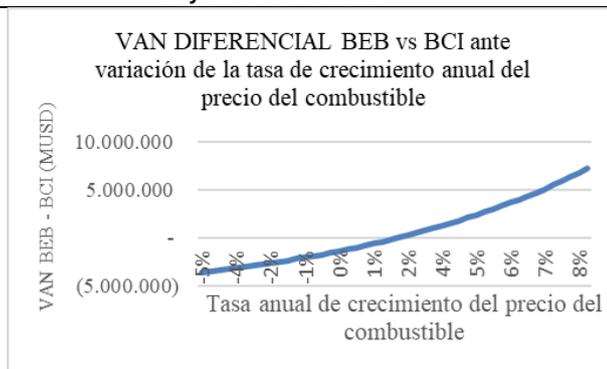


Figura 5: Análisis de sensibilidad ante el costo del combustible

Originalmente según las fuentes se proyecta una tasa de crecimiento anual en promedio del 5% para el costo del combustible. Al realizar el análisis de sensibilidad, se obtiene que la tasa mínima de crecimiento es del 2,17%.

3.7.2 Análisis de sensibilidad ante la variación del precio de la electricidad

Si bien se observa que el valor total tanto potencia reservada como la de consumo tiene un historial bastante estable según las tarifas de la ANDE, es importante entender cuál es el crecimiento máximo de costos en estos conceptos admisibles para que el proyecto siga siendo rentable. En el caso base, se tenía un total de 115.014 USD mensuales en concepto de energía. El monto para el cual la diferencia del VAN de ambas alternativas es 0 es de 385.273 USD mensuales, es decir, un crecimiento de 235%. Observando cómo varía este valor al analizar distintos escenarios para el crecimiento del precio de la electricidad se obtiene la Figura 6:

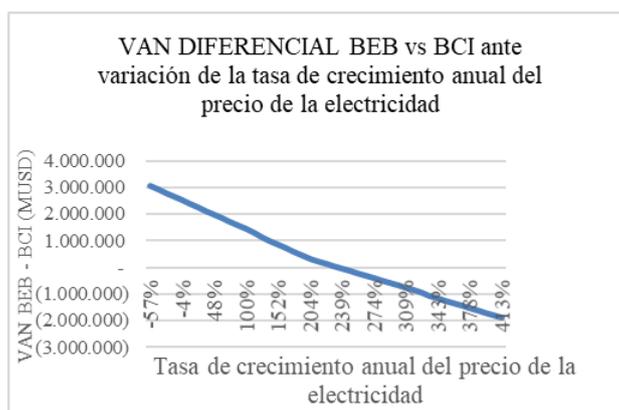


Figura 6: Análisis de sensibilidad ante el costo de la electricidad

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se buscó poder dar un primer acercamiento a un plan genérico, que pueda ser aplicable a todas las empresas de transporte público paraguayas, donde a partir de sus datos particulares, con algoritmos, se pueda calcular de forma rápida, eficiente y certera cuál es la mejor alternativa para la implementación de buses eléctricos, la minimización de costos como rol principal.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Hablando de los costos, Paraguay tiene una gran ventaja frente a demás países de la región e inclusive del mundo gracias al bajo costo de la electricidad. Esto debe ser capitalizado por las empresas, más aún, teniendo en cuenta que nuestro país depende netamente de las importaciones para su provisión de combustible, el cual siempre tiene impactos negativos con una alta volatilidad en su estructura de costos que deriva en incrementos del pasaje perjudicando a los clientes.

Yendo al caso específico de la empresa en cuestión pudimos observar que dentro de la estructura de costos de los buses eléctricos la inversión es el más significativo representando aproximadamente el 95% del costo total del proyecto, por el otro lado, en el caso de los buses diésel este valor asciende a apenas el 40% por lo que el beneficio del bus eléctrico se obtiene en la medida que mayor kilometraje se alcance con el mismo. Sin embargo, entendimos que por una limitación de la batería, este puede recorrer como máximo 250 km por día para poder maximizar la vida útil de la batería, mientras que, el kilometraje mínimo requerido para que sea viable económicamente los buses eléctricos debe rondar los 160 km por día. Quedando este como el rango que permitió hallar la cantidad de buses que debieran ser eléctricos para la flota en cuestión.

Hallando el cronograma de cargas óptimo, se observó como para el esquema bajo el que opera esta empresa un cargador puede rendir para más de 5 buses lo que permitió un mejor aprovechamiento del mismo para diluir los costos asociados a este entre estos buses para favorecer la rentabilidad de los buses eléctricos, que finalmente trajo un ahorro de 2,5 millones de usd para la flota de 45 buses. Mediante los análisis de sensibilidad, se demostró que es un proyecto bastante sólido ya que, en sus principales componentes variables, como lo serían el costo del combustible y electricidad se deberían de dar escenarios bastante pesimistas para que el costo total de los buses eléctricos sea superior al de los buses diésel.

Por último, como se observó, la principal barrera con la que podrían toparse los empresarios que quieran apostar por buses eléctricos es el alto grado de inversión inicial que se requiere por el costo de los buses. En ese sentido, es importante poder desarrollar políticas que permitan a ellos tener acceso a préstamos con tasas de interés razonables, en plazos accesibles para que el nivel de liquidez que se requiera en los primeros años del proyecto no sea un factor excluyente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Matriz energética em Paraguay. Vice Ministério de Minas y Energia. 10/10/21. https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php?option=com_content&view=article&id=1628&Itemid Pág. 1.
- [2] Comision de Integración Energética Regional. CIER, 2020. <http://ciertarifas.org/> Pág. 15.
- [3] Catálogo Tecnico Zhongthong Sunny. Zhongthong. 10/10/21 <http://auto-che.com/v/lck/lck6103g-2-112-zhongtong.html> Pág. 1.
- [4] Global Electric Vehicle Outlook. IEA, 2019. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>. Páginas 1–5.
- [5] Pliego Tarifario. ANDE, 2021. <https://www.ande.gov.py/docs/tarifas/PLIEGO21.pdf>. Páginas 16-33.