

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

Plan piloto de incorporación de buses eléctricos a la flota de buses del sistema de transporte del Área Metropolitana de Asunción

Sergio Acosta, Arnaldo Ozorio, Enrique Buzarquis, Félix Fernández, Diana Valdez

Facultad Politécnica - Universidad Nacional de Asunción

Paraguay

Resumen

El Paraguay ocupa uno de los primeros lugares a nivel mundial de producción per cápita de hidroelectricidad, principalmente por lo generado por las dos grandes represas binacionales Itaipu y Yacyretá, que son renovables y limpias. Sin embargo, uno de los mayores consumos energéticos es de combustibles fósiles, siendo que la energía hidroeléctrica excedente es exportada a los países vecinos. En este contexto, el sistema de transporte público es uno de los principales consumidores de combustible fósiles y de emisión de gases contaminantes. Por lo tanto, el país debe dedicar una gran parte de los recursos financieros para importar la totalidad del combustible derivado de petróleo utilizados en dicho sector, dado que no existe explotación nacional del crudo y esta a su vez, depende del precio del mercado internacional. Debido a que cada día estamos sujetos a implementar cambios que reduzcan las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y de esta forma enfrentar al Cambio Climático, en este trabajo se realiza un análisis energético, financiero y ambiental referente a la renovación de la flota de buses convencionales, en busca de la transición hacia los buses eléctricos. Para el análisis se han tenido en cuenta cinco itinerarios reales del sistema de transporte del área metropolitana que da acceso al centro de Asunción. Con los datos obtenidos se realizaron cálculos considerando varios escenarios, obteniendo como principal resultado positivo el escenario tendencial eléctrico, que se caracteriza por renovar el 20% de la flota de buses. Además, se destaca que el escenario alternativo 2, que se caracteriza por la renovación del 100% de la flota de buses, únicamente resulta factible con un aporte financiero por parte del estado. Dicho escenario también requiere del incremento de los recorridos por día del sistema de transporte, debido al alto costo de adquisición de los buses eléctricos. Con la utilización del software LEAP se realizaron los cálculos energéticos y medioambientales. En lo que respecta a las emisiones de GEI, se ha observado una clara ventaja con la renovación de buses convencionales por buses eléctricos, con una disminución a 5,9 toneladas métricas de emisiones de CO₂ en el área metropolitana, logrando así una reducción del 20% de emisiones contemplado en el Plan Nacional de Desarrollo 2030.

Palabras clave

Movilidad Eléctrica, Hidroenergía, Combustibles fósiles, Cambio Climático, Buses eléctricos, Plan Nacional de Desarrollo 2030.

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

1 *Objetivo General*

Proponer un plan piloto de incorporación de buses eléctricos en la flota del sistema de transporte del Área Metropolitana de Asunción (AMA), con el fin de brindar un modelo para futuros estudios de movilidad eléctrica para el Paraguay.

1.1 *Objetivos Específicos*

- Estudiar la metodología de planificación que aplica actualmente el Viceministerio de Transporte.
- Elaborar un estudio de viabilidad socio-económica de la incorporación de buses eléctricos a corto, medio y largo plazo en la flota de transporte público del AMA.
- Elaborar un estudio del impacto ambiental y potencial de reducción de gases de efecto invernadero de las alternativas propuestas.
- Analizar el impacto energético con la inserción de buses eléctricos en la estructura del sistema del transporte público utilizando el software LEAP©.

2 *Metodología*

Se desarrolla un modelo energético del sistema de transporte del área metropolitana de Asunción, el análisis de la situación actual del sistema de transporte público ha sido el primer paso para la realización de este estudio. Para ello se han recopilado datos del Viceministerio de Transporte y de las empresas Magno S.A. (Línea 12) y Mcal. López (Línea 38). El software que se utiliza para la simulación es *Low Emissions Analysis Platform* (LEAP©). El mismo es una herramienta útil para modelar escenarios energéticos y ambientales.



Figura 1. Logo del software LEAP.

2.1 *Hipótesis consideradas*

Se tuvo en cuenta los objetivos de la estrategia “Valorización del Capital Ambiental” del Plan Nacional de Desarrollo 2030 (PND), que es la de aumentar en “60% el consumo de energías renovables” y “Reducir en 20% el consumo de combustible fósil”, esto se aplicó al análisis con la introducción de buses eléctricos a la flota del AMA, creando escenarios de corto, mediano y largo plazo [1].

2.2 *Análisis del sistema de transporte del Área Metropolitana*

Para el presente trabajo se usaron las facilidades de análisis de transporte con el software LEAP©, de manera a construir una serie de escenarios que evalúen las diferentes políticas aplicables con la introducción de buses eléctricos a la flota del AMA [2]. Primeramente, se construyó un inventario en el año base de consumo de combustible y emisiones de gases de los buses a combustión. Luego, se crearon dos escenarios que permitieron la proyección de consumo y de las emisiones de gases hacia el futuro, asumiendo que habrá políticas que respalden la reducción del uso de hidrocarburos, para luego comparar los resultados de los escenarios y analizar el óptimo aplicable. Para dar inicio a los análisis financieros, se desarrollaron escenarios basados en las proyecciones realizadas en la Prospectiva Energética de la República del Paraguay 2018-2050 [3]. Por consiguiente, se elaboraron cuatro escenarios de introducción de buses eléctricos a la flota de buses del AMA,

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

con proyecciones de corto, mediano y largo plazo al año, 2022, 2040 y 2050, respectivamente. Se realizó el estudio de flujo de caja con VPN, utilizando una tasa de descuento del 9 %, considerando los costos operativos como: el precio del vehículo, precio de la batería, precio de cargadores, costo del combustible (electricidad), costo de mantenimiento y costo de impuestos, como así también el costo del pasaje que corresponde al total de ventas de servicios.

2.2.1 Escenarios de evaluación

Los escenarios que han sido estudiados se subdividen en dos partes: i) la primera en dos escenarios energéticos, Escenario Tendencial y Escenario Alternativo, luego ii) la segunda parte en cuatros escenarios financieros que tienen en cuenta la proyección del costo de los hidrocarburos y de la electricidad hasta el año 2050.

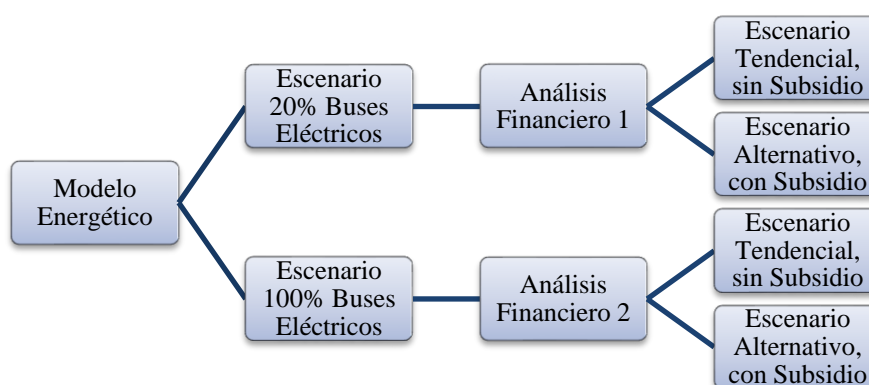


Figura 2 Estructura de los escenarios estudiados.

2.2.1.1 Modelo Energético: Escenario 20% Buses Eléctricos

En el primer escenario llamado Escenario 20% Buses Eléctricos, se efectúa con la base de datos de la flota de buses del Viceministerio de Transporte. Se analizó en renovar el 20% de la flota de buses del área metropolitana de Asunción a buses eléctricos, introduciendo 5% para el 2030, 10% para el 2040 y 20% para el 2050, estudiando el comportamiento de la demanda de energía y la reducción de gases de efecto invernadero.

2.2.1.2 Modelo Energético: Escenario 100% Buses Eléctricos

Este escenario analizó la renovación completa de la flota de buses del área metropolitana, proponiendo como meta para el año 2050 que la flota sea 100% buses eléctricos, estudiando el comportamiento de la demanda de energía y la reducción de gases de efecto invernadero.

2.2.1.3 Análisis Financiero 1: Escenario Tendencial sin Subsidio

En el primer escenario llamado escenario tendencial eléctrico, se analizó el VPN para la incorporación del 20% de buses eléctricos a la flota de buses del sistema de transporte público del Área Metropolitana de Asunción (AMA), incorporando gradualmente el 5% para el 2030, 10% para el 2040 y 20% para el 2050, con una totalidad de 399 buses eléctricos incorporados, sin subsidio del Estado.

2.2.1.4 Análisis Financiero 1: Escenario Alternativo con Subsidio

En el segundo escenario se analizó el VPN, para la incorporación del 20% de buses eléctricos a la flota de buses del sistema de transporte público del AMA, incorporando gradualmente el 5% para el 2030, 10% para

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

el 2040 y 20% para el 2050, con una totalidad de 399 buses eléctricos incorporados, con subsidio del Estado de 30.000 USD.

2.2.1.5 Análisis Financiero 2: Escenario Tendencial sin Subsidio

En el tercer escenario, se analizó el VPN, para la incorporación del 100% de buses eléctricos a la flota de buses del sistema de transporte público del AMA, incorporando gradualmente el 20% para el 2030, 50% para el 2040 y 100% para el 2050, con una totalidad de 1966 buses eléctricos incorporados, sin subsidio del Estado.

2.2.1.6 Análisis Financiero 2: Escenario Alternativo con Subsidio

En el cuarto escenario, se analizó el VPN, para la incorporación del 100% de buses eléctricos a la flota de buses del sistema de transporte nacional, incorporando gradualmente el 20% para el 2030, 50% para el 2040 y 100% para el 2050, con una totalidad de 1966 buses eléctricos incorporados, con subsidio del Estado de 30.000 USD.

3. Resultados y discusiones

3.1 Modelo energético: Escenario 20% de Buses Eléctricos

En la Tabla 1 se observa que los buses convencionales en el año base son mayoritariamente dependiente de los hidrocarburos, a medida que van ingresando los buses eléctricos se puede apreciar una disminución de la dependencia del combustible fósil. Para el año 2030, la flota consumiría 768 Miles de Gigajoule, representando el 18% del uso del Diésel en la flota del área metropolitana. De la misma manera, introduciendo 399 buses eléctricos para el año 2050, disminuiría el uso del Diésel hasta un 16%.

Tabla 1. Resultados por año del modelo energético: Escenario 20% de Buses Eléctricos (Miles Gigajoule)

Fuente	2022	2030	2035	2040	2045	2050
Diésel	4062,1	768	745,6	725,6	693,4	654
Electricidad	0,9	5,6	9,2	12,6	18,4	25,1
Total	4063	773,6	754,8	738,2	711,8	679,1

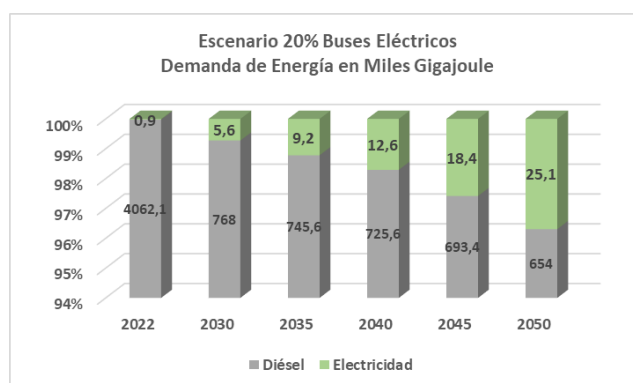


Ilustración 2. Proyección de la demanda de Energía. Escenario 20% Buses Eléctricos

En la ilustración 3 se puede observar la participación de la fuente energética cada 5 años, hay una clara disminución del uso del hidrocarburo con apenas introducir el 20% de buses eléctricos a la flota del AMA, llegando para el 2050, una participación del 4% en el consumo energético.

3.2 Modelo energético: Escenario 100% de Buses Eléctricos

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

En la Tabla 2 se observa el comportamiento del sector, podemos observar que para el año 2030, existe una reducción en el consumo final de 684,4 Miles de Gigajoule, que representa el 90% de la dependencia hacia los combustibles fósiles. De la misma forma, para el año 2050 tan solo 81 Miles de Gigajoule representaría el 30% del uso del combustible Diésel en la flota de buses del área metropolitana.

Tabla 2. Resultados por año del modelo energético: Escenario 100% Buses Eléctricos (Miles Gigajoule)

Fuente	2022	2030	2035	2040	2045	2050
Diésel	4095,6	684,4	566,4	447,2	278,7	81
Electricidad	0,9	22,2	41,5	61,8	91,7	125,6
Total	4096,5	706,6	607,9	509	370,4	206,6

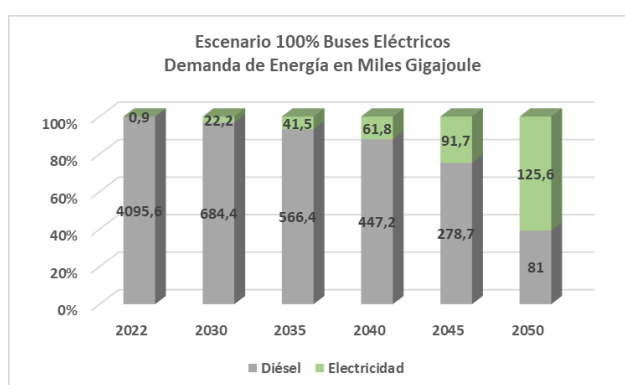


Ilustración 3. Proyección de la demanda de Energía. Escenario 100% Buses Eléctricos

En la ilustración 4 se puede observar la participación de la fuente energética para el año 2050, destacando una clara disminución del consumo de hidrocarburos del sistema de transporte del área metropolitana de Asunción, llegando una participación de 70% de la Electricidad en el consumo energético.

3.3 Cálculo de emisiones de GEI

En la Ilustración 5 se presenta la proyección de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) hasta el año 2050. Se observa que a partir de la introducción de buses eléctricos a la flota del área metropolitana existe una reducción considerable en la emisión de GEI, de 297,7 Miles de Toneladas Métricas de CO₂ equivalente, para el año 2022, y de 47,9 Miles de Toneladas Métricas de CO₂ con la renovación del 20% de la flota para el año 2050. Mientras que con la renovación del 100% de la flota a buses eléctricos, se estaría disminuyendo a 5,9 Miles de Toneladas Métricas de CO₂ para el año 2050.

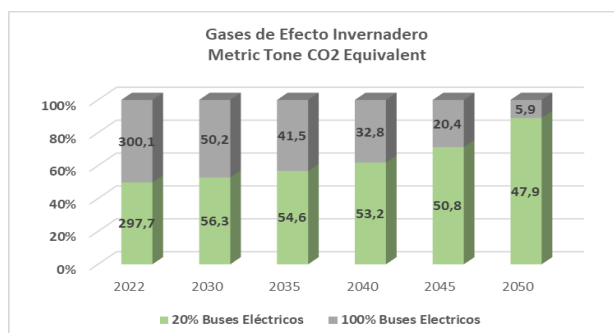


Ilustración 4. Proyección de la emisión de gases efecto invernadero. Modelo energético

3.4 Análisis Financiero 1: Escenario Tendencial sin Subsidio

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

Una vez obtenidos todos los datos, los mismos fueron considerados para el cálculo del VPN, donde se detallan en guaraníes todos los costos operativos y la totalidad de ventas que se realizan por año. En la Ilustración 6 se puede apreciar el comportamiento del VPN para el escenario tendencial 20% de Buses Eléctricos. Se observa que para el 2022, con la introducción de 11 buses eléctricos la inversión inicial del costo operativo sería de 5.797.817 USD, con un total de ventas de 666.837 USD. Se ve reflejado un costo inicial bastante elevado, a medida que se introducen los buses eléctricos se puede observar que el total de ventas va en aumento considerable, para el año 2031, con la introducción parcial de 109 buses eléctricos, la tendencia del total de ventas es positiva, superando en 340.303 USD a los costos operativos. Como resultado final de este escenario, para el 2050, con la introducción total de 399 buses eléctricos, el total de ventas queda en 189.513.158 USD, con un costo operativo de 104.441.227 USD representando una ganancia de 85.071.931 USD, obteniéndose un resultado muy alentador para las empresas de transporte público del AMA, considerando incluso que no habrá un aporte por parte del Estado.

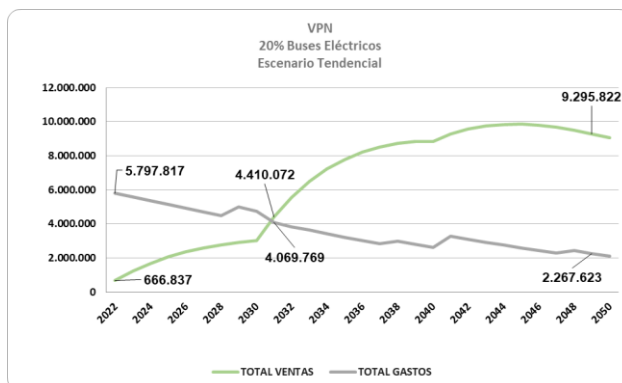


Ilustración 5 Proyección de ventas y gastos del Escenario tendencial sin Subsidio

3.5 Análisis Financiero 1: Escenario Alternativo con Subsidio

En la Ilustración 7 se puede apreciar el VPN del escenario tendencial 20% de Buses Eléctricos. Se observa que para el 2022, con la introducción de 11 buses eléctricos la inversión inicial del costo operativo sería de 4.854.601 USD, con un total de ventas de 666.837 USD, se ve reflejado un costo inicial bastante elevado, a medida que se introducen los buses eléctricos se puede observar que el total de ventas va en un aumento considerable, para el año 2031, con la introducción parcial de 109 buses eléctricos, la tendencia del total de ventas es positiva, superando en 863.545 USD a los costos operativos. Como resultado final de este escenario, para el 2050, con la introducción total de 399 buses eléctricos, el total de ventas queda en 189.513.158 USD, con un costo operativo de 90.300.532 USD, representando una ganancia de 99.212.627 USD, obteniendo un resultado bastante positivo para las empresas del transporte público del AMA, teniendo en cuenta que no habrá un aporte por parte del Estado.

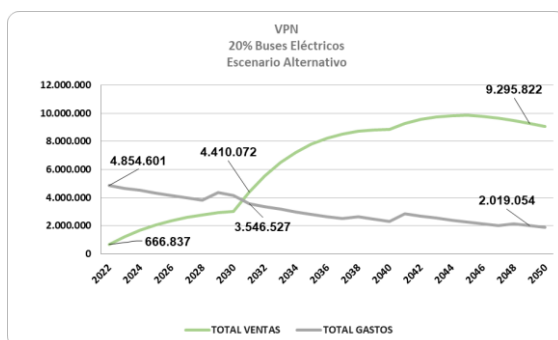


Ilustración 6 Proyección de ventas y gastos del Escenario Alternativo con Subsidio

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

3.6 Análisis Financiero 2: Escenario Tendencial sin Subsidio

En la Ilustración 8 se puede apreciar el VPN del escenario tendencial 100% de buses eléctricos. Se observa que para el 2022, con la introducción de 44 buses eléctricos la inversión inicial del costo operativo sería de 20.491.269 USD con un total de ventas de 2.667.348 USD, se ve reflejado un costo inicial bastante elevado, a medida que se introducen los buses eléctricos se puede observar que el comportamiento del total de ventas va aumentando, pero no logra cubrir el costo operativo. Cada ocho años la renovación de la batería afecta directamente al costo operativo, a medida que llega la vida útil de la misma. A partir del año 2046, con la introducción parcial de 1574 buses eléctricos, las ventas del servicio superarían al total de gastos en 521.888 USD, pero luego del transcurso de los años se puede apreciar un valor equitativo entre ambos valores, obteniendo así un resultado negativo de -124.147.730 USD para las empresas de transporte público del AMA, teniendo en cuenta que no habrá una ayuda monetaria por parte del Estado.

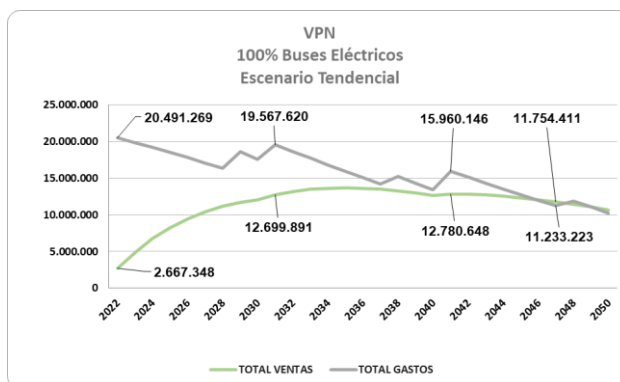


Ilustración 7 Proyección de ventas y gastos del Escenario tendencial con Subsidio

3.7 Análisis Financiero 2: Escenario Alternativo con Subsidio

Se detallan en guaraníes todos los costos operativos y la totalidad en ventas que se realizan por año. En la siguiente ilustración se observa que para el 2022, con la introducción de 44 buses eléctricos la inversión inicial del costo operativo sería de 16.760.156 USD con un total de ventas de 3.334.185 USD, se ve un costo inicial bastante elevado, a medida que se introducen los buses eléctricos se puede observar que el comportamiento del total de ventas va aumentando. A partir del año 2032, con la introducción parcial de 691 buses eléctricos, las ventas del servicio superarían al total de gastos en 4.032.308 USD. Para el 2050 ya se observa una tendencia positiva donde es posible recuperar la inversión.

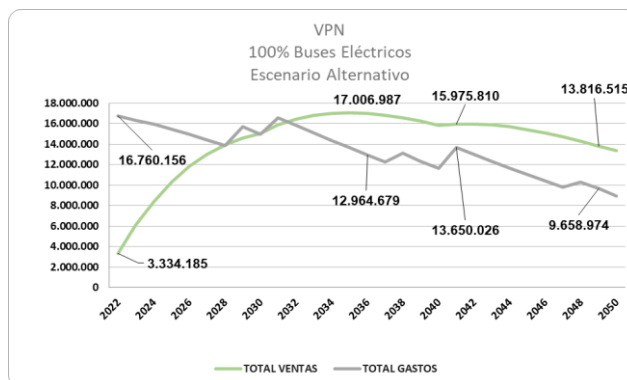


Ilustración 8 Proyección de ventas y gastos del Escenario Alternativo con Subsidio

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

4 Conclusión

Con el análisis realizado para el presente trabajo, se pudo identificar la estructura actual con que cuenta el Viceministerio de Transporte. Hoy en día existen 1963 buses operativos, dependientes de los hidrocarburos. Se estudiaron 4 posibles escenarios financieros para el cálculo de los gastos operativos y ventas, donde para cada escenario se ha considerado la proyección del costo del combustible hasta el año 2050. De los 4 escenarios, 3 resaltan como escenarios favorables a la renovación de la flota de buses del AMA. Los 2 escenarios de renovación de 20% de la flota, con y sin subsidio y el escenario 100% de buses alternativos resultan escenarios alentadores y positivos para las empresas de transporte público. Mediante el análisis del sistema de transporte del AMA con el software LEAP, se puede concluir que al renovar el 100% de la flota a buses eléctricos, se redujo hasta un 70% de la dependencia de hidrocarburos. Asimismo, con la renovación del 20% de la flota, se redujo un 5% de la dependencia de hidrocarburos. A través de los cálculos realizados para los escenarios del modelo energético, se destaca la disminución de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero de hasta un 80%, en el sistema de transporte público del área metropolitana, en el escenario de renovación del 100% de buses eléctricos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Plan Nacional de Desarrollo Paraguay 2030. Secretaría Técnica de Planificación del Desarrollo Económico y Social, Paraguay, 2014, páginas 14-60
- [2] Datos extraídos de la planilla de registro del sistema de transporte público. Viceministerio de Transporte, Paraguay, 2019
- [3] La Prospectiva Energética 2050 de Paraguay. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Paraguay, 2021, páginas 50-60