

Uso de electricidad en el transporte de carga terrestre a través del hidrógeno verde

Gustavo Riveros-Godoy^{1,2}, Victor Balbuena¹, Enrique Buzarquis¹

¹Parque Tecnológico Itaipu

²Universidad Privada del Este

Paraguay

Resumen

El Paraguay es un país mediterráneo y, por lo tanto, el transporte terrestre es de vital importancia para cargas de exportación e importación. Recientemente, las bajadas del nivel del río Paraná comprometió el transporte por medio fluvial, aumentando la participación del transporte por medio terrestre. El transporte de cargas conlleva el recorrido de grandes distancias, implicando en un consumo intensivo de combustibles de origen fósil como, por ejemplo, el Diesel, causando contaminación ambiental por emisiones de gases de efecto invernadero y material particulado que representan un riesgo para la salud humana y el cambio climático. El sector de transporte es considerado un sector difícil de abatir porque la electrificación de estos vehículos no sería técnicamente viable mediante el uso de baterías para el recorrido de largas distancias. Actualmente, diversos países se encuentran trabajando en vehículos pesados movidos por tecnologías de celdas a combustibles de hidrógeno como alternativa a los motores a combustión interna. Este estudio plantea la introducción de la tecnología del hidrógeno en camiones de carga y el impacto técnico, económico y ambiental que pueda tener. Se presenta y se discute el modo de producción de hidrógeno verde para el abastecimiento de 100 vehículos Diesel de transporte terrestre de carga en dos escenarios de producción centralizada y descentralizada. Se toma como ruta de referencia, el recorrido entre Minga Guazú, Alto Paraná y un puerto de Asunción.

Palabras clave

Hidrógeno, Electrólisis, Transporte de carga, Vehículos Pesados.

1. INTRODUCCIÓN

La actual situación ambiental sin precedentes ha fomentado la búsqueda por alternativas de mitigación de las emisiones de carbono en todos los sectores de la economía. Uno de los sectores de mayor impacto es el sector de transporte, con participación en 2019 de aproximadamente 23% de las emisiones totales de CO₂ relacionadas a la energía y siendo 70% provenientes de forma directa del transporte terrestre [1]. Con el objetivo de reducir las emisiones para mitigar el cambio climático, fue firmado en 2015 el acuerdo de París, donde 195 países se comprometieron a tomar las medidas necesarias para limitar el aumento de la temperatura global en hasta 2°C con respecto a los niveles preindustriales, sugiriendo de preferencia mantener por debajo de 1,5°C [2]. En ese contexto, Paraguay como parte firmante del acuerdo de París, se comprometió a reducir hasta 20% de sus emisiones de gases de efecto invernadero [3].

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

Los transportes de carga convencionales utilizan combustibles fósiles para la producción de fuerza motriz. La combustión del uso común de Diesel en transportes de carga emite gases de efecto invernadero (GEI), óxido de nitrógeno (NOx) y material particulado (MP) [3], implicando un riesgo para la salud humana y el cambio climático. De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), eventos climáticos extremos deben ocurrir con mayor frecuencia con el aumento del cambio climático. En los últimos años en Paraguay, la navegabilidad de los ríos se vio comprometida por extensos periodos sin lluvias y elevadas temperaturas, pudiendo esperarse que en los próximos años haya un incremento en el volumen de transporte terrestre de carga, y, por ende, el aumento de camiones pesados. De acuerdo con el balance energético nacional 2020, el sector de transporte en Paraguay consume aproximadamente 91% de la importación de los derivados de petróleo [5].

Estrategias para la mitigación de emisiones en el transporte de carga consisten en el mejoramiento de la eficiencia o la reducción de la polución de camiones a Diesel, usando combustibles alternativos o usando ejes motrices híbridos que acumulan energía en baterías [6]. Por otro lado, la electrificación del sector de transporte es considerado como un sector difícil de abatir debido a la densidad energética de las baterías; su empleo en camiones requiere la ocupación de grandes espacios y sobrecarga en peso al vehículo, influyendo en su autonomía.

Una alternativa potencial a las limitaciones técnicas del uso de batería es el empleo de hidrogeno en celdas a combustibles. Estas producen únicamente vapor de agua como subproducto de la generación de energía. El hidrogeno es el elemento de mayor densidad energética por unidad de masa, pudiendo almacenar cantidades significantes de energía a altas presiones ocupando volúmenes menores cuando comparadas con las baterías. Actualmente, diversos proyectos demostrativos son realizados de transporte de diferentes segmentos de vehículos pesados. La alianza europea publico privada de hidrogeno y celdas a combustibles FCH JU reporta 23 proyectos localizados en Norte América, Europa y Asia con 2.562 vehículos pesados en circulación [7].

Las principales agencias de energía como la IRENA y la IEA plantean que el hidrógeno debe tener un papel fundamental en la transición energética como vector potencial para la descarbonización de la economía. El hidrógeno, al ser un combustible versátil de alto contenido energético, puede ser utilizado en diversa industria como para la producción de energía, químicos, fertilizantes, entre otros [8].

La producción libre de emisiones de carbono del hidrógeno verde es realizada por la electrólisis del agua a partir de fuentes de energías renovables. En ese sentido, Paraguay tiene gran potencial y oportunidad de ser productor de este combustible debido a contar con una matriz energética mayormente renovable.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto técnico, económico y ambiental que tendrá sobre la instalación centralizada y descentralizada de plantas de producción de hidrógeno para abastecer 100 camiones de carga pesadas de forma diaria.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo fueron propuestos dos escenarios en el que se abastecerían de forma centralizada y descentralizada a un total de 100 camiones de carga pesada. Los escenarios prevén la

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

definición de la cantidad de puestos de reabastecimiento y el recorrido a ser realizado por los camiones. Para determinación de la distancia, fue utilizado la herramienta *Google Earth*. La estimación de la demanda de H₂ fue realizada a partir de las especificaciones técnicas de una solución comercial en transporte de carga como vehículo de referencia. A partir de la estimativa de demanda, se calculó para cada escenario la potencia instalada necesaria de las plantas de hidrógeno a fin de abastecer de forma diaria a los camiones. La evaluación del capital de inversión necesario fue realizada utilizando un método de estimación por correlación con proyectos existentes de almacenamiento de energía en hidrógeno. Para el análisis ambiental se tomaron valores reportados por el consorcio internacional de transporte limpio (ICCT) como referencia sobre transporte de carga de camiones Diesel.

3. RESULTADOS

3.1. Definición los escenarios.

El trabajo propone la evaluación de los siguientes dos escenarios:

- Escenario A: centralizado, se refiere a una planta de producción y abastecimiento para atender a 100 camiones por día.
- Escenario B: descentralizado, se refiere a 4 plantas de producción y abastecimiento para atender a 25 camiones cada una.

3.2. Definición del trayecto.

Para ambos escenarios fue definido el mismo trayecto de la siguiente forma:

- Punto de abastecimiento y salida: Minga Guazú.
- Punto de llegada: Puerto Unión, Asunción.

La Figura 1 presenta el trayecto de los camiones. La distancia entre el punto de salida y el punto de llegada es de 306 km, dando un recorrido total de 612 Km.

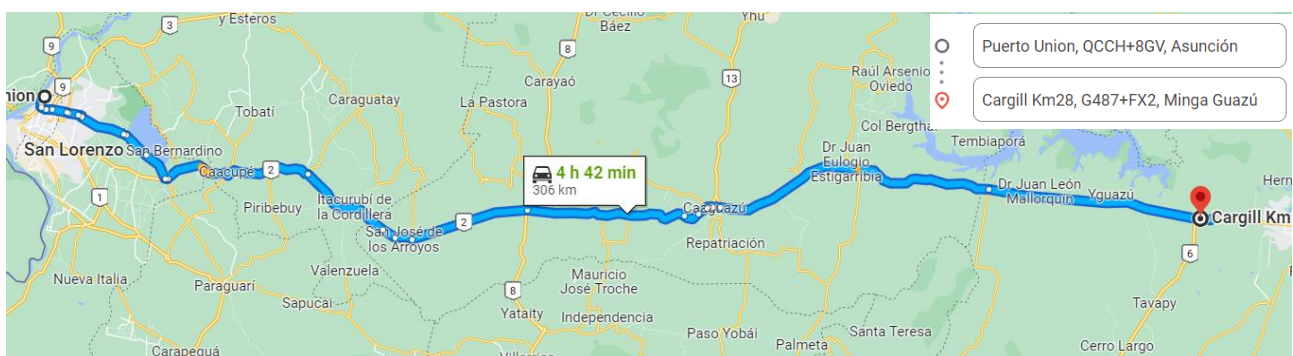


Figura 1. Trayecto del transporte de carga.

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

3.3. Especificación del vehículo de referencia.

El camión seleccionado fue en base al estado de desarrollo. Existen diferentes empresas trabajando en la fabricación de prototipos de camiones a hidrógeno, para el estudio fue seleccionada la empresa *Hyzon*, ya que esta ofrece soluciones en estado comercial. Por lo tanto, el camión utilizado para el estudio es el *Hyzon Class 8*. La Tabla I presenta las especificaciones del camión y la Figura 2 exhibe una imagen del camión [9].

Tabla I. Especificaciones del camión *Hyzon Class 8*.

Potencia del motor	302 kW (continuo), 450 kW (pico)
Tren de potencia	700 V
Velocidad máxima	88,5 kmh
Cantidad de hidrógeno a bordo	50-70 kg
Presión de almacenamiento	350 bar
Autonomía típica	604 – 805 km



Figura 2. Camión *Hyzon Class 8*.

De acuerdo con la especificación técnica presentada en la Tabla I, el camión tiene una autonomía promedio de 704 km. Considerando la cantidad promedio de hidrogeno a bordo siendo 60 kg, el consumo específico por kilómetro recorrido es de 11,70 kg.

3.4. Demanda de hidrógeno.

A partir de la definición del trayecto y las especificaciones técnicas del camión, se realiza la estimación de la demanda de hidrogeno:

$$Demanda\ de\ H_2 = \frac{612\ km}{11,7\ \frac{km}{kgH_2}} = 52,31\ kg; \quad (1)$$

Cada camión necesita 52,31 kg de H₂ para realizar el trayecto propuesto.

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

3.5. Capacidad de abastecimiento de los puestos.

El escenario A debe ser capaz de abastecer 100 camiones por día, requiriendo un total de 5.231 kg de H₂ de forma diaria.

En el escenario B, cada estación debe abastecer 1/4 del requerimiento de la estación centralizada, por lo tanto, es necesario disponer de 1.308 kg de H₂ para atender a 25 camiones de forma diaria en cada estación.

3.6. Determinación de la potencia de la planta de producción de H₂.

Para determinar la potencia necesaria de la planta de producción de hidrógeno para el abastecimiento diario de 100 camiones en los escenarios A y B, fue considerado la eficiencia de la planta en términos de consumo específico de energía en operación continua diaria. Fue tomado el valor promedio del consumo específico reportado por la IRENA, igual a 64 kWh/kg para electrolizadores alcalinos.

$$Potencia_{escenario A} = 5.231 \text{ kg} \cdot 64 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{24 \text{ horas}} = 13.949 \text{ kWh}; \quad (2)$$

$$Potencia_{escenario B} = 1.308 \text{ kg} \cdot 64 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{24 \text{ horas}} = 3.488 \text{ kWh}; \quad (3)$$

La estimación indica que, para satisfacer las demandas de los escenarios, es necesario instalar plantas con potencias aproximadas de 14 MW y 3,5 MW/planta para los escenarios A y B, respectivamente.

Considerando la premisa de que las plantas operarían de forma diaria (24 horas), el consumo de energía para cada escenario sería de 122,20 GWh por año.

Como se observa que la autonomía es suficiente para realizar el trayecto de ida y vuelta, la estación de reabastecimiento puede ser instalada de forma centralizada en el escenario A en el punto de salida y con la producción *in situ* de hidrógeno. Ya en el escenario B, las estaciones serían instaladas en 4 localizaciones diferentes, con su respectiva estación de reabastecimiento.

3.7. Análisis económico.

El análisis económico considera el costo de inversión del electrolizador (C_{SE}), el costo del sistema de compresión, el costo del sistema de almacenamiento. Fue utilizada la metodología para estimación propuesta por Riveros, que evalúa costos de diferentes proyectos por capacidad de producción. La ecuación 4 fue utilizada para estimación del costo del sistema de producción considerando la capacidad de producción en kg/hr ($C_{p_{el}}$) [10].

$$C_{SE} = 170.489 + 63.669 C_{p_{el}} \quad (4)$$

En función a la ecuación, la inversión necesaria para el electrolizador del escenario A es 14.047.066 USD, mientras que para el escenario B, la inversión es 3.639.633 USD por cada estación, totalizando en 14.558.533 USD para el escenario.

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

La estimación del costo del compresor y del almacenamiento fueron realizadas utilizando correlaciones con costos de referencias de fabricantes de estos equipamientos y otros costos de inversión en otros proyectos. Así, la Tabla II presenta los resultados de la estimación de inversión necesaria para la instalación del puesto de reabastecimiento propuestos para los escenarios A y B.

Tabla II. Inversión necesaria estimada para los escenarios A y B.

Equipamiento	Escenario A (USD)	Escenario B (USD)
Electrolizador	14.047.066	14.558.533
Compresor	1.768.240	3.439.774
Almacenamiento	12.072.615	12.072.615
Total	27.887.921	30.070.992

La diferencia de inversión entre los escenarios es de 2.183.071 USD. Las Figuras 3.a y 3.b presentan la distribución porcentual del costo para ambos escenarios. El equipamiento de mayor impacto en cuanto a inversión es el electrolizador, representando aproximadamente 50% del costo para ambos escenarios. En términos de economía de escala, el escenario B requiere una inversión mayor en 3% para el electrolizador, y de aproximadamente 95% para el compresor, siendo este equipamiento el más sensible en cuanto a la diferencia de inversión entre ambos escenarios.

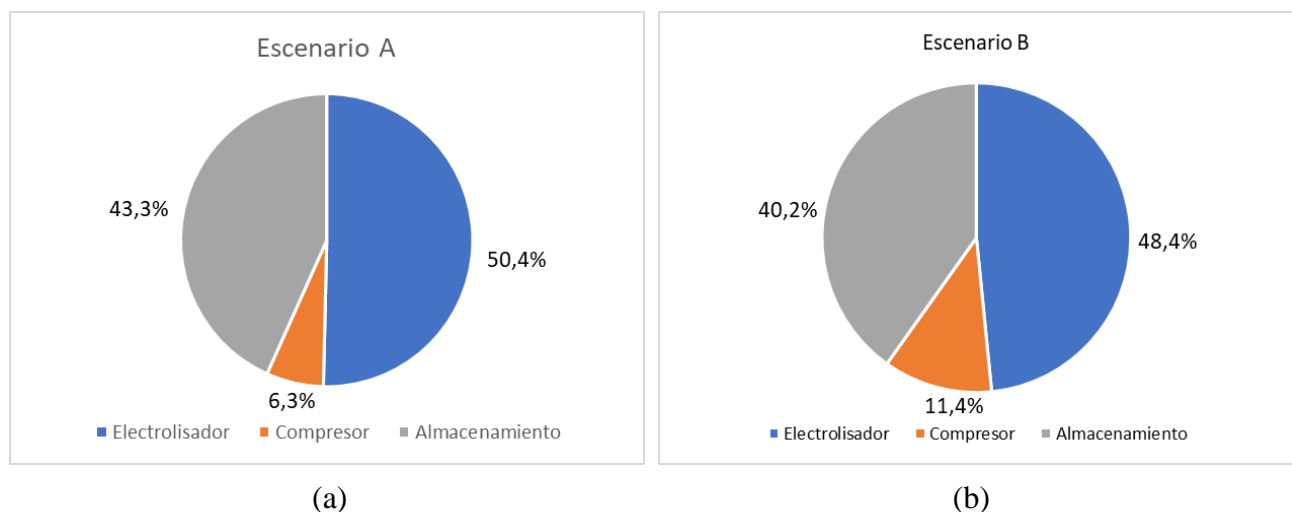


Figura 3. Distribución porcentual del costo de inversión para el (a) escenario A y (b) escenario B.

El costo evitado en cuanto a compra de combustible fue estimado en función de factores por el ICCT, que evalúa el desempeño de consumo de combustible de diferentes mercados en ciclos de operación y cargas en condiciones razonables. En ese sentido, fueron tomados valores reportados por el ICCT para transporte de cargas del mercado hindú, debido a la similitud de carga máxima permitida con la regulación nacional paraguaya, siendo esta de 27 toneladas por camión [11,12]. En ese contexto, el valor asumido de consumo de combustible fue 54,8 L/100km y el costo del Diesel considerado fue 1,17 USD/L [13]. La Tabla III presenta los resultados obtenidos del análisis, considerando el consumo para el recorrido propuesto.

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

Tabla III. Consumo y costo de combustible Diesel.

Consumo de combustible por camión (Litros)	Costo del Diesel por recorrido (USD)	Consumo de combustible por 100 camiones (Litros)	Costo del Diesel por 100 camiones (USD)
340	398	34.000	39.780

A partir de los valores de la Tabla III, el costo anual por el consumo de combustible fósil representa un total de 14.519.700 USD, que es totalmente importado, por lo tanto, son divisas que van al exterior del país.

3.8. Análisis ambiental.

El análisis ambiental consistió en la estimación de mitigación de emisiones que pueden ser evitadas con la implementación del uso de hidrógeno verde, en comparación con el uso del Diesel. La Tabla IV presenta las emisiones por combustión de Diesel por 100 camiones, estos resultados se refieren a potenciales emisiones diarias.

Tabla IV. Consumo y emisiones diarias por camiones Diesel en el escenario propuesto.

Consumo Diesel 100 camiones (Litros)	Emisiones GEI (ton)	Emisiones PM2.5 (ton)	Emisiones NOx (ton)	Emisiones SOx (ton)
34.000	59,15	10,60	11,54	2,31

Consumo de Diesel: 2,5 km/l; Emisiones: GHG = 1.739,8 g/km; PM_{2.5} = 0,179 g/km; NOx = 1,09 g/km; SOx = 0,20 g/km [14].

De los resultados de la Tabla IV, la mitigación anual en cuanto a gases de efecto estufa sería aproximadamente 21.600 toneladas.

4. CONCLUSIONES

Ante la actual situación ambiental y la inminente transición energética para tecnologías de bajo carbono, inúmeros proyectos de I&D&i son realizados para la descarbonización de los sectores económicos. En ese contexto, el trabajo evaluó técnica, económica y ambientalmente el uso de energía eléctrica en vehículos pesados de carga, a través de la producción y utilización de hidrógeno.

El trabajo demostró a partir de los escenarios propuestos la influencia en la economía de escala, presentado una inversión inferior de aproximadamente 8% para el escenario centralizado en comparación al escenario descentralizado. La diferencia se vio en un gran impacto en la inversión necesaria en cuanto a la instalación de compresores, representando aproximadamente 80% de la diferencia en inversión necesaria; no fueron considerados otros gastos, que también representaría una inversión mayor para la producción descentralizada, como por ejemplo los gastos operativos de las plantas.

No fue realizado un análisis del costo de producción del hidrógeno, tampoco fue evaluado el costo de adquisición de camiones de carga movidos a hidrógeno.

Es importante resaltar que existe un alto costo asociado al consumo de combustible Diesel para el caso propuesto (14.519.700 USD), este valor evitado representaría divisas que no saldrían del país y que es equivalente al costo estimado para la adquisición de electrolizadores.

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

Con respecto a la evaluación ambiental, se vio que, a partir del trabajo planteado, la mitigación anual de gases de efecto invernadero alcanzaría valores aproximados de 21.600 toneladas evitadas, que puede contribuir por un lado en el esfuerzo nacional de reducción de emisiones y por otro, ayudaría a mejorar la viabilidad económica de proyectos de este tipo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Working Group III IPCC. “Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Technical Summary”. Informe de Evaluación 6, Febrero 2022, página 67-68.
- [2] Working Group I Technical Support Unit IPCC. “Global Warming of 1.5°C”. Reporte Especial, Mayo 2018, página 4-5.
- [3] DNCC/MADES. “Actualización de la NDC de la República del Paraguay al 2030”. Julio 2021, páginas 12-13.
- [4] C. Cunanan, M. Tran, Y. Lee, S. Kwok, V. Leung, M. Fowler, A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. Clean Technol. 2021, 3, páginas 474-489.
- [5] Balance Energético Nacional 2020. Viceministerio de Minas y Energías, Paraguay, 2021, página 10.
- [6] C. Cunanan, M. Tran, Y. Lee, S. Kwok, V. Leung, M. Fowler, A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. Clean Technologies, 2021, v. 3, n. 2, páginas 474-489.
- [7] Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Duty’s High Performance Green Solution. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH), Bélgica, 2020, páginas 30-51.
- [8] Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolyser to meet the 1.5°C Climate Goal. IRENA, Emiratos Arabes Unidos, 2020, página 16.
- [9] Hydron Powered Fuel Cell Electric Vehicles On The Road Today. Hyzon, 10/04/2022, <https://www.hyzonmotors.com/vehicles>.
- [10] G. Riveros, Rodovia do Hidrogênio Brasil-Paraguai: Estudo Técnico, Econômico e Ambiental. UNICAMP, Brasil, 2013, páginas 73-75.
- [11] Estimating the Fuel Efficiency Technology Potential of Heavy-Duty Trucks in Major Markets Around the World. The International Council on Clean Transportation (ICCT), Estados Unidos, 2016, página 18.
- [12] Plan Nacional de Logística. Ministerio de Industria y Comercio, Paraguay, 2013, página 111.
- [13] Precios de combustibles vigentes. PETROPAR, 20/04/2022, https://www.petropar.gov.py/?page_id=4460

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

- [14] P. Machado, A. Teixeira, F. Collaço, D. Mouette. Review of Life Cycle Greenhouse Gases, Air Pollutant Emissions and Costs of Road Medium and Heavy-Duty Trucks. Wires Comput Stat., Diciembre, 2021, página 395.