

Evaluación de la integración de vehículos eléctricos en el mercado colombiano a 2050 usando dinámica de sistemas

Juan Camilo Galvez Avellaneda, Estudiante de maestría, +57 3138825875, juanc.galveza@utadeo.edu.co
Andres Julian Aristizabal Cardona, Director de tesis, +57 3005467943, andresj.aristizabalc@utadeo.edu.co
Isaac Dyrer Rezonzew, Profesor – tutor de tesis, +57 3216369360, isaac.dynerr@utadeo.edu.co
Enrique Ángel Sanint, Profesor EIA – tutor de tesis, enriqueangelsanint@hotmail.com

Overview

Este artículo se enfoca en la evaluación de las perspectivas y el potencial que Colombia posee para lograr una transición completa hacia vehículos eléctricos, con el objetivo de alcanzar una penetración del 100% de este tipo de automóviles para el año 2050. Para abordar este desafío, se plantean cuatro escenarios potenciales que parten de diferentes enfoques y estrategias.

En estos escenarios, se consideran diversas variables que desempeñarán un papel fundamental en la transformación del parque automotor colombiano, tales como incentivos gubernamentales destinados a fomentar la adopción de vehículos eléctricos, la evolución de los precios de las baterías, los cambios en los costos de adquisición de los vehículos eléctricos, la expansión de la red de estaciones de carga y otros elementos relevantes para el análisis.

Esta evaluación, busca proporcionar una visión clara de las posibilidades y desafíos que enfrenta Colombia en su camino hacia la electrificación del transporte, y ofrece un escenario para la toma de decisiones informadas en la formulación de estrategias que impulsen la adopción de vehículos eléctricos en el país.

Con el propósito de alcanzar el objetivo que se describe en el artículo, se empleó un enfoque de modelado de simulación. A través de este proceso, se obtuvo un modelo definitivo que da la posibilidad de representar de manera visual el progreso de los diferentes escenarios a lo largo de los años. Esta representación gráfica brinda una comprensión clara acerca de cuáles escenarios cumplen con los parámetros establecidos para lograr la meta previamente establecida llegando a valores cercanos al 100% para el año 2050 de vehículos eléctricos en Colombia y teniendo una reducción considerable del CO2 producido por el sector de transporte en Colombia en un 27% menos en comparación al 2023, contando que el aumento de vehículos para el año 2050 será mucho mayor que en el periodo inicial, comenzando así un periodo de descenso para la contaminación en el país.

Los Escenarios planteados del posible comportamiento del País a 2050 son los siguientes:

1. Green Democracy:

El precio de los combustibles fósiles se encuentra al alza manteniendo un aumento progresivo de los gastos operativos de los vehículos a gasolina, permitiendo así un crecimiento de los vehículos eléctricos debido a su bajo costo operativo mediante la carga de los vehículos con el bajo costo en comparación de la energía en los sectores residenciales, permitiendo un crecimiento extraordinario de los puntos de recarga en hogares y centros comerciales, al igual que el aumento de estas a lo largo de la malla vial en el país. La política de cero emisiones es cada vez más estricta llegando a impulsar incentivos tributarios a favor de los vehículos eléctricos llegando a una curva de aprendizaje capaz incrementar en gran medida la cantidad de EV en Colombia. Se hace uso eficiente de los avances tecnológicos y de desarrollo en la ciudad, generando en las personas el deseo de migrar a vehículos eléctricos al igual que aumentar los beneficios por el cambio a las nuevas tecnologías. De igual manera, las empresas invierten y apuestan a un mejoramiento de estas tecnologías llegando a tener precios asequibles para la mayoría de los colombianos.

2. Greta:

El precio de los combustibles fósiles aumenta, lo que promueve una transición energética en la que se ven distintas situaciones políticas que oscilan con los cambios de gobierno, impidiendo que exista una estructura sólida que apoye la transformación del sector del transporte a vehículos eléctricos. La actividad económica del sector privado permite diversificar los ingresos del país, lo que conlleva junto al costo del combustible a aumentar la posibilidad de adquirir un VE, sin embargo, la inexistencia de incentivos económicos por parte del gobierno ralentiza la curva de adquisición del transporte eléctrico, sumado a la poca estructura de suministro eléctrico para estos vehículos. Con ayuda del sector privado, se logra incentivar la innovación y desarrollo de los VE logrando reducir el costo de las baterías y mejorar la autonomía de los vehículos.

3. Renewable Extractivism:

El precio de los combustibles fósiles no impulsan el cambio a vehículos eléctricos debido a su reducción en el precio. Se crea incertidumbre en el sector privado debido a que los gobiernos promueven políticas para frenar la exploración haciendo al país dependiente del petróleo y gas importados, al igual, se reduce la inversión de las empresas en nuevos proyectos de innovación o desarrollo tecnológico, llevando esto a un estancamiento del decrecimiento del precio de los VE y disminución de la curva de aprendizaje de las estaciones de carga en el país. Los incentivos económicos no son suficientes para activar la economía en pro del desarrollo sostenible en el sector transporte y se plantea una curva de aprendizaje lenta en la adquisición de los vehículos eléctricos debido a la falta de apoyo del sector privado en el país.

4. Burning House:

El precio de los combustibles fósiles bajan favoreciendo al uso de vehículos convencionales, debido a esto las personas no tienen interés en incurrir en gastos innecesarios adquiriendo vehículos eléctricos. En los gobiernos siguientes, se promueve la idea de continuar con una economía favorable y dependiente del petróleo y gas, teniendo así una disminución progresiva de los beneficios antes dados a dueños de vehículos eléctricos. El país no hace ningún tipo de ley o decreto para implementar vehículos eléctricos ni beneficios que puedan favorecer al aumento de la venta de este tipo de autos, por el contrario, se invierte en exploración de hidrocarburos y el uso de los combustibles fósiles aumenta. La estructura de las ciudades para vehículos eléctricos existe únicamente en zonas puntuales como

centros comerciales y en los hogares de los dueños de este tipo de vehículos.

Methods

El modelo comprende las variables principales para la toma de decisiones en la probabilidad de selección de un vehículo eléctrico, se especifica cuáles son las razones principales por las cuales las personas optarían por seleccionar este tipo de tecnología. En base a estos, se plantea un modelo Logit que ayude a comprender el funcionamiento del proceso de selección en base a los porcentajes de cada uno de estos factores.

Al considerar los diversos factores que influyen en la toma de decisiones, se asignaron los pesos específicos a cada uno de ellos teniendo como referencia encuestas del modelo de masificación de vehículos eléctricos con el objetivo de proporcionar una evaluación integral. Estas ponderaciones reflejan la importancia relativa de cada factor en la toma de decisiones respecto a la elección de vehículos. La investigación para esta metodología asigna los siguientes porcentajes a los factores clave:

Costo del vehículo: Representa el 30% de la evaluación total, reflejando la significativa influencia de este factor en la decisión final.

Autonomía: Con un peso del 21%, este factor refleja la importancia de la capacidad de recorrido del vehículo en la toma de decisiones.

Costos operativos: Es asignado un peso del 23% a este factor, reconociendo su impacto en los costos a largo plazo asociados con la propiedad del vehículo.

Estaciones de carga: Dada la creciente importancia de la infraestructura de carga, este factor tiene un peso del 7% a partir de los resultados obtenidos.

Tiempo de carga: Cuenta con un resultado del 7% considerando la conveniencia y eficiencia a la rapidez con la que un vehículo puede recargarse.

Costos de mantenimiento: Con un peso del 6%, este factor refleja la relevancia de los gastos asociados con el mantenimiento a lo largo del tiempo.

Cantidad de vehículos: Cuenta con un 6% para reflejar la importancia de la variedad y disponibilidad de modelos en la decisión del consumidor.

Esta estructura de ponderación busca proporcionar una evaluación equilibrada y completa, considerando todos los aspectos relevantes en la selección de vehículos.

Results

A partir de los elementos clave que ocasionan un cambio del sistema de transporte, se desarrollaron cuatro escenarios basados en los extremos de orientación social y política. En este análisis, se observó que tres de dichos escenarios logran superar el umbral del 50% de vehículos eléctricos en el parque automotor. No obstante, al llegar al año 2040, solo uno de estos escenarios había logrado estar cerca de este porcentaje, lo cual se interpreta como la notable demora en el proceso de adopción de esta tecnología cuando las orientaciones social y política evolucionan en direcciones opuestas. Este hallazgo enfoca la importancia crítica de la alineación entre los factores sociales y políticos para propiciar una transición eficiente hacia vehículos eléctricos en el sistema de transporte.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el porcentaje de participación de los vehículos eléctricos en Colombia, según los escenarios propuestos, muestra un rango significativo. En el escenario menos optimista, representado por "Burning House", el porcentaje es del 27.8%, mientras que en el escenario más alentador, "Green Democracy", la participación asciende a un 98.5% para el año 2050.

Conclusions

Los puntos clave para poder pensar en un futuro con una transición del 100% de participación de vehículos eléctricos en Colombia es contemplar una total armonía entre la orientación social y la orientación política tal como se describe en el escenario "Green Democracy", además, se debe realizar un análisis riguroso del comportamiento en el futuro del costo de compra de los vehículos eléctricos, la autonomía y los costos de operación ya que en total, equivalen a un 73.87% del total en los factores de decisión al momento de la compra para un vehículo eléctrico.

Al analizar la transformación en el sistema de transporte en Colombia, se aprecia una gran disminución en las emisiones generadas en el país. No obstante, es fundamental reconocer que esta reducción nunca alcanzará un valor de cero hasta que el sistema de generación eléctrica esté completamente alimentado por fuentes de energía renovable para los vehículos eléctricos y no se hayan reducido a cero los vehículos a combustión ya que son los mayores contribuyentes a la generación de CO₂ en el sector del transporte. La dependencia de fuentes de energía renovable para la recarga de vehículos eléctricos es un paso crucial hacia la obtención de emisiones cercanas a cero en el sector del transporte.

Es relevante indicar que el porcentaje más alto obtenido para el año 2040 es del 48.6%, mostrando que los últimos años contemplados en los escenarios son cruciales para el crecimiento masivo de esta tecnología. Esto sugiere que la aceptación de los vehículos eléctricos tiende a aumentar de manera acelerada en los años finales del periodo analizado.

References

- [1] L. N. Patil *et al.*, "Investigation on different parameters associated with purchase of electric vehicle in India," *Case Stud Transp Policy*, vol. 15, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.cstp.2024.101152.
- [2] REN 21, "RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT," *REN 21*, 2022.
- [3] S. Faisal, B. P. Soni, G. R. Goyal, F. I. Bakhsh, D. Husain, and A. Ahmad, "Reducing the Ecological Footprint and charging cost of electric vehicle charging station using renewable energy based power system," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2023.100398.
- [4] M. A. Nasab, W. K. Al-Shibli, M. Zand, B. Ehsan-maleki, and S. Padmanaban, "Charging management of electric vehicles with the presence of renewable resources," *Renewable Energy Focus*, vol. 48, p. 100536, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ref.2023.100536.
- [5] H. Zhou, Y. Dang, Y. Yang, J. Wang, and S. Yang, "An optimized nonlinear time-varying grey Bernoulli model and its application in forecasting the stock and sales of electric vehicles," *Energy*, vol. 263, p. 125871, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.125871.
- [6] C. Gil Ribeiro and S. Silveira, "The impact of financial incentives on the total cost of ownership of electric light commercial vehicles in EU countries," *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 179, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.tra.2023.103936.
- [7] J. Pasha *et al.*, "Electric vehicle scheduling: State of the art, critical challenges, and future research opportunities," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 38. Elsevier B.V., Mar. 01, 2024. doi: 10.1016/j.jii.2024.100561.
- [8] D. Horak, A. Hainoun, G. Neugebauer, and G. Stoeglehner, "Battery electric vehicle energy demand in urban energy system modeling: A stochastic analysis of added flexibility for home charging and battery swapping stations," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 37, p. 101260, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.segan.2023.101260.
- [9] P. G. Dhawale, V. K. Kamboj, S. K. Bath, M. S. Raboaca, and C. Filote, "Integrating renewable energy and plug-in electric vehicles into security constrained unit commitment for hybrid power systems," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2035–2048, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.01.027.
- [10] E. Lopez-Arboleda, A. T. Sarmiento, and L. M. Cardenas, "Understanding synergies between electric-vehicle market dynamics and sustainability: Case study of Colombia," *J Clean Prod*, vol. 321, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128834.
- [11] M. Torres Pamplona, A. Jaramillo Duque, and J. Ortiz Castrillón, "Vehículos Eléctricos Versus Convencionales en Colombia: Un Análisis Financiero Comparando Los Costos Totales de Propiedad," *Revista Innovación y Desarrollo Sostenible*, vol. 1, no. 2, pp. 36–45, Feb. 2021, doi: 10.47185/27113760.v1n2.26.
- [12] Leonardo Paoli, "Electric Vehicles," IEA. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>
- [13] ces online, "SK Innovation and Kia Motors join forces in latest of several Korean circular battery initiatives," circular energy storage. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.circularenergystorage-online.com/post/sk-innovation-and-kia-motors-join-forces-in-latest-of-several-korean-circular-battery-initiatives>
- [14] International Energy Agency, "Global Supply Chains of EV Batteries," Francia, Jul. 2022. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [15] energy.com, "DOE Awards \$60 Million to Accelerate Advancements in Zero-Emissions Vehicles," energy.gov. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-60-million-accelerate-advancements-zero-emissions-vehicles>
- [16] L. Maybury, P. Corcoran, and L. Cipcigan, "Mathematical modelling of electric vehicle adoption: A systematic literature review," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 107, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103278.
- [17] N. Bañol Arias, S. Hashemi, P. B. Andersen, C. Træholt, and R. Romero, "Assessment of economic benefits for EV owners participating in the primary frequency regulation markets," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 120, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105985.
- [18] G. Zhao and J. Baker, "Effects on environmental impacts of introducing electric vehicle batteries as storage - A case study of the United Kingdom," *Energy Strategy Reviews*, vol. 40, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100819.
- [19] B. D. C. " Blas and M. Quintana, "Modelo de masificación de vehículos eléctricos," Bogotá D.C, 2014.
- [20] D. Xu, W. Pei, and Q. Zhang, "Optimal Planning of Electric Vehicle Charging Stations Considering User Satisfaction and Charging Convenience," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15145027.
- [21] M. S. Mastoi *et al.*, "An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends," *Energy Reports*, vol. 8. Elsevier Ltd, pp. 11504–11529, Nov. 01, 2022. doi: 10.1016/j.egy.2022.09.011.
- [22] P. Skaloumpakas *et al.*, "A user-friendly electric vehicle reallocation solution for uniformly utilized charging stations," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, p. 101266, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101266.
- [23] J. Engelhardt, J. M. Zepter, T. Gabderakhmanova, and M. Marinelli, "Energy management of a multi-battery system for renewable-based high power EV charging," *eTransportation*, vol. 14, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100198.
- [24] J. Zhong, N. Yang, X. Zhang, and J. Liu, "A fast-charging navigation strategy for electric vehicles considering user time utility differences," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 30, p. 100646, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100646.
- [25] J. Hagman and J. J. Stier, "Selling electric vehicles: Experiences from vehicle salespeople in Sweden," *Research in Transportation Business and Management*, 2022, doi: 10.1016/j.rtbm.2022.100882.
- [26] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nat Clim Chang*, vol. 5, no. 4, pp. 329–332, Mar. 2015, doi: 10.1038/nclimate2564.
- [27] Annie Lee, "Alza en materias primas impulsa mayores precios de baterías para autos eléctricos," Bloomberg. Accessed: Oct. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.bloomberglinea.com/2021/11/04/alza-en-materias-primas-impulsa-mayores-precios-de-baterias-para-autos-electricos/>
- [28] H. Aouzellag, K. Ghedamsi, and D. Aouzellag, "Energy management and fault tolerant control strategies for fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicles to enhance autonomy, efficiency and life time of the fuel cell system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 22. Elsevier Ltd, pp. 7204–7213, Jun. 15, 2015. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.132.
- [29] LowCarbonPower, "Electricidad en Colombia en 2022." [Online]. Available: <https://lowcarbonpower.org/es/region/Colombia#:~:text=EI%20promedio%20de%20las%20emisiones,159.9%20to%20164.2%20gCO2eq%20%20kWh.%5CIA%3%B1o>
- [30] G. M. L. S. E. Joya Leidy, "Factores de decisión que influyen en la adquisición de vehículos eléctricos en Bogotá," *Universidad EAN*, Mar. 2023.