UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación De Desempeño De Vehículos Eléctricos En San Andrés Isla.

Yilia Anita Davis Manuel

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Ciudad, Colombia
2024

Evaluación De Desempeño De Vehículos Eléctricos En San Andrés Isla.

Yilia Anita Davis Manuel

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D., Doctor, Electrónico Javier Alveiro Rosero García

Línea de Investigación:

Electrical Machines Y Drives, EMD Grupo de Investigación

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2024

Dedicado a mi mama, a mis hermanos, a mi familia, a mis jefes, mis amigos y mis compañeros de trabajo, quienes fueron los que me dieron mucha motivación para comenzar y culminar esta etapa importante de mis estudios, a la universidad Nacional de Colombia por aceptarme y abrirme las puertas para ampliar mis conocimientos profesionales en esta maestría.

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad"

Albert Einstein

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

_____

Yilia Anita Davis Manuel

Fecha 03/12/2024

Agradecimientos

Primero que todo darle gracias a nuestro señor Jesucristo por permitirme tener vida y salud para lograr culminar esta maestría, a mis padres especialmente a mi madre Anita Manuel por creer en mí, a pesar de varias adversidades, fue una oportunidad muy satisfactoria, agradezco a todos los profesores de la Universidad Nacional de Colombia principalmente al profesor Javier Rosero García y al ingeniero Edward Jay Rueda por siempre estar ahí apoyándome y brindarme todo su conocimiento, dedicación, animo, comprensión y el apoyo que siempre me brindaron durante toda la etapa de esta preparación profesional.

Resumen

Evaluación De Desempeño De Vehículos Eléctricos En San Andrés Isla.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño energético, el impacto económico y los beneficios ambientales de los vehículos eléctricos (VE) en comparación con los vehículos convencionales (VC) en San Andrés Isla. La importancia de esta investigación radica en la urgencia de implementar soluciones de movilidad sostenibles en un entorno insular, donde la eficiencia energética y la reducción de emisiones son esenciales para preservar el ecosistema local y mitigar los efectos del cambio climático.

En un contexto global marcado por la preocupación por el cambio climático y la contaminación, este análisis proporciona información fundamental para respaldar decisiones estratégicas en políticas de transporte y energía. La adopción de vehículos eléctricos representa un paso decisivo hacia una movilidad más eficiente y sostenible, contribuyendo al bienestar ambiental y social de la isla.

El objetivo general de esta investigación es determinar cómo la infraestructura y el uso de vehículos eléctricos pueden influir en la sostenibilidad energética, económica y ambiental de San Andrés. Para ello, se plantearon objetivos específicos: evaluar la eficiencia energética de los VE frente a los VC, analizar el impacto económico de su adopción mediante indicadores de costos de operación y mantenimiento, y cuantificar la reducción de emisiones contaminantes derivadas de su uso.

La metodología empleada fue cuantitativa, basada en la recopilación directa de datos mediante mediciones reales de los vehículos en estudio. Se registraron trayectorias comparables para ambos tipos de vehículos, lo que permitió evaluar sus consumos energéticos y desempeños de manera precisa. Este enfoque garantizó resultados sólidos y objetivos al contrastar los vehículos eléctricos y convencionales en condiciones controladas.

Entre los hallazgos más relevantes, se destaca que los VE presentan un desempeño energético significativamente superior, con una conversión de energía

almacenada en movimiento superior al 90%, frente al rango de 17-21% en los VC. Este resultado evidencia la capacidad de los VE para aprovechar la energía de manera mucho más eficiente, lo que los convierte en una alternativa ideal para promover una movilidad sostenible en San Andrés.

Desde el punto de vista económico, aunque los costos iniciales de adquisición de los VE son más elevados, el análisis demuestra que, a largo plazo, resultan más rentables debido a sus menores costos operativos y de mantenimiento. Estos beneficios financieros consolidan a los VE como una opción económicamente viable para los habitantes de la isla. Asimismo, se identificó una significativa reducción en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), con una disminución acumulada de aproximadamente 589.7 toneladas en un periodo de 10 años gracias a la adopción de esta tecnología. Este impacto positivo en la calidad del aire contribuye directamente a un entorno más saludable y sostenible.

La implementación de infraestructura para vehículos eléctricos en San Andrés surge como una estrategia altamente efectiva desde las perspectivas económica, energética y ambiental. Los VE no solo destacan por su eficiencia y capacidad para reducir emisiones, sino que también representan un avance hacia un modelo de movilidad más resiliente y comprometido con la sostenibilidad de la isla.

Se recomienda continuar con la expansión de la infraestructura de carga, fomentar políticas que incentiven la adopción de vehículos eléctricos y realizar investigaciones adicionales que aborden el ciclo de vida completo de los VE, incluyendo el reciclaje de baterías. Estas acciones contribuirán al desarrollo sostenible de San Andrés y a la consolidación de los beneficios asociados a la transición hacia una movilidad eléctrica.

Palabras clave: Vehículos eléctricos, desempeño energético, impacto ambiental, San Andrés, sostenibilidad.

Abtract

Performance Evaluation of Electric Vehicles on San Andrés Island.

This study aims to evaluate the energy performance, economic impact, and environmental benefits of electric vehicles (EVs) compared to conventional vehicles (CVs) in San Andrés Island. The significance of this research lies in the urgent need to implement sustainable mobility solutions in an insular environment, where energy efficiency and emission reduction are critical for preserving the local ecosystem and mitigating climate change effects.

In a global context marked by growing concerns about climate change and pollution, this analysis provides essential data to support strategic decisions in transportation and energy policies. The adoption of EVs represents a crucial step towards achieving more efficient and sustainable mobility, contributing to the environmental and social well-being of the island.

The main objective of this study is to determine how EV infrastructure and usage can influence the energy, economic, and environmental sustainability of San Andrés. Specific objectives include evaluating the energy efficiency of EVs compared to CVs, analyzing the economic impact of EV adoption through indicators such as operating and maintenance costs, and quantifying emission reductions achieved through their use.

The methodology adopted was quantitative, relying on direct data collection through real-world performance measurements of the vehicles under study. Comparable trajectories were established for both EVs and CVs, enabling precise assessments of energy consumption and performance. This approach ensured robust and objective results by analyzing both vehicle types under controlled conditions.

Key findings indicate that EVs demonstrate significantly superior energy performance, achieving an energy-to-motion conversion efficiency exceeding 90%, compared to the 17-21% range observed in CVs. This result underscores the ability of EVs to utilize energy far more effectively, making them an optimal alternative for fostering sustainable mobility in San Andrés.

From an economic perspective, although the initial purchase costs of EVs are higher, the analysis reveals that they become more cost-effective over time due to their lower operating and maintenance costs. These financial advantages position EVs as a viable and attractive option for the island’s residents. Additionally, a significant reduction in nitrogen oxide (NOx) emissions was identified, with an

estimated cumulative decrease of approximately 589.7 tons over a 10-year period. This positive impact on air quality directly contributes to a healthier and more sustainable environment.

The deployment of EV infrastructure in San Andrés emerges as a highly effective strategy from economic, energy, and environmental standpoints. EVs not only excel in efficiency and emission reduction but also represent a critical step towards a resilient and sustainable mobility model tailored to the island's unique needs.

It is recommended to continue expanding charging infrastructure, promote policies that incentivize EV adoption, and conduct further research into the full lifecycle of EVs, including battery recycling. These measures will support the sustainable development of San Andrés and enhance the benefits associated with transitioning to electric mobility.

Keywords: Electric vehicles, energy performance, environmental impact, San Andrés, sustainability.

Lista de abreviaturas

1. Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
km	Longitud
kWh	Medida de energía
MWh	Medida de energía
CO_2	Dióxido de carbono
gal	Medida de capacidad para líquidos
Eq	Equivalente en área o volumen con distinta forma
T	Unidad de peso equivalente a 1,000 kg
MW	Equivalente a un millón de vatios
Wh	Unidad de energía en vatios-hora
Ah	Unidad de carga eléctrica en amperios-hora
NOx	Óxidos de nitrógeno

2. Subíndices

Subíndice	Término
10	Partículas de diámetro menor a 10 μm
2	Estado de oxidación del oxígeno
x	Oxidación del nitrógeno
el	Relativo a componentes eléctricos
ch	Fase de carga
dis	Fase de descarga

3. Abreviaturas

Abreviatura	Término
EV	Vehículo eléctrico
FV	Fotovoltaicos
GPS	Global Positioning System
BMS	Sistema de Gestión de Baterías
DoD	Profundidad de descarga
SOC	Estado de carga
SOH	Estado de salud
PV	Fotovoltaico
ESS	Sistema de almacenamiento de energía
HVAC	Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado

Contenido

4. Marco teórico 21
4.1 Conceptos Fundamentales 21
4.1.1 Vehículos Eléctricos (VE) 22
4.1.2 Vehículos híbridos 24
4.1.3 Vehículos Convencionales (VC) 29
4.2 Eficiencia Energética 30
4.2.1 Comparación de Eficiencia 31
4.2.2 Consumo de Energía 32
4.3 Impacto Ambiental 33
4.3.1 Emisiones de CO2 34
4.3.2 Ciclo de Vida 34
4.4 Costos Operativos 37
4.4.1 Mantenimiento y Durabilidad 37
4.4.2 Costos de Energía 38
4.5 Especificaciones Técnicas del Vehículo Eléctrico 39
4.5.1 Motor Eléctrico 39
4.5.2 Batería 40
4.5.3 Autonomía 40
4.5.4 Consumo Energético y transmisión 41
4.5.5 Dimensiones y Peso 41
4.5.6 Sistema de Carga 41
4.5.7 Seguridad y Tecnología 42
4.6 Infraestructura de Carga 42
4.7 Capex y Opex 43
4.8 Capex (Gastos de Capital) 43
4.9 Opex (Gastos Operativos) 44
4.10 Normatividad y Reglamentación 45
4.10.1 Ley 1964 de 2019: Ley de Movilidad Eléctrica 45
4.10.2 Resoluciones del Ministerio de Minas y Energía 46
4.10.3 Requisitos para Registro y Licencias 46
4.10.4 Políticas Locales 46
4.10.5 Antecedentes 47

5. Estado del arte 50
5.1 Estado del Arte 50
5.1.1 Tecnologías de Vehículos Eléctricos 51
5.1.2 Vehículos eléctricos en Colombia y en San Andrés 57
5.1.3 Trabajos e investigaciones 58

6. Metodología de evaluación del desempeño vehículos eléctricos 63
6.1 Diseño de la Investigación 65
6.1.1 Tipo de Investigación: Cuantitativa con Componentes Cualitativos 65
6.1.2 Enfoque Metodológico: Descriptivo y Comparativo 65
6.2 Selección de la Muestra 65

6.2.1 Criterios de Selección 65
6.2.2 Tamaño de la Muestra 66
6.2.3 Procedimiento de Muestreo 66
6.3 Recolección de Datos 66
6.3.1 Fuentes de Datos 67
6.3.2 Instrumentos de Recolección 67
6.3.3 Procedimiento de Recolección 68
6.4 Análisis de Datos 68
6.4.1 Preparación de los Datos 68
6.4.2 Análisis Estadístico 69
6.5 Evaluación del Desempeño Energético 69
6.5.1 Indicadores 69
6.5.2 Comparación 69
6.6 Evaluación del Impacto Ambiental y Económico 69
6.6.1 Emisiones 69
6.6.2 Costos 70

7. Evaluación de desempeño energético 71
7.1 Especificaciones técnicas de vehículos y GPS 71
7.1.1 GPS VBOX Sport VBS01-V3 71
7.1.2 Vehículo eléctrico YUAN EV 400 72
7.2 Evaluación de ciclos de conducción por vía 74
7.2.1 Recorridos EEDAS - planta de generación Schooner Bight 74
7.2.2 Recorridos EEDAS - Subestación eléctrica del Bight 81
7.3 cálculo de precios económico por consumo en combustibles vs energía 88
7.3.1 Calculo monetario de energía y combustible por rutas. 88
7.3.2 Capex y Opex 94

8. Evaluación de desempeño ambiental 117
8.1 Emisiones $\boldsymbol{CO2}$, $\boldsymbol{NOx}$ y $\boldsymbol{PM10}$ 118
8.1.1 Emisiones de $\boldsymbol{CO2}$ por cambio de vehículos convencionales a EV. 118
8.2 $\boldsymbol{CO2}$ emitidos a la atmosfera por cargar EV al sistema de distribución local a base de Diesel 126
8.3 Generación de dióxido de carbono a 1 y 10 años por inyectar energía con proyectos solares o eólicos a la red de distribución local a base de Diesel para cargar un EV. 128
8.4 Reducción del Óxido de nitrógeno (NOx) y de PM10 132

9. Conclusiones 138

10. Bibliografía 140

Lista de figuras

Figura 1. BEV vehículo eléctrico a baterías. Fuente: (Ministerio de Energía, 2024)..... 22
Figura 2. FCEV vehículo con celda de hidrógeno. Fuente: (Ministerio de Energía, 2024). 23
Figura 3. PHEV vehículo híbrido enchufable. Fuente: (Ministerio de Energía, 2024)..... 23
Figura 4. Recarga de vehículo con celda de combustible de hidrógeno. Fuente: (Ministerio de Energía de Chile, 2024). 38
Figura 5. Tesla actualiza el manual del propietario de la versión americana del Model Y con una indicación expresa a la batería estructural formada por celdas 4680. Fuente: (García, 2022) 51
Figura 6. Arquitectura de plataformas. Fuente: (newsroom, 2023). 56
Figura 7. Summary of GPD based drive cycles determination. Fuente: (Anand, Rekha, & Chirag, 2005) 59
Figura 8. Data acquisition setup schematic. Fuente: (Niemeier, 2015). 60
Figura 9. Sensor de velocidad de rueda inductivo y objetivo. Fuente: (Houh Lee, Gitano, Seng Eu, & Mohd Khalil, 2010)..... 60
Figura 10. Metodología detallada propuesta donde se explica los procesos de la toma de decisiones. Fuente: Propia. 64
Figura 11. Toma de datos y Análisis y resultados. Fuente: Propia..... 67
Figura 12. Análisis de los parámetros energéticos y ambientales para la obtención de los resultados. Fuente: Propia. 68
Figura 13. GPS Vbox sport. Fuente: (vboxmotorsport, 2024) 72
Figura 14. Configuración general del vehículo eléctrico YUAN EV 400. Fuente: (Motorysa, 2024)..... 73
Figura 15. Primer recorrido establecido, desde la zona céntrica hasta la circunvalar. Fuente: Propia..... 75
Figura 16. Ciclo de conducción de la ruta EEDAS (centro) hacia SOPESA (Schooner Bight). Fuente: Propia..... 77
Figura 17. Histograma de velocidades. Fuente: Propia. 79
Figura 18. Aceleración lateral por recorrido. Fuente: Propia..... 79
Figura 19. Porcentaje de descarga de la batería por cada viaje. Fuente: Propia. 81
Figura 20. Primer recorrido establecido, desde la zona céntrica hasta la vía San Luis. Fuente: Propia..... 83
Figura 21. Ciclo de conducción de la ruta EEDAS (centro) hacia SOPESA (vía San Luis). Fuente: Propia..... 85
Figura 22. Aceleración lateral por recorrido. Fuente: Propia..... 85
Figura 23. Porcentaje de descarga de la batería por cada viaje. Fuente: Propia. 87

Figura 24. Comparación de Ganancias Anuales del CDT y OPEX del Vehículo Convencional. Fuente: Propia. 100
Figura 26. Costo por consumo anual para las dos tipologías de vehículos. Fuente: Propia. 106
Figura 27. Número de ciclos vs capacidad en mAh. Fuente: (Battery University, 2023).108
Figura 28. Consumo de energía y combustible del 2023 en San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Fuente: Propia con la informacion recibida de la interventoria ASE que realiza EEDAS S.A. E.S.P. 120
Figura 29. Emisiones de kg*CO2 por la generación de energía eléctrica en San Andrés, Providencia y Santa Catalina para el 2023. Fuente: Propia..... 121
Figura 30. Emisiones de CO2/año del parque automor de las islas. Fuente: Propia. 122
Figura 31. Reducción de emisiones de CO2 por cambiar el 20% de vehículos a Diesel a EV hasta el año 10. Fuente: Propia..... 124
Figura 32. Reducción de emisiones de CO2 por cambiar el 70% de vehículos a Diesel a EV hasta el año 10. Fuente: Propia..... 125
Figura 33. Reducción de emisiones vs emisiones de vehículos de carga pesada. Fuente: Propia. 126
Figura 34. Reducción de emisiones por cargar un vehículo con la red de distribución pleno y la red con inyección de energías renovables. Fuente: Propia. 129
Figura 35: Emisiones de kg*CO2 generadas por cargar vehículos eléctricos en el sistema de distribución local a base de Diesel pleno hasta el año 10. Fuente: Propia. 130
Figura 36: Disminución de emisiones de kg*CO2eq cargar vehículos eléctricos en la red de distribución local base de Diesel con inyección de energía solares y/o eólicos. Fuente: Propia. 131
Figura 37. Diferencia de emisiones kg*CO2 por cargar vehículos con diferentes en la red convencional. Fuente: Propia. 132
Figura 38. Reducción de Óxido de Nitrógeno NOX por inyectar energía a la red con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia. 135
Figura 39. Reducción de material particulado por inyectar energía a la red con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia. 137

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación del ciclo de vida. Fuente: Propia. 35
Tabla 2. Comparativa Resumida. Fuente: (HYUNDAI, 2024). 39
Tabla 3. Comparativa Resumida. Fuente: Propia. 45
Tabla 4. Datos generales obtenidos del trayecto desde EEDAS hasta Schooner Bight. Fuente: Propia. 74
Tabla 5. Organización de las velocidades por segundos calcular la mediana. Fuente: Propia. 76
Tabla 6. Información recopilada de los recorridos. Fuente: Propia. 80
Tabla 7. Datos generales obtenidos del trayecto desde EEDAS hasta vía San Luis. Fuente: Propia. 82
Tabla 8. Organización de las velocidades por segundos calcular la mediana de la trayectoria EEDAS-SUBESTACIÓN DEL BIGHT. Fuente: Propia. 84
Tabla 9. Información recopilada de los recorridos. Fuente: Propia. 86
Tabla 10. Precios de combustible del mes de mayo de las cuatro gasolineras de la isla. 88
Tabla 11. Tarifas de energía SOPESA SA del mes de mayo del 2024. Fuente: (sopesa, 2024) 89
Tabla 12. Distancias mínimas, medias y maxima por ruta. 90
Tabla 13. Precio del combustible por kilómetro recorrido. Fuente: Propia. 91
Tabla 14. Costo monetario de combustible mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS-Schooner Bight. Fuente: Propia. 91
Tabla 15. Costo monetario de combustible mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS-Subestación SOPESA (Vía San Luis). Fuente: Propia. 93
Tabla 16. Costo monetario de energía mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS-Schooner Bight. Fuente: Propia. 93
Tabla 17. Costo monetario de energía mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS-Subestación SOPESA (Vía San Luis). Fuente: Propia. 94
Tabla 18. inversiones de capital para la compra del vehículo eléctrico y el vehículo a combustión. Fuente: Propia. 95
Tabla 19. Consumo energético por 20.000 km/anuales de los dos tipos de vehículos. Fuente: Propia. 96
Tabla 20. Ganancias Anuales del CDT y OPEX del Vehículo Convencional. Fuente: Propia. 98
Tabla 21. Capital y Ganancias. Fuente: Propia. 99

Tabla 22. Consumo de combustibles por 20.000 km/anuales de los dos tipos de vehículos. Fuente: Propia. 104
Tabla 23. Costos en cambio de baterías por ciclos de carga. Fuente: Propia. 107
Tabla 24. Mantenimientos generales de las dos tipologías de vehículos. Fuente: Propia. 112
Tabla 25. Criterio de comparación entre VC y VE. Fuente: Propia. 113
Tabla 26. Mantenimientos generales de las dos tipologías de vehículos. Fuente: Propia. 113
Tabla 27. Costos nivelados por 20.000 kilómetros. Fuente: Propia. 114
Tabla 28. Emisiones de dióxido de carbono CO2 por el consumo de combustible de un vehículo Diesel en el año 1 y 10. Fuente: Propia. 119
Tabla 29**:** Emisiones de dióxido de carbono CO2 por el consumo de combustible de un vehículo gasolina en el año 1 y 10. 119
Tabla 30. Cálculo aproximado de emisiones de dióxido de carbono del parque automotor con referencia de 500 galones de combustible anual. Fuente: Propia. 122
Tabla 31. Cambio del 20% de vehículos Diesel por año. Fuente: Propia. 123
Tabla 32. Cambio del 70% de vehículos a gasolina por año. Fuente: Propia. 124
Tabla 33. Generación de Dióxido de Carbono por cargar un vehículo eléctrico con el sistema de distribución local a base de Diesel. Fuente: Propia. 127
Tabla 34. Generación de Dióxido de Carbono por cargar un vehículo eléctrico en el sistema de distribución local con inyección de energías solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia. 128
Tabla 35. Factores de emisión para embarcaciones con potencia superior a los 1kW para plantas con funcionamiento de Diesel Marino. Fuente: (VOWTAP, 2014). 132
Tabla 36. Energía renovable requerida por años para la carga de los vehículos eléctricos en la red de distribución local de SOPESA S.A. Fuente: Propia. 133
Tabla 37. Óxido de nitrógeno NOx no emitido a la atmosfera por la carga de los vehículos eléctricos en la red de energía convencional de SOPESA S.A. Fuente: Propia. 134
Tabla 38. Reducción de material particulado $PM10$ por inyectar energía a la red con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia. 136

4. Marco teórico

La evaluación del desempeño energético de los vehículos eléctricos (VE) en comparación con los vehículos convencionales de combustión interna (VCI) es un tema de creciente interés, especialmente en regiones insulares como San Andrés, Isla. Este análisis se centra en varios aspectos clave que influyen en la eficiencia energética, el impacto ambiental y los costos operativos de ambos tipos de vehículos.

La eficiencia energética es un factor crucial en la evaluación de los vehículos. Los VE son conocidos por su alta eficiencia debido a la conversión directa de electricidad en movimiento, con pérdidas mínimas por fricción y calor. En contraste, los VCI tienen una eficiencia menor debido a las pérdidas de energía inherentes a la combustión de combustibles fósiles.

El impacto ambiental de los vehículos es otro aspecto fundamental. Los VE no emiten gases de escape, lo que contribuye a una mejor calidad del aire y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero[2]. Por otro lado, los VCI emiten una cantidad significativa de contaminantes, lo que afecta negativamente al medio ambiente y a la salud pública (Sanz Arniz, 2015).

Los costos operativos de los VE tienden a ser más bajos en comparación con los VCI. Esto se debe a la menor necesidad de mantenimiento y al menor costo de la electricidad en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, la infraestructura de carga y la disponibilidad de estaciones de servicio son factores que pueden influir en la viabilidad de los VE en regiones específicas como San Andrés.

La evaluación del desempeño energético de los VE frente a los VCI en San Andrés debe considerar la eficiencia energética, el impacto ambiental y los costos operativos. Este análisis proporciona una base para tomar decisiones informadas sobre la adopción de tecnologías de transporte más sostenibles y eficientes en la isla.

4.1 Conceptos Fundamentales

La evaluación del desempeño energético de VE frente a vehículos convencionales (VC) es un tema de creciente relevancia en el contexto actual, donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son prioridades en el desarrollo del transporte. Este análisis se fundamenta en

conceptos clave que permiten comprender las diferencias y similitudes entre estos dos tipos de vehículos, así como su impacto en el medio ambiente y la economía.

4.1.1 Vehículos Eléctricos (VE)

Los VE representan una innovación significativa en el ámbito del transporte, ofreciendo una alternativa más sostenible y eficiente en comparación con los VC. A medida que la preocupación por el cambio climático y la contaminación ambiental aumenta, la adopción de tecnologías de movilidad eléctrica se vuelve cada vez más relevante.

Un vehículo eléctrico es un automóvil que utiliza uno o más motores eléctricos para su propulsión, en lugar de un motor de combustión interna. Estos vehículos funcionan gracias a la energía almacenada en baterías recargables, que se cargan conectándolas a una fuente de electricidad. La conversión de energía eléctrica a energía mecánica permite que el vehículo se desplace sin emitir contaminantes durante su operación.

Existen varios tipos de vehículos eléctricos, cada uno con características y funcionalidades específicas:

Vehículos Eléctricos de Batería (BEV): Funcionan exclusivamente con energía eléctrica almacenada en baterías. No tienen motor de combustión interna y son conocidos por su cero emisiones durante el uso (Ministerio de Energía, 2024).

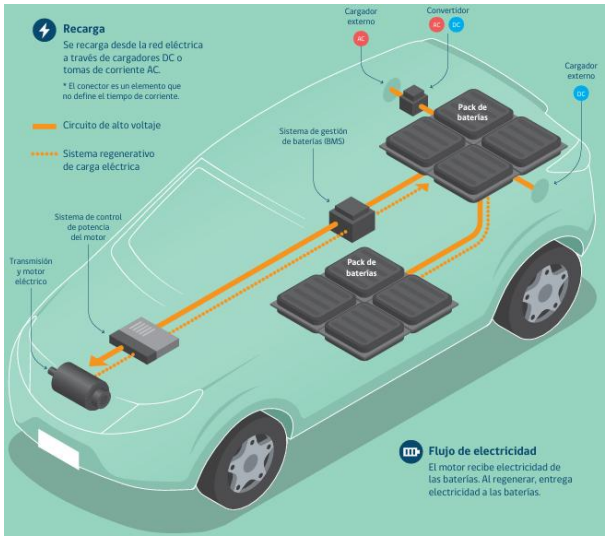


Figura 1. BEV vehículo eléctrico a baterías. Fuente: (Ministerio de Energía, 2024).

Vehículos Eléctricos de Autonomía Extendida (REEV): Combinan un motor eléctrico con un generador de combustión interna que solo se utiliza para cargar las baterías, permitiendo así una mayor autonomía (LugEnergy, 2024).

Vehículos Eléctricos de Pila de Combustible (FCEV): Utilizan hidrógeno como fuente de energía, generando electricidad a través de una reacción química en una celda de

combustible. Estos vehículos emiten solo vapor de agua como subproducto (Electric For All, 2024).

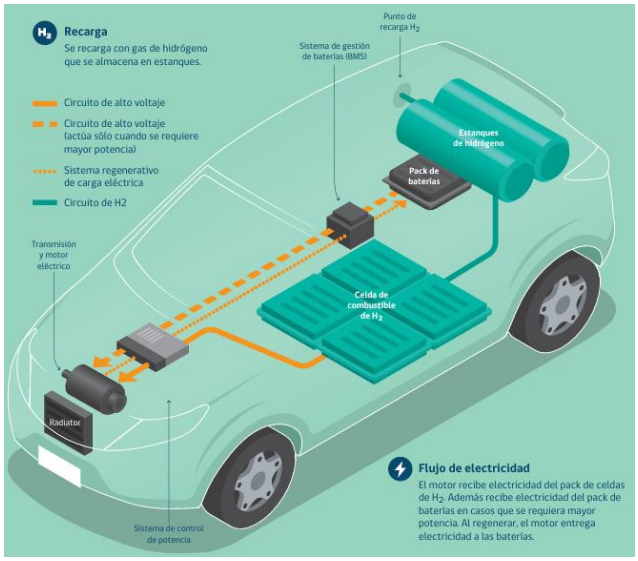


Figura 2. FCEV vehículo con celda de hidrógeno. Fuente: (Ministerio de Energía, 2024).

Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV): Combinan un motor eléctrico y un motor de combustión interna, permitiendo que el vehículo funcione en modo eléctrico o utilizando gasolina/Diesel (LugEnergy, 2024).

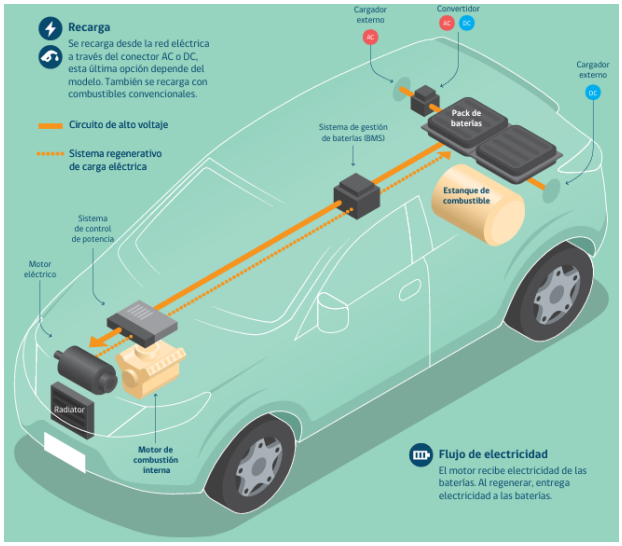


Figura 3. PHEV vehículo híbrido enchufable. Fuente: (Ministerio de Energía, 2024).

A nivel general, los componentes clave de un vehículo eléctrico incluyen (NHTSA, 2024):

Motor Eléctrico: Convierte la energía eléctrica en energía mecánica para impulsar el vehículo.

Batería: Almacena la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del motor.

Sistema de Gestión de Baterías (BMS): Controla el estado y la carga de las baterías para optimizar su rendimiento y vida útil.

Cargador: Permite recargar las baterías conectándolas a una fuente eléctrica.

Transmisión: Transfiere la potencia del motor a las ruedas del vehículo.

Sistema Regenerativo: Recupera parte de la energía durante la frenada y la devuelve a las baterías.

Además de los aspectos técnicos, hay otros factores importantes a considerar en la evaluación de vehículos eléctricos (LugEnergy, 2024):

Eficiencia Energética: Los VE son generalmente más eficientes que los VC, convirtiendo un mayor porcentaje de energía en movimiento.

Impacto Ambiental: Los VE contribuyen significativamente a la reducción de emisiones contaminantes, lo cual es vital para combatir el cambio climático.

Costos Operativos: Aunque el costo inicial puede ser más alto, los VE suelen tener menores costos operativos debido a su eficiencia energética y menores necesidades de mantenimiento.

Infraestructura de Carga: La disponibilidad de estaciones de carga es crucial para facilitar la adopción masiva de vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos ofrecen una alternativa viable y sostenible al transporte convencional, con múltiples beneficios tanto económicos como ambientales. A medida que avanza la tecnología y se expande la infraestructura necesaria, es probable que su adopción continúe creciendo en todo el mundo.

4.1.2 Vehículos híbridos

Los vehículos eléctricos y híbridos representan una evolución significativa en la movilidad sostenible, ofreciendo alternativas a los vehículos de combustión interna. El Vehículo Eléctrico Híbrido (HEV) son una combinación de un motor de combustión interna y uno o más motores eléctricos. Este diseño permite que los HEV aprovechen las ventajas de ambos tipos de motorización, mejorando la eficiencia del combustible y reduciendo las emisiones contaminantes (Torre & Mendoza, 2013). Características Principales:

- Sistema de Propulsión Combinado: Los HEV utilizan tanto un motor de combustión (generalmente de gasolina) como un motor eléctrico. Esto permite que el vehículo funcione en diferentes modos, dependiendo de las condiciones de conducción (Chele, 2017).

- Batería Recargable: La batería del motor eléctrico se recarga automáticamente mediante el motor de combustión y mediante la recuperación de energía durante la frenada (frenado regenerativo) (Giraldo, 2022).
- No Conectables: A diferencia de los vehículos híbridos enchufables (PHEV), los HEV no pueden ser conectados a una fuente de energía externa para recargar sus baterías (Auto Crash, 2023).

El funcionamiento se da:

1. Arranque y Aceleración: En situaciones como el arranque o la aceleración inicial, el motor eléctrico puede funcionar solo o en conjunto con el motor de combustión, lo que proporciona un impulso adicional y reduce el consumo de combustible.
2. Frenado Regenerativo: Durante la frenada, el sistema recupera parte de la energía que normalmente se perdería, convirtiéndola en electricidad para recargar la batería.
3. Modo Híbrido: Los HEV pueden alternar entre los dos motores según sea necesario. Por ejemplo, pueden utilizar el motor eléctrico a bajas velocidades y el motor de combustión a velocidades más altas o durante aceleraciones fuertes.

Los Vehículos Eléctricos Híbridos (HEV) son más eficientes que los vehículos convencionales debido a su capacidad para utilizar energía eléctrica en lugar de depender únicamente del combustible fósil. Esto resulta en un mejor aprovechamiento de la energía y una menor emisión de gases contaminantes. Al combinar motores eléctricos y de combustión, los HEV emiten menos gases contaminantes en comparación con los vehículos que solo utilizan motores de combustión interna. Esto contribuye significativamente a la mejora de la calidad del aire y a la reducción del impacto ambiental. La utilización de energía eléctrica durante ciertas fases de la conducción permite a los HEV reducir el consumo total de combustible. Esto no solo disminuye la dependencia de combustibles fósiles, sino que también ofrece un alivio económico a los usuarios.

La capacidad del motor eléctrico en los HEV es limitada, lo que significa que no pueden funcionar exclusivamente en modo eléctrico durante largos períodos. En general, la autonomía eléctrica es muy corta, variando entre 1 y 3 kilómetros. Aunque los HEV ofrecen beneficios a largo plazo en términos de ahorro de combustible, su costo inicial es más alto en comparación con los vehículos convencionales. Esto puede representar una barrera económica para algunos usuarios al momento de la adquisición.

Los vehículos eléctricos híbridos (HEV) representan una opción intermedia entre los vehículos convencionales y los totalmente eléctricos. Su capacidad para combinar dos fuentes de energía permite una conducción más eficiente y menos contaminante. Sin embargo, su autonomía eléctrica limitada y costo inicial son factores por considerar al momento de elegir este tipo de vehículo.

Vehículo Híbrido Enchufable (PHEV), es una combinación de un motor de combustión interna y un motor eléctrico, con la capacidad de conectarse a una fuente de energía externa para recargar sus baterías. Esta tecnología ofrece una solución intermedia entre los vehículos eléctricos puros y los vehículos convencionales, permitiendo una mayor flexibilidad en el uso diario (Fang, y otros, 2019).

Los PHEV están diseñados para funcionar principalmente en modo eléctrico durante distancias cortas, lo que permite realizar trayectos urbanos con cero emisiones. Cuando la batería se agota, el vehículo puede cambiar automáticamente al motor de combustión para continuar el viaje sin interrupciones (Fang, y otros, 2019). Esto proporciona a los usuarios la tranquilidad de no depender exclusivamente de la infraestructura de carga eléctrica. Características Principales (Colcha Carlosama, Caiza Quishpe, & Pineda Maigua, 2022):

- Carga Externa: Los PHEV pueden ser enchufados a una toma de corriente para recargar la batería, lo que permite aprovechar tarifas eléctricas más bajas durante la noche y maximizar el uso del modo eléctrico.
- Modo Totalmente Eléctrico: Estos vehículos pueden operar en modo totalmente eléctrico durante distancias que generalmente oscilan entre 30 y 80 km, dependiendo del modelo. Esto es ideal para desplazamientos diarios sin emisiones contaminantes.
- Versatilidad: Ofrecen flexibilidad al usuario, permitiendo realizar trayectos cortos sin emisiones y utilizar el motor de combustión para viajes más largos, lo que elimina la "ansiedad por la autonomía" que puede experimentar un conductor de un vehículo eléctrico puro (HYUNDAI, 2024).

Los PHEV funcionan mediante un sistema de propulsión que incluye (audi, 2024):

1. Motor de Combustión Interna: Generalmente alimentado por gasolina, este motor se activa cuando la batería se agota o cuando se requiere más potencia.
2. Motor Eléctrico: Proporciona energía para el funcionamiento en modo eléctrico y ayuda a mejorar la eficiencia general del vehículo.

3. Batería Recargable: Almacena energía eléctrica y se recarga a través de un enchufe o mediante el frenado regenerativo.

Los PHEV pueden operar en tres modos diferentes:

- Solo con el motor eléctrico.
- Solo con el motor de combustión interna.
- Combinando ambos motores para maximizar la eficiencia.

Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida (EREV) son una innovadora solución en la movilidad sostenible. Estos vehículos funcionan principalmente como vehículos eléctricos de batería (BEV), pero incluyen un motor de combustión interna que actúa como generador para recargar la batería cuando es necesario (Alvarez Gomez & Burbano Celi, 2023). Esta combinación permite a los EREV ofrecer los beneficios de un vehículo eléctrico con la tranquilidad adicional de un rango extendido gracias al generador.

Los EREV están diseñados para operar principalmente en modo eléctrico, utilizando energía almacenada en la batería. Cuando la batería se agota, el motor de combustión se activa para generar electricidad, lo que extiende la autonomía del vehículo (Díez González, 2019). Características Principales:

- Modo Eléctrico Principal: Los EREV operan principalmente en modo eléctrico, utilizando la energía almacenada en la batería para propulsarse, lo que resulta en cero emisiones durante su uso normal.
- Generador Auxiliar: El motor de combustión se activa solo cuando la batería se agota, generando electricidad para alimentar el motor eléctrico y, en algunos casos, recargar la batería mientras se conduce.
- Eficiencia y Comodidad: Proporcionan los beneficios de un vehículo eléctrico con la tranquilidad adicional de un rango extendido gracias al generador, lo que permite realizar viajes más largos sin necesidad de recargas frecuentes.

Los vehículos eléctricos de autonomía extendida (EREV) representan una opción atractiva para quienes buscan combinar las ventajas de los vehículos eléctricos con la flexibilidad de los motores de combustión interna. Su capacidad para operar en modo totalmente eléctrico durante distancias cortas, junto con su versatilidad para viajes más largos, los convierte en una opción viable para una movilidad más sostenible.

Vehículo Eléctrico de Hidrógeno (FCEV) utilizan pilas de combustible que convierten hidrógeno en electricidad, emitiendo solo vapor de agua como residuo. Esta tecnología representa una opción atractiva para reducir las emisiones contaminantes y depender menos de los combustibles fósiles.

Los FCEV funcionan mediante un proceso electroquímico en el que el hidrógeno se combina con oxígeno del aire en una celda de combustible para producir electricidad. Esta electricidad es utilizada para alimentar un motor eléctrico, lo que permite que el vehículo se desplace.

Características Principales

- Cero Emisiones Contaminantes: La única emisión de un FCEV es vapor de agua, lo que los hace muy atractivos desde el punto de vista ambiental. Esto contrasta con los vehículos de combustión interna que emiten gases nocivos.
- Rápido Reabastecimiento: Los FCEV pueden ser recargados rápidamente en estaciones de hidrógeno, similar a llenar un tanque de gasolina. El proceso de repostaje suele tardar entre 3 y 5 minutos, lo que es considerablemente más rápido que cargar un vehículo eléctrico convencional.
- Menos Comunes: Aunque ofrecen una alternativa interesante para la movilidad sostenible, la infraestructura para el abastecimiento de hidrógeno es menos desarrollada que la de los vehículos eléctricos convencionales, lo que limita su adopción generalizada.

Los vehículos eléctricos de hidrógeno (FCEV) representan una opción prometedora para la movilidad sostenible, ofreciendo ventajas significativas en términos de emisiones y eficiencia energética. Sin embargo, su adopción a gran escala está limitada por la infraestructura disponible y los costos asociados. A medida que se desarrollen más estaciones de hidrógeno y tecnologías relacionadas, es probable que los FCEV jueguen un papel importante en el futuro del transporte.

Los vehículos híbridos y eléctricos ofrecen diversas opciones para quienes buscan reducir su huella ambiental mientras disfrutan de las ventajas del transporte moderno. La elección entre estos tipos dependerá del estilo de vida del usuario, las necesidades específicas en términos de autonomía y las preferencias sobre el tipo de energía utilizada. La transición hacia estas tecnologías es fundamental para lograr una movilidad más sostenible y eficiente.

4.1.3 Vehículos Convencionales (VC)

Los vehículos convencionales (VC) son aquellos que funcionan mediante motores de combustión interna, utilizando combustibles fósiles como gasolina, diésel o gas natural para generar la energía necesaria para su propulsión. Estos vehículos han sido la norma en la industria automotriz durante más de un siglo y se caracterizan por un sistema motriz complejo que incluye múltiples componentes mecánicos interconectados (Fabela, Hernández, & Cruz, 2022).

El funcionamiento de un vehículo convencional se basa en la conversión de la energía química del combustible en energía mecánica. El motor de combustión interna es el componente principal, donde se produce la combustión del combustible, generando gases que empujan los pistones y crean movimiento rotacional. Este movimiento se transmite a las ruedas a través de un sistema motriz que incluye el embrague, la caja de cambios y el eje diferencial (El espectador, 2022).

Componentes Clave (Carroya.com, 2023)

Motor de Combustión Interna: Es el corazón del vehículo, donde se lleva a cabo la combustión del combustible para generar potencia.

Embrague: Permite conectar y desconectar el motor de las ruedas, facilitando el cambio de marchas.

Caja de Cambios: Ajusta la relación de transmisión para optimizar el rendimiento del motor según las condiciones de conducción.

Eje Diferencial: Distribuye la potencia a las ruedas y permite que giren a diferentes velocidades, lo cual es esencial en curvas.

Sistema de Frenado: Incluye frenos de disco o tambor que permiten detener el vehículo de manera segura.

Los vehículos convencionales se pueden clasificar en varias categorías según su tipo de combustible y configuración (Torres Pamplona, Jaramillo Duque, & Ortiz Castrillón, 2021):

Vehículos a Gasolina: Utilizan gasolina como combustible principal.

Vehículos Diésel: Funcionan con diésel, generalmente ofreciendo mayor eficiencia y torque.

Vehículos a Gas: Utilizan gas natural comprimido (GNC) o gas licuado de petróleo (GLP).

Vehículos Híbridos: Combinan un motor de combustión interna con uno eléctrico, aunque no son considerados completamente convencionales.

La infraestructura establecida para vehículos convencionales es una de sus principales ventajas. Existe una amplia red de estaciones de servicio disponibles, lo que facilita el abastecimiento de combustible en casi cualquier lugar. Esta accesibilidad permite a los conductores realizar viajes largos sin preocuparse por la disponibilidad de combustible, lo que contribuye a la comodidad y la confianza en el uso diario de estos vehículos (Rodriguez, Bohórquez, & Díez, 2015).

Los vehículos convencionales generan emisiones significativas de gases contaminantes, como dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, lo que contribuye al cambio climático y a la degradación de la calidad del aire. Estas emisiones representan un desafío ambiental importante, especialmente en un contexto global que busca reducir la huella de carbono y mitigar los efectos del calentamiento global (Rodriguez, Bohórquez, & Díez, 2015).

Además, los costos operativos de los vehículos convencionales pueden ser elevados. El precio del combustible fluctúa, y a menudo puede ser alto, lo que impacta el presupuesto de los propietarios. Asimismo, los gastos de mantenimiento, que incluyen cambios de aceite, reparaciones y el desgaste de piezas, pueden acumularse con el tiempo, lo que agrava el costo total de propiedad (Rodriguez, Bohórquez, & Díez, 2015).

Los vehículos convencionales generan una gran parte de las emisiones globales de CO2 y otros contaminantes atmosféricos, lo que ha generado un creciente interés por alternativas más sostenibles como los vehículos eléctricos e híbridos, que buscan reducir la huella ambiental del transporte.

Aunque los vehículos convencionales han sido una pieza fundamental del transporte moderno, su impacto ambiental y sus costos operativos están impulsando una transición hacia tecnologías más limpias. A medida que la industria automotriz evoluciona, es crucial considerar tanto los beneficios como las limitaciones de estos vehículos en comparación con sus contrapartes eléctricas.

4.2 Eficiencia Energética

La eficiencia energética es un concepto fundamental en la gestión de recursos que busca optimizar el uso de la energía para maximizar el rendimiento mientras se minimiza el consumo. En un mundo donde la demanda de energía sigue creciendo y las preocupaciones por el cambio climático son cada vez más urgentes, la eficiencia energética se presenta como una solución clave para reducir el desperdicio de recursos y mitigar el impacto ambiental.

La eficiencia energética se refiere a la capacidad de realizar actividades o utilizar dispositivos y sistemas con un menor consumo de energía, sin sacrificar la calidad o el rendimiento. Esto implica adoptar tecnologías más eficientes, así como prácticas que reduzcan las pérdidas de energía. El objetivo principal es disminuir la cantidad de energía necesaria para proporcionar productos y servicios, lo que no solo beneficia al medio

ambiente, sino que también tiene un impacto positivo en la economía de los consumidores al reducir sus facturas energéticas (Iberdrola, 2024).

En el contexto actual, donde las emisiones de gases de efecto invernadero están en aumento, la eficiencia energética se convierte en una herramienta crucial para combatir el cambio climático. Al optimizar el uso de la energía, se puede reducir significativamente la huella de carbono y contribuir a un futuro más sostenible. Además, la implementación de medidas de eficiencia energética puede generar ahorros económicos tanto para individuos como para empresas, lo que fomenta un consumo responsable y consciente (enel.com.co, 2024).

La eficiencia energética no solo es una práctica beneficiosa desde el punto de vista económico, sino que también juega un papel crucial en la lucha contra el cambio climático. Adoptar medidas que optimicen el uso de energía es esencial para construir un futuro sostenible y resiliente, donde cada individuo puede contribuir a este objetivo global.

4.2.1 Comparación de Eficiencia

La comparación de eficiencia entre VE y VC es un aspecto crucial en la evaluación de su rendimiento energético y su impacto ambiental. Esta comparación se basa en varios factores, incluyendo la eficiencia del motor, el consumo de energía, y la capacidad de regeneración de energía durante la operación.

Los vehículos eléctricos son notablemente más eficientes en la conversión de energía. Según diversas fuentes, los motores eléctricos pueden alcanzar una eficiencia de entre 80% y 90% en la conversión de energía almacenada en las baterías a movimiento. Esto significa que una gran parte de la energía utilizada se traduce directamente en desplazamiento, lo que los convierte en una opción muy eficiente para el transporte (El espectador, 2022).

Además, los VE incorporan sistemas como el frenado regenerativo, que permite recuperar parte de la energía cinética durante la desaceleración y el frenado. Este sistema ayuda a recargar las baterías mientras el vehículo está en uso, mejorando aún más su eficiencia energética (NHTSA, 2024).

En contraste, los vehículos de combustión interna tienen una eficiencia significativamente menor. La mayoría de los motores de combustión convierten solo entre 25% y 36% de la energía del combustible en movimiento. Gran parte de esta energía se pierde como calor a través del sistema de escape y otros componentes mecánicos. Esto implica que un vehículo convencional desperdicia una cantidad considerable de energía en comparación con su contraparte eléctrica (NHTSA, 2024).

El consumo energético también varía considerablemente entre ambos tipos de vehículos. Los VE se miden en kilovatios-hora por cada 100 kilómetros recorridos (kWh/100 km),

mientras que los VC se evalúan en litros por cada 100 kilómetros (L/100 km). Esta diferencia en las unidades de medida refleja cómo cada tipo de vehículo utiliza la energía disponible para su funcionamiento (Rodriguez, Bohórquez, & Díez, 2015).

4.2.2 Consumo de Energía

La comparación del consumo de energía entre VE y VC revela diferencias significativas en la eficiencia y el uso de recursos. A continuación, se analizan los aspectos clave relacionados con el consumo energético de ambos tipos de vehículos.

Los vehículos eléctricos son medidos en términos de consumo energético en kilovatios-hora por cada 100 kilómetros (kWh/100 km). Este valor puede variar según el modelo y las condiciones de conducción, pero generalmente se encuentra en un rango de 15 a 30 kWh/100 km. Por ejemplo, un coche eléctrico con una batería de 50 kWh que recorre 250 kilómetros tendría un consumo de 20 kWh/100 km (RACE, 2023).

Por otro lado, los vehículos convencionales dependen del combustible fósil, que se mide en litros por cada 100 kilómetros (L/100 km). La eficiencia de estos vehículos varía ampliamente, pero generalmente se sitúa entre 5 y 12 L/100 km. Esto implica que un vehículo convencional puede consumir entre 0.5 y 1.2 litros por cada 10 kilómetros, dependiendo del tipo de motor y las condiciones de conducción.

Comparación de Eficiencia

- Eficiencia Energética: Los VE son más eficientes en la conversión de energía. Mientras que un vehículo eléctrico puede convertir hasta el 90% de la energía almacenada en la batería en energía útil para propulsarse, los VC suelen tener una eficiencia del 20% al 30% debido a las pérdidas durante la combustión y la transmisión.
- Emisiones Contaminantes: Los VE emiten cero emisiones durante su operación, lo que es un beneficio significativo desde el punto de vista ambiental. En contraste, los VC emiten dióxido de carbono (CO2) y otros contaminantes, contribuyendo al cambio climático y a la contaminación del aire.

El análisis reciente indica que el consumo energético promedio diario de un vehículo eléctrico es aproximadamente 40 kWh, similar al consumo promedio diario de una casa en algunos países, que es alrededor de 30 kWh. Esto sugiere que la carga diaria de un vehículo eléctrico puede ser comparable al consumo energético diario de un hogar (RACE, 2023).

La comparación del consumo energético entre vehículos eléctricos y convencionales muestra que los VE son significativamente más eficientes y menos contaminantes. A

medida que la infraestructura para cargar vehículos eléctricos se expande y se mejora, es probable que su adopción continúe creciendo como una solución viable para una movilidad más sostenible.

Factores que afectan el consumo energético de los VE incluyen (HYUNDAI, 2024):

- Peso del vehículo: Un mayor peso requiere más energía para moverse.
- Estilo de conducción: Conducciones agresivas aumentan el consumo.
- Condiciones climáticas: Temperaturas extremas pueden afectar la autonomía y eficiencia.
- Tipo de carretera: La eficiencia es generalmente mayor en entornos urbanos debido al frenado regenerativo.

Los vehículos convencionales se miden en litros por cada 100 kilómetros (L/100 km). Por ejemplo, un vehículo que consume 8 L/100 km implica que necesita 8 litros de combustible para recorrer esa distancia. Para calcular el consumo, se puede usar la fórmula (RACE, 2024)

$$\text{Consumo} = \left(\frac{\text{Capacidad del depósito}}{\text{Distancia recorrida}}\right) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Un vehículo que tiene un depósito de 50 litros y recorre 500 km tendría un consumo de:

$$\left(\frac{50}{500}\right) \times 100 = 10 \text{ L/100 km} \quad \text{Ecuación 2}$$

La comparación del consumo energético entre vehículos eléctricos y convencionales se da para poder mostrar cuál de los dos son más eficientes en la conversión de energía a movimiento, con un menor impacto ambiental debido a su cero emisiones durante la operación. Aunque hipotéticamente hablando los VC pueden tener un costo inicial más bajo, su consumo energético y emisiones son significativamente mayores, lo que plantea desafíos para la sostenibilidad a largo plazo.

4.3 Impacto Ambiental

El impacto ambiental de los vehículos, tanto eléctricos como de combustión interna, es un aspecto crítico por considerar en la evaluación de su sostenibilidad. Esta sección aborda dos factores clave: las emisiones de CO2 y el ciclo de vida de los vehículos.

4.3.1 Emisiones de CO2

Los vehículos eléctricos son reconocidos por su capacidad de operar con cero emisiones durante su uso. Esto significa que no generan dióxido de carbono (CO2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) ni partículas en suspensión, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire en áreas urbanas. En contraste, los vehículos de combustión interna son responsables de una cantidad significativa de emisiones contaminantes, ya que queman combustibles fósiles para funcionar. Este proceso no solo libera CO2, sino también otros gases nocivos que afectan la salud pública y el medio ambiente (Huerta, 2021).

Sin embargo, es importante señalar que, aunque los vehículos eléctricos (VE) no emiten contaminantes durante su operación, su impacto ambiental no es completamente nulo. La producción y el ciclo de vida de las baterías que utilizan requieren grandes cantidades de energía y materiales, como el cobalto y el níquel, cuya extracción puede ser altamente contaminante (Botero, 2023).

Las emisiones de dióxido de carbono (CO2) son uno de los principales contribuyentes al cambio climático y se generan principalmente durante la operación de vehículos de combustión interna. Estos vehículos queman combustibles fósiles, lo que resulta en la liberación de grandes cantidades de CO2 a la atmósfera. Por ejemplo, un automóvil típico puede emitir entre 120 y 200 gramos de CO2 por kilómetro recorrido, dependiendo de su eficiencia y tipo de combustible (Botero, 2023).

4.3.2 Ciclo de Vida

El análisis del ciclo de vida es esencial para comprender el verdadero impacto ambiental de ambos tipos de vehículos. Este enfoque considera todas las etapas, abarcando desde la extracción de materias primas, la producción, el uso y la disposición final.

Producción: La fabricación de un vehículo eléctrico, especialmente sus baterías, genera más emisiones durante esta fase en comparación con un vehículo convencional. Por ejemplo, se estima que la producción de un coche eléctrico puede generar entre 14 y 25 toneladas de CO2, dependiendo del modelo y los materiales utilizados. Esto contrasta con los VC, cuya producción también tiene un impacto, pero generalmente menor en términos absolutos (Huerta, 2021).

Uso: Durante su operación, los VE tienen un impacto ambiental considerablemente menor debido a su eficiencia energética y cero emisiones directas. En cambio, los VC continúan emitiendo gases contaminantes a lo largo de su vida útil.

Disposición Final: Al final de su vida útil, las baterías de los vehículos eléctricos plantean desafíos significativos en términos de reciclaje y manejo adecuado. Sin un sistema efectivo para reciclar estas baterías, pueden convertirse en una fuente importante de contaminación. Los vehículos convencionales también enfrentan problemas similares al

final de su vida útil, pero el reciclaje de metales y componentes es más establecido en comparación con las baterías eléctricas.

Etapa del ciclo de vida	Vehículo de combustión interna	Vehículo eléctrico
Extracción de materias primas	Alta emisión de CO2	Menor emisión de CO2, pero impacto en la extracción de minerales
Producción	Alta emisión de CO2	Menor emisión de CO2, pero mayor consumo de energía en la producción de baterías
Uso	Alta emisión de CO2	Baja emisión de CO2 si la electricidad es renovable
Fin de vida	Emisiones asociadas al desecho del vehículo	Requiere gestión adecuada de las baterías

Tabla 1. Comparación del ciclo de vida. Fuente: Propia.

Si bien la producción de vehículos eléctricos tiene un impacto ambiental, este se compensa en gran medida por las bajas emisiones durante su uso, especialmente si la electricidad proviene de fuentes renovables. A largo plazo, los vehículos eléctricos ofrecen una alternativa más sostenible en comparación con los vehículos de combustión interna.

El impacto ambiental de los vehículos es multifacético, y tanto las emisiones de CO2 como el ciclo de vida deben ser considerados en su evaluación. Mientras que los vehículos de combustión interna son responsables de emisiones constantes y significativas durante su operación, los vehículos eléctricos ofrecen una alternativa más limpia, aunque su producción y disposición deben gestionarse adecuadamente para maximizar los beneficios ambientales. La transición hacia tecnologías de transporte más sostenibles es esencial para mitigar el impacto ambiental en el futuro.

Al evaluar el ciclo de vida de un VE, es esencial considerar no solo la duración y el rendimiento de la batería, sino también los costos asociados con su reciclaje al final de su vida útil. Para este proyecto, se ha establecido un ciclo de vida considerado de 10 años. Durante este período, se asume que la batería no alcanzará el límite de ciclos de carga, lo que significa que no será necesario realizar un estudio sobre el cambio de baterías.

El reciclaje de baterías es un aspecto crítico en la gestión del ciclo de vida, ya que permite recuperar materiales valiosos como litio, cobalto y níquel, contribuyendo a la sostenibilidad y reduciendo el impacto ambiental asociado con la extracción de nuevos recursos. Los costos de reciclaje pueden variar dependiendo del tipo de batería y del proceso utilizado.

Las baterías LFP son conocidas por su alta estabilidad térmica y seguridad. Aquí hay algunos puntos clave sobre su vida útil:

1. Durabilidad: Las baterías LFP pueden soportar entre 2000 y 4000 ciclos de carga-descarga. Esto es significativamente más que muchas otras químicas de iones de litio, como las NMC (Níquel, Manganeso y Cobalto).
2. Capacidad de carga: Después de 4000 ciclos, una batería LFP puede mantener aproximadamente el 80% de su capacidad original. Esto significa que, aunque la capacidad disminuye, la batería sigue siendo útil para muchas aplicaciones.
3. Estabilidad térmica: Las baterías LFP son más resistentes al calor y tienen una temperatura de fuga térmica más alta (270°C) en comparación con las NMC (210°C). Esto las hace más seguras y duraderas en condiciones extremas.
4. Costo-beneficio: Aunque el costo inicial de las baterías LFP puede ser mayor debido a la menor densidad energética, su mayor vida útil y menor desgaste las hacen más rentables a largo plazo.

Factores que afectan la vida útil

- Profundidad de descarga (DOD): Mantener la DOD entre el 20% y el 80% puede extender la vida útil de la batería.
- Corriente de carga: Cargar a una corriente baja reduce el desgaste de las celdas de la batería.
- Temperatura: Mantener una temperatura óptima es crucial para el rendimiento y la longevidad de la batería.

Las baterías LFP son una excelente opción para aplicaciones que requieren seguridad, durabilidad y un buen equilibrio entre costo y rendimiento. Con una vida útil de hasta 4000 ciclos, estas baterías pueden proporcionar un rendimiento confiable durante muchos años, lo que las hace ideales para sistemas de almacenamiento de energía y vehículos eléctricos.

La consideración del ciclo de vida y los costos asociados al reciclaje son fundamentales para una evaluación completa del impacto económico y ambiental del uso de vehículos eléctricos. En este caso específico, dado que se espera que la batería dure durante todo el ciclo proyectado sin necesidad de reemplazo, no es necesario realizar un estudio adicional sobre el cambio de baterías. Sin embargo, es importante seguir monitoreando las condiciones del mercado para el reciclaje y la reutilización de baterías a medida que avanza la tecnología.

4.4 Costos Operativos

Los costos operativos son un factor crítico por considerar al evaluar la viabilidad económica de los VE en comparación con los VC. Estos costos incluyen tanto el mantenimiento y durabilidad como los costos de energía, que impactan directamente en el costo total de propiedad a lo largo del tiempo.

4.4.1 Mantenimiento y Durabilidad

Los vehículos eléctricos generalmente presentan costos de mantenimiento más bajos en comparación con los vehículos de combustión interna. Esto se debe a varias razones (Universidad de los Andes, 2019):

Los motores eléctricos tienen menos piezas móviles que los motores de combustión, lo que reduce la probabilidad de fallos mecánicos y, por ende, la necesidad de reparaciones frecuentes. Los VE requieren menos mantenimiento preventivo. Por ejemplo, no necesitan cambios de aceite, y el sistema de frenos suele desgastarse menos debido al uso del frenado regenerativo, que recupera energía durante la desaceleración.

En términos de durabilidad, los motores eléctricos suelen ser más resistentes debido a su simplicidad y menor desgaste. No obstante, la durabilidad de la batería es un factor crucial. Las baterías de iones de litio, que son comunes en los VE, tienen una vida útil estimada de entre 8 y 15 años, dependiendo del uso y las condiciones de carga. Por otro lado, los motores eléctricos pueden durar entre 15 y 20 años en condiciones normales, alcanzando incluso hasta 1.6 millones de kilómetros en algunos casos (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Por otro lado, los vehículos de combustión interna requieren un mantenimiento más frecuente y complejo. Este incluye cambios de aceite, reemplazo de filtros de aire y combustible, bujías y mantenimiento del sistema de escape. La mayor cantidad de piezas móviles en los motores de combustión interna también aumenta el riesgo de desgaste y fallos con el tiempo.

En cuanto a durabilidad, los motores de combustión interna pueden ser muy duraderos si reciben el mantenimiento adecuado, con muchos vehículos capaces de superar los 200,000 km. Sin embargo, el desgaste de componentes como el motor, la transmisión y el sistema de escape puede ser significativo a lo largo de la vida del vehículo, lo que afecta su rendimiento a largo plazo.

Figura 4. Recarga de vehículo con celda de combustible de hidrógeno. Fuente: (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Los vehículos con celdas de combustible de hidrógeno representan una alternativa prometedora en la movilidad sostenible, destacándose por su rápida recarga y cero emisiones. En estos vehículos, el hidrógeno almacenado en un tanque se combina con oxígeno en la celda de combustible, produciendo electricidad que alimenta el motor eléctrico y genera únicamente vapor de agua como subproducto. Este proceso de recarga, similar a repostar gasolina o diésel, se completa en aproximadamente 3 a 5 minutos, ofreciendo una experiencia de uso práctica y eficiente.

Entre las ventajas de los vehículos de hidrógeno, se encuentra su alta autonomía, que puede variar entre 500 y 700 kilómetros por carga, y la rápida recarga mencionada, lo que los hace muy convenientes en comparación con los vehículos eléctricos de baterías convencionales. Además, su operación limpia contribuye significativamente a la reducción de emisiones contaminantes, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad.

La adopción de vehículos con celdas de combustible de hidrógeno se perfila como una solución viable y ecológica para el transporte, combinando eficiencia energética con un menor impacto ambiental.

4.4.2 Costos de Energía

El costo energético es otro aspecto fundamental en la evaluación de los costos operativos.

Vehículos Eléctricos: El costo para cargar un VE depende del precio por kilovatio-hora (kWh) y del consumo energético del vehículo. En general, los VE consumen entre 15 y 30 kWh/100 km, lo que se traduce en un costo promedio por kilómetro significativamente menor que el de los VC (HYUNDAI, 2024).

Vehículos de Combustión Interna: En comparación, los VC tienen costos energéticos más altos debido al precio variable de los combustibles fósiles. Un vehículo que consume 8 L/100 km y con un precio del combustible de 1.5 euros/L tendría un costo por kilómetro considerablemente mayor, alcanzando aproximadamente 12 euros cada 100 km (HYUNDAI, 2024).

Aspecto	Vehículo Eléctrico (VE)	Vehículo de Combustión Interna (VC)
Costos de Mantenimiento	Menores; ahorro potencial > USD 5,000	Mayores; mantenimiento frecuente
Durabilidad	Baterías: 8-15 años	Motores: variable
Costo Energético (100 km)	3 - 6 euros	~12 euros

Tabla 2. Comparativa Resumida. Fuente: (HYUNDAI, 2024).

Los vehículos eléctricos ofrecen ventajas significativas en términos de costos operativos, tanto en mantenimiento como en energía consumida. A pesar del costo inicial más alto para adquirir un VE, sus menores costos operativos a largo plazo pueden hacerlos más atractivos económicamente. Esta tendencia es especialmente relevante en contextos donde la sostenibilidad y la reducción de emisiones son prioridades globales.

4.5 Especificaciones Técnicas del Vehículo Eléctrico

Las especificaciones técnicas de un vehículo eléctrico varían considerablemente entre modelos y fabricantes. Sin embargo, hay ciertos parámetros clave que suelen incluirse para describir el rendimiento y las características de un vehículo eléctrico. Los VE se caracterizan por una serie de especificaciones técnicas que determinan su rendimiento, eficiencia y funcionalidad. A continuación, se detallan los elementos más relevantes que componen estas especificaciones.

4.5.1 Motor Eléctrico

- Potencia: La potencia del motor eléctrico se mide en kilovatios (kW) y puede variar según el modelo. Por ejemplo, un motor puede tener una potencia de 100 kW, lo que equivale a aproximadamente 135 caballos de fuerza (Volkswagen, 2024).

- Tipo de Motor: Los motores eléctricos pueden ser de diferentes tipos, como motores de imán permanente o motores sin escobillas, cada uno con sus propias ventajas en términos de eficiencia y mantenimiento.
- Torque: El par motor, medido en Newton-metro (Nm), indica la fuerza de torsión que el motor ejerce sobre las ruedas. Los motores eléctricos ofrecen un par máximo instantáneo, lo que proporciona una aceleración suave y potente.

4.5.2 Batería

- Capacidad: La capacidad de la batería se mide en kilovatios-hora (kWh). Esta especificación indica cuánta energía puede almacenar la batería. Las capacidades de las baterías de los vehículos eléctricos varían, pero generalmente se encuentran entre 20 kWh y 100 kWh. Por ejemplo, una batería típica podría tener una capacidad de 22 kWh o más, lo que afecta directamente la autonomía del vehículo (Volkswagen, 2024).
- Tecnología: La mayoría de los VE utilizan baterías de iones de litio, que ofrecen una buena relación entre peso, capacidad y durabilidad. Estas baterías son preferidas por su alta densidad energética y menor tasa de autodescarga.
- Química: Las baterías de iones de litio son las más comunes en los vehículos eléctricos. Sin embargo, otras químicas, como las baterías de estado sólido, están en desarrollo y prometen ofrecer mayor densidad energética y seguridad.
- Tiempo de carga: El tiempo necesario para cargar completamente la batería puede variar según la potencia del cargador y la capacidad de la batería. Por ejemplo, una batería de 35 kWh puede tardar aproximadamente 10 horas en cargarse completamente con un cargador de 3 kW, mientras que, con un cargador de 7 kW, el tiempo se reduce a aproximadamente 5 horas (evesco, 2024).

4.5.3 Autonomía

- Rango: La autonomía de un vehículo eléctrico se refiere a la distancia que puede recorrer con una carga completa. Dependiendo del modelo y condiciones de conducción, esta cifra puede variar entre 150 km y más de 500 km por carga (Volkswagen, 2024).

- Alcance: Indica la distancia máxima que puede recorrer el vehículo con una carga completa de la batería. La autonomía real puede variar según factores como la temperatura, el estilo de conducción y el uso de accesorios.
- Consumo energético: Se mide en kilovatios hora por cada 100 kilómetros (kWh/100 km) e indica la eficiencia energética del vehículo (Volkswagen, 2024).

4.5.4 Consumo Energético y transmisión

El consumo energético se mide en kWh/100 km. Un vehículo eléctrico eficiente puede consumir entre 15 y 30 kWh/100 km, lo que indica cuánta energía utiliza para recorrer esa distancia (Volkswagen, 2024).

Generalmente, los vehículos eléctricos utilizan una transmisión automática con una sola velocidad, ya que el motor eléctrico ofrece su par máximo desde el inicio, eliminando la necesidad de múltiples marchas.

4.5.5 Dimensiones y Peso

- Tamaño: Las dimensiones del vehículo pueden variar ampliamente. Por ejemplo, un VE típico podría tener un largo de aproximadamente 4,1 m, ancho de 1,8 m, y altura de 1,5 m (Volkswagen, 2024).
- Peso: El peso total del vehículo incluye la batería y otros componentes eléctricos. Esto puede influir en la eficiencia y el rendimiento.

4.5.6 Sistema de Carga

- Potencia de Carga: La potencia a la que se puede cargar la batería varía según el tipo de cargador utilizado (carga lenta o carga rápida). Por ejemplo, un cargador rápido puede ofrecer potencias superiores a 50 kW, permitiendo cargar el batería significativamente más rápido (Volkswagen, 2024).
- Tipos de Carga: Los VE pueden cargar a través de cargadores de corriente alterna (AC) y corriente continua (DC).
- Tiempo de Carga: Dependiendo del tipo de cargador, puede variar desde 30 minutos en cargadores rápidos hasta varias horas en cargadores domésticos.

4.5.7 Seguridad y Tecnología

- Sistemas de Seguridad: Los VE suelen estar equipados con múltiples sistemas de seguridad como frenos ABS, control de estabilidad (ESP), airbags y sensores de estacionamiento.
- Tecnología a Bordo: Incluyen características como pantallas táctiles para navegación, conectividad Bluetooth, cámaras traseras y sistemas avanzados de asistencia al conductor.

Las especificaciones técnicas de los vehículos eléctricos son fundamentales para comprender su funcionamiento y ventajas sobre los vehículos convencionales. Desde la potencia del motor hasta la capacidad de la batería y las características tecnológicas avanzadas, cada elemento contribuye a su eficiencia energética y sostenibilidad. A medida que la tecnología avanza, se espera que estas especificaciones continúen mejorando, haciendo que los vehículos eléctricos sean una opción cada vez más atractiva para los consumidores.

4.6 Infraestructura de Carga

La infraestructura de carga no solo facilita el uso diario de los vehículos eléctricos, sino que también es fundamental para el crecimiento del mercado automotriz eléctrico. Una red bien desarrollada de estaciones de carga permite a los usuarios recargar sus vehículos de manera conveniente y eficiente, lo que fomenta la confianza en la transición hacia una movilidad más sostenible. Además, contribuye a la reducción de emisiones de carbono al hacer que los VE sean una opción más accesible y práctica.

Tipos de Cargadores

Existen varios tipos de cargadores que se utilizan para recargar vehículos eléctricos, cada uno con diferentes capacidades y tiempos de carga:

- Cargadores de Nivel 1: Utilizan una conexión estándar de 120 voltios (V) y tienen potencias que oscilan entre 1.4 kW y 2.4 kW. Son los más lentos, permitiendo una carga completa en aproximadamente 8 a 12 horas, ideales para uso doméstico donde el vehículo puede estar estacionado durante la noche.
- Cargadores de Nivel 2: Operan a 240 V y pueden cargar un vehículo completamente en aproximadamente 4 a 6 horas. Su potencia varía entre 3.7 kW y 22 kW, siendo adecuados para instalaciones comerciales y residenciales donde el vehículo puede estar estacionado por períodos prolongados.

- Cargadores Rápidos (Nivel 3): También conocidos como cargadores de corriente continua (DC fast chargers), pueden recargar un vehículo eléctrico hasta el 80% en apenas 20 a 30 minutos. Estos cargadores tienen potencias que típicamente oscilan entre 50 kW y 350 kW, siendo fundamentales en estaciones de servicio público y rutas principales, donde los usuarios necesitan recargar rápidamente.

El desarrollo de la infraestructura de carga varía significativamente entre diferentes regiones. En países como España, se han alcanzado más de 8,400 puntos de carga y 24,020 conectores, con un crecimiento notable en áreas urbanas. Sin embargo, las áreas rurales aún presentan desafíos significativos debido a la baja densidad de puntos de carga disponibles (ecodes, 2024).

4.7 Capex y Opex

Los términos Capex (gastos de capital) y Opex (gastos operativos) son fundamentales para evaluar la viabilidad económica y financiera de los vehículos eléctricos (VE) en comparación con los vehículos de combustión interna (VC). A continuación, se presenta un análisis general de ambos conceptos en el contexto de estos tipos de vehículos.

4.8 Capex (Gastos de Capital)

El Capex se refiere a las inversiones iniciales necesarias para adquirir y poner en funcionamiento un activo. En el caso de los vehículos, esto incluye el costo de compra, así como cualquier gasto adicional relacionado con la infraestructura necesaria para su operación.

Vehículos Eléctricos (Minenergía; UPME; USAENE; SUMATORIA, 2024):

- Costo Inicial: Los precios de los VE suelen ser más altos que los de los VC debido al costo de las baterías y la tecnología eléctrica. Por ejemplo, un vehículo eléctrico puede costar entre un 20% y un 40% más que un vehículo convencional equivalente.
- Infraestructura de Carga: La instalación de estaciones de carga también representa un gasto significativo. Los costos pueden variar dependiendo del tipo de cargador (nivel 1, nivel 2 o cargadores rápidos), con inversiones que pueden oscilar entre USD 1,000 y USD 50,000 por estación, dependiendo de la capacidad y ubicación.

Vehículos de Combustión Interna (Minenergía; UPME; USAENE; SUMATORIA, 2024):

- Costo Inicial: Generalmente, los VC tienen un costo inicial más bajo en comparación con los VE. Esto se debe a que la tecnología está más establecida y los costos de producción son menores.
- Infraestructura: La infraestructura para el abastecimiento de combustible (gasolineras) ya está ampliamente disponible y no requiere inversiones adicionales significativas por parte del propietario del vehículo.

4.9 Opex (Gastos Operativos)

Los Opex de los VE suelen ser más bajos debido a menores costos de mantenimiento y energía. Esta diferencia puede hacer que, a largo plazo, los VE sean más rentables en comparación con los VC.

El Opex incluye todos los costos recurrentes asociados con la operación y mantenimiento del vehículo a lo largo del tiempo.

- Vehículos Eléctricos:
- Costos Energéticos: Los VE suelen tener menores costos operativos en términos energéticos. El costo promedio por kilovatio-hora (kWh) es generalmente más bajo que el costo por litro de combustible fósil. Por ejemplo, cargar un VE puede costar entre 3 y 6 euros cada 100 km, dependiendo del consumo energético2.
- Mantenimiento: Los costos de mantenimiento son significativamente menores debido a la menor cantidad de piezas móviles en un motor eléctrico. Esto puede resultar en ahorros que alcanzan hasta un 50% menos en comparación con los VC3.

Vehículos de Combustión Interna:

- Costos Energéticos: Los VC tienen costos operativos más altos debido al precio variable del combustible. Por ejemplo, un vehículo que consume 8 L/100 km puede costar alrededor de 12 euros cada 100 km, dependiendo del precio del combustible.
- Mantenimiento: Los VC requieren mantenimiento regular, como cambios de aceite, reemplazo de filtros y otros servicios mecánicos, lo que incrementa sus costos operativos a lo largo del tiempo.

Aspecto	Vehículo Eléctrico (VE)	Vehículo de Combustión Interna (VC)
Capex Inicial	Más alto; incluye infraestructura de carga	Más bajo; infraestructura ya establecida

Opex Energético	Menor; costo por kWh generalmente más bajo	Mayor; depende del precio del combustible
Opex Mantenimiento	Menor; menos piezas móviles	Mayor; mantenimiento regular necesario

Tabla 3. Comparativa Resumida. Fuente: Propia.

La evaluación del Capex y Opex analiza, la inversión inicial, los costos operativos a largo plazo. Este estudio revela una visión de los VE sean una opción atractiva no solo desde una perspectiva ambiental sino también económica, especialmente a medida que la tecnología avanza y se reduce el costo de las baterías. La decisión entre ambos tipos de vehículos dependerá en gran medida del uso previsto, las preferencias personales y la disponibilidad de infraestructura adecuada.

4.10 Normatividad y Reglamentación

La normatividad en Colombia establece límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para fuentes móviles terrestres. Esta reglamentación busca mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación. Además, el marco regulatorio también incluye incentivos para la adopción de vehículos eléctricos, así como la promoción de infraestructuras de carga, contribuyendo a un entorno más sostenible.

La normatividad y reglamentación en torno a los vehículos eléctricos (VE) en Colombia ha evolucionado significativamente en los últimos años, impulsada por la necesidad de promover una movilidad más sostenible y reducir las emisiones contaminantes. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes de esta normativa.

4.10.1 Ley 1964 de 2019: Ley de Movilidad Eléctrica

Esta ley es fundamental para el desarrollo de la movilidad eléctrica en Colombia. Sus objetivos principales incluyen:

- Promoción del Uso de Vehículos Eléctricos: La ley establece medidas para incentivar la compra y uso de VE, incluyendo exenciones fiscales como la eliminación del impuesto de matrícula y del impuesto a vehículos automotores.
- Infraestructura de Carga: Se promueve la construcción de estaciones de carga en todo el país, facilitando así el acceso a la energía necesaria para operar estos vehículos. También se ofrecen incentivos para que particulares y empresas instalen puntos de carga.
- Incentivos Fiscales: Las empresas que adquieren vehículos eléctricos pueden deducir hasta el 50% del valor del vehículo en su declaración de renta.

- Regulaciones Ambientales: Se establece que al menos el 1% de los vehículos en las flotas de transporte público deben ser eléctricos, contribuyendo así a la reducción de emisiones contaminantes.

4.10.2 Resoluciones del Ministerio de Minas y Energía

El Ministerio de Minas y Energía ha emitido varias resoluciones que regulan aspectos técnicos y operativos relacionados con la infraestructura de carga:

- Condiciones Mínimas para Estaciones de Carga: Las estaciones que presten servicio público deben garantizar acceso y continuidad del servicio. Esto incluye la estandarización de conectores y potencias para asegurar la interoperabilidad entre diferentes modelos de vehículos.
- Regulación Tarifaria: Se están estableciendo lineamientos sobre las tarifas aplicables a la carga pública, buscando un equilibrio entre los costos operativos y el acceso al servicio.

4.10.3 Requisitos para Registro y Licencias

Para operar un vehículo eléctrico en Colombia, no se requiere una licencia especial, ya que estos vehículos son considerados automotores. Sin embargo, se deben cumplir ciertos requisitos para su registro:

- Documentación Necesaria: Al igual que los vehículos convencionales, los VE deben presentar documentación específica para su registro, incluyendo certificados técnicos y cumplimiento normativo.
- Categorías de Licencia: Para conducir automóviles eléctricos, se requiere una licencia de conducción de categoría B, que es la misma exigida para los vehículos convencionales.

4.10.4 Políticas Locales

Además de las regulaciones nacionales, muchas ciudades han implementado políticas locales para fomentar el uso de vehículos eléctricos:

- Iniciativas Municipales: Algunas ciudades están desarrollando planes específicos para aumentar la infraestructura de carga pública y privada, así como incentivos adicionales para usuarios particulares.

- Espacio Público: Se están estableciendo lineamientos para utilizar el espacio público para instalar estaciones de carga, promoviendo así un acceso más amplio a esta infraestructura.

La normatividad y reglamentación en Colombia está orientada a promover la movilidad eléctrica como una solución viable frente a los retos ambientales actuales. A través de leyes como la Ley 1964 de 2019 y diversas resoluciones del Ministerio de Minas y Energía, se busca crear un marco que incentive el uso de vehículos eléctricos, desarrolle infraestructura adecuada y garantice un entorno regulatorio favorable. La implementación efectiva de estas políticas es clave para alcanzar los objetivos ambientales y mejorar la calidad del aire en las ciudades colombianas.

4.10.5 Antecedentes

La historia de la adopción de VE en Colombia comienza a ganar tracción en la última década, a medida que el país ha empezado a reconocer la importancia de la movilidad sostenible. En un esfuerzo por cumplir con sus compromisos medioambientales, el gobierno colombiano ha implementado una serie de incentivos y políticas para promover el uso de vehículos eléctricos, lo que ha permitido que estos vehículos se integren gradualmente en el sistema de transporte del país.

Colombia ha implementado diversas estrategias para fomentar el uso de vehículos eléctricos como parte de su compromiso con el desarrollo sostenible y la reducción de emisiones contaminantes. Algunos hitos clave incluyen (San Andrés Islas será piloto en el uso de carros eléctricos en Colombia, 2024):

Políticas Gubernamentales: En 2016, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible anunció un piloto para el uso de carros eléctricos en San Andrés, buscando promover tecnologías limpias que contribuyan a la disminución de la contaminación atmosférica. Durante este anuncio, se destacó que el país contaba con aproximadamente 700 vehículos eléctricos, de los cuales solo 50 estaban en Bogotá 12.

- Incentivos Fiscales: La Ley 1964 de 2019 establece beneficios fiscales para la compra de vehículos eléctricos, incluyendo la exención del impuesto sobre vehículos y descuentos en peajes y estacionamientos. Estas medidas han sido cruciales para incentivar la compra de VE entre los consumidores colombianos.
- Crecimiento del Mercado: Según datos recientes, el número de vehículos eléctricos en Colombia ha aumentado significativamente, alcanzando más de 25,000 unidades a finales de 2023. Este crecimiento es impulsado tanto por consumidores individuales como por flotas corporativas que buscan alternativas sostenibles.

El camino hacia la electromovilidad en Colombia inició con pequeñas iniciativas en el sector privado y avances tecnológicos en la industria automotriz global. Sin embargo, el impulso decisivo vino con la promulgación de la Ley 1964 de 2019, que estableció beneficios tributarios y arancelarios para la compra de vehículos eléctricos, exenciones de peajes y otras regulaciones que fomentan la movilidad sostenible. Esta legislación fue fundamental para incentivar la adopción, al eliminar impuestos como el IVA y reducir los costos de los vehículos eléctricos, haciéndolos más competitivos frente a los convencionales de combustión interna (Ley 1964 de 2019, 2019).

Además, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 incluyó metas específicas para aumentar la flota de vehículos eléctricos y desarrollar una infraestructura de carga más robusta en las principales ciudades del país (Ley 1964 de 2019, 2019).

El desarrollo de los vehículos eléctricos en San Andrés Isla, un territorio insular con particularidades geográficas y ambientales está aún en una fase temprana. Sin embargo, la isla presenta condiciones ideales para la movilidad eléctrica, dada su pequeña extensión territorial, la preocupación por la sostenibilidad y la dependencia del turismo ecológico. A continuación, se exploran los antecedentes más relevantes en la introducción de VE en esta región.

La isla de San Andrés se ha convertido en un punto focal para la implementación de vehículos eléctricos en Colombia (San Andrés Islas será piloto en el uso de carros eléctricos en Colombia, 2024):

- Piloto en San Andrés: En 2016, se anunció un piloto para el uso de carros eléctricos en la isla como parte de una estrategia más amplia para reducir la contaminación y promover un modelo de transporte más sostenible. Este proyecto busca no solo introducir vehículos eléctricos, sino también concienciar a los ciudadanos sobre la importancia de reducir su huella de carbono.
- Iniciativas Locales: La Empresa de Energía del Archipiélago de San Andrés (EEDAS) ha estado trabajando activamente en la transición hacia una movilidad más sostenible. Recientemente, EEDAS recibió dos vehículos eléctricos que estarán a cargo de la Secretaría de Salud, marcando el inicio de una transición energética institucional en el departamento.
- Proyectos Futuras: Además, se han anunciado planes para introducir un bus eléctrico que transportará a los ciudadanos por las calles de San Andrés. Este bus estará equipado para facilitar el acceso a personas con movilidad reducida y contribuirá a la reducción de emisiones contaminantes.
- Colaboración con Empresas: Empresas automotrices como Kia están explorando proyectos ecológicos en San Andrés, incluyendo centros dedicados a la movilidad

sostenible y reciclaje. La inversión prevista para estos proyectos es significativa y busca generar un impacto positivo tanto ambiental como económico en la región.

5. Estado del arte

Como ya se ha mencionado, impacto económico, y ambiental de los VE en comparación con los VC es un tema de creciente interés en todo el mundo. Este apartado revisa el estado actual del conocimiento y los antecedentes sobre el uso de VE en islas o territorios insulares, con particular atención a San Andrés Isla.

Las tecnologías de VE incluyen baterías de iones de litio, motores eléctricos de alta eficiencia, sistemas de gestión de baterías (BMS) y cargadores rápidos. Estas innovaciones han mejorado significativamente la autonomía y el rendimiento de los VE (Durango Escobar, 2023).

5.1 Estado del Arte

El estado del arte en la evaluación del desempeño energético y del impacto económico y ambiental de los VE ha avanzado significativamente en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la eficiencia energética del transporte y mitigar el impacto de la dependencia de combustibles fósiles.

La movilidad eléctrica se centra en el uso de VE y otras modalidades de transporte que operan con electricidad como fuente de energía. En las últimas décadas, este concepto ha cobrado gran relevancia debido a la urgencia de mitigar el cambio climático, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la calidad del aire en las áreas urbanas. Este enfoque integral sobre la movilidad eléctrica abarca diversos aspectos, como su desarrollo tecnológico, beneficios, desafíos y las políticas necesarias para su adopción (Iberdrola, 2024).

Los vehículos eléctricos ofrecen una alternativa viable a los combustibles fósiles como la gasolina y el diésel. Esta tecnología abarca una amplia gama de medios de transporte, que incluyen bicicletas y scooters eléctricos, así como automóviles y autobuses eléctricos. Al adoptar esta tecnología, se busca no solo optimizar el uso de recursos energéticos, sino también contribuir a un entorno más saludable mediante la disminución de emisiones contaminantes en las ciudades.

5.1.1 Tecnologías de Vehículos Eléctricos

Este apartado examina las principales tecnologías que sustentan los VE, centrándose en componentes clave como baterías, motores eléctricos, sistemas de control y avances en infraestructura.

Baterías

Las baterías son el componente más crítico de los vehículos eléctricos, ya que determinan su capacidad para almacenar y suministrar energía. Actualmente, las baterías de iones de litio son las más utilizadas debido a su alta densidad energética y durabilidad. Sin embargo, se están desarrollando nuevas tecnologías, como las baterías de estado sólido, que ofrecen una mayor seguridad y tiempos de carga más rápidos. Estas baterías eliminan el riesgo de incendios asociados con las baterías líquidas y pueden aumentar la autonomía del vehículo significativamente (López Sánchez, 2019).

Figura 5. Tesla actualiza el manual del propietario de la versión americana del Model Y con una indicación expresa a la batería estructural formada por celdas 4680. Fuente: (García, 2022)

Por ejemplo, Tesla ha introducido celdas de batería 4680 en su modelo Model Y, que prometen aumentar la densidad energética y reducir costos por kWh. Además, se están explorando baterías orgánicas que utilizan materiales derivados del carbono como electrodos, lo que podría revolucionar la forma en que se almacenan y utilizan la energía en los vehículos eléctricos (Alvarez, 2023).

La mayoría de los VE en el mercado utilizan baterías de iones de litio, que ofrecen una alta densidad energética, una vida útil prolongada y una capacidad de carga relativamente rápida. Sin embargo, su producción tiene un impacto ambiental significativo y su reciclaje sigue siendo un desafío (Dunn & Wang, 2022).

- Baterías de estado sólido: Se están investigando como una alternativa prometedora a las baterías de iones de litio, ya que ofrecen una mayor densidad energética y seguridad al utilizar un electrolito sólido en lugar de líquido.

- Baterías de flujo: Estas son otra opción emergente, especialmente adecuadas para aplicaciones de almacenamiento a gran escala. Utilizan soluciones líquidas para almacenar energía y pueden ser más económicas para aplicaciones estacionarias, aunque su implementación en vehículos aún está en desarrollo.

Motores Eléctricos

Los motores eléctricos son responsables de convertir la energía almacenada en las baterías en movimiento. La eficiencia de estos motores es crucial para maximizar la autonomía del vehículo. Los avances recientes han llevado al desarrollo de motores más compactos y eficientes, como los motores sin imanes permanentes que utilizan materiales más abundantes y económicos (García Hernández, 2023). Por ejemplo, un motor desarrollado por Mahle tiene una eficiencia del 95%, lo que mejora significativamente el rendimiento general del vehículo (Conejero Roselló, 2015).

Los motores eléctricos operan bajo el principio de electromagnetismo, donde una corriente eléctrica pasa a través de un devanado, generando un campo magnético que interactúa con un rotor, provocando su rotación. Esta rotación se traduce en movimiento, permitiendo que el vehículo avance. Los dos tipos más comunes de motores eléctricos utilizados en vehículos eléctricos son (Islam, Ahsan, Rahman, & Amintanvir, 2023):

- Motores de Corriente Continua (DC): Utilizan corriente continua y son sencillos en su diseño, pero menos eficientes a altas velocidades.
- Motores de Corriente Alterna (AC): Incluyen motores sincrónicos y asincrónicos, que ofrecen mayor eficiencia y control en una variedad de condiciones de operación.

La eficiencia de los motores eléctricos es crucial para la autonomía del vehículo. Un motor eficiente puede convertir entre el 80% y el 95% de la energía eléctrica en energía mecánica. Esto significa que menos energía se pierde como calor, lo que se traduce en una mayor distancia recorrida por cada carga de batería (Rimpas, y otros, 2023).

Los avances recientes han permitido el desarrollo de motores más compactos y ligeros, lo que también contribuye a mejorar la eficiencia general del vehículo. Por ejemplo, los motores sin imanes permanentes están ganando popularidad debido a su capacidad para utilizar materiales más abundantes y económicos, como el acero y el aluminio, en lugar de materiales raros como el neodimio (Cai, Wu, Zhou, & Liang, 2021):

- Motores Sin Imanes Permanentes: Estos motores utilizan un diseño alternativo que reduce costos, sino que también minimiza la dependencia de materiales raros. Esto permite una producción más sostenible y accesible.

- Tecnologías de Enfriamiento Avanzadas: Los nuevos diseños incorporan sistemas de enfriamiento más eficientes que permiten a los motores operar a temperaturas óptimas, mejorando su rendimiento y prolongando su vida útil.
- Controladores Avanzados: Los avances en electrónica de potencia han llevado al desarrollo de controladores más sofisticados que optimizan el rendimiento del motor en tiempo real, ajustando la salida según las condiciones de conducción.

Impacto en la Autonomía del Vehículo

La autonomía de un VE se refiere a la distancia que puede recorrer con una sola carga de batería. Este aspecto es crucial para la aceptación y viabilidad de los vehículos eléctricos en el mercado. La mejora continua en la eficiencia de los motores eléctricos tiene un impacto directo y significativo en esta autonomía, lo que a su vez influye en la percepción del consumidor y en la adopción generalizada de esta tecnología.

La mejora continua en la eficiencia de los motores eléctricos tiene un impacto directo en la autonomía del vehículo. A medida que los fabricantes desarrollan motores más eficientes y ligeros, los VE pueden recorrer mayores distancias con una sola carga. Esto es especialmente importante para aumentar la aceptación del consumidor y hacer que los vehículos eléctricos sean una opción viable para una variedad más amplia de usuarios.

La eficiencia del motor eléctrico es uno de los factores más determinantes para maximizar la autonomía del vehículo. Los motores más eficientes convierten una mayor proporción de la energía eléctrica almacenada en las baterías en movimiento, lo que significa que menos energía se pierde como calor. Por ejemplo, un motor que opera con una eficiencia del 90% permite que un mayor porcentaje de la energía de la batería se utilice efectivamente para impulsar el vehículo (Criado Muñoz, 2020).

La reducción del peso del vehículo es otro factor clave que contribuye a una mayor autonomía. Los avances en materiales y diseño permiten crear vehículos eléctricos más ligeros sin comprometer su seguridad o durabilidad. Un vehículo más ligero requiere menos energía para moverse, lo que se traduce en una menor demanda de energía por kilómetro recorrido (Zhou, Jiang, Hu, & Hua, 2022).

Los sistemas de frenado regenerativo permiten recuperar parte de la energía cinética durante el frenado y utilizarla para recargar las baterías. Esta estrategia no solo aumenta la eficiencia general del vehículo, sino que también extiende su autonomía al aprovechar situaciones cotidianas como desaceleraciones y frenadas (García González, 2021).

La mejora continua en la eficiencia de los motores eléctricos y otras tecnologías asociadas tiene un impacto directo y positivo en la autonomía de los vehículos eléctricos. A medida que se desarrollan motores más eficientes, se utilizan materiales más ligeros y se optimizan las capacidades de las baterías, los VE pueden recorrer mayores distancias con

una sola carga. Esto no solo aumenta su viabilidad como opción de transporte sostenible, sino que también favorece su aceptación generalizada entre los consumidores, marcando un paso significativo hacia un futuro más limpio y eficiente en el ámbito del transporte.

Sistemas de Control

Los sistemas de control son fundamentales para la operación eficiente de los VE, ya que gestionan la energía entre la batería y el motor, optimizando el rendimiento del vehículo. Estos sistemas utilizan tecnologías avanzadas para maximizar la eficiencia energética y mejorar la experiencia de conducción. Entre las funciones y características clave de estos sistemas, se destaca la gestión de energía, la implementación de algoritmos avanzados y la integración de componentes críticos (Echeverry Montes, 2024).

La gestión eficiente de la energía es uno de los principales objetivos de los sistemas de control en vehículos eléctricos. Estos sistemas regulan el flujo de energía entre la batería y el motor, asegurando que se utilice la cantidad adecuada de energía según las condiciones de conducción. Esto incluye la optimización del rendimiento del motor, donde los sistemas de control ajustan la potencia del motor eléctrico de acuerdo con las necesidades del conductor y las condiciones del entorno, lo que permite un uso más eficiente de la energía almacenada. Además, el frenado regenerativo es una tecnología clave que permite recuperar parte de la energía cinética durante la desaceleración y el frenado, almacenándola nuevamente en la batería. Los sistemas de control ajustan automáticamente el nivel de frenado regenerativo para maximizar la recuperación de energía, lo que contribuye a una mayor autonomía del vehículo (Kumar, Panda, Naayagi, Thakur, & Panda, 2023).

La implementación de algoritmos avanzados es esencial para el funcionamiento óptimo de los sistemas de control. Estos algoritmos permiten a los vehículos eléctricos adaptarse a diversas condiciones de conducción y estilos del conductor. Por ejemplo, el control predictivo utiliza modelos dinámicos para anticipar las necesidades energéticas del vehículo y ajustar los parámetros en tiempo real, facilitando una conducción más eficiente, similar a un sistema GPS que sugiere rutas óptimas en función del tráfico futuro. Asimismo, los sistemas pueden adaptarse al estilo de conducción del usuario, personalizando las estrategias de control para maximizar la eficiencia energética en función de los hábitos individuales del conductor (Hongwen & Zhang, 2016).

Los sistemas de control en vehículos eléctricos incluyen varios componentes críticos que desempeñan funciones específicas. El controlador del motor gestiona el suministro eléctrico al motor, optimizando su rendimiento y eficiencia. El convertidor electrónico de potencia se encarga de convertir la energía almacenada en la batería para su uso por el motor eléctrico. Finalmente, la unidad de gestión de energía coordina el flujo energético entre los diferentes componentes del sistema, asegurando un funcionamiento eficiente y seguro. La integración de estos elementos permite a los vehículos eléctricos ofrecer un rendimiento superior y una experiencia de conducción más controlada y eficiente.

Infraestructura de Carga

La infraestructura de carga es un elemento crucial para el éxito y la adopción masiva de los VE. Esta infraestructura no solo incluye la instalación de estaciones de carga, sino también el desarrollo de tecnologías innovadoras que faciliten la recarga eficiente y conveniente de estos vehículos.

Existen diferentes tipos de cargadores que se utilizan para recargar vehículos eléctricos, cada uno con características y capacidades específicas (Trujillo, Sánchez, & Dávila, 2021):

- Cargadores Lentos: Estos cargadores suelen utilizar una toma de corriente estándar de 120 voltios (V). Tienen una potencia que varía entre 1.4 kW y 2.4 kW. Son ideales para la carga en casa o en lugares donde el vehículo puede estar estacionado durante largos períodos. La carga completa puede tardar entre 8 y 12 horas.
- Cargadores Rápidos: Utilizan corriente alterna (AC) o corriente continua (DC) para reducir significativamente el tiempo de carga. Los cargadores rápidos operan típicamente a 240 V y pueden tener potencias que oscilan entre 7 kW y 22 kW. Pueden cargar un vehículo hasta el 80% en aproximadamente 30 minutos, lo que es esencial para viajes largos y uso diario.
- Cargadores Ultra-Rápidos: Estos cargadores son capaces de proporcionar potencias superiores a 150 kW, permitiendo recargas en menos de 20 minutos. Utilizan corriente continua (DC) y son especialmente útiles en estaciones de servicio a lo largo de rutas principales, donde los conductores necesitan cargar rápidamente. Los voltajes de estos cargadores pueden variar, pero generalmente operan en un rango de 400 V a 800 V, dependiendo del diseño del sistema.

El desarrollo de la infraestructura de carga varía significativamente entre diferentes regiones. En países como España, se han alcanzado más de 8,400 puntos de carga y 24,020 conectores, con un crecimiento notable en áreas urbanas. Sin embargo, las áreas rurales aún presentan desafíos significativos debido a la baja densidad de puntos de carga disponibles (ecodes, 2024).

La infraestructura de carga es esencial para el éxito y expansión del uso de vehículos eléctricos. Para maximizar su efectividad, es fundamental continuar desarrollando redes extensas y eficientes que integren tecnologías limpias y sostenibles. La colaboración entre gobiernos y sectores privados será clave para superar los desafíos actuales y fomentar una transición efectiva hacia una movilidad eléctrica más amplia y accesible.

La expansión de la infraestructura de carga es esencial para facilitar el uso diario de los VE y mejorar su viabilidad económica. A medida que más estaciones de carga se instalan en áreas urbanas y rurales, se reduce la "ansiedad por autonomía" que muchos consumidores sienten al considerar la compra de un vehículo eléctrico (García & García, La transición al vehículo eléctrico, 2024).

La infraestructura de carga es fundamental para el futuro del transporte eléctrico. Con el desarrollo continuo de tecnologías innovadoras como la carga inalámbrica y sistemas V2G, junto con la expansión necesaria en estaciones de carga, se espera que la adopción de vehículos eléctricos aumente significativamente. Esto no solo beneficiará a los propietarios individuales, sino que también contribuirá a un futuro más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles.

Avances Tecnológicos

La integración de conectividad 5G promete facilitar una comunicación más rápida y efectiva entre los vehículos y las infraestructuras urbanas. Esta mejora en la comunicación permitirá una gestión del tráfico más fluida, lo que a su vez aumentará la seguridad vial al permitir que los vehículos intercambien información en tiempo real sobre las condiciones del camino, la congestión y la disponibilidad de estaciones de carga (newsroom, 2023).

Figura 6. Arquitectura de plataformas. Fuente: (newsroom, 2023).

Además, se están explorando plataformas modulares diseñadas específicamente para vehículos eléctricos. Estas plataformas ofrecen la flexibilidad necesaria para adaptar los vehículos a diferentes tipos y tamaños, lo que optimiza el proceso de producción y permite personalizar los vehículos de acuerdo con las necesidades de distintos mercados y usuarios. Este modularidad no solo aumenta la eficiencia en la fabricación, sino que también mejora la versatilidad y el atractivo de los VE (Donovan, 2023).

En cuanto a la infraestructura de carga, se están desarrollando tecnologías innovadoras que mejoran aún más la experiencia de carga de los vehículos eléctricos. Entre estas se encuentra la carga inalámbrica por inducción, que permite cargar vehículos sin necesidad de cables mediante un sistema de inducción electromagnética. Aunque esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y no es tan común como los cargadores tradicionales, presenta la ventaja de eliminar el desgaste físico asociado con las conexiones por cable, facilitando una experiencia de carga más cómoda y eficiente (Urcelay Fernández de Arroyabe, 2023).

Otra innovación significativa son los sistemas V2G (Vehicle-to-Grid), que permiten a los vehículos eléctricos devolver energía a la red eléctrica cuando no están en uso. Esta capacidad no solo ayuda a equilibrar la carga en la red, sino que también brinda a los propietarios de VE la oportunidad de monetizar su capacidad de almacenamiento energético. Al integrar los vehículos eléctricos en la red eléctrica, se crea una red inteligente que optimiza el consumo energético, contribuyendo a un uso más sostenible y eficiente de la electricidad (Mayorga Rodríguez, 2024)

Las tecnologías detrás de los vehículos eléctricos están en constante evolución, con innovaciones que mejoran su eficiencia, seguridad y sostenibilidad. A medida que estas tecnologías se desarrollan y se implementan ampliamente, se espera que los vehículos eléctricos desempeñen un papel cada vez más importante en la transición hacia un transporte más limpio y eficiente.

5.1.2 Vehículos eléctricos en Colombia y en San Andrés

La adopción de VE en Colombia ha crecido en los últimos años, impulsada por políticas gubernamentales, conciencia ambiental y avances tecnológicos. Este estado del arte examina la situación actual de los carros eléctricos en el país, con un enfoque particular en la isla de San Andrés.

Colombia ha implementado diversas políticas para fomentar el uso de vehículos eléctricos como parte de su estrategia para reducir las emisiones de gases contaminantes y promover la sostenibilidad. Algunas de las iniciativas incluyen (Omar Andrés Camacho, 2023):

Incentivos Fiscales: La Ley 1964 de 2019 establece beneficios fiscales para la compra de vehículos eléctricos, como la exención del impuesto sobre vehículos y descuentos en peajes y estacionamientos.

Infraestructura de Carga: Se están realizando esfuerzos significativos para expandir la infraestructura de carga en todo el país, facilitando el uso diario de los VE. Según un informe del Ministerio de Minas y Energía, se han instalado más de 1,500 puntos de carga a nivel nacional hasta 2023.

Crecimiento del Mercado: Según datos del Observatorio de Movilidad Sostenible, el número de vehículos eléctricos en Colombia ha aumentado considerablemente, alcanzando más de 25,000 unidades a finales de 2023. Este crecimiento es impulsado tanto por consumidores individuales como por flotas corporativas que buscan alternativas sostenibles.

En Colombia, empresas de transporte público están integrando vehículos eléctricos en sus flotas. Bogotá, por ejemplo, ha iniciado la electrificación de su sistema de buses, consolidándose como una de las ciudades de América Latina con mayor cantidad de buses

eléctricos. Medellín también está avanzando en la implementación de taxis eléctricos gracias a la colaboración entre el sector público y empresas como BYD y Renault (Rodiguez Vargas, Nocua Sánchez, & Lancheros Barragán, 2019).

En la isla de San Andrés, la iniciativa hacia la movilidad eléctrica está tomando forma con proyectos específicos que buscan implementar tecnologías limpias. Un ejemplo destacado es el proyecto liderado por la Empresa de Energía del Archipiélago de San Andrés (EEDAS), que busca introducir un bus eléctrico en las calles de la isla:

Proyecto del Bus Eléctrico: EEDAS ha lanzado una convocatoria para adecuar un vehículo 100% eléctrico tipo chasis cabinado a bus utilitario integral. Este proyecto incluye características como capacidad para 18 pasajeros, accesibilidad para personas con movilidad reducida y aire acondicionado. La inversión asignada para este proyecto es de aproximadamente 235 millones de pesos colombianos (USD 62,000) (Taborelli, 2023).

Compromiso con la Sostenibilidad: EEDAS también está trabajando en otros proyectos relacionados con la eficiencia energética y el uso de energías renovables en el archipiélago, lo que refleja un compromiso con un futuro más sostenible.

La situación actual de los carros eléctricos en Colombia muestra un panorama positivo, con un crecimiento constante impulsado por políticas favorables y una mayor conciencia ambiental. En San Andrés, proyectos específicos como el bus eléctrico representan un paso importante hacia una movilidad más sostenible. Sin embargo, es crucial continuar desarrollando infraestructura adecuada y fomentar la educación sobre movilidad eléctrica para maximizar su impacto.

5.1.3 Trabajos e investigaciones

En el trabajo (1): En el presente proyecto, el factor principal para realizar estas mediciones en cuanto al uso de combustible vs energía es un sistema de GPS que se debe implementar en los recorridos rutinarios de un vehículo convencional y eléctrico para lograr los análisis de factibilidad correspondientes.

Clasifican los ciclos de conducción en dos partes como ciclos modales y ciclos HYZEM. Los ciclos modales se caracterizan por porciones significativas de velocidades constantes y aceleraciones lineales. Como tales, tienden a ser artificiales (no verdaderamente representativos de la vida real) y pueden estar sesgados hacia una velocidad o nivel de aceleración en particular. Sin embargo, dado que ofrecen definiciones fáciles, pueden adoptarse fácilmente como herramientas estándar y encontrar un amplio uso en el desarrollo de emisiones; en cambio los ciclos HYZEM son ciclos transitorios. Las partes en las que la velocidad es constante son mucho más pequeñas que en los ciclos modales. Los ciclos HYZEM se derivan de patrones de conducción reales. Por lo tanto, son una mejor representación de las condiciones reales de manejo que los ciclos Modales (Niemeier, 2015). Cada área (geográfica) tendrá un patrón de conducción muy específico. Este patrón depende de la infraestructura del lugar, la densidad vehicular y los problemas de cumplimiento en ese lugar (Niemeier, 2015).

Estos autores utilizan el concepto de “chase car” (Recopilación de datos para el desarrollo del ciclo de conducción) con el fin de recopilar los datos (Anand, Rekha, & Chirag, 2005).

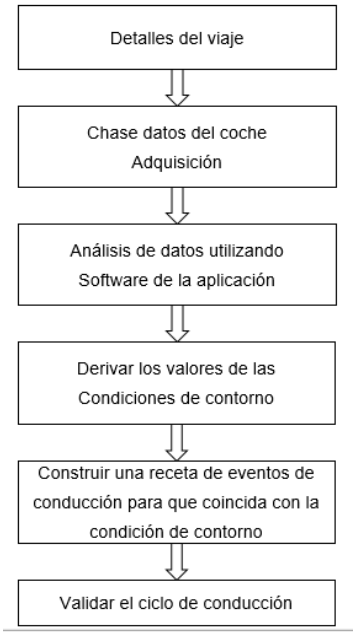


Figura 7. Summary of GPD based drive cycles determination. Fuente: (Anand, Rekha, & Chirag, 2005)

Los historiales de velocidad y tiempo de diferenciaron comprensivamente, entonces establecieron unas condiciones de límite de una unidad de ciclo como las siguientes: velocidad, tiempo, distancia (longitud del viaje), distribución de velocidad, niveles de aceleración y aceleración: aceleración normal, aceleración fuerte, crucero, deceleración normal y deceleración fuerte.

El equipo GPS utilizado es capaz de indicar coordenadas, velocidades y distancia, con esta información se diseñó un algoritmo específico para permitir que los datos fueran analizados (Niemeier, 2015). Así se planteó el diagrama para la configuración de datos.

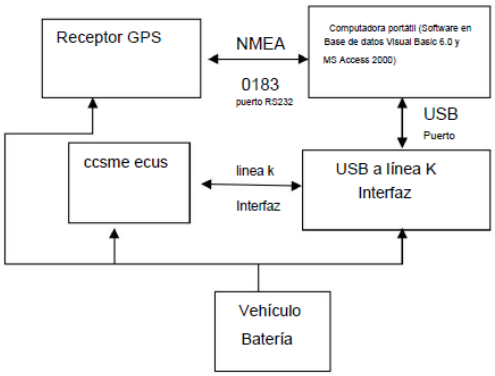


Figura 8. Data acquisition setup schematic. Fuente: (Niemeier, 2015).

Se elaboró un protocolo de recogida de datos para la ciudad de pune, india, con los datos de 150 autos, con personas de diversa edad, diferentes sitios de la ciudad en diferentes momentos del día (Niemeier, 2015).

En el trabajo (2): utilizan varios métodos para desarrollar un mecanismo de un ciclo de conducción de motocicletas, donde incluía la observación directa, encuestas de motociclistas, seguimiento de vehículos con medición de la velocidad de las ruedas a bordo y registro de datos (Houh Lee, Gitano, Seng Eu, & Mohd Khalil, 2010).

Para la recopilación de datos se usó una motocicleta convencional y un captador de velocidad de rueda donde almacena los datos en un ordenador. La señal de velocidad de la rueda se genera cuando dos pernos de metal montados en radios disparan señales cuando pasan por un sensor inductivo. La señal de velocidad de la rueda se filtra a través de un filtro de paso bajo para reducir el ruido. Los datos almacenados se descargan posteriormente a la computadora para su procesamiento (Houh Lee, Gitano, Seng Eu, & Mohd Khalil, 2010).

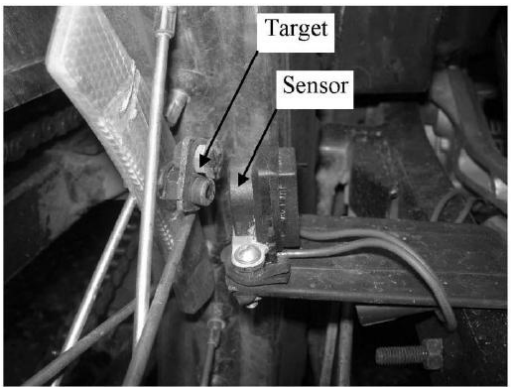


Figura 9. Sensor de velocidad de rueda inductivo y objetivo. Fuente: (Houh Lee, Gitano, Seng Eu, & Mohd Khalil, 2010)

Los datos de velocidad obtenidos por zonas (urbano, suburbano, autopista y por carretera) se procesaron para generar ciclos de conducción representativos, para analizar los ciclos de conducción se especificaron varios parámetros importantes: velocidad máxima, velocidad de crucero media, aceleración/desaceleración máxima y media, duración total y tiempo de inactividad (Houh Lee, Gitano, Seng Eu, & Mohd Khalil, 2010).

En el trabajo (3): El procedimiento consiste en generar micro viajes extraídos de datos del mundo real registrados durante las pruebas en carretera. Se consideró un conjunto de nueve parámetros para la comparación del ciclo de manejo con los datos del mundo real, a saber, duraciones porcentuales de aceleración, desaceleración, crucero y ralentí, velocidad promedio, velocidad máxima, aceleración y desaceleración máximas y número de paradas por km (Houh Lee, Gitano, Seng Eu, & Mohd Khalil, 2010).

Se eligió un vehículo SUV con las especificaciones con el fin de realizar pruebas en las regiones de prueba, los parámetros requeridos del vehículo, como la velocidad del vehículo y la aceleración, se registraron desde el mecanismo de control del sistema de gestión del motor, la posición del volante se midió utilizando un sensor de cuerda personalizado, se utilizó un dispositivo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para registrar la longitud, latitud y altitud durante la prueba. Los datos se registraron a una frecuencia de 50 muestras por segundo (Sriniwas, Amal, Nandagopalan, Simhachalan, & al., 2011).

Para la realización de ciclos de conducción se dividieron las rutas en micro viaje como el perfil de velocidad-tiempo entre el comienzo de la parada anterior y el final del siguiente instante en el que la velocidad del vehículo cae a cero. El micro viaje se aplica a los perfiles de las ciudades, mientras que existe cierta desviación para las autopistas y ghats donde hay menos números de paradas y arranques. Para las ciudades, donde hay inicios y paradas frecuentes, un Micro-viaje comienza desde el instante en que la velocidad cae a cero hasta el siguiente instante en que ocurre el mismo evento. Para autopista, la velocidad límite a la que comienza y finaliza un micro viaje es de 100 km/h y para Ghats, la velocidad es de 55 km/h. Estos son valores optimizados para obtener el máximo no. de Micro viajes. El procedimiento de desarrollo del ciclo de conducción implica una serie de pasos complejos que comienzan con la división de los datos básicos en micro viajes de pequeña duración. Esto se hace utilizando un programa MATLAB especialmente codificado (Sriniwas, Amal, Nandagopalan, Simhachalan, & al., 2011).

En el trabajo (4): Contaminación del aire y economía, autobús diésel versus autobús eléctrico, indica los vehículos eléctricos (EV) dan cero emisiones de GEI en forma de emisiones de escape. Los vehículos híbridos eléctricos producen menos emisiones en comparación con los vehículos propulsados por fuentes de energía convencionales no renovables.

También se ha producido una reducción en el tiempo de recarga de las baterías de los VE gracias a las nuevas tecnologías como la frenada regenerativa; desde más de 8 horas hasta alrededor de una hora. Aun así, no suelen tener una adopción generalizada, ya que

exigiría no solo nuevas formas de gestionar la interfaz entre los vehículos y la red eléctrica debido a la carga extra que tendría que soportar la red para recargar los vehículos cada día, sino también nuevas formas de valorar el ahorro de combustible y las reducciones en emisiones (Adheesh, Vasisht, & Ramasesha, 2016).

La sustitución de un autobús diésel por un autobús eléctrico generaría un impacto significativo en el medio ambiente. Un litro de diésel emite 2,64 kg de CO2 Tomando la distancia recorrida por los buses tanto diésel como eléctricos en un día de 170 km, el consumo promedio de combustibles del bus diésel será de 80.45 litros con una emisión de 212 kg de CO2. Así, en un año cada autobús diésel emitirá hasta 77 toneladas de CO2. Teniendo en cuenta el número total de autobuses diésel que circulan por las carreteras de la ciudad, la cantidad de CO2 emitida por sus gases de escape resulta ser de mucho kilo toneladas. Además, también deben tenerse en cuenta las emisiones de partículas de estos vehículos (Adheesh, Vasisht, & Ramasesha, 2016). Nos da a entender que los buses eléctricos no expulsan emisiones directas a la atmosfera, indirectamente la energía generada por las centrales eléctricas para cargar el autobús sí, pero que es mucho menos que lo que emite el autobús diésel.

6. Metodología de evaluación del desempeño vehículos eléctricos

Este capítulo describe el enfoque metodológico paso a paso que se empleará para cumplir con los objetivos planteados en la investigación. El estudio se centra en la evaluación del desempeño energético y del impacto ambiental y económico de la infraestructura de vehículos eléctricos en San Andrés.

La metodología evalúa el desempeño de VE y de combustión interna (VCI) es robusta, abarcando múltiples aspectos desde la recolección de datos hasta el análisis comparativo. Destaca por su integralidad y enfoque en la recolección de datos reales, lo que garantiza un análisis confiable. La comparación directa entre ambos tipos de vehículos permite identificar ventajas y desventajas en términos de consumo energético, costos y emisiones, además de considerar diversos factores que influyen en su desempeño, como el perfil del conductor y las condiciones de la vía.

La metodología permite una visión completa del comportamiento de los VE. Además, se apoya en datos cuantitativos reales y aborda tanto aspectos energéticos como económicos y ambientales. Su enfoque comparativo es clave para identificar las ventajas de la electromovilidad en relación con los vehículos tradicionales.

La metodología propuesta ofrece varias ventajas clave que la convierten en un enfoque robusto y útil para evaluar el desempeño de VE y convencionales en San Andrés.

1. Estructura Clara y Detallada: Esta metodología proporciona un marco bien definido para cada etapa del estudio, lo que asegura que los pasos a seguir, desde la recolección de datos hasta el análisis de los resultados, estén claramente delineados y organizados.
2. Enfoque Integral: La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos permite una visión más amplia y profunda del impacto energético, ambiental y económico

de los vehículos eléctricos y convencionales. Esta integración ofrece una comprensión más completa de los distintos factores que afectan su desempeño.

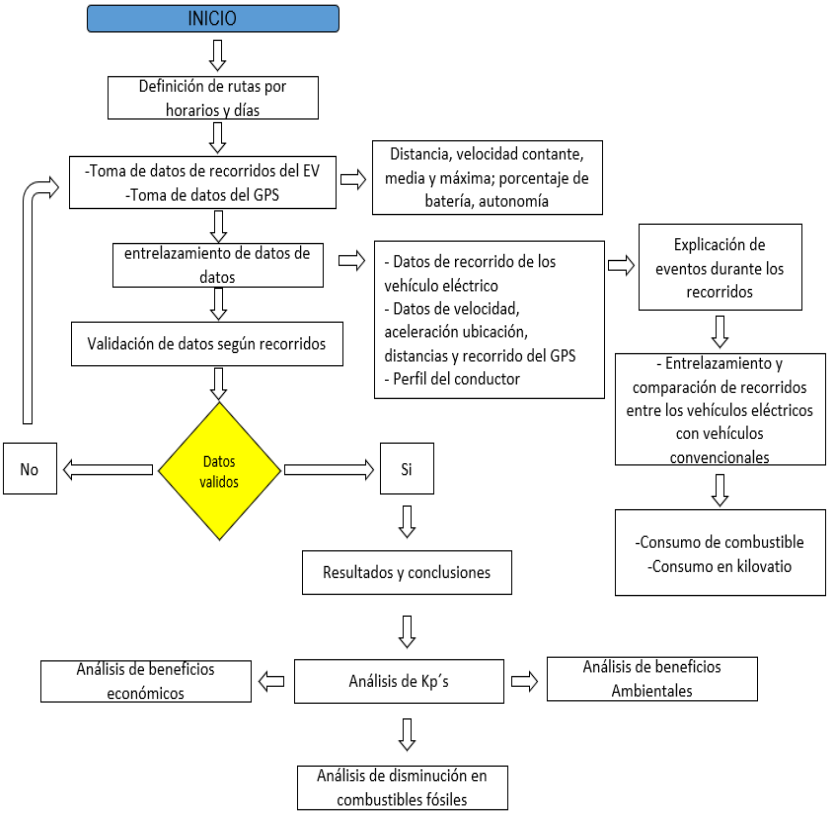


Figura 10. Metodología detallada propuesta donde se explica los procesos de la toma de decisiones. Fuente: Propia.

1. Comparación Directa: La metodología permite una comparación precisa entre VE y vehículos de combustión interna en cuanto a eficiencia energética, costos y emisiones, facilitando la identificación de las fortalezas y debilidades de cada tipo de vehículo.
2. Evaluación Multidimensional: Se tienen en cuenta varios criterios de evaluación, como la eficiencia energética, los costos operativos y las emisiones, proporcionando una visión holística del desempeño de los vehículos.
3. Recolección de Datos: Al incluir variables como distancia, tiempo, velocidad, consumo de energía y emisiones, la metodología asegura un análisis detallado que permite obtener resultados precisos y completos.

4. Aplicabilidad Práctica: Los resultados pueden ser utilizados para tomar decisiones concretas y fundamentadas sobre la adopción de VE en San Andrés, ayudando a promover la movilidad sostenible en la isla.
5. Beneficios Económicos y Ambientales: La metodología facilita la identificación de los beneficios económicos y ambientales de los VE, apoyando la formulación de políticas que promuevan la sostenibilidad y la reducción de emisiones contaminantes.

Esta metodología constituye una base sólida para evaluar los VE en términos energéticos, económicos y ambientales, pero puede mejorarse con las recomendaciones mencionadas, lo que permitirá tomar decisiones más informadas en cuanto a la movilidad sostenible en contextos como el de San Andrés. Ofrece un enfoque detallado y riguroso para analizar el rendimiento de los VE y vehículos convencionales, proporcionando herramientas valiosas para tomar decisiones informadas y promover políticas de movilidad sostenible.

6.1 Diseño de la Investigación

6.1.1 Tipo de Investigación: Cuantitativa con Componentes Cualitativos

La investigación se enmarca principalmente dentro de un enfoque cuantitativo, ya que se medirán datos numéricos y objetivos relacionados con el desempeño energético, económico y ambiental de los vehículos eléctricos (VE). Sin embargo, incluirá componentes cualitativos, como encuestas a usuarios para obtener percepciones sobre la viabilidad y aceptación de los VE en San Andrés.

6.1.2 Enfoque Metodológico: Descriptivo y Comparativo

El enfoque descriptivo busca caracterizar el comportamiento energético de los VE y sus impactos en términos económicos y ambientales. El estudio también es comparativo, ya que contrastará el rendimiento de los VE con los vehículos convencionales de combustión interna, tanto en términos de consumo de energía como de emisiones y costos operativos.

6.2 Selección de la Muestra

6.2.1 Criterios de Selección

Para la selección de los vehículos a estudiar, se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

- Tipo de vehículo (eléctrico y de combustión interna) que actualmente se utiliza en San Andrés.
- Vehículos destinados a usos similares (como transporte público, taxis o transporte privado) para hacer comparaciones más precisas.
- Año de fabricación y tecnología del motor, con el fin de evaluar las tecnologías más actuales en el contexto del estudio.

6.2.2 Tamaño de la Muestra

El tamaño de la muestra se calculará en función de la población de vehículos en la isla, tanto eléctricos como convencionales, buscando una muestra representativa para cada tipo. Se utilizará una fórmula estadística adecuada para definir el tamaño de la muestra, considerando un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%.

6.2.3 Procedimiento de Muestreo

Se empleará un muestreo estratificado, dividiendo la población de vehículos en diferentes estratos según el tipo de vehículo (eléctrico y convencional), uso (público o privado) y tamaño. Este método garantizará una representación adecuada de cada grupo en el estudio y permitirá comparaciones entre vehículos que realizan actividades similares.

6.3 Recolección de Datos

La metodología inicia con recopilar datos de viaje del vehículo eléctrico con respecto a cada recorrido como lo es la distancia, el tiempo, el conductor asignado, las paradas, desvíos, semáforos, autonomía inicial, autonomía final, porcentaje de batería final, porcentaje de batería final, cantidad de personas en el vehículo, porcentaje de aire acondicionado, temperatura ambiente y afluencia de personas en las vías; con el fin de establecer un ciclo de conducción para la ruta urbana y rural escogida, también se recopilan los datos dl GPS donde se obtuvieron los parámetros de distancia máxima, distancia media, distancia mínima, velocidad y el tiempo.

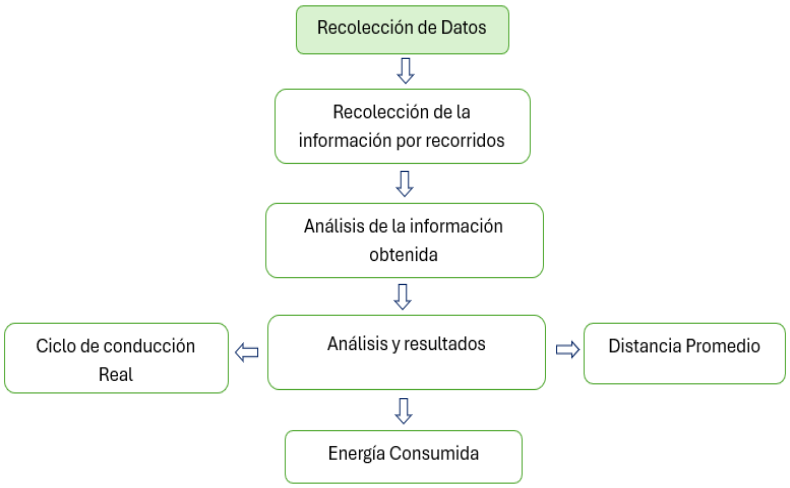


Figura 11. Toma de datos y Análisis y resultados. Fuente: Propia.

6.3.1 Fuentes de Datos

Se utilizarán tanto fuentes primarias como fuentes secundarias:

- Primarias: Datos obtenidos directamente mediante la medición del consumo energético, encuestas a usuarios de vehículos eléctricos y convencionales, y registros de emisiones.
- Secundarias: Estudios previos, bases de datos sobre consumo energético, reportes de agencias gubernamentales y fabricantes de vehículos, y literatura técnica sobre vehículos eléctricos.

6.3.2 Instrumentos de Recolección

Se utilizarán los siguientes instrumentos:

- Encuestas y entrevistas estructuradas: Para recoger información cualitativa sobre la percepción de los usuarios en cuanto a costos, mantenimiento y viabilidad de los VE.
- Dispositivos de medición de consumo energético: Para medir directamente el consumo de energía de los vehículos eléctricos y convencionales en condiciones reales de conducción.
- Sistemas de monitoreo de emisiones: Para cuantificar las emisiones producidas por los vehículos de combustión interna.

6.3.3 Procedimiento de Recolección

El proceso de recolección de datos en el campo incluirá:

- Monitoreo de vehículos en diferentes trayectos dentro de San Andrés, midiendo el consumo energético y las emisiones.
- Aplicación de encuestas a propietarios y conductores de vehículos eléctricos y convencionales para obtener información económica y de mantenimiento.
- Recolección de datos secundarios de fuentes documentales confiables, tales como informes de movilidad urbana y estudios previos realizados en contextos similares.

6.4 Análisis de Datos

Análisis de los resultados obtenidos de la recopilación de datos de los vehículos eléctricos, la comparación con los vehículos a combustión:

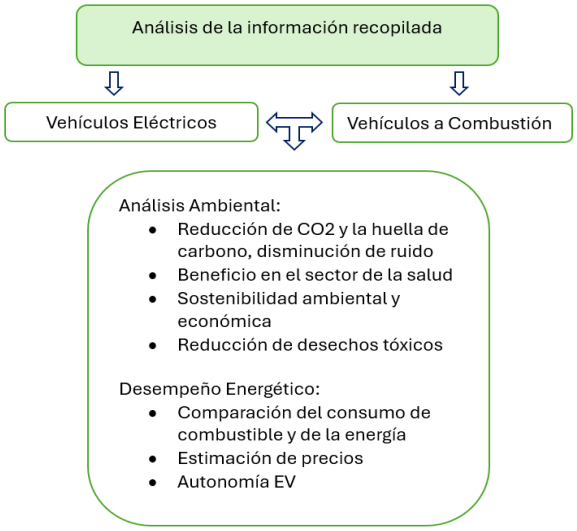


Figura 12. Análisis de los parámetros energéticos y ambientales para la obtención de los resultados. Fuente: Propia.

6.4.1 Preparación de los Datos

Los datos recolectados pasarán por un proceso de limpieza y transformación, donde se eliminarán duplicados, datos inconsistentes o erróneos, y se organizarán en un formato adecuado para el análisis. También se estandarizarán las unidades de medida para permitir comparaciones entre tipos de vehículos.

6.4.2 Análisis Estadístico

Se emplearán varias técnicas estadísticas, entre ellas:

- Estadística descriptiva: Para describir los datos recolectados, tales como consumo energético promedio, emisiones y costos operativos.
- Regresión lineal: Para identificar patrones de consumo energético en función de variables como el tipo de vehículo, condiciones de conducción y uso.

6.5 Evaluación del Desempeño Energético

6.5.1 Indicadores

Se definirán varios indicadores de desempeño energético, tales como:

- Consumo energético específico (kWh/km): Para los vehículos eléctricos.
- Consumo de combustible (litros/km): Para los vehículos de combustión interna.
- Costos operativos (COP/km): Que incluirán costos de energía o combustible y costos de mantenimiento.

6.5.2 Comparación

El desempeño energético de los vehículos eléctricos se comparará con los vehículos de combustión interna utilizando los indicadores mencionados. Se analizará la relación entre la distancia recorrida y el consumo de energía en ambos tipos de vehículos para determinar cuál es más eficiente en términos energéticos en San Andrés.

6.6 Evaluación del Impacto Ambiental y Económico

6.6.1 Emisiones

Se calcularán las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes producidos por los vehículos de combustión interna, como el dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas (PM). Para los vehículos eléctricos, se estimarán las emisiones indirectas relacionadas con la producción de la electricidad utilizada, dependiendo de la matriz energética de la isla.

6.6.2 Costos

Se evaluarán los costos totales de propiedad (TCO) de cada tipo de vehículo, lo que incluirá:

- Costos de adquisición: El precio inicial de los vehículos eléctricos frente a los convencionales.
- Costos de operación: Energía o combustible, mantenimiento y seguros.
- Costo de vida útil: Comparación entre la longevidad y los gastos totales asociados a cada tipo de vehículo durante su vida útil.

Con estos análisis, se podrá determinar la viabilidad económica de la implementación masiva de vehículos eléctricos en San Andrés y sus beneficios o desventajas ambientales.

Esta metodología proporciona un enfoque sistemático para evaluar el impacto energético, económico y ambiental de los vehículos eléctricos en San Andrés, permitiendo la toma de decisiones informadas en cuanto a la adopción de esta tecnología en el contexto insular.

7. Evaluación de desempeño energético

En este capítulo se aplica la metodología explicada en el capítulo anterior, en el que se analizan los datos de viaje del vehículo eléctrico con respecto a cada recorrido como lo es la distancia, el tiempo, las paradas, desvíos, semáforos, autonomía inicial, autonomía final, porcentaje de batería final, porcentaje de batería final, cantidad de personas en el vehículo, porcentaje de aire acondicionado, temperatura ambiente y afluencia de personas en las vías; con el fin de establecer un ciclo de conducción para la ruta urbana y rural escogida, también se recopilan los datos del GPS donde se obtuvieron los parámetros de distancia máxima, distancia media, distancia mínima, velocidad y el tiempo, con esto, se llega al análisis económico por consumo en combustibles vs energía.

7.1 Especificaciones técnicas de vehículos y GPS

7.1.1 GPS VBOX Sport VBS01-V3

El GPS VBOX Sport VBS01-V3 es un dispositivo altamente preciso y confiable, diseñado para realizar mediciones detalladas de velocidad, distancia y posición en aplicaciones automotrices y de rendimiento dinámico. Su capacidad para registrar datos a una frecuencia de 20 Hz (20 veces por segundo) le permite captar cambios rápidos en la velocidad y posición del vehículo con una exactitud en velocidad de ±0.1 km/h, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para el análisis del desempeño vehicular.

El VBOX Sport también ofrece una precisión en la medición de distancias, con un margen de error de 0.05%, o menos de 50 centímetros por kilómetro recorrido. Esta característica es para estudios donde la distancia recorrida. Además, la posición absoluta del GPS tiene una precisión de ±2 metros, lo que garantiza un nivel de exactitud adecuado para la mayoría de las pruebas en entornos reales.

El dispositivo es compatible con los sistemas de satélite GPS y GLONASS, lo que le permite mantener una señal fuerte y precisa en diversas condiciones. La batería recargable ofrece hasta 6 horas de uso continuo, y los datos recolectados se almacenan en una tarjeta microSD.

Figura 13. GPS Vbox sport. Fuente: (vboxmotorsport, 2024)

El VBOX Sport es una solución avanzada y práctica para la medición detallada del rendimiento de vehículos, gracias a su alta precisión, robustez y capacidad de almacenar grandes volúmenes de datos para análisis detallados.

7.1.2 Vehículo eléctrico YUAN EV 400

El YUAN EV 400 es un vehículo eléctrico compacto fabricado por BYD, diseñado para ofrecer un equilibrio óptimo entre eficiencia, comodidad y seguridad para el uso particular. A continuación, se destacan sus principales especificaciones técnicas:

El YUAN EV 400 está equipado con un motor de 70 kW (94 HP), que produce un torque máximo de 180 Nm, garantizando un rendimiento notable en la conducción. Utiliza baterías de NCM (Níquel, Cobalto y Manganeso) con una capacidad de 53,2 kWh, ofreciendo una autonomía de hasta 400 km en condiciones óptimas, según el ciclo NEDC. El tiempo de carga varía entre 9 horas y 30 minutos en carga normal (AC) y aproximadamente 1 hora y 30 minutos en carga rápida (DC).

Motor	
Max. potencia (kW)	70
Max. torque (N•m)	180
Transmisión	
Tipo de transmisión	BYDNT18-1
Batería	
Tipo de batería	NCM
Capacidad (kWh)	53.2
Voltage (V)	394.2
Cantidad de modulos	/
Cantidad de celdas	108
Capacidad de cada celda (Ah)	135
Cargador	
Podencia de carga	EU AC 7kW/DC 40kW GB AC 7kW/DC 40kW
Tiempo de carga	8.5h/1.5h

Figura 14. Configuración general del vehículo eléctrico YUAN EV 400. Fuente: (Motorysa, 2024)

El vehículo tiene unas dimensiones de 4,360 mm de largo, 1,785 mm de ancho y 1,680 mm de altura, con una distancia entre ejes de 2,535 mm. El peso vehicular vacío es de 1,580 kg, mientras que el peso bruto vehicular es de 1,955 kg. La capacidad del baúl es de más de 400 litros, alcanzando hasta 1,200 litros con los asientos traseros abatidos.

En cuanto a desempeño, el YUAN EV 400 puede alcanzar una velocidad máxima de 140 km/h y acelerar de 0 a 100 km/h en menos de 13.9 segundos. Su radio de giro es menor o igual a 5.5 m, lo que facilita la maniobrabilidad.

El vehículo está equipado con avanzados sistemas de seguridad, incluyendo airbags delanteros y laterales, control de estabilidad (ESP), sistema de monitoreo de presión de llantas (TPMS) y freno de parqueo eléctrico (EPB). En términos de tecnología y conectividad, cuenta con una pantalla multimedia de 10.1", sistema de llave inteligente, cámara y sensores de reversa, así como tapicería en cuero. Otros elementos destacados incluyen control crucero y un sunroof panorámico.

El YUAN EV 400 combina un diseño moderno con tecnología avanzada y características de seguridad robustas. Es ideal para quienes buscan un vehículo eléctrico eficiente y práctico para el uso diario, contribuyendo así a una movilidad más sostenible y ecológica, con cero emisiones durante su operación.

7.2 Evaluación de ciclos de conducción por vía

7.2.1 Recorridos EEDAS - planta de generación Schooner Bight

Se realizan los recorridos desde la empresa EEDAS SA ESP, ubicada en la zona céntrica de la isla, que para llegar a su destino al sector de SCHOONER BIGHT debe atravesar varias avenidas transitadas y luego llegar a la vía circunvalar, el cual es, una vía menos recurrente. Se realizaron 24 recorridos y se tomaron los siguientes parámetros de vía:

Descripción	Datos de recorridos
Distancia (Km)	8,41
Tiempo Promedio De Llegada En La Tarde (minutos)	17:14
Semáforos	3
Velocidad Media (Km/h)	34,9
Promedio Velocidad Máxima (Km/h)	69,7
Velocidades Entre 20,01-40,01 (Km/h)	37,5%
Velocidades Entre 40,01-60,01 (Km/h)	25%
Velocidades Entre 60,06-80,01 (Km/h)	25%
Velocidades Entre 80,01-100,01 (Km/h)	12,5%

Tabla 4. Datos generales obtenidos del trayecto desde EEDAS hasta Schooner Bight. Fuente: Propia.

El trayecto estudiado entre EEDAS y Schooner Bight, con una distancia total de 8,41 km, ofrece una visión detallada de las condiciones de tráfico mixto que se experimentan durante el recorrido. El tiempo promedio de llegada en la tarde es de 17 minutos y 14 segundos, lo que refleja un tráfico relativamente moderado considerando la presencia de tres semáforos. Este número de semáforos indica que gran parte del trayecto se realiza en zonas urbanas, donde las interrupciones del tráfico son comunes.

La velocidad media de 34,9 km/h sugiere un recorrido con condiciones de tráfico fluido en algunos tramos y más lentas en otros. El promedio de velocidad máxima de 69,7 km/h refuerza la idea de que hay partes del trayecto en las que los conductores pueden alcanzar velocidades más elevadas, probablemente en zonas menos congestionadas o de tráfico más libre.

La distribución de las velocidades muestra un patrón de conducción característico de un recorrido urbano-suburbano:

- 37,5% del tiempo se conduce a velocidades entre 20,01 y 40,01 km/h, lo que es típico de zonas con tráfico más denso o con presencia de semáforos y zonas residenciales.
- 25% del trayecto se realiza a velocidades entre 40,01 y 60,01 km/h, sugiriendo tramos de transición con tráfico más ligero.

- Otro 25% se realiza entre 60,06 y 80,01 km/h, lo que podría ser en avenidas más abiertas o carreteras menos congestionadas.
- Finalmente, el 12,5% se recorre entre 80,01 y 100,01 km/h, lo que indica tramos de mayor velocidad, probablemente en vías rápidas o con menos intersecciones.

La combinación de velocidades y la presencia de semáforos sugiere un tráfico mixto, típico de trayectos que atraviesan tanto zonas urbanas como vías más rápidas. El hecho de que el 37,5% del tiempo se pase en velocidades moderadas (20-40 km/h) refuerza la idea de que gran parte del trayecto está sujeto a congestiones y regulaciones de tráfico, como semáforos o cruces peatonales.

Este trayecto de 8,41 km refleja un patrón de tráfico mixto con tramos urbanos y algunos de mayor velocidad. El tiempo de viaje y la velocidad media están influenciados tanto por la infraestructura (semáforos y calles urbanas) como por la posibilidad de acceder a vías más rápidas. Esto proporciona un contexto útil para entender cómo factores como la velocidad, los semáforos y las condiciones del tráfico afectan la eficiencia de los trayectos en este recorrido.

El GPS que se adquirió para este proyecto solo permitía analizar 6 recorridos, por lo tanto, se tomó la opción de modelarlos en Microsoft Excel para visualizar los 24 recorridos a la vez, tomando los datos de velocidades de cada recorrido cada 50 segundos.

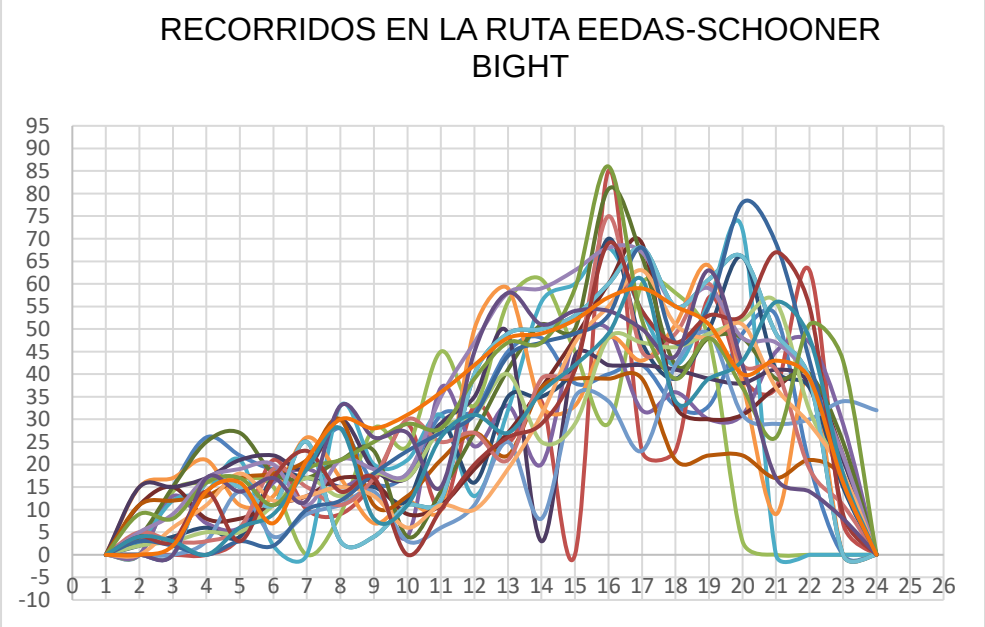


Figura 15. Primer recorrido establecido, desde la zona céntrica hasta la circunvalar. Fuente: Propia.

Para entender el tipo de vía, con la gráfica anterior, se puede observar que al principio del recorrido la aceleración, desaceleración no es variable y la velocidad antes de los 350

segundos no pasan de 35km/h esto es debido a que el vehículo aun esa en zona alta afluencia vehicular y vías cortas, en cambio cuando se va aproximando en hacia el destino sube las velocidades a más de 70km/h, ya que la vía se vuelve solitaria de forma rectilínea con pocas curvas y cambia la anchura de la vía. Con esa información se pudo obtener el ciclo de conducción calculando así la mediana, donde se organizan las velocidades en conjuntos ordenados por segundos.

	Segundos																								
Velocidad	V/S	0s	50s	100s	150s	200s	250s	300s	350s	400s	450s	500s	550s	600s	650s	700s	750s	800s	850s	900s	950s	1000s	1050s	1100s	1150s
	V007	0	0	15	26	22	19	20	28	16	18	31	32	45	48	38	40	42	33	33	49	53	20	0	0
	V033	0	0	0	0	4	21	10	9	16	29	10	33	25	34	0	85	23	23	57	39	37	63	7	0
	VR020	0	0	14	16	17	15	0	9	28	24	45	33	56	61	45	29	60	58	48	3	0	0	0	0
	V028	0	0	13	7	6	16	19	15	17	4	37	24	33	20	48	50	32	36	30	31	45	47	29	0
	V017	0	3	12	14	21	2	0	33	20	21	31	13	32	56	60	68	54	42	56	72	0	0	0	0
	V012	0	15	17	21	11	13	26	17	7	12	10	50	59	33	33	48	43	51	64	38	9	40	0	0
	VR044	0	2	4	6	4	17	17	15	15	12	29	16	35	35	42	70	47	39	50	66	41	37	15	0
	VR047	0	11	15	8	8	11	13	17	16	9	11	19	27	37	48	60	69	33	30	31	37	40	22	0
	VR055	0	4	15	25	27	18	17	21	23	4	14	27	41	51	50	81	66	42	48	48	39	40	25	0
	VR057	0	15	15	17	21	22	19	30	19	17	29	35	49	3	44	42	42	41	39	38	41	38	21	0
	VR060	0	0	0	16	15	11	25	3	4	11	12	40	49	50	53	60	68	55	61	66	49	39	0	0
	VR066	0	11	12	13	17	18	21	30	11	13	21	27	22	37	39	39	39	21	22	22	17	21	17	0
	VR044	0	0	0	3	14	4	9	11	14	3	6	11	25	8	35	34	23	42	49	31	29	30	34	32
	VR069	0	5	3	3	6	19	15	11	17	30	25	27	21	39	41	75	45	49	60	42	41	19	11	0
	VR071	0	2	3	5	5	11	17	13	18	17	28	31	40	25	29	48	47	46	49	52	56	32	18	0
	VR072	0	5	9	17	19	20	11	21	19	18	35	47	58	59	63	68	67	55	59	48	47	39	22	0
	VR073	0	0	0	16	15	11	25	3	4	11	12	40	49	50	53	60	68	55	61	66	49	39	0	0
	VR075	0	0	6	11	18	12	13	15	13	6	11	10	19	31	47	55	63	51	48	51	37	29	18	0
	VR077	0	3	2	0	3	2	10	12	18	23	27	31	44	47	49	53	68	47	55	78	69	43	16	0
	VR076	0	4	3	14	3	17	23	14	17	0	10	20	26	29	41	69	54	47	53	53	67	55	9	0
	VR079	0	9	8	16	17	11	19	21	25	29	28	39	47	47	59	86	52	39	48	37	26	51	43	0
	VR080	0	0	0	17	14	17	12	33	26	27	15	45	58	51	54	54	50	44	63	42	17	14	8	0
	VR083	0	4	3	0	6	9	19	28	8	11	26	31	27	36	42	49	61	34	39	43	56	48	18	0
	VR085	0	0	2	14	16	7	21	30	28	31	36	42	48	49	52	57	59	55	51	40	43	39	16	0

Tabla 5. Organización de las velocidades por segundos calcular la mediana. Fuente: Propia.

La Tabla 5, presenta, la distribución de las velocidades de las cuales se puede hacer un análisis de las velocidades registradas a lo largo de la ruta EEDAS-SOPESA. Los datos fueron recolectados en intervalos de 50 segundos y se analizaron las métricas de suma, promedio, máximos, mínimos y mediana de las velocidades a lo largo del trayecto. El objetivo es identificar patrones de comportamiento en las velocidades y evaluar los puntos clave del recorrido.

El análisis de la suma de las velocidades en cada intervalo de tiempo muestra un incremento constante a lo largo de la ruta, con algunos picos notables. El punto más alto se alcanzó a los 750 segundos, con una suma total de 1380 V/s, lo que sugiere que este fue el tramo de mayor velocidad del recorrido. Por el contrario, el valor más bajo se registró a los 1150 segundos, con solo 32 V/s, lo que indica una desaceleración pronunciada o incluso el final del trayecto.

El promedio de las velocidades a lo largo del tiempo refleja la velocidad típica de los vehículos en cada intervalo. Al igual que en la suma, el promedio más alto, de 57.5 V/s, se observó a los 750 segundos. Este pico resalta un tramo de alta velocidad en la ruta. Hacia el final, en el intervalo de 1150 segundos, el promedio disminuyó considerablemente a 1.33 V/s, lo que evidencia una notable reducción en la velocidad en esa etapa del trayecto, posiblemente debido a una desaceleración antes de finalizar la ruta.

En términos generales, el análisis revela que hay un incremento notable en las velocidades promedio, máximas y acumuladas alrededor de los 750 segundos, lo que indica un tramo de la ruta donde los vehículos pueden acelerar considerablemente. A partir de ese punto, las velocidades comienzan a disminuir gradualmente, lo que sugiere que los vehículos desaceleran hacia el final de la ruta. Esta fluctuación en las velocidades puede estar influenciada por las condiciones del tráfico, las características del terreno o el comportamiento de los conductores en determinados tramos.

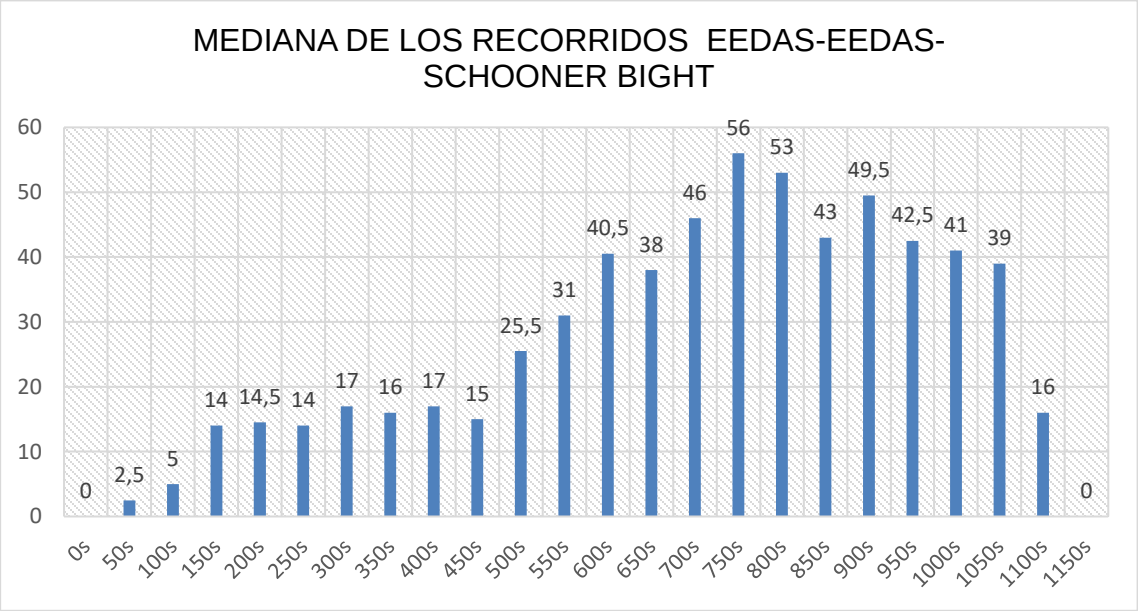


Figura 16. Ciclo de conducción de la ruta EEDAS (centro) hacia SOPESA (Schooner Bight). Fuente: Propia.

El gráfico presentado ilustra la distribución de frecuencias de los tiempos de recorrido entre EEDAS y Schooner Bight. Cada barra representa un rango de tiempo en segundos, y la altura de la barra indica cuántas veces se ha registrado un tiempo de recorrido dentro de ese rango. Esta visualización permite identificar patrones y tendencias en los tiempos de viaje.

Los datos revelan una gran variabilidad en los tiempos de recorrido, con registros que van desde menos de 100 segundos hasta más de 1100 segundos. Se observan picos en ciertos rangos de tiempo, sugiriendo que existen condiciones o rutas específicas que tienden a

generar tiempos de recorrido similares. Sin embargo, también se nota la ausencia de datos en algunos rangos, lo que podría indicar que esos tiempos son poco comunes o que no se han documentado adecuadamente.

Varios factores pueden influir en la variabilidad de los tiempos de recorrido, incluyendo:

Condiciones del tráfico: La hora del día es fundamental, ya que durante las horas pico el tráfico suele ser más denso, incrementando los tiempos de recorrido. Los fines de semana y días festivos tienden a tener menos congestión. Eventos especiales, como conciertos o ferias, pueden causar congestión adicional.

Condiciones climáticas: Factores como la lluvia o la niebla pueden afectar la velocidad de los vehículos y, por ende, aumentar el tiempo de viaje.

Estado de las vías: Obras en la vía o accidentes pueden causar retrasos significativos.

Ruta elegida: Los conductores pueden optar por diferentes rutas que pueden ofrecer variaciones en los tiempos de recorrido. Aunque algunos atajos pueden parecer más rápidos, en ocasiones no lo son debido al tráfico o las condiciones de la vía.

Estilo de conducción: La velocidad y las pausas realizadas durante el recorrido también impactan directamente en el tiempo total del trayecto.

En el trayecto de 8,41 km, el tiempo promedio de llegada en la tarde es de 17 minutos y 14 segundos, con tres semáforos a lo largo del recorrido. La velocidad media se sitúa en 34,9 km/h, con un promedio de velocidad máxima de 69,7 km/h. La distribución de las velocidades indica que un 37,5% del recorrido se realiza entre 20,01 y 40,01 km/h, lo que refuerza la idea de que el trayecto combina tramos urbanos y de mayor velocidad. Por último, el gráfico de la mediana de los recorridos en diferentes fechas ayuda a visualizar las tendencias en los recorridos diarios y la variabilidad en el número de viajes realizados cada día.

Con el histograma de las velocidades se observa que las velocidades que más varia son entre 28,71 y 37,41km/h.

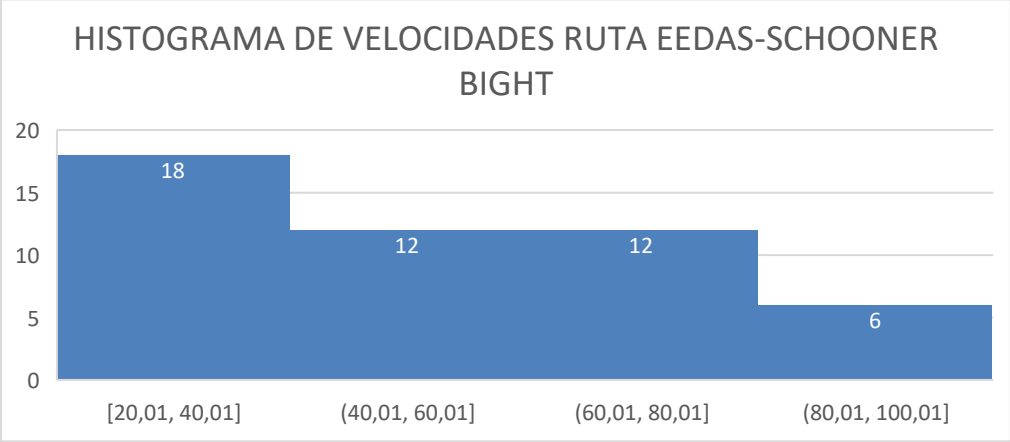


Figura 17. Histograma de velocidades. Fuente: Propia.

El GPS también nos permite visualizar la aceleración lateral del vehículo, el cual, se evidencio que las gráficas presentaban este parámetro elevado cuando se inicia la medición, es decir en la salida del vehículo y al llegar el destino, esto debido a que en el arranque y al finalizar se deben realizar giros aproximados de 90°.

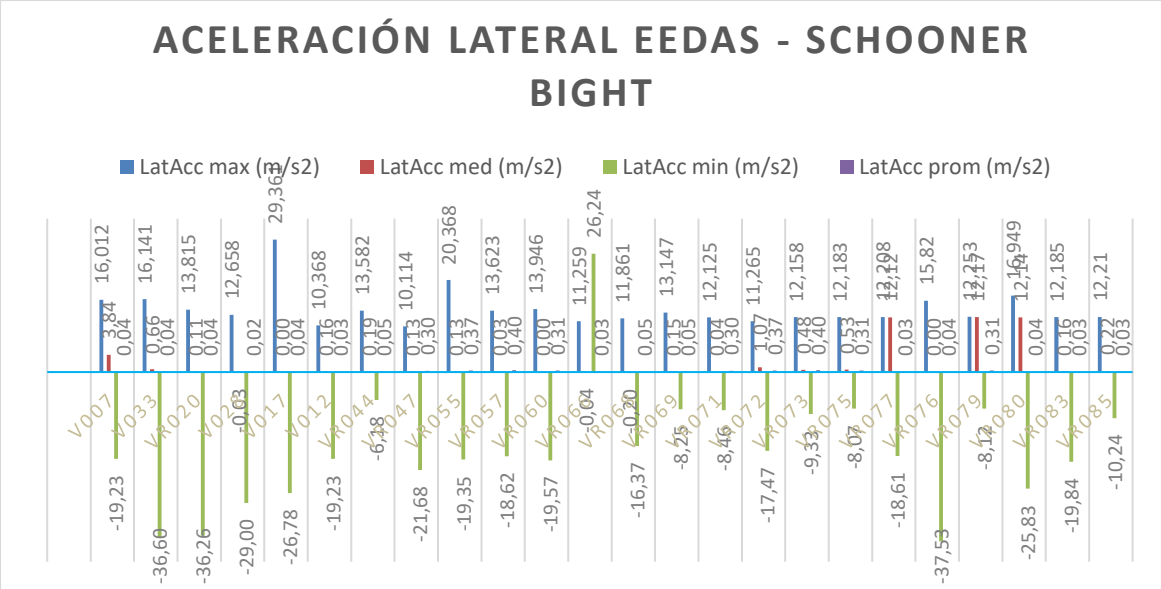


Figura 18. Aceleración lateral por recorrido. Fuente: Propia.

En la siguiente tabla podemos encontrar los parámetros obtenido de los 24 recorridos realizados como las distancias por recorridos, el porcentaje de la batería inicial y final, la autonomía del vehículo inicial y final, porcentaje de descarga y autonomía inicial y final.

ítem	Duración minutos	Distancias Km	% bat in	%bat done	energía utilizada	Autonomía In (Km)	Autonomía fin (Km)	Autonomía final
1	18:24:50	9,06	99	97	2	409	397	12
2	19:32:30	8,8	98	95	3	405	393	12
3	15:18:00	8,2	76	73	3	314	302	12
4	21:16:00	8,9	34	31	3	140	128	12
5	17:13:00	8,9	77	74	3	319	307	12
6	18:10:59	9,35	80	75	5	331	309	22
7	25:31:50	8,8	44	41	3	182	170	12
8	20:35:44	8,5	88	85	3	363	351	12
9	16:50:15	8,21	75	71	4	310	294	16
10	18:24:50	9	97	95	2	401	389	12
11	17:50:03	8,8	33	30	3	136	124	12
12	18:30:33	9,02	99	96	3	410	398	12
13	17:08:00	8,7	92	89	3	380	368	12
14	19:50:37	8,85	81	78	3	334	322	12
15	21:16:03	9,15	75	72	3	310	295	15
16	18:10:59	8,4	66	63	3	273	261	12
17	17:35.13	8,6	33	30	3	136	124	12
18	17:28.04	8,69	29	26	3	120	108	12
19	19:05:13	8,73	99	96	3	409	397	12
20	18:13:30	8,8	99	96	3	409	397	12
21	18:33:07	9,1	82	79	3	339	327	12
22	16:53:03	8,6	21	18	3	87	75	12
23	18:33:33	0,36	97	94	3	397	385	12
24	18:33:02	8,2	71	68	3	293	281	12

Tabla 6. Información recopilada de los recorridos. Fuente: Propia.

De esta Tabla 6, se pudo obtener los valores promedios como la duración del viaje 14:14:49 minutos, la distancia recorrida de 8,41 kilómetros, la energía de la batería consumida de 3% y una autonomía de 12,7 km/h, se debe tener en cuenta que la autonomía de recorrido del vehículo eléctrico diferente con los datos de distancia recorrida obtenidos del GPS, esto se debe a que la autonomía que el vehículo visualizada en pantalla depende de muchos factores externos como el clima, internos como el uso del aire acondicionado, el peso y la forma de manejar del conductor.

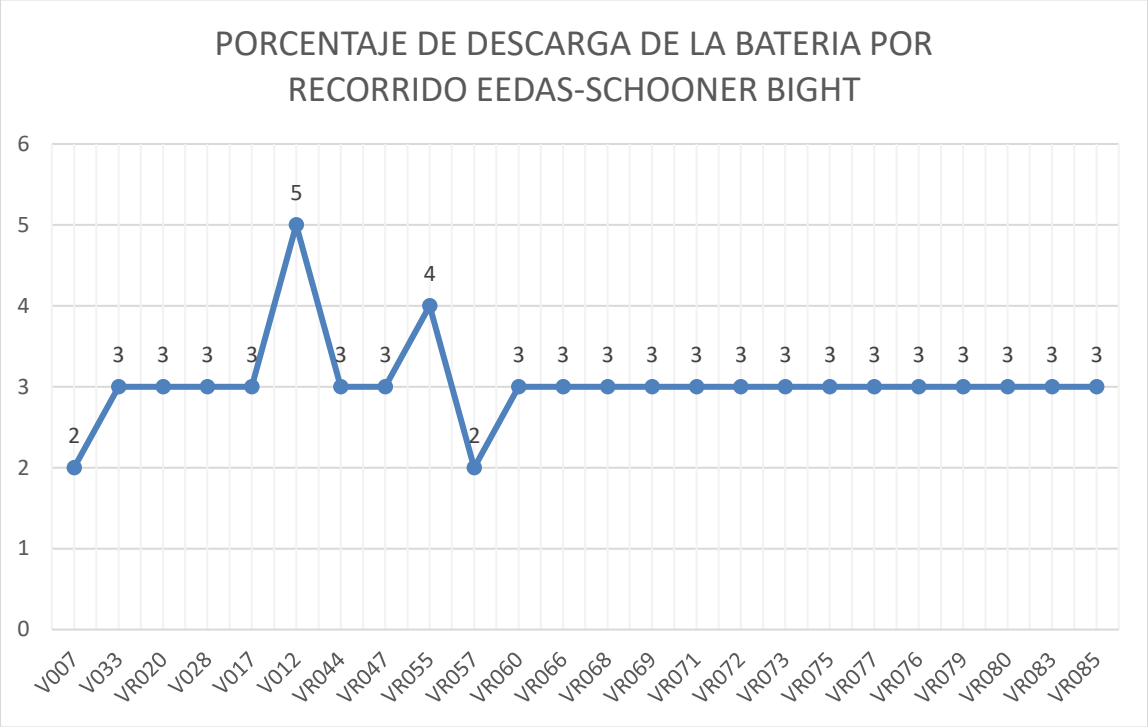


Figura 19. Porcentaje de descarga de la batería por cada viaje. Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta que la batería totalmente cargada cuenta con una capacidad en autonomía de 53.2kWh y la descarga de la batería del 3%, se determinó que el consumo energético por porcentaje consumido es de 0,532kWh, es decir, que el desgaste de la batería del promedio de estos recorridos es de 1,6kWh por 8,41km tomados por el GPS, pero la autonomía mostrada en el vehículo eléctrico fue de 12,7 km recorridos, con esto, se puede entender que los datos de consumo en sector rural de la isla tienden a un con consumo promedio por kilómetro de 0.13 kWh por 1 kilometro.

$$Consumo\ por\ Bat\ x\ km = \frac{Consumo\ de\ la\ bateria\ por\ tayecto}{kilometros\ recorridos\ por\ el\ vehiculo\ (tomado\ del\ vehiculo)}$$ Ecuación 3

$$Consumo\ por\ Bat\ x\ kilometro = \frac{1{,}6kWh}{12km} = 0{,}13kWh/1km$$ Ecuación 4

7.2.2 Recorridos EEDAS - Subestación eléctrica del Bight

Se realiza recorridos desde la empresa EEDAS SA ESP hasta la subestación eléctrica de la Sociedad Productora de Energía SOPESA SA ubicada en la vía San Luis de la isla, este sector es muy transitado en las horas del día por muchos transeúntes de barrios aledaños y lejanos para llegar al centro de la isla. Se realizaron 25 recorridos y se tomaron los siguientes parámetros de vía:

Descripción	Datos de recorridos
Distancia (Km)	2,73
Tiempo Promedio De Llegada En La Tarde (minutos)	7:38
Semáforos	2
Velocidad Media (Km/h)	24
Promedio Velocidad Máxima (Km/h)	48
Velocidades Entre 20-32 (Km/h)	50%
Velocidades Entre 32-44 (Km/h)	12%
Velocidades Entre 44-56 (Km/h)	36%
Velocidades Entre 56-68 (Km/h)	2%

Tabla 7. Datos generales obtenidos del trayecto desde EEDAS hasta vía San Luis. Fuente: Propia.

El GPS que se adquirió para este proyecto solo permitía analizar 6 recorridos, por lo tanto, se tomó la opción de modelarlos en Microsoft Excel para visualizar los 25 recorridos a la vez, tomando los datos de velocidades de cada recorrido cada 50 segundos.

Para entender el tipo de vía con respecto a la gráfica anterior, se puede observar que en todos los recorridos las velocidades son variables y no alcanza los 55 km/h, debido a que en este corto recorrido se encuentran dos semáforos, afluencia vehicular y siete (7) paseos peatonales, además que la velocidad máxima permitida es de 30 km/h. Con esa información se pudo obtener el ciclo de conducción calculando así la mediana, donde se organizan las velocidades en conjuntos ordenados por segundos.

El análisis de las velocidades a lo largo del recorrido ofrece una visión detallada del comportamiento de los vehículos en función del tiempo. La suma total de las velocidades en cada intervalo temporal revela cómo se acumulan las velocidades a lo largo del trayecto. Se observa un patrón de incremento constante, con algunos picos notables en momentos clave del recorrido. El pico máximo de acumulación de velocidad se presenta a los 360 segundos, alcanzando un valor de 811, lo que indica un punto de alta actividad o velocidad sostenida. En contraste, el pico mínimo ocurre a los 480 segundos, con una suma de 132, lo que podría corresponder a una sección del trayecto donde los vehículos disminuyen significativamente su velocidad o enfrentan interrupciones.

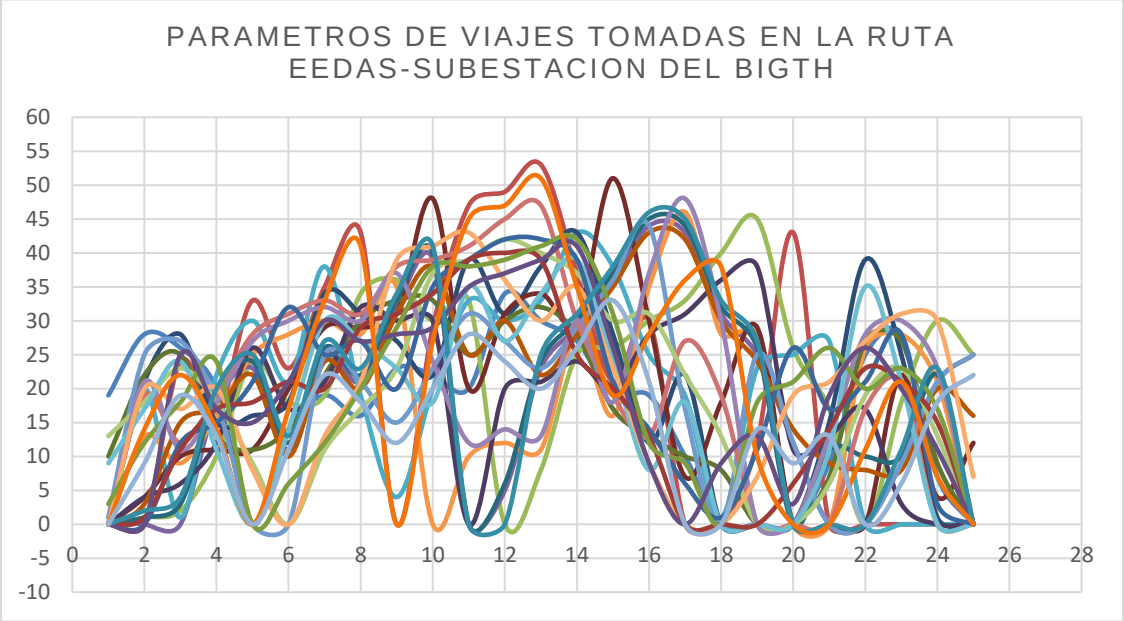


Figura 20. Primer recorrido establecido, desde la zona céntrica hasta la vía San Luis. Fuente: Propia.

En cuanto al promedio de las velocidades, este dato proporciona una idea de la velocidad típica en cada intervalo de tiempo. El promedio máximo se alcanza también a los 360 segundos, con un valor de 32.44, lo que sugiere que en ese momento del recorrido los vehículos mantuvieron una velocidad relativamente alta en comparación con el resto del trayecto.

Los valores máximos de velocidad en cada intervalo reflejan los momentos en los que los vehículos alcanzaron sus velocidades más altas. El máximo absoluto de 53 se registra a los 240 segundos, lo que indica un momento clave de aceleración en el trayecto. La mediana de las velocidades, que ofrece una medida central, sigue una tendencia similar. La mediana máxima de 33 se observa a los 200 segundos, lo que indica que la mitad de las velocidades registradas en ese intervalo fueron iguales o inferiores a ese valor.

Se destaca un notable incremento en las velocidades promedio y máximas alrededor de los 360 segundos, lo que podría señalar un tramo del recorrido en el que los vehículos tuvieron la oportunidad de acelerar más, posiblemente debido a mejores condiciones de la ruta o menor tráfico. La variabilidad en las velocidades máximas y mínimas a lo largo del trayecto sugiere fluctuaciones en las condiciones del recorrido o en el comportamiento de los conductores, lo que puede reflejar factores como cambios en la infraestructura de la carretera, tráfico o decisiones de conducción. A pesar de esta variabilidad, la consistencia en la mediana y el promedio hasta los 360 segundos sugiere un patrón general de aceleración, seguido por una disminución de la velocidad en la fase final del trayecto.

Velocidad	segundos																							
V/S	0s	20s	40s	60s	80s	100s	120s	140s	160s	180s	200s	220s	240s	260s	280s	300s	320s	340s	360s	380s	400s	420s	440s	460s	480s
VR073	19	28	26	20	0	14	19	16	23	22	20	34	30	27	19	19	10	0	0	0	9	25	28	7	0
VR075	0	0	24	16	33	23	35	43	0	29	47	49	53	37	21	30	0	0	12	43	0	0	0	0	0
VR066	0	1	2	10	24	18	19	34	36	30	33	0	8	25	26	30	33	40	45	26	17	0	18	30	25
VR052	1	0	0	18	23	11	25	21	32	39	0	5	23	29	36	44	43	31	25	12	0	0	9	21	25
VR050	1	20	1	22	30	21	38	19	4	20	33	30	33	43	38	25	19	1	23	25	27	0	0	0	0
VR047	0	13	9	16	25	28	30	28	35	0	10	12	11	28	16	35	46	28	28	0	0	26	28	21	0
VR094	0	21	28	15	16	18	34	31	27	22	39	31	38	43	28	12	22	0	0	0	15	39	25	1	0
VR043	0	4	10	11	11	20	29	29	31	48	20	31	34	30	51	30	7	18	29	0	0	0	22	4	12
VR045	10	22	25	13	11	14	22	30	33	33	25	30	32	28	17	13	10	8	0	0	7	27	27	9	0
VR056	0	4	6	12	26	17	21	32	30	30	0	20	21	24	20	28	31	36	38	11	13	17	3	0	0
VR057	0	1	3	19	24	12	26	22	33	40	0	6	24	30	37	45	44	32	26	0	11	10	10	22	0
VR058	0	3	15	17	22	10	24	20	31	38	25	30	22	28	35	43	42	30	24	14	9	8	8	20	16
VR059	1	25	27	18	0	0	25	21	15	23	31	27	23	29	36	44	17	0	25	12	0	0	9	21	25
VR067	0	19	12	19	28	31	33	31	38	39	41	45	47	30	19	13	27	19	0	0	0	17	21	0	0
VR068	13	18	23	18	9	0	11	17	23	37	39	42	40	37	30	31	22	13	0	0	6	19	23	13	0
VR074	0	21	11	18	27	30	32	30	37	24	12	14	13	30	18	37	48	30	0	0	13	28	30	23	0
VR075	9	17	24	11	0	14	30	27	23	18	35	27	34	39	24	8	18	0	0	0	11	35	21	0	0
VR086	0	20	17	20	8	0	13	21	39	41	43	36	30	35	23	9	0	0	7	19	21	27	31	30	7
VR087	0	0	12	15	21	32	25	27	20	35	39	42	42	39	21	14	6	1	11	26	17	21	28	3	0
VR088	0	1	11	17	18	21	20	29	31	34	39	40	39	25	20	13	0	0	0	6	14	23	21	15	0
VR089	3	12	18	24	0	6	12	20	29	38	38	39	41	42	31	12	9	0	18	21	26	20	23	17	0
VR090	0	0	25	17	15	21	30	27	28	29	35	37	39	41	26	9	0	9	13	3	19	26	20	11	0
VR091	0	2	4	20	25	13	27	23	34	41	0	0	25	31	38	46	45	33	27	0	0	0	11	23	0
VR092	0	14	22	14	0	17	33	41	0	27	45	47	51	35	19	28	36	38	10	0	0	11	21	7	0
VR097	0	9	19	13	0	11	22	18	12	20	28	24	20	26	33	21	0	0	14	9	13	0	6	18	22

Tabla 8. Organización de las velocidades por segundos calcular la mediana de la trayectoria EEDAS-SUBESTACIÓN DEL BIGHT. Fuente: Propia.

Para obtener la conducción regular de la ruta desde EEDAS hasta SUBESTACION DEL BIGHT se calcula la mediana de los periodos el cual se tomaron los datos que fueron cada cincuenta (50) segundos, con lo anterior, se halla el ciclo de conducción de esta vía.

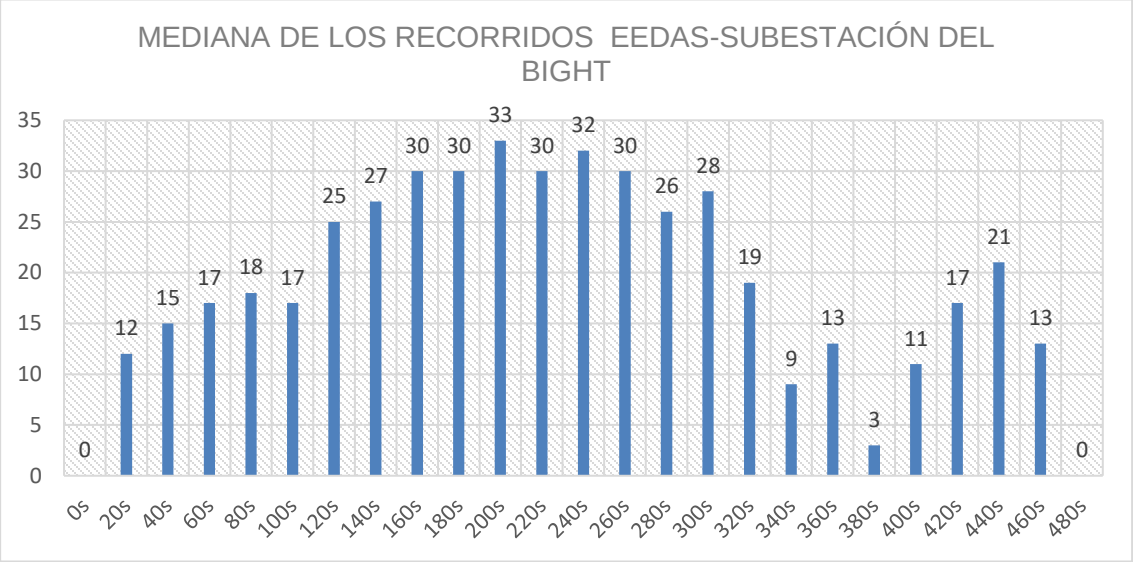


Figura 21. Ciclo de conducción de la ruta EEDAS (centro) hacia SOPESA (vía San Luis). Fuente: Propia.

El GPS también nos permite calcular la aceleración lateral del vehículo, el cual, se evidencio que las gráficas presentaban este parámetro elevado cuando se inicia la medición, es decir en la salida del vehículo y al llegar el destino, esto debido a que en el arranque y al finalizar se deben realizar giros aproximados de 90°.

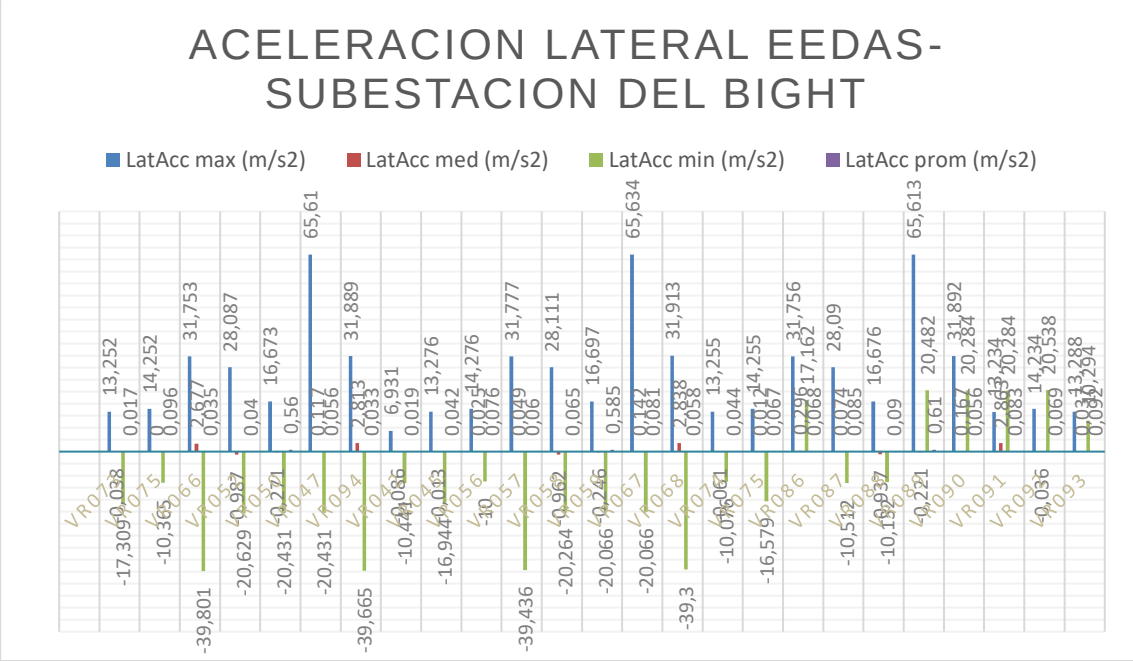


Figura 22. Aceleración lateral por recorrido. Fuente: Propia.

En la siguiente tabla podemos encontrar los parámetros obtenido de los 25 recorridos realizados como las distancias por recorridos, el porcentaje de la batería inicial y final, la autonomía del vehículo inicial y final, porcentaje de descarga y autonomía inicial y final.

ítem	Registro	Duración minutos	Distancias Km	% bat in	%bat done	Energía utilizada	Autonomía In (Km)	Autonomía fin (Km)	Autonomía final
1	VR073	8:02:30	2,7	92	91	1	380	376	4
2	VR075	6:47:00	2,77	88	87	1	364	360	4
3	VR066	8:13:00	2,8	70	69	1	290	286	4
4	VR052	8:52:00	2,7	45	44	1	186	182	4
5	VR050	7:11:58	2,7	33	32	1	136	132	4
6	VR047	9:29:15	2,8	62	61	1	256	252	4
7	VR094	8:04:10	2,81	22	21	1	91	87	4
8	VR042	9:14:10	2,8	99	98	1	409	405	4
9	VR045	8:04:20	2,7	87	86	1	360	356	4
10	VR056	8:14:03	2,8	97	96	1	401	397	4
11	VR057	7:50:17	2,7	40	39	1	165	161	4
12	VR058	8:26:12	2,7	70	69	1	289	285	4
13	VR059	8:41:26	2,71	63	62	1	260	256	4
14	VR067	6:55:46	2,7	55	54	1	227	223	4
15	VR068	7:15:07	2,7	90	89	1	372	368	4
16	VR074	6:52:06	2,7	78	77	1	322	318	4
17	VR075	7:47:51	2,71	61	60	1	252	248	4
18	VR086	7:50:24	2,7	44	43	1	182	178	4
19	VR087	8:00:01	2,8	99	98	1	409	405	4
20	VR088	7.57:39	2,71	82	81	1	339	335	4
21	VR089	8:51:14	2,7	55	54	1	227	223	4
22	VR090	8:49:43	2,7	39	38	1	161	157	4
23	VR091	7:03:15	2,67	96	95	1	397	393	4
24	VR092	6:49:36	2,7	70	69	1	289	285	4
25	VR093	8:11:07	2,7	46	45	1	190	186	4

Tabla 9. Información recopilada de los recorridos. Fuente: Propia.

De la tabla anterior, se pudo obtener los valores promedios como la duración del viaje 07:38:55 minutos, la distancia recorrida de 2,73 kilómetros, la energía de la batería consumida de 1% y una autonomía de 4 km/h, se debe tener en cuenta que la autonomía de recorrido del vehículo eléctrico difiere con los datos de distancia recorrida obtenidos del GPS, esto se debe a que la autonomía que el vehículo visualizada en pantalla depende de muchos factores externos, internos y/o la forma de manejar del conductor. Esto se debe a que la autonomía del vehículo que se muestra en pantalla depende de muchos factores

externos como el clima y la inclinación de la vía, y los factores internos como el nivel del aire acondicionado y las cargas adicionales a las baterías.

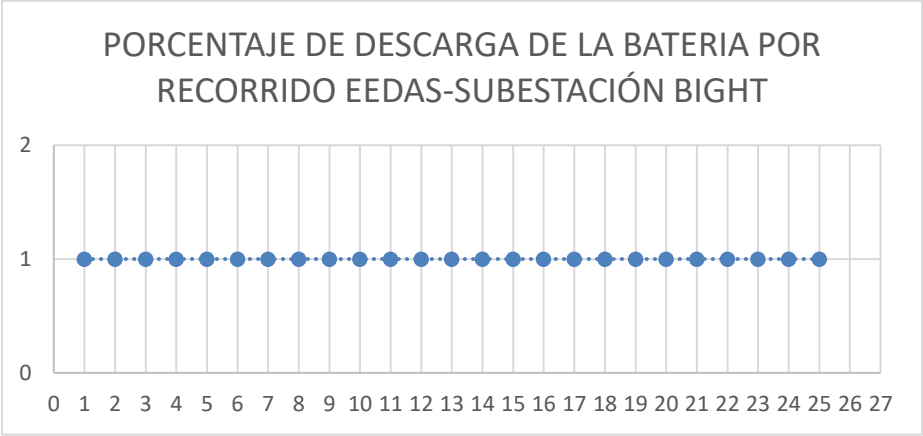


Figura 23. Porcentaje de descarga de la batería por cada viaje. Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta que la batería totalmente cargada cuenta con una capacidad en autonomía de 53.2kWh y la descarga de la batería del 1%, se determinó que el consumo energético por porcentaje consumido es de 0,532kWh, es decir, que el desgaste de la batería del promedio de estos recorridos es de 0,532kWh por 2,73km tomados por el GPS, pero la autonomía mostrada en el vehículo eléctrico fue de 4 km recorridos, con esto, se puede entender que los datos de consumo en sector rural de la isla tienden a un con consumo promedio por kilómetro de 0.13 kWh por 1 kilometro.

$$Consumo\ por\ Bat\ x\ km = \frac{Consumo\ de\ la\ bateria\ por\ tayecto}{kilometros\ recorridos\ por\ el\ vehiculo\ (tomado\ del\ vehiculo)}$$ Ecuación 5

$$Consumo\ por\ Bat\ x\ kilometro = \frac{1{,}6kWh}{12km} = \frac{0{,}13kWh}{1km}$$ Ecuación 6

Con los cálculos anteriores se demuestra que para las zonas urbanas y rurales de la isla el consumo de la batería de los vehículos por kilómetro recorrido es de 0.13kWh.

7.3 cálculo de precios económico por consumo en combustibles vs energía

7.3.1 Calculo monetario de energía y combustible por rutas.

Para realizar los cálculos de precios entre los vehículos eléctricos y a combustión se utilizarán los precios del combustible, y de energía del mes de mayo del 2024 de San Andrés isla. Para esto se utiliza el precio de los combustibles del mes de mayo de 2024 en la isla de San Andrés de la única empresa que provee el combustible TEXACO CON TECHRON.

En el mes de mayo, los precios del combustible en las cuatro gasolineras principales de la isla mostraron una variabilidad significativa según el tipo de combustible. Estos precios reflejan las diferencias entre los puntos de distribución y las particularidades del mercado local.

En cuanto al Diésel, se observaron precios que oscilaron entre los $9.800 y los $10.600. El precio más bajo fue en la EDS Nene’s Marine con $9.800, mientras que el más alto fue en VIA San Luis, con $10.600. Las otras estaciones, EDS Gas Portofino y EDS Duffis, presentaron precios intermedios de $10.400 y $10.100, respectivamente. El precio promedio del diésel en la isla durante este mes fue de $10.225.

COMBUSTIBLE	PRECIO 1gal TECHRON EDS Nene's Marine	PRECIO 1gal TECHRON VIA SAN LUIS	PRECIO 1gal TECHRON EDS GAS PORTOFINO	PRECIO 1gal TECHRON EDS DUFFIS	PROMEDIO
Diesel	$ 9.800	$ 10.600	$ 10.400	$ 10.100	$ 10.225
Plus Corriente	$ 14.800	$ 16.460	$ 15.740	$ 15.650	$ 15.663
Premium Super	$ 21.000	$ 21.230	N/A	$ 20.750	$ 20.993

Tabla 10. Precios de combustible del mes de mayo de las cuatro gasolineras de la isla.

Para la Gasolina Plus Corriente, los precios fueron más elevados y con una mayor diferencia entre las estaciones. VIA San Luis registró el precio más alto con $16.460, mientras que EDS Nene’s Marine ofreció el precio más bajo con $14.800. EDS Gas Portofino y EDS Duffis mantuvieron precios similares, con $15.740 y $15.650, respectivamente. El promedio del precio para este tipo de combustible fue de $15.663.

En cuanto a la Gasolina Premium Super, los precios fueron los más elevados de todos los tipos de combustibles. VIA San Luis tuvo el precio más alto con $21.230, seguida de EDS Duffis con $20.750 y EDS Nene’s Marine con $21.000. Es importante notar que EDS Gas Portofino no ofreció este tipo de combustible durante el mes de mayo. El precio promedio para la Premium Super fue de $20.993.

En resumen, los precios del combustible en la isla durante mayo mostraron variaciones importantes según el tipo de combustible y la estación de servicio, con el diésel siendo el más accesible y la gasolina Premium Super la más costosa.

sopesa SOCIEDAD PRODUCTORA DE ENERGÍA DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA S.A. E.S.P.	GESTION COMERCIAL	CÓDIGO: FT-GFA-10 VERSIÓN:003
	TARIFA	FECHA: 20 DE OCTUBRE DE 2022 PAGINA 1 DE 1

La tarifa aplicada es el resultado del cálculo de la formula tarifaria asignada por la Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG en su Resolución No. 160 /2008 Modificada por la Resolución 073/2009
A continuación publicamos la tarifa correspondiente al mes de mayo de 2024

NO RESIDENCIAL

CUn,m		INDUSTRIAL Y COMERCIAL		OFICIAL Y ESPECIAL		PROVISIONAL		ALUMBRADO PUBLICO	
NIVEL I	1200,40	ENERGIA	SUBSIDIO	ENERGIA	SUBSIDIO	ENERGIA	SUBSIDIO	ENERGIA	SUBSIDIO
		736,35	464,05	613,62	586,78	736,35	464,05	613,62	586,78
NIVEL 2	1053,81	ENERGIA	SUBSIDIO	ENERGIA	SUBSIDIO	ENERGIA	SUBSIDIO	ENERGIA	SUBSIDIO
		630,46	423,36	525,39	528,43	630,46	423,36	525,39	528,43

RESIDENCIAL

ESTRATO	CUn,m	TARIFA < = 187	SUBSIDIO < = 187	TARIFA > 187-800	SUBSIDIO > 187-800	TARIFA > 800
1	1200,40	324,90	875,50	613,62	586,78	1200,40
2	1200,40	387,85	812,55	613,62	586,78	1200,40
3	1200,40	519,67	680,73	613,62	586,78	1200,40

ESTRATO	CUn,m	TARIFA 0-800	SUBSIDIO	TARIFA > 800
4	1200,40	613,62	586,78	1200,40
5	1200,40	736,35	464,05	1200,40
6	1200,40	736,35	464,05	1200,40

COMPONENTES CUn,m	NIVEL I	NIVEL II
CUn,m	1200,40	1053,81
Gcm	435,10	435,10
IAOMn,m	705,97	590,94
Am	0,0000	0,0000
Mm	0,0000	0,0000
Pn,m	0,1200	0,0600

Tabla 11. Tarifas de energía SOPESA SA del mes de mayo del 2024. Fuente: (sopesa, 2024)

En mayo de 2024, SOPESA S.A. presentó un esquema tarifario que abarca diversos sectores, desde clientes residenciales hasta industriales y comerciales, con variaciones de precios según el nivel de consumo y el tipo de usuario. Las tarifas incluyen un componente de energía y un subsidio, diseñado para aliviar parte del costo para los usuarios, especialmente en los niveles más bajos.

Para el sector No Residencial, los precios se dividen en dos niveles. En el Nivel I, la tarifa es de 1.200,40 PEN, con un costo de energía de 736,35 PEN y un subsidio de 464,05 PEN. En el Nivel II, la tarifa es ligeramente más baja, con 1.053,81 PEN, mientras que la energía cuesta 630,46 PEN y el subsidio asciende a 423,36 PEN. Estos valores reflejan un enfoque para compensar a los usuarios no residenciales mediante un subsidio que cubre una parte considerable de la tarifa.

En el caso del sector Industrial y Comercial, las tarifas también están divididas en dos niveles. El Nivel I presenta un costo de 613,62 PEN, con una energía de 586,78 PEN y un subsidio significativo de 736,35 PEN. En el Nivel II, la tarifa es más baja, con 525,39 PEN, y la energía cuesta 528,43 PEN, con un subsidio de 630,46 PEN. Este sector parece beneficiarse de subsidios robustos que buscan incentivar el desarrollo industrial y comercial.

Para el sector Oficial y Especial, los precios son idénticos a los del sector industrial y comercial, con tarifas de 613,62 PEN y 525,39 PEN en los Niveles I y II, respectivamente. La energía y el subsidio en ambos niveles también son equivalentes a los mencionados anteriormente, con subsidios de 736,35 PEN y 630,46 PEN en los diferentes niveles. Esto sugiere una política homogénea de tarifas para estos sectores clave.

En el sector Provisional, las tarifas replican las de los sectores Industrial, Comercial, Oficial y Especial. El Nivel I tiene un costo de 613,62 PEN, mientras que el Nivel II es de 525,39 PEN, con los mismos costos de energía y subsidio que en los otros sectores mencionados. Este tipo de tarifa podría estar destinado a consumidores temporales o situaciones especiales que requieren energía de manera transitoria.

Para el Alumbrado Público, las tarifas también siguen el mismo esquema que el sector provisional y otros mencionados, con tarifas de 613,62 PEN para el Nivel I y 525,39 PEN para el Nivel II. Al igual que en los sectores anteriores, los costos de energía y subsidios son consistentes con los otros grupos.

Finalmente, en el sector Residencial, las tarifas están segmentadas por estratos. En el Estrato 1, se tiene una tarifa de 1.200,40 PEN, con dos tramos de consumo. Para consumos menores o iguales a 187 kWh, la tarifa es de 324,90 PEN y el subsidio es elevado, con 875,50 PEN. Para consumos entre 187 y 800 kWh, la tarifa es de 613,62 PEN, con un subsidio de 586,78 PEN. En el Estrato 2, el esquema es similar, con una tarifa de 1.200,40 PEN. En este caso, para consumos menores o iguales a 187 kWh, la tarifa es de 387,85 PEN y el subsidio es de 812,55 PEN, mientras que para consumos mayores a 187 kWh y hasta 800 kWh, la tarifa es la misma que en el Estrato 1, con 613,62 PEN y un subsidio de 586,78 PEN.

Con la información de la Tabla 12, y la Tabla 15, se obtuvo los valores de distancias mínimas, máximos y la mediana, estos parámetros se utilizarán para comparación energética entre los vehículos eléctricos y a combustión

EEDAS - SCHOONER BIGHT		
RECORRIDOS Km		
MINIMO	MEDIANA	MAXIMO
8,2	8,8	9,35
EEDAS - SCHOONER BIGHT		
RECORRIDOS Km		
MINIMO	MEDIANA	MAXIMO
2,67	2,7	2,81

Tabla 12. Distancias mínimas, medias y maxima por ruta.

Teniendo en cuenta la Tabla 6. Datos Teóricos de rendimiento de vehículos a combustión para San Andrés, y la Tabla 16. Precios de combustible del mes de mayo de las cuatro gasolineras de la isla, se calcula el precio del combustible por kilómetro recorrido.

Combustible	Distancias Km que alcanza un galón del combustible UPME 2015	Precio promedio mayo 2024 por galón	Precio promedio del combustible por Km
Diesel	52	$ 10.225,00	$ 196,635
Plus Corriente	40	$ 15.662,50	$ 391,563
Premium Super	40	$ 20.993,33	$ 524,833

Tabla 13. Precio del combustible por kilómetro recorrido. Fuente: Propia.

En mayo de 2024, se realizó un análisis del precio del combustible por kilómetro recorrido, con el objetivo de proporcionar una visión clara sobre los costos de transporte para diferentes tipos de combustible: diésel, plus corriente y premium super. Este análisis es útil tanto para consumidores como para empresas que buscan optimizar sus gastos de transporte.

Para el diésel, la distancia promedio recorrida por galón es de 52 km. Con un precio promedio por galón de $10.225,00, el costo por kilómetro recorrido es de $196,635. Esto muestra que el diésel es la opción más económica en cuanto a costo por kilómetro, lo que lo convierte en una alternativa atractiva para aquellos que buscan maximizar el rendimiento del combustible en distancias largas.

En cuanto a la, plus corriente, la distancia promedio recorrida por galón es de 40 km, con un precio promedio por galón de $15.662,50. El costo por kilómetro recorrido asciende a $391,563. Este costo es considerablemente más alto que el del diésel, lo que sugiere que, aunque es una opción más común en vehículos particulares, su costo de operación por kilómetro es más elevado.

La premium super tiene un costo aún mayor. Con una distancia promedio recorrida por galón de 40 km y un precio promedio por galón de $20.993,33, el costo por kilómetro recorrido es de $524,833. Este precio refleja que la premium super, aunque ofrece un mayor rendimiento en términos de potencia del motor, es la opción más costosa en términos de gasto por kilómetro.

Con los datos de la Tabla 12. Distancias mínimas, medias y maxima por ruta y laTabla 13. Precio del combustible por kilómetro recorrido, se calcula el costo monetario mínimo, medio y máximo del combustible por ruta.

EEDAS - SCHOONER BIGHT				
Descripción	Distancias Km	Diesel	Plus Corriente	Premium Super
MINIMO	8,2	$ 1.612,40	$ 3.210,81	$ 4.303,63
MEDIANA	8,8	$ 1.730,38	$ 3.445,75	$ 4.618,53
MAXIMO	9,35	$ 1.838,53	$ 3.661,11	$ 4.907,19

Tabla 14. Costo monetario de combustible mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS- Schooner Bight. Fuente: Propia.

La ruta entre EEDAS y Schooner Bight presenta diferentes costos de combustible en función de la distancia recorrida, que se divide en tres categorías: mínima, mediana y máxima. Las distancias son de 8,2 km para el costo mínimo, 8,8 km para el costo medio y 9,35 km para el costo máximo. Estos costos reflejan el gasto en combustible para tres tipos de gasolina y diésel, proporcionando una visión clara de cómo varían según el tipo de combustible y la distancia.

Costo Mínimo

Para una distancia de 8,2 km, el costo del combustible es:

- Diésel: $1.612,40
- Plus Corriente: $3.210,81
- Premium Super: $4.303,63

Este costo muestra que el diésel es la opción más económica, lo que puede ser atractivo para los conductores que buscan reducir sus gastos en combustible.

Costo Medio

Al considerar una distancia de 8,8 km, los costos son:

- Diésel: $1.730,38
- Plus Corriente: $3.445,75
- Premium Super: $4.618,53

El costo medio indica un ligero aumento en comparación con el costo mínimo, pero mantiene la tendencia de que el diésel es la opción más asequible en esta ruta.

Costo Máximo

Finalmente, para la distancia máxima de 9,35 km, los costos se distribuyen de la siguiente manera:

- Diésel: $1.838,53
- Plus Corriente: $3.661,11
- Premium Super: $4.907,19

El costo máximo revela un incremento en los precios, lo que demuestra que, a medida que se aumenta la distancia, también se incrementan los gastos en combustible, especialmente en las opciones más caras.

A lo largo de las tres distancias analizadas, el diésel se presenta consistentemente como la opción más económica, con precios que oscilan entre $1.612,40 y $1.838,53. Por otro lado, el plus corriente y la premium super muestran incrementos significativos en sus costos, reflejando cómo el tipo de combustible influye en el gasto total del trayecto.

EEDAS - SUBESTACION DEL BIGHT				
Descripción	**Distancias Km**	**Diesel**	**Plus Corriente**	**Premium Super**
MINIMO	2,67	$ 525,014	$ 1.045,47	$ 1.401,31
MEDIA	2,70	$ 530,913	$ 1.057,22	$ 1.417,05
MAXIMO	2,81	$ 552,543	$ 1.100,29	$ 1.474,78

Tabla 15. Costo monetario de combustible mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS-Subestación SOPESA (Vía San Luis). Fuente: Propia.

Para hallar cuanto es el costo de la energía requerida para cada recorrido, se tomo es valor pleno de energía de la empresa SOPESA SA del mes de mayo 1.200,04 pesos por un kilovatio consumido, relacionado con que el vehículo eléctrico utilizado en óptimas condiciones tiene un consumo energético de 0,13 kWh por kilómetro recorrido.

EEDAS - SCHOONER BIGHT			
Descripción	**Distancias Km**	**Kilovatios consumidos**	**Costo del recorrido**
MINIMO	8,2	1,07	$ 1.279,63
MEDIANA	8,8	1,14	$ 1.373,26
MAXIMO	9,35	1,22	$ 1.459,09

Tabla 16. Costo monetario de energía mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS- Schooner Bight. Fuente: Propia.

El análisis del costo monetario de energía para el recorrido desde EEDAS hasta Schooner Bight se basa en tres distancias: mínima, mediana y máxima. Estas distancias están asociadas a diferentes consumos de kilovatios, lo que permite comprender cómo varían los gastos energéticos en función de la distancia recorrida.

Para la distancia mínima de 8,2 km, el consumo de energía es de 1,07 kWh, lo que se traduce en un costo del recorrido de $1.279,63. Este costo representa la opción más económica, siendo ideal para quienes optan por realizar el trayecto más corto con un consumo energético relativamente bajo.

En el caso de la distancia mediana de 8,8 km, el consumo se incrementa ligeramente a 1,14 kWh, resultando en un costo de $1.373,26. Este costo medio refleja un aumento moderado en comparación con el costo mínimo, indicando que el incremento en la distancia conlleva un leve aumento en el consumo de energía y, por ende, en el gasto asociado.

Finalmente, para la distancia máxima de 9,35 km, el consumo energético es de 1,22 kWh, lo que eleva el costo del recorrido a $1.459,09. Este costo refleja el mayor gasto energético,

evidenciando que a medida que se incrementa la distancia, también se eleva el consumo de energía y el costo total del trayecto.

En general, los costos monetarios de energía para el recorrido entre EEDAS y Schooner Bight muestran un patrón claro: a medida que la distancia aumenta, también lo hace el consumo de kilovatios y el costo total del trayecto. El costo mínimo se sitúa en $1.279,63, mientras que el costo máximo alcanza $1.459,09, indicando una relación directa entre la distancia recorrida y el gasto energético.

La relación entre la distancia y el consumo de energía es directa; es decir, a mayor distancia recorrida, mayor es el consumo y el costo. Sin embargo, el consumo de energía no es linealmente proporcional a la distancia, lo que sugiere que otros factores como la velocidad, la aceleración, el tipo de vehículo y las condiciones de la vía influyen en el consumo. Aunque no se presenta explícitamente, el costo por kilómetro puede ser calculado, permitiendo comparar la eficiencia energética de diferentes vehículos o rutas.

EEDAS - SUBESTACION DEL BIGHT			
Descripción	**Distancias Km**	**Kilovatios consumidos**	**Costo del recorrido**
MINIMO	2,67	0,35	$ 416,66
MEDIA	2,70	0,35	$ 421,34
MAXIMO	2,81	0,37	$ 438,51

Tabla 17. Costo monetario de energía mínimo, medio y máximo de la ruta EEDAS-Subestación SOPESA (Vía San Luis). Fuente: Propia.

7.3.2 Capex y Opex

Para hacer un análisis más detallado, se realizará un estudio de costo/beneficio de adquirir un vehículo eléctrico contra un vehículo a combustión y su mantenimiento en el tiempo, para esto, se desarrollará los cálculos de inversiones de capital que crean beneficios - CAPEX y el costo permanente para el funcionamiento de un producto-OPEX y costo nivelado por km recorrido a un año y a 10 años.

Para realizar el análisis se buscó un vehículo de combustión como el Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT 4x2 Turbo, que es un SUV (vehículo utilitario deportivo).

Donde las características de este vehículo son:

Potencia: 154 HP

Capacidad de tanque: 13.2 Gal

Tracción:4x4

Transmisión: Mecánica 6 velocidades

También se toma tres precios de energía en las islas ya que estas son subsidiadas por el gobierno nacional

Precio de la energía sin subsidio: $1200,4 pesos

Precio de la energía para el sector industrial y comercial con subsidio: $736,35 pesos

Precio de la energía para el sector residencial con subido estrato 1,2 y 3: $613,62 pesos.

Para los cálculos de inversiones de capital que crean beneficios -CAPEX, se busca el valor de los dos vehículos y valor del trámite para ingreso a las islas, SOAT, pólizas y otros impuestos.

CAPEX		
Vehículo	**Adquisición**	**Costos**
EV BYD YUAN 400	Compra del vehículo	$ 122.500.000,00
	SOAT, pólizas, traslado, cupo y otros impuestos	$ 7.000.000,00
	Total	**$ 129.500.000,00**
Renault Duster New Duster Intens 1.3 Cvt 4x2 Turbo	Compra del vehículo	$ 70.000.000,00
	SOAT, pólizas, traslado, cupo y otros impuestos	$ 7.000.000,00
	Total	**$ 77.000.000,00**

Tabla 18. inversiones de capital para la compra del vehículo eléctrico y el vehículo a combustión. Fuente: Propia.

Hoy en día existen precios variables para estos tipos de vehículos deportivos en el mercado, pero el precio de los vehículos eléctricos supera en costos al de los vehículos a combustión, no obstante, el mantenimiento en el tiempo y en el abastecimiento de energía es más bajo, para confirmar este análisis, realizaron los cálculos del el costo permanente para el funcionamiento de las dos tipologías de vehículos, en donde se evaluara el consumo en energía, combustibles, vida útil de las baterías de ION de litio y los mantenimientos generales.

OPEX		
Vehículo	**Consumo energético Recorridos de 20.000 km/anuales**	**Costos**
EV BYD YUAN 400	Kilometros recorridos por año	20000
	Consumo energía por kilómetro por hora	0,13
	Consumo de energía por kilómetro por año	2600
	Consumo por kilómetro por 10 años	26000
	Costo de 1kWh	$ 1.200,40
	Costo energético por año	$ 3.121.040,00
	Costo energético a 10 años por kWh	$ 31.210.400,00
Renault Duster New Duster Intens 1.3 Cvt 4x2 Turbo	$ 0	

Tabla 19. Consumo energético por 20.000 km/anuales de los dos tipos de vehículos. Fuente: Propia.

El vehículo a combustión por los 20.000 km recorridos anuales, el consumo es de 500 galones a los que se realizan los cálculos por los tres tipos de combustible utilizados en la isla, el Diesel, plus corriente y premium super.

Por otro lado, se hace un análisis de los gastos operativos (OPEX) anuales del vehículo convencional en comparación con las ganancias anuales de un Certificado de Depósito a Término (CDT). A continuación, se presentan los datos y resultados en tablas y gráficos para una mejor visualización:

La comparación entre los gastos operativos anuales (OPEX) de un vehículo convencional y las ganancias de un Certificado de Depósito a Término (CDT) pone en evidencia la diferencia sustancial en términos de costos y rentabilidad. Vamos a desglosar los datos presentados y realizar el análisis detallado.

Ganancias del CDT:

- Las ganancias anuales del CDT son $4,598,735.46.
- OPEX Anual del Vehículo Convencional (ajustado):
- Se estima un gasto de $19,510,874.50 en OPEX para el vehículo convencional, originalmente calculado con los porcentajes de consumo de 30% de gasolina super y 70% de gasolina corriente.
- Precio del combustible y consumo:
- Gasolina Super: $20,993 por galón

- Gasolina Corriente: $10,225 por galón
- Consumo anual del vehículo: 1,000 galones en total, desglosado en 300 galones de gasolina super y 700 galones de gasolina corriente.
- Cálculo de OPEX ajustado por combustible:
- Gasolina Super (300 galones):
  300 gal x $20,993 = $6,297,900
- Gasolina Corriente (700 galones):
  700 gal x $10,225 = $7,157,500
- OPEX Anual Total ajustado (combustible):
  $6,297,900+ $7,157,500= $13,455,400
- 2. Comparación de OPEX ajustado con las ganancias del CDT:
- Diferencia Anual:
- Las ganancias del CDT: $4,598,735.46
- El OPEX ajustado del vehículo convencional: $13,455,400

La diferencia anual sería:

- Diferencia Anual=4,598,735.46 − 13,455,400

Es decir, el vehículo convencional genera $8,856,664 más en gastos operativos que las ganancias del CDT.

- Proyección a 10 años:
- Las ganancias del CDT en 10 años:
  $4,598,735.46 * 10 = $45,987,354.60
- El OPEX del vehículo convencional en 10 años:
  $13,455,400* 10 = $134,554,000

La diferencia total a lo largo de 10 años sería:

Diferencia Total=134,554,000−45,987,354.60=88,566,646

Esto muestra que el vehículo convencional tendría un costo operativo $88,566,646 superior a las ganancias obtenidas por el CDT en un período de 10 años.

- 3. Análisis y conclusión:
- Costo superior del vehículo convencional: A lo largo de 10 años, el vehículo convencional implica un gasto de $86,000,000 en OPEX, en contraste con las ganancias de $45,987,354.60 generadas por el CDT. Esto pone en evidencia que el vehículo convencional no es económicamente eficiente en comparación con una inversión en CDT.
- Eficiencia económica del CDT: El CDT ofrece una rentabilidad anual fija y predecible, que a lo largo de 10 años acumula $45,987,354.60, mientras que el vehículo convencional genera una pérdida neta si se consideran sus costos operativos.
- En resumen, si se considera un capital inicial de $52,500,000 para el vehículo convencional, el CDT parece ser una opción más rentable, ya que no solo evita los gastos operativos de mantenimiento de un vehículo, sino que también genera ingresos adicionales sin las complejidades y costos que implica el consumo de combustible y el mantenimiento de un vehículo. A lo largo de 10 años, la diferencia total de $40,012,645.40 favorece significativamente a la inversión en CDT.

Año	Ganancias CDT ($)	OPEX Vehículo Convencional ($)	Diferencia ($)
1	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
2	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
3	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
4	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
5	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
6	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
7	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
8	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
9	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
10	4,598,735.46	19,510,874.50	14,912,139.04
Total	**45,987,354.63**	**195,108,745.00**	**149,121,390.40**

Tabla 20. Ganancias Anuales del CDT y OPEX del Vehículo Convencional. Fuente: Propia.

El costo OPEX del vehículo convencional se mantiene constante durante todo el período, siendo $19,510,874.50 anuales. A lo largo de 10 años, el total de los costos operativos es de $195,108,745.00. Este valor incluye costos de mantenimiento, combustible, y otros gastos recurrentes asociados a la operación de un vehículo convencional.

La diferencia anual entre las ganancias del CDT y el OPEX del vehículo convencional es siempre de $14,912,139.04. Al final de los 10 años, esta diferencia acumulada es de $149,121,390.40. Esto demuestra que, aunque las ganancias del CDT son constantes y relativamente estables, los costos operativos del vehículo convencional superan ampliamente las ganancias obtenidas por el CDT a lo largo de los 10 años.

Los altos costos anuales asociados con el OPEX del vehículo convencional son un factor importante que considerar. A lo largo de 10 años, el OPEX acumulado (más de $195 millones) supera ampliamente las ganancias de la inversión en el CDT, lo que sugiere que el vehículo convencional tiene un costo de operación muy elevado a largo plazo.

Si se comparan las ganancias del CDT con los costos operativos de un vehículo convencional, se observa que, en términos financieros, las ganancias por intereses no son suficientes para cubrir el costo total de la operación del vehículo. La diferencia acumulada de $149 millones resalta la desventaja financiera del uso de vehículos convencionales frente a una inversión pasiva en instrumentos financieros como el CDT.

Concepto	Monto ($)
Ganancias CDT a 10 años	45,987,354.63
OPEX Vehículo Convencional a 10 años	195,108,745.00
Capital Invertido	52,500,000.00
Total Ganancias + Capital	98,487,354.63

Tabla 21. Capital y Ganancias. Fuente: Propia.

Total Ganancias + Capital: Sumando las ganancias del CDT ($45,987,354.63) con el capital invertido ($52,500,000.00), se obtiene un total de $98,487,354.63. Este total es la cantidad combinada de los fondos generados por la inversión inicial y las ganancias obtenidas de los intereses del CDT.

Al comparar las ganancias obtenidas a través del CDT con el costo total de operación del vehículo convencional, se observa una clara disparidad. Aunque las ganancias del CDT son estables, las cuales suman $45,987,354.63 en 10 años, los costos operativos del vehículo convencional superan ampliamente esta cifra ($195,108,745.00). Esto implica que, para mantener un vehículo convencional durante 10 años, los costos asociados son mucho mayores que las ganancias pasivas que se obtendrían invirtiendo el capital en un CDT.

Impacto del Capital Inicial en la Comparación: Si bien el capital invertido en el vehículo convencional es de $52,500,000.00, este monto es solo una parte de la ecuación. Si se suman las ganancias del CDT con este capital, obtenemos un total de $98,487,354.63. En comparación, el costo de operación del vehículo convencional durante 10 años excede significativamente este total ($195,108,745.00), lo que sugiere que la opción del vehículo convencional genera una desventaja financiera considerable en términos de OPEX.

El análisis muestra que los costos operativos del vehículo convencional superan con creces las ganancias generadas por un Certificado de Depósito a Término durante un periodo de 10 años, lo que resulta en una diferencia negativa a largo plazo.

Si se compara el total de $98,487,354.63 (capital invertido más las ganancias del CDT) con los $195,108,745.00 de OPEX, se evidencia que mantener el vehículo convencional durante 10 años representa una carga financiera significativa en términos de costos recurrentes.

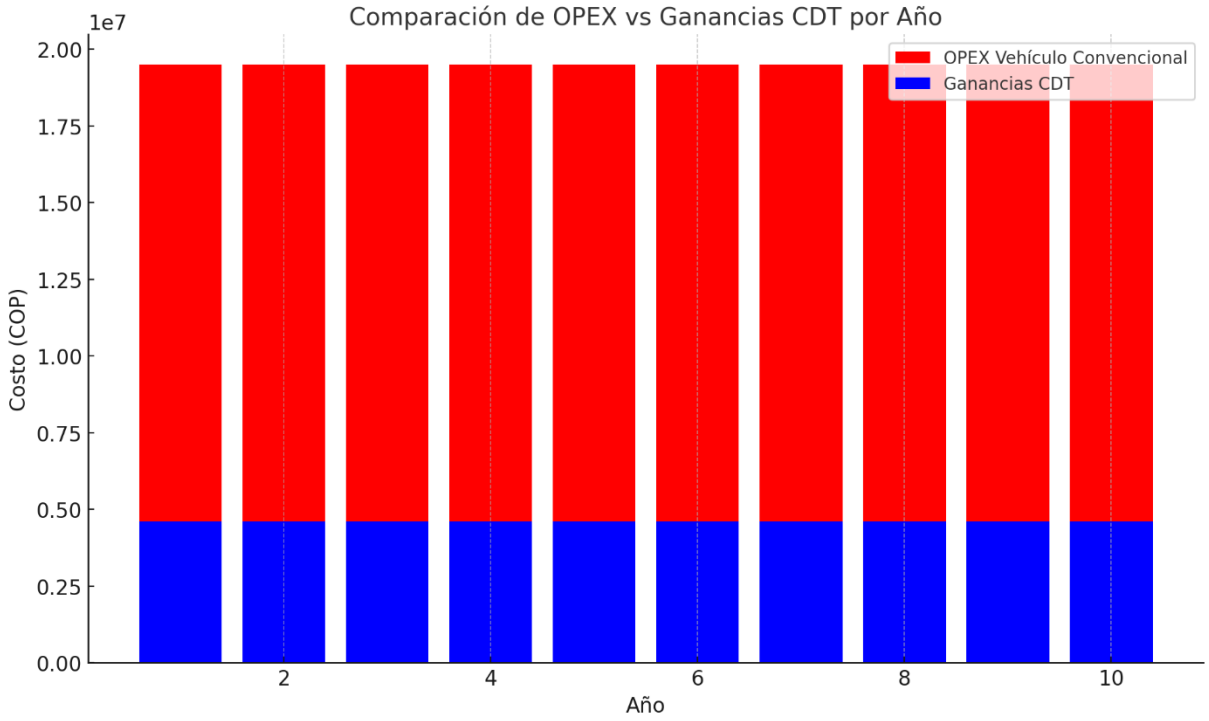


Figura 24. Comparación de Ganancias Anuales del CDT y OPEX del Vehículo Convencional. Fuente: Propia.

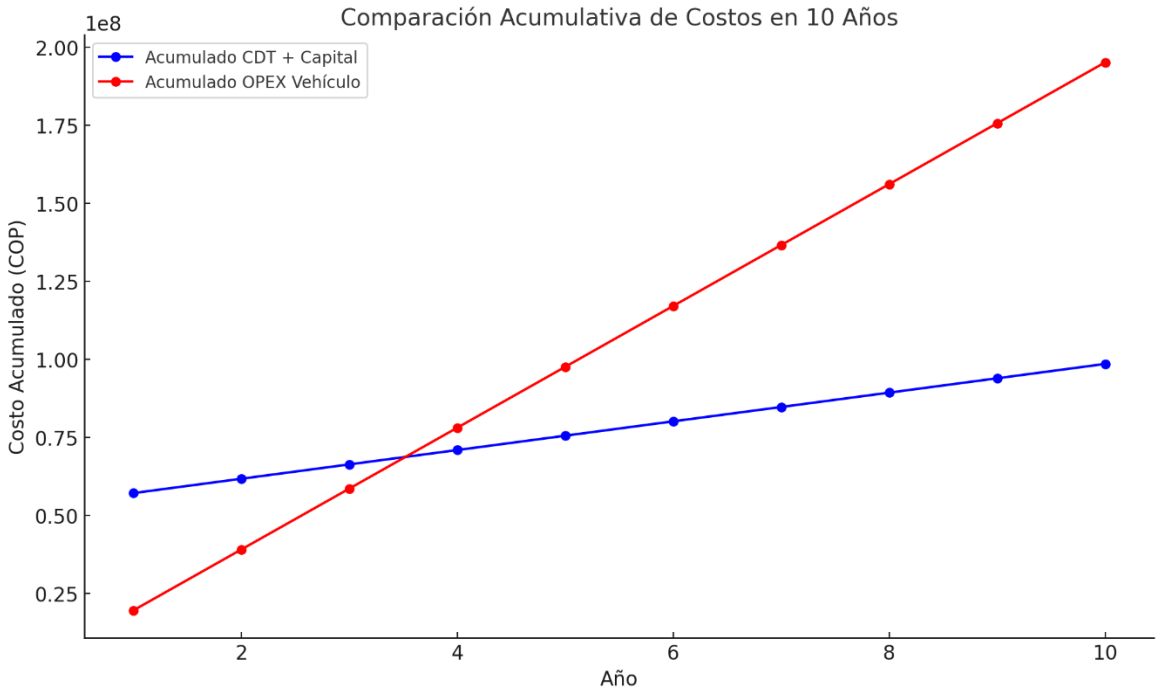
Comparación Anual:

- El OPEX anual del vehículo convencional es de $19,510,874.50 COP.
- Las ganancias anuales del CDT ascienden a $4,598,735.46 COP.
- La diferencia anual en favor del vehículo convencional es de $14,912,139.04 COP.

Acumulados a 10 Años:

- Total OPEX del vehículo convencional a 10 años: $195,108,745.00 COP.
- Total ganancias del CDT a 10 años: $45,987,354.63 COP.
- Capital inicial invertido en el CDT: $52,500,000.00 COP.
- Total acumulado del CDT, incluyendo el capital invertido: $98,487,354.63 COP.

El ahorro acumulado considerando la diferencia entre OPEX y ganancias del CDT más capital es de $96,621,390.37 COP.



El análisis muestra que, aunque la inversión inicial en un vehículo eléctrico como el BYD es significativamente mayor, los ahorros en costos operativos (OPEX) a largo plazo pueden compensar esta inversión. Además, considerando las ganancias anuales del CDT, el ahorro se hace aún más evidente. Optar por un vehículo eléctrico puede resultar en ahorros significativos y beneficios financieros a lo largo de una década, especialmente en entornos donde los costos operativos del vehículo convencional son altos.

Para realizar este estudio basado en los datos anteriores anuales, del Opex, se tiene en cuenta que el vehículo convencional funcionara con un porcentaje de combustible del 70% gasolina corriente y 30% super premium que equivale a $ 8.630.874,50 pesos, más el mantenimiento en el tiempo $ 10.880.000,00, obteniendo un total de $ 19.510.874,50 de pesos anuales.

Con la diferencia de costos de los dos vehículos $52,500,000.00 se invierte este capital en un Certificado de Depósito a Término (CDT) el cual el primer año se obtendrá una ganancia aproximada de $4,598,735.46, el cual será descontado de (capital + ganancia) el Opex anual para saber su rentabilidad en el tiempo.

Devaluación del capital y ganancia anual		
Capital Año 1	$	52.500.000,00
Ganancia por año CDT promedio	$	4.598.735,46
Opex anual	$	19.510.874,50
(Capital +Ganancia)-Opex	$	37.587.860,96
Capital Año 2	$	37.587.860,96
Ganancia por año CDT banco de bogota - retención del 4%	$	3.193.465,00
Opex anual	$	19.510.874,50
(Capital +Ganancia)-Opex	$	21.270.451,46
Capital Año 3	$	21.270.451,46
Ganancia por año CDT Bancolombia -retención del 4%	$	1.677.489,00
Opex anual	$	19.510.874,50
(Capital +Ganancia)-Opex	$	3.437.065,96

En el año tres se puede observar que se nivela la inversión de costos de vehículo eléctrico, debido a que los gastos anuales de los vehículos a combustión son mayores.

El EV BYD YUAN 400 tiene un consumo de energía de 0.13 kWh por kilómetro, lo que se traduce en un consumo total de 2,600 kWh por año (0.13 kWh/km * 20,000 km). A lo largo de 10 años, el consumo total sería de 26,000 kWh. El costo de 1 kWh se ha estimado en $1,200.40 COP, lo que implica un costo energético anual de $3,121,040 COP (2,600 kWh * $1,200.40 COP) y un costo total de $31,210,400 COP en un período de 10 años. Esto refleja el bajo costo operativo de los vehículos eléctricos, que además de tener un consumo energético eficiente, están menos expuestos a la volatilidad de los precios del combustible.

Es importante destacar que los $1,200.40 COP por kWh son la tarifa de energía sin subsidio. En ciertas regiones, como las islas, el precio del kilovatio puede ser significativamente más bajo, llegando a $776.56 COP con subsidio.

Esto implica que el costo energético anual del EV BYD YUAN 400 podría ser incluso menor. Si consideramos el precio subsidiado:

- Consumo anual de energía: 2,600 kWh
- Costo por kWh con subsidio: $776.56 COP
- Costo energético anual: 2,600 kWh * $776.56 COP = $2,019,056 COP
- Costo total en 10 años: 26,000 kWh * $776.56 COP = $20,190,560 COP

Con el subsidio, el ahorro es mucho mayor, reafirmando el beneficio económico de los vehículos eléctricos en términos de costos operativos y eficiencia energética. Esto muestra aún más la ventaja financiera y la sostenibilidad de optar por vehículos eléctricos en comparación con los vehículos convencionales que dependen de combustibles fósiles más costosos y volátiles.

Por otro lado, el Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT 4x2 Turbo, al ser un vehículo de combustión, tiene un consumo promedio de 7 litros de combustible por cada 100 km. En un año, recorriendo 20,000 kilómetros, este vehículo consumiría 1,400 litros de combustible (20,000 km / 100 km * 7 litros). Teniendo un costo de $10,000 COP por litro de combustible, el gasto anual sería de $14,000,000 COP y el costo total en 10 años alcanzaría los $140,000,000 COP. Este cálculo muestra que, aunque los vehículos de combustión pueden tener costos iniciales más bajos, sus costos operativos son considerablemente más altos debido al precio del combustible.

Comparación de costos a 10 años: En un periodo de 10 años, el EV BYD YUAN 400 tiene un costo energético de $31,210,400 COP, mientras que el Renault Duster tiene un costo de combustible de $140,000,000 COP. Esta diferencia significativa evidencia la eficiencia económica de los vehículos eléctricos en términos de costos operativos a largo plazo. Aunque los vehículos eléctricos requieren una inversión inicial más alta, los costos de operación resultan ser mucho menores, lo que los convierte en una opción más atractiva y rentable a largo plazo.

OPEX		
Vehículo	**Consumo en combustible de 20.000 km/anuales**	**Costos**
EV BYD YUAN 400	$ 0	

Renault Duster New Duster Intens 1.3 Cvt 4x2 Turbo	Kilometros recorridos por año	20000
	Consumo de combustible 1 Gal gasolina por 40 km	40
	Consumo de combustible por año (gal)	500
	Precio promedio del galón de Plus Corriente	$ 15.662,50
	Costos en Plus corriente por año	$ 7.831.250,00
	Costos en Plus Corriente por 10 años	$ 78.312.500,00
	Precio promedio del galón de gasolina Super	$ 20.993,33
	Costos en Premium Super por año	$ 10.496.665,00
	Costos Premium Super por 10 años	$ 104.966.650,00
	Precio promedio del galón de Diesel	$ 10.225,00
	Costos totales del Diesel por un año	$ 5.112.500,00

Tabla 22. Consumo de combustibles por 20.000 km/anuales de los dos tipos de vehículos. Fuente: Propia.

Haciendo el análisis de los costos de abastecer el vehículo con combustible o energía, se observa que por los 20.000 km recorridos en el año el vehículo eléctrico tendrá un costo menor.

Para el EV BYD YUAN 400, el consumo de combustible es inexistente, dado que funciona con electricidad. Por lo tanto, el costo operativo relacionado con el combustible es $0 COP tanto por año como por un período de 10 años. Esto supone una ventaja significativa en términos de costos, ya que los vehículos eléctricos no requieren combustible líquido, lo que elimina los gastos relacionados con la volatilidad del mercado de hidrocarburos.

En el caso del Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT 4x2 Turbo, el consumo de combustible es estimado en 1 galón por cada 40 kilómetros recorridos. Con 20,000 kilómetros anuales, el vehículo consumiría 500 galones de combustible por año. Dependiendo del tipo de combustible, los costos operativos varían considerablemente:

- Plus Corriente: Con un precio promedio de $15,662.50 COP por galón, el Renault Duster tendría un costo anual de $7,831,250 COP. A lo largo de 10 años, esto sumaría un total de $78,312,500 COP.
- Gasolina Super: Para este tipo de combustible, el precio promedio es de $20,993.33 COP por galón, lo que genera un costo anual de $10,496,665 COP. En un período de 10 años, los costos ascienden a $104,966,650 COP, el más alto entre las opciones analizadas.

A lo largo de 10 años, el EV BYD YUAN 400 se presenta como la opción más económica en términos de costos operativos relacionados con el combustible, dado que no incurre en ningún gasto de este tipo. Por el contrario, los costos para el Renault Duster varían significativamente según el tipo de combustible utilizado:

- Plus Corriente: $78,312,500 COP en 10 años.
- Gasolina Super: $104,966,650 COP en 10 años.

El análisis muestra que, aunque el Renault Duster puede variar en costos según el tipo de combustible, incluso en la opción más económica (diésel), el vehículo eléctrico EV BYD YUAN 400 sigue siendo considerablemente más rentable en cuanto a costos operativos a largo plazo, ya que no genera gastos en combustible. Este informe refuerza la ventaja económica de los vehículos eléctricos frente a los de combustión interna, particularmente en términos de OPEX relacionados con el combustible.

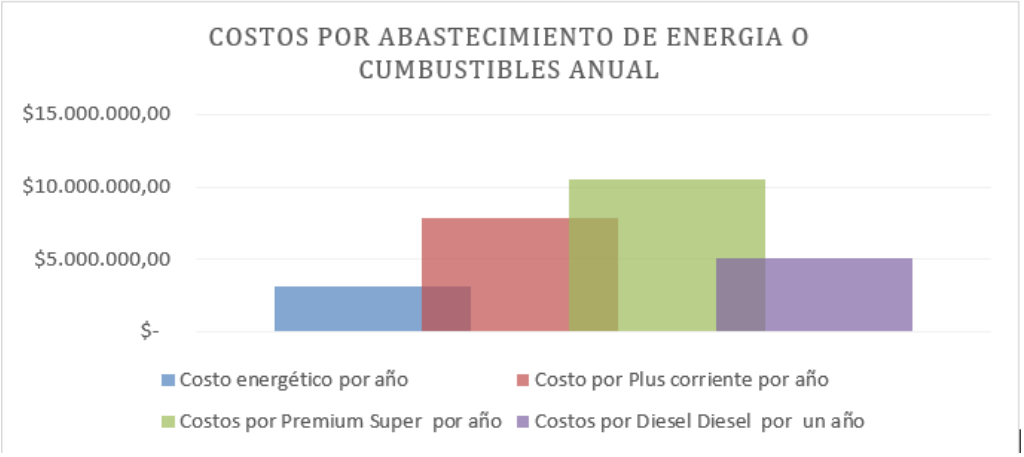


Figura 25. Costo por consumo anual para las dos tipologías de vehículos. Fuente: Propia.

El gráfico titulado “Costos por abastecimiento de energía o combustibles anual” presenta un análisis comparativo de los costos anuales asociados con diferentes tipos de abastecimiento de energía y combustibles para vehículos. Se identifican cuatro categorías principales: costo energético por año para vehículos eléctricos, y costos por Plus Corriente, Premium Super y Diesel Corriente para vehículos convencionales.

Los costos anuales se distribuyen de la siguiente manera:

- Costo Energético por Año: Aproximadamente $5,000,000 para el consumo de energía eléctrica de vehículos eléctricos.
- Costo por Plus Corriente por Año: Aproximadamente $10,000,000.
- Costo por Premium Super por Año: Aproximadamente $12,000,000.
- Costo por Diesel Corriente por Año: Aproximadamente $15,000,000.

En el análisis comparativo del gráfico "Costos por abastecimiento de energía o combustibles anual", se puede mencionar que, aunque se hace la comparación con Diesel, es importante notar que ciertos tipos de vehículos no están diseñados para utilizar Diesel.

Este tipo de análisis es útil para ilustrar las diferencias en costos, pero siempre se debe tener en cuenta la compatibilidad del combustible con el tipo de vehículo. En este caso, la comparación con Diesel puede servir como referencia general, pero no aplica directamente a los vehículos que no están diseñados para operar con Diesel.

El gráfico permite observar que el costo energético anual está orientado a los vehículos eléctricos, mientras que los otros costos se refieren a vehículos convencionales. El costo por Plus Corriente puede referirse a un tipo específico de combustible, y el costo por Premium Super se relaciona con gasolina de alto octanaje utilizada en vehículos de alto

rendimiento. El costo por Diesel corresponde a un combustible común en vehículos comerciales.

Los costos anuales de Plus Corriente y Premium Super son significativamente más altos que el costo energético de los vehículos eléctricos, lo que sugiere que la electricidad es una opción más económica a largo plazo. El costo anual del Diesel se sitúa en un punto intermedio: más barato que los combustibles de mayor octanaje, pero más caro que la electricidad. Además, se observa una diferencia considerable entre el costo más bajo (energía eléctrica) y el más alto (Premium Super), indicando que la elección del combustible o la energía puede impactar notablemente en los costos operativos de un vehículo.

OPEX		
Vehículo	**Baterías**	**Costos**
EV BYD YUAN 400	Vida útil de la batería de ion de litio yuan 400 en ciclos	4000
	Energía consumida en kWh por año	2600
	Capacidad de batería del EV en kWh	53,2
	Capacidad de batería del EV con descarga a l 80% en kWh	42,56
	Ciclos Carga por año	61,1
	Ciclos Carga por 10 años	611
	Costo en baterías	$ 0
Renault Duster New Duster Intens 1.3 Cvt 4x2 Turbo	$ 0	

Tabla 23. Costos en cambio de baterías por ciclos de carga. Fuente: Propia.

En el caso del EV BYD YUAN 400, la batería de NCM (Níquel, Cobalto y Manganeso) tiene una vida útil estimada de 4,000 ciclos de carga. Dado que el vehículo consume 2,600 kWh de energía por año y la batería tiene una capacidad de 53.2 kWh (o 42.56 kWh considerando una descarga del 80% para prolongar su vida útil), se necesitan aproximadamente 61.1 ciclos de carga anuales. Esto resulta en 611 ciclos de carga en un período de 10 años, indicando que la batería no necesitará reemplazo durante este tiempo, por lo que el costo en baterías es de $0 COP en los 10 años considerados.

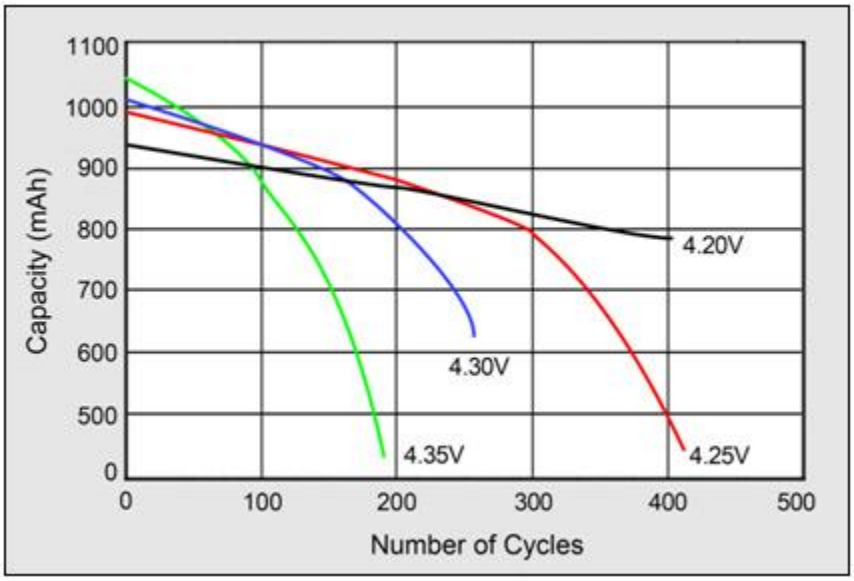


Figura 26. Número de ciclos vs capacidad en mAh. Fuente: (Battery University, 2023).

El rendimiento de las baterías NCM está influenciado por la profundidad de descarga (DoD), un factor crítico que afecta tanto su vida útil como su capacidad efectiva. A continuación, se presenta un análisis detallado centrado en el comportamiento de las baterías NMC a diferentes profundidades de descarga, con especial énfasis en el rango de 4,000 ciclos.

La profundidad de descarga (DoD) es el porcentaje de energía extraída de la batería en relación con su capacidad total. A menor DoD, la batería puede soportar más ciclos de carga/descarga antes de que su capacidad disminuya considerablemente. A continuación, se detalla el impacto de la DoD en el número de ciclos soportados:

- 100% DoD: ~300 ciclos.
- 80% DoD: ~400 ciclos.
- 60% DoD: ~600 ciclos.
- 40% DoD: ~1,000 ciclos.
- 20% DoD: ~2,000 ciclos.
- 10% DoD: Hasta 6,000 ciclos.

Un enfoque a 4,000 ciclos implica operar la batería a una profundidad de descarga significativamente baja, generalmente en torno al 15-25% DoD, lo que corresponde a un uso parcial de la capacidad total de la batería en cada ciclo.

Cuando se diseña un sistema basado en baterías NMC para alcanzar 4,000 ciclos, se adoptan estrategias específicas de operación, que incluyen la limitación del DoD y la optimización del manejo térmico. Las principales características y ventajas asociadas son:

1. Durabilidad Extendida:
    - Al operar con un DoD bajo (15-25%), se minimiza la degradación química y estructural dentro de las celdas.
    - Esto preserva la integridad de los electrodos y evita fallos prematuros, permitiendo alcanzar 4,000 ciclos sin una pérdida significativa de capacidad (>80%).
2. Capacidad Utilizable:
    - Aunque el DoD restringe el uso de la capacidad total de la batería en cada ciclo, la operación a 4,000 ciclos ofrece una capacidad operativa promedio constante a lo largo de su vida útil.
    - Para aplicaciones donde la vida útil es más crítica que la capacidad máxima, como en entornos insulares o urbanos, esta estrategia es ideal.
3. Eficiencia Energética:
    - A bajas DoD, las baterías NMC muestran menores pérdidas internas por resistencia, mejorando la eficiencia energética global del sistema.
4. Reducción de Costos a Largo Plazo:
    - Aunque la capacidad diaria utilizada es menor, la prolongación de la vida útil disminuye el costo nivelado de almacenamiento de energía (LCOS), ya que el costo inicial se amortiza en un mayor número de ciclos.

Para garantizar que una batería NMC alcance 4,000 ciclos con una profundidad de descarga (DoD) del 15-25%, es esencial implementar ciertas condiciones operativas que optimicen su rendimiento y vida útil.

Las baterías NMC son especialmente sensibles a la temperatura. Operar dentro de un rango ideal de 20-30°C es crucial para evitar reacciones no deseadas y la degradación acelerada de las celdas. Mantener esta temperatura óptima ayuda a prolongar significativamente la vida útil de la batería.

Es fundamental utilizar un sistema de gestión de baterías (BMS) avanzado que monitorice continuamente el voltaje y la corriente para evitar sobrecargas o descargas excesivas. Además, es necesario limitar la DoD a rangos seguros, adecuados al diseño del sistema, para maximizar la durabilidad de la batería.

Mantener tasas de carga y descarga moderadas (inferiores a 1C) ayuda a evitar el estrés mecánico y térmico en las celdas de la batería. Este enfoque reduce el desgaste y prolonga la vida útil, garantizando un rendimiento óptimo durante un mayor número de ciclos.

En aplicaciones urbanas, donde los ciclos diarios son moderados y la distancia recorrida es limitada, las baterías NMC operadas a 4,000 ciclos ofrecen una solución sostenible y económica. Este modelo es particularmente útil en entornos insulares, como San Andrés, donde la autonomía diaria requerida es baja y se prioriza la durabilidad.

En sistemas híbridos o de respaldo, operar a una baja DoD asegura un funcionamiento confiable por más de una década, garantizando una energía disponible y fiable durante largos periodos.

El uso parcial de la capacidad total en cada ciclo puede no ser ideal para aplicaciones que requieren altas demandas de energía en cortos periodos. Esto implica que ciertas aplicaciones energéticas intensivas podrían no beneficiarse del todo de esta metodología.

La implementación de este enfoque requiere una inversión inicial en sistemas avanzados de gestión térmica y de carga, lo que puede incrementar significativamente el costo inicial. Estos sistemas son necesarios para monitorear y mantener las condiciones óptimas de operación.

Las baterías NMC operadas en rangos de 15-25% DoD son capaces de alcanzar 4,000 ciclos, convirtiéndose en una solución óptima para aplicaciones que priorizan la longevidad sobre la capacidad total diaria. Este enfoque, respaldado por estrategias avanzadas de gestión térmica y energética, maximiza el rendimiento y minimiza los costos de reemplazo a largo plazo. Así, las baterías NMC se presentan como una opción sólida tanto para vehículos eléctricos como para almacenamiento estacionario en entornos insulares como San Andrés.

La vida útil de una batería, determinada por ciclos de carga completos, varía según factores como la temperatura, la profundidad de descarga (DOD) y la corriente de carga. Las baterías modernas, tanto LFP como NMC, en sistemas de almacenamiento de energía (BESS) pueden durar entre 4,000 y 6,000 ciclos de carga. Por ejemplo, las baterías NMC de Pixii Powershaper tienen una vida útil de 6,000 ciclos a +25ºC, mientras que las LFP duran 4,000 ciclos (Battery University, 2023).

Las baterías LFP suelen tener menos ciclos de carga comparadas con las NMC, aunque estas últimas ofrecen mayor densidad de energía y una vida útil más prolongada, justificando su mayor costo inicial. Las LFP son más adecuadas para aplicaciones orientadas a la potencia, mientras que las NMC proporcionan mayor densidad energética.

La DOD se refiere a la cantidad de energía extraída de una batería en comparación con su capacidad total. Mantener la DOD entre el 20% y el 80% prolonga la vida útil de las baterías. Además, las baterías se desgastan menos cuando se cargan y descargan a corrientes más bajas, permitiendo un equilibrio adecuado entre las celdas y reduciendo el desgaste desigual (Battery University, 2023).

Comprender la vida útil de las baterías y cómo los ciclos de carga afectan su rendimiento es crucial para garantizar una operación eficiente y rentable de los sistemas de almacenamiento de energía. Al mantener la DOD dentro de límites saludables, limitar la

corriente de carga y descarga, y controlar la temperatura, podemos extender significativamente la vida útil de las baterías. Baterías de almacenamiento energético industrial y BESS como Pixii Powershaper permiten una gestión avanzada de la carga, ampliando su vida útil y facilitando un mantenimiento adecuado.

Para el Renault Duster, al ser un vehículo de combustión interna, no utiliza baterías de alto costo como las de los vehículos eléctricos. Como resultado, el costo en baterías es también de $0 COP, ya que este factor no aplica en su caso.

El EV BYD YUAN 400 no se espera un costo adicional por cambio de baterías durante los primeros 10 años, ya que los 611 ciclos de carga necesarios en ese período están muy por debajo de la capacidad de la batería, la cual tiene una vida útil estimada de 4,000 ciclos.

El Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT 4x2 Turbo, al ser un vehículo de combustión interna, no incurre en costos relacionados con baterías.

Los costos operativos relacionados con el cambio de baterías en el EV BYD YUAN 400 son inexistentes durante los primeros 10 años de uso, al igual que en el Renault Duster, donde los cambios de batería no son necesarios debido a su naturaleza de combustión interna. Esto refuerza el bajo costo de mantenimiento asociado a los vehículos eléctricos en comparación con los tradicionales.

En cuanto a los mantenimientos generales de las dos referencias de vehículos son similares como el motor, los neumáticos, el aire acondicionado, el sistema de refrigeración, la batería, la carrocería y pintura, lo único que si variase entre los mantenimientos de los dos vehículos es el cambio de aceite.

Aspecto de Mantenimiento	EV BYD YUAN 400	Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT 4x2 Turbo
Revisiones Periódicas	Inspección de batería, sistema de frenos, neumáticos, sistema de refrigeración	Cambio de aceite y filtro, filtro de aire, filtro de combustible, filtro de cabina
Sistema de Frenos	Verificación y mantenimiento del sistema de frenos, incluyendo líquido de frenos	Revisión de pastillas de freno, cambio de líquido de frenos cada 2 años
Neumáticos	Comprobación de presión y desgaste regularmente	Rotación de neumáticos cada 10,000 km, alineación y balanceo cada 20,000 km

Sistema de Refrigeración	Inspección del sistema de refrigeración de la batería y del motor eléctrico	Revisión del líquido refrigerante y cambio cada 2 años, inspección de mangueras y radiador
Sistema Eléctrico	Revisión del cableado y conexiones, actualización de software	N/A
Transmisión	N/A	Revisión y cambio del líquido de transmisión cada 60,000 km
Bujías	N/A	Reemplazo cada 30,000 a 60,000 km
Otros Componentes	Cambio de filtros de aire y cabina, inspección de suspensión y dirección	Revisión de batería, sistema de escape
Revisiones Anuales	Inspección general en taller autorizado	Inspección general en taller autorizado

Tabla 24. Mantenimientos generales de las dos tipologías de vehículos. Fuente: Propia.

Con el CAPEX y OPEX estimados, se procede a realizar los cálculos del costo nivelados por kilometros que es el comparativo a valor presente en pesos constantes por cada vehículo y se calcula sumando los costos CAPEX y OPEX proyectados a 10 años, dividido entre los Kilometros recorrido por el mismo tiempo.

Criterio	Vehículos Convencionales	Vehículos Eléctricos
Eficiencia de Consumo	Los vehículos convencionales mejoran año tras año en eficiencia de consumo de gasolina, lo que reduce los costos operativos a lo largo del tiempo.	La eficiencia del consumo de energía puede ser alta desde el inicio, pero no se mejora tanto a lo largo del tiempo como en los vehículos convencionales.
Costo Operativo (OPEX)	El OPEX depende del precio de la gasolina y el mantenimiento del motor. Aunque se reduce por la mejora en la eficiencia, siempre existe el costo de combustible.	El OPEX es más estable y generalmente más bajo, debido a la menor cantidad de mantenimiento del motor y la ausencia de consumo de combustible, pero incluye costos de carga de electricidad.

Vida útil y mantenimiento	El mantenimiento de los vehículos convencionales suele ser más alto debido al desgaste del motor, el sistema de escape y otros componentes mecánicos.	Los vehículos eléctricos requieren menos mantenimiento de piezas móviles, pero tienen el costo adicional de reemplazar las baterías cada 8-10 años.
Durabilidad de los Componentes Principales	Los motores de combustión interna suelen durar entre 10-15 años, pero con el tiempo se deterioran debido al desgaste mecánico.	Las baterías de los vehículos eléctricos tienen una vida útil de 8-10 años, después de los cuales deben ser reemplazadas.
Impacto Ambiental	Emisiones de CO2 y otros contaminantes durante el uso del vehículo, dependiendo del tipo de combustible.	Menos emisiones durante el uso, pero la producción de las baterías puede generar huella de carbono significativa.
Costo Inicial (CAPEX)	El costo inicial de los vehículos convencionales tiende a ser más bajo que el de los vehículos eléctricos debido a la tecnología más establecida.	El costo inicial de los vehículos eléctricos tiende a ser más alto debido al costo de las baterías y la tecnología avanzada.
Evolución a Largo Plazo (10 años)	Los vehículos convencionales continúan mejorando su eficiencia, pero el costo del combustible puede aumentar y las regulaciones ambientales pueden generar restricciones.	Los vehículos eléctricos tienen un costo de mantenimiento más predecible, pero las baterías requieren reemplazo después de 8-10 años, lo que puede resultar costoso.
Reemplazo de Componentes	El reemplazo de piezas del motor, sistema de escape y otros componentes puede ser costoso y frecuente con el tiempo.	El reemplazo de las baterías es el costo principal a largo plazo, que debe ser considerado cada 8-10 años.

Tabla 25. Criterio de comparación entre VC y VE. Fuente: Propia.

Los datos que se tendrán en cuenta para realizar este análisis serán la compra del vehículo, el consumo energético, el consumo del combustible y baterías, ya que estas características son las que diferencias un vehículo con el otro; las otras características como mantenimientos preventivos, cambio de llantas, lubricaciones son valores iguales para los dos vehículos.

Vehículo	Precio Aproximado (COP)
EV BYD YUAN 400	$ 100.000.000
Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT	$ 108.800.000

Tabla 26. Mantenimientos generales de las dos tipologías de vehículos. Fuente: Propia.

La imagen muestra una tabla que compara los precios aproximados en pesos colombianos (COP) de dos vehículos: el EV BYD YUAN 400 y el Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT.

- EV BYD YUAN 400 tiene un precio aproximado de $100,000,000 COP.
- Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT tiene un precio aproximado de $108,800,000 COP.

El EV BYD YUAN 400, que es un vehículo eléctrico, es ligeramente más económico en términos de costo inicial, siendo $8,800,000 COP más barato que el Renault Duster New Duster Intens 1.3 CVT, que es un vehículo de combustión interna. Este ahorro en el costo de adquisición inicial, junto con los menores costos de operación y mantenimiento en el caso del vehículo eléctrico, puede hacer que el EV BYD YUAN 400 sea una opción más atractiva a largo plazo en términos de costos totales.

DESCRIPCIÓN	CAPEX	OPEX	TOTAL	KM	$/KM CAPEX	$/KM OPEX	$/KM UNIFICADO	PRECIO REFERENCIA DE LA ENERGÍA
BYD	$ 130.500.000,00	$ 31.210.400,00	$ 161.710.400,00	200000	**$ 652,50**	$ 156,05	$ 808,55	$1.200,40
DUSTER	$ 77.000.000,00	$ 78.312.500,00	$ 155.312.500,00		$ 385,00	**$ 391,56**	$ 776,56	
BYD	$ 130.500.000,00	$ 19.145.100,00	$ 149.645.100,00		**$ 652,50**	$ 95,73	$ 748,23	$736,35
DUSTER	$ 77.000.000,00	$ 78.312.500,00	$ 155.312.500,00		$ 385,00	**$391,56**	$ 776,56	
BYD	$ 130.500.000,00	$ 15.954.120,00	$ 146.454.120,00		**$ 652,50**	$ 79,77	$ 732,27	$613,62
DUSTER	$ 77.000.000,00	$ 78.312.500,00	$ 155.312.500,00		$ 385,00	**$ 391,56**	$776,56	

Tabla 27. Costos nivelados por 20.000 kilómetros. Fuente: Propia.

El análisis presentado compara los costos de capital (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) entre dos vehículos, el BYD EV y el Renault Duster, para un kilometraje total de 200,000 km. La comparación también se realiza bajo diferentes precios de referencia de la energía.

BYD EV

- CAPEX: El costo inicial del vehículo es de $130,500,000 COP.
- OPEX: Dependiendo del precio de referencia de la energía, el costo operativo varía:
  - A un precio de $1,200.40 COP/kWh, el OPEX es de $31,210,400 COP.
  - A un precio de $736.35 COP/kWh, el OPEX baja a $19,145,100 COP.
  - A un precio de $613.62 COP/kWh, el OPEX es aún menor, llegando a $15,954,120 COP.
- Costo Total (CAPEX + OPEX):
  - Con el precio más alto de la energía, el costo total es de $161,710,400 COP.
  - Con el precio medio de energía, el costo total es de $149,645,100 COP.
  - Con el precio más bajo de energía, el costo total es de $146,454,120 COP.
- Costo por km:
  - CAPEX por km: $652,50 COP
  - OPEX por km: Varía entre $156,05 COP (con energía más cara) y $79,77 COP (con energía más barata).
  - Costo Unificado por km: Oscila entre $808,55 COP (precio más alto) y $732,27 COP (precio más bajo).

Renault Duster

- CAPEX: El costo inicial del vehículo es de $77,000,000 COP.
- OPEX: El costo operativo es constante a lo largo de los escenarios, dado que no depende del precio de la energía, y se mantiene en $78,312,500 COP.
- Costo Total (CAPEX + OPEX): $155,312,500 COP.
  - Costo por km:
    - CAPEX por km: $385,00 COP.
    - OPEX por km: $391,56 COP.
    - Costo Unificado por km: $776,56 COP.

En el escenario más costoso para el BYD EV (energía a $1,200.40 COP/kWh), el costo unificado por km es de $808,55 COP, lo cual es más alto que el costo unificado del Renault Duster, que es $776,56 COP.

Sin embargo, cuando el precio de la energía baja, el BYD EV se vuelve más competitivo, llegando a un costo unificado de $732,27 COP (con energía a $613.62 COP/kWh), lo que lo hace más económico que el Renault Duster.

Aunque el BYD EV tiene un CAPEX inicial más alto, su OPEX puede ser significativamente menor dependiendo del costo de la energía. Esto lo hace una opción más eficiente a largo plazo en escenarios donde la energía es más barata. El Renault Duster, por otro lado, tiene un costo inicial más bajo pero su OPEX es constante y considerablemente más alto, lo que lo vuelve menos competitivo en términos de costos operativos a largo plazo.

8. Evaluación de desempeño ambiental

Las Emisiones de gases de efecto invernadero en las islas ha incrementado durante los últimos años, causada principalmente por el uso de hidrocarburos para la generación de energía eléctrica (Diesel) y el parque automotor (Diesel y gasolina), incluyendo el transporte marítimo y aéreo. Es contradictorio el uso diario de estos combustibles fósiles puesto que las islas fueron declaradas una reserva de biosfera por la UNESCO en el 2000 y desde entonces no se han tomado medidas correctivas para disminuir estas emisiones.

Desde el 2020 se presenció el cambio climático en el Archipiélago, debido a los huracanes, ETA, IOTA 2020 y JULIA causando muchas lluvias y fuertes vientos. Se identifica cinco contaminantes que afectan a la salud humana, reflejado en el Documento De Marco Teórico De Contaminantes Atmosféricas En Colombia: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2), ozono troposférico (O3) y material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 µm (PM10). Además de éstos, se incluye al CO2 (dióxido de carbono) por su aporte al efecto invernadero (Tyler, 2013).

Del capítulo anterior, se pudo determinar el consumo de combustible de un vehículo convencional de 500 galones por año y 5.000 galones por 10 años, de acuerdo a esto, se evaluará el desempeño ambiental de aproximadamente 20.000 kilómetros recorridos por año de los dos tipos de vehículos y así calcular los niéveles CO2 (Dióxido de Carbono) como el causante del efecto invernadero, NOX (Óxido de Nitrógeno) como gases reactivos que causan la formación de lluvias acidas y el MP10 (Material particulado) que es el principal causante de los problemas de salud pública.

Las Emisiones de gases de efecto invernadero en las islas ha incrementado durante los últimos años, causada principalmente por el uso de hidrocarburos para la generación de energía eléctrica (Diesel) y el parque automotor (Diesel y gasolina), incluyendo el transporte marítimo y aéreo. Es contradictorio el uso diario de estos combustibles fósiles puesto que las islas fueron declaradas una reserva de biosfera por la UNESCO en el 2000 y desde entonces no se han tomado medidas correctivas para disminuir estas emisiones.

Desde el 2020 se pudo presenciar lo impactante del cambio climático en el Archipiélago, ya que fue impactado por tres grandes huracanes, ETA e IOTA 2020 que fue devastadora para las islas y dio un giro inesperado a la vida de los providéncianos, el huracán JULIA que su paso fue leve por las islas, pero causó muchas lluvias y fuertes vientos.

Se identifica cinco (5) contaminantes criterio que afectan a la salud inmediatamente desde su inhalación en *el Documento De Marco Teórico De Contaminantes Atmosféricas En Colombia*: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2), ozono troposférico (O3) y material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 µm (PM10). Además de éstos, se incluye al CO2 (dióxido de carbono) por su aporte al efecto invernadero.

Con la información del capítulo anterior, se pudo determinar el consumo de combustible de un vehículo convencional de 500 galones por año y 5.000 galones por 10 años, de acuerdo a esto, se evaluará el desempeño ambiental de aproximadamente 20.000 kilómetros recorridos por año de los dos tipos de vehículos y así calcular los niéveles CO2 (Dióxido de Carbono) como el causante del efecto invernadero, NOX (Óxido de Nitrógeno) como gases reactivos que causan la formación de lluvias acidas y el MP10 (Material particulado) que es el principal causante de los problemas de salud pública.

8.1 Emisiones CO_2, NO_x y PM_{10}

8.1.1 Emisiones de CO_2 por cambio de vehículos convencionales a EV.

Para el cálculo de estas emisiones se usarán los parámetros obtenidos de la UPME, en donde nos indica que el factor de emisión CO2 de la gasolina comercial es de 7.6181 KgCO2/gal y el factor de emisión CO2 Diesel marino: 8,8632 KgCO2/gal[1].

[1] http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/calculadora.html

gal Diesel	Factor de emisión CO2 Diesel KgCO2/gal	Emisiones kgCO2/gal*año	Emisiones kgCO2/gal*10año
500	8,8632	4.432	44.316

Tabla 28. Emisiones de dióxido de carbono CO2 por el consumo de combustible de un vehículo Diesel en el año 1 y 10. Fuente: Propia.

El consumo de 500 galones de Diesel resulta en 4,432 kg de dióxido de carbono emitido en el primer año. A lo largo de 10 años, estas emisiones ascienden a un total de 44,316 kgCO2. Estos datos son cruciales para evaluar el impacto ambiental del uso de vehículos Diesel y pueden ser utilizados para considerar alternativas más sostenibles o estrategias para reducir las emisiones.

La tabla muestra que por cada galón de diesel consumido, se emiten aproximadamente 8.8632 kg de CO2. Multiplicando este factor de emisión por el consumo anual de 500 galones, obtenemos que se emiten 4,432 kg de CO2 al año. Extrapolando este valor a diez años, se llega a un total de 44,316 kg de CO2 emitidos en una década.

gal gasolina	Factor de emisión CO2 Gasolina KgCO2/gal	Emisiones kgCO2/gal*año	Emisiones kgCO2/gal*10año
500	7,6181	3.809	38.091

Tabla 29**:** Emisiones de dióxido de carbono CO2 por el consumo de combustible de un vehículo gasolina en el año 1 y 10.

Se debe tener en cuenta que para el departamento archipiélago es indispensable abastecer de energía a los vehículos eléctricos con energías alternativas, debido a que la generación de energía del archipiélago también es con combustible Diesel; no obstante, si se decide cargar de energía a los vehículos eléctricos directamente de la red de distribución local de SOPESA S.A. no se estaría reduciendo las emisiones de gases contaminantes a la atmosfera.

Para realizar los cálculos de emisiones del parque automotor, es necesario conocer los niveles de combustible y de CO2 que genera la empresa productora de energía del Archipiélago - SOPESA S.A., ya que este es el principal factor contaminante e la isla y de esto manera aproximar las emisiones totales.

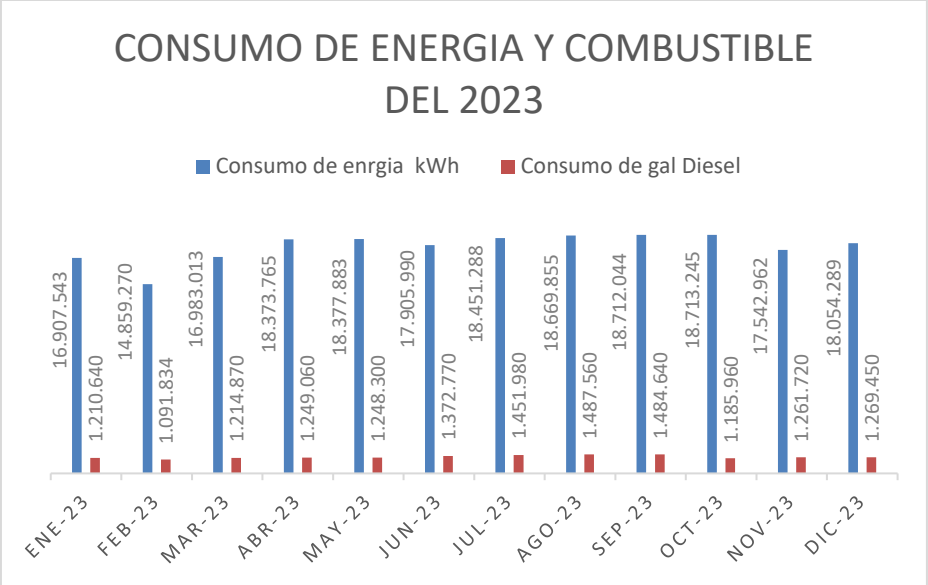


Figura 27. Consumo de energía y combustible del 2023 en San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Fuente: Propia con la informacion recibida de la interventoria ASE que realiza EEDAS S.A. E.S.P.

El gráfico presenta la evolución mensual del consumo de energía eléctrica (kWh) y el consumo de combustible diésel (galones) en las islas del archipiélago a lo largo del año 2023. Estos datos reflejan una tendencia creciente en ambos tipos de consumo, con picos en los meses de mayor actividad turística.

Tanto el consumo de energía eléctrica como el consumo de diésel muestran un incremento constante a lo largo del año, destacándose picos durante los meses de mayor turismo. Esto indica una relación entre el aumento de la actividad económica, especialmente en el sector turístico, y el incremento de la demanda energética.

Existe una correlación directa entre el consumo de electricidad y el de diésel, ya que en estas islas la generación de electricidad depende mayormente de la combustión de diésel. A medida que aumenta la demanda de energía eléctrica, el consumo de diésel también crece para satisfacerla.

Las fluctuaciones estacionales son evidentes, con aumentos significativos en los meses de temporada alta turística, de abril a octubre, mientras que los consumos bajan en los meses de menor actividad turística, como enero, febrero y noviembre.

El consumo de energía eléctrica varió a lo largo del año, comenzando en 16,907,543 kWh en enero y alcanzando su pico en octubre con 18,713,245 kWh. Otros meses de alto consumo incluyen abril, mayo y agosto, coincidiendo con los periodos de alta demanda turística.

De manera similar, el consumo de diésel mostró un aumento significativo, comenzando en 1,210,640 galones en enero y alcanzando su máximo en septiembre con 1,487,560

galones. Este incremento en el consumo de diésel es paralelo al aumento del consumo de energía eléctrica.

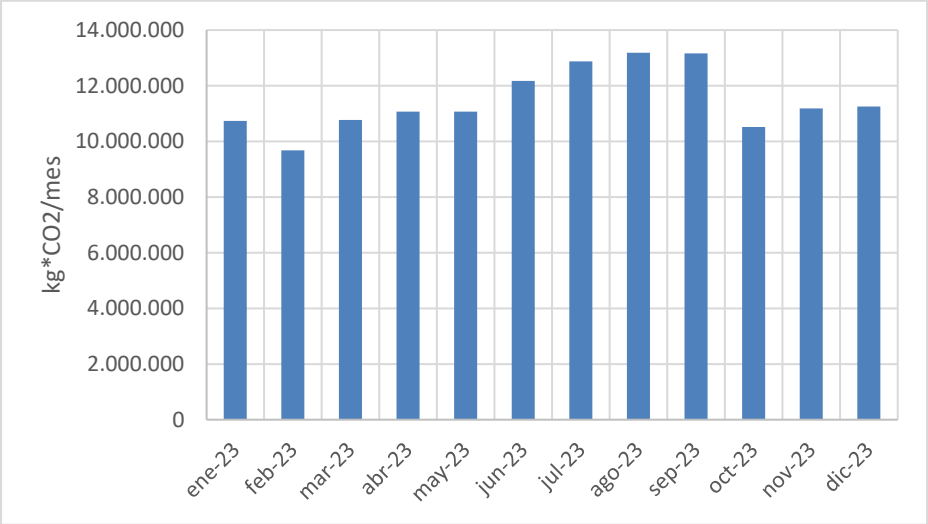


Figura 28. Emisiones de kg*CO2 por la generación de energía eléctrica en San Andrés, Providencia y Santa Catalina para el 2023. Fuente: Propia.

Las emisiones de CO2 en la región muestran una tendencia al alza de manera constante a lo largo del año 2023, comenzando con 13 millones de kg de CO2 en enero y alcanzando los 13.5 millones de kg de CO2 en diciembre. Aunque las variaciones mensuales son relativamente pequeñas, se observa un incremento paulatino en la generación de CO2.

Aunque las emisiones continúan siendo elevadas, la implementación de fuentes de energía renovable está diseñada para reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que contribuirá a reducir las emisiones en el futuro. Según informes recientes del Ministerio de Energía, estas iniciativas han tenido éxito inicial, y se espera que los resultados sean más visibles en los próximos años.

El cálculo de emisiones de dióxido de carbono por 20.000km/año y consumo de 500gal/año se puede del 100% del parque automotor que equivale a 2.5716 vehículos se puede apreciar en la siguiente tabla:

Descripción	Cantidad de vehículos	Consumo en combustible por año	kg*CO2/ año	kg*CO2/ 10 años
Vehículos Diesel	5.143	2.571.600	45.585	455.852
Vehículos Gasolina	18001	9.000.600	137.135	1.371.349

Vehículos pesados, Diesel	2572	1.285.800	22.793	227.926
Total	25716	12.858.000	205.513	2.055.128

Tabla 30. Cálculo aproximado de emisiones de dióxido de carbono del parque automotor con referencia de 500 galones de combustible anual. Fuente: Propia.

La tabla analiza las emisiones de dióxido de carbono (CO2) generadas por los vehículos en el archipiélago, específicamente aquellos que consumen diésel y gasolina. Se hace una estimación basada en un consumo anual de 500 galones de combustible por vehículo, revelando las emisiones totales en un año y en un periodo de diez años.

Los vehículos a Gasolina, representa la mayor fuente de emisiones, con un aporte anual de 137,135 kg de CO2 debido a su alta cantidad en la región (18,001 vehículos).Lo Vehículos Diesel y Pesados aunque en menor cantidad que los vehículos a gasolina, los vehículos diésel (5,143 unidades) y pesados (2,572 unidades) también generan emisiones significativas, con 45,585 kg de CO2 y 22,793 kg de CO2 anuales, respectivamente.

Durante una década, el parque automotor del archipiélago emitiría un total de 2,055,128 kg de CO2, con los vehículos a gasolina contribuyendo con la mayor parte de estas emisiones. Esta cifra resalta la importancia de reducir el consumo de combustible y la necesidad de adoptar tecnologías más limpias para mitigar el impacto ambiental.

El análisis muestra que las emisiones de CO2 del parque automotor son considerables y aumentarán con el tiempo si no se toman medidas. La implementación de vehículos eléctricos, la promoción de transporte público eficiente, y la mejora en la eficiencia de los combustibles son estrategias clave para reducir las emisiones en el archipiélago.

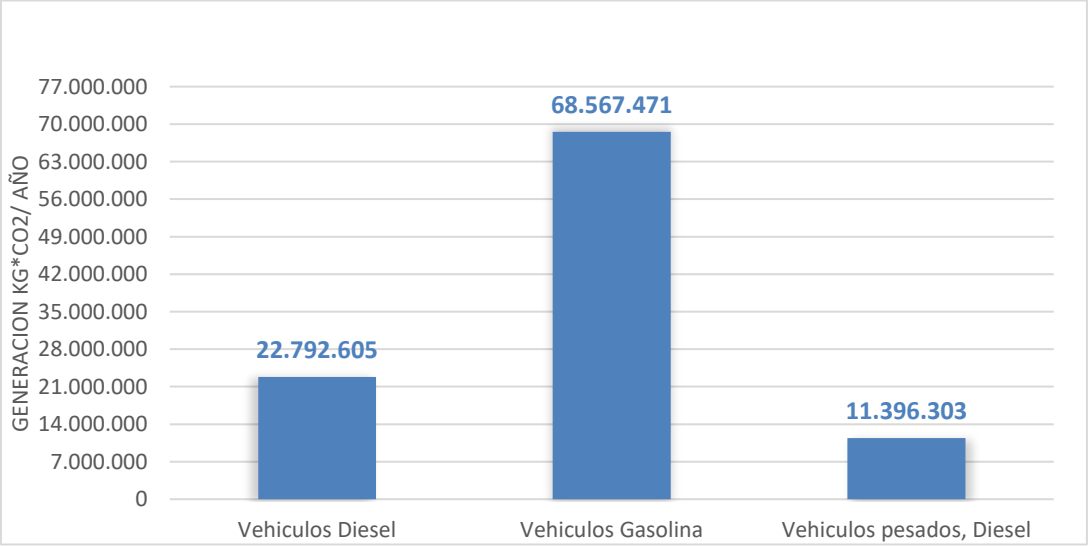


Figura 29. Emisiones de CO2/año del parque automor de las islas. Fuente: Propia.

Las emisiones que tiene el departamento anual de CO2 por estos dos factores es de 200.515.757 kg*CO2. El parque automotor en las islas genera una cantidad significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO2) anualmente, lo que representa un desafío ambiental considerable. Según los datos analizados, los vehículos de gasolina son responsables de las mayores emisiones, alcanzando un total de 68,567,471 kg de CO2 al año. Esta cifra resalta el impacto que los automóviles de gasolina tienen en la calidad del aire y el medio ambiente local.

En segundo lugar, los vehículos diésel contribuyen con 22,792,605 kg de CO2 anuales, lo que también representa una carga significativa sobre el medio ambiente, aunque inferior a la de los vehículos de gasolina. Finalmente, los vehículos pesados diésel, aunque menos numerosos, generan 11,396,303 kg de CO2 al año. Estos datos indican que tanto los vehículos de gasolina como los diéseles son responsables de una parte considerable de las emisiones de gases de efecto invernadero en las islas.

A continuación, se realiza el cálculo de reducción de emisiones por hacer el recambio del 90% de los vehículos convencionales del parque automotor que equivale a 23.144 vehículos, el cual, el 20% equivale a 5.143 vehículos Diesel y el 70% a 18.001 vehículos a gasolina.

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
	3%	3%	1%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	2%
Cantidad de vehículos por año	771	771	257	514	257	514	514	514	514	514
Totales de vehículos Diesel	771	1.543	1.800	2.314	2.572	3.086	3.600	4.115	4.629	5.143

Tabla 31. Cambio del 20% de vehículos Diesel por año. Fuente: Propia.

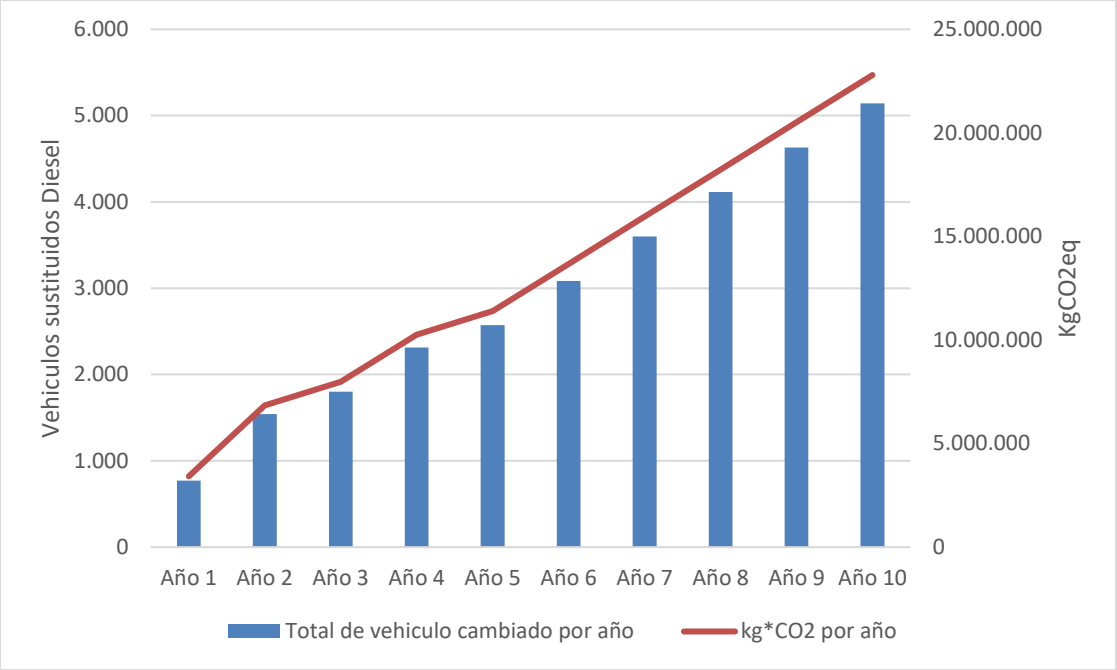


Figura 30. Reducción de emisiones de CO2 por cambiar el 20% de vehículos a Diesel a EV hasta el año 10. Fuente: Propia.

La gráfica muestra cómo las emisiones de CO2 se reducen de manera acumulativa. Cada año, la cantidad de kg de CO2 ahorrados aumenta a medida que más vehículos diésel son sustituidos. Para el Año 10, se alcanza la máxima reducción de emisiones, evidenciando el impacto positivo y sostenible de la transición hacia los vehículos eléctricos.

La sustitución del 20% de vehículos diésel por vehículos eléctricos a lo largo de 10 años demuestra ser una estrategia eficaz para la reducción de emisiones de CO2. Esta transición no solo es fundamental para cumplir con los objetivos de sostenibilidad ambiental, sino que también mejora la calidad de vida de los habitantes de las islas.

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
	10%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	10%	10%
Cantidad de vehículos por año	2572	2572	1286	1286	1286	1286	1286	1286	2572	2572
Totales de vehículos a gasolina	2572	5143	6429	7715	9001	10286	11572	12858	15430	18001

Tabla 32. Cambio del 70% de vehículos a gasolina por año. Fuente: Propia.

La gráfica anterior presenta un plan para la transformación del parque automotor en un período de 10 años, buscando cambiar el 70% de los vehículos a gasolina. La estrategia

se distribuye de manera escalonada, comenzando con un cambio gradual que permitirá una transición sostenible hacia un parque automotor más limpio.

En los primeros dos años, se establece un cambio del 10% de los vehículos a gasolina, lo que se traduce en 2572 vehículos adicionales cada año. Este enfoque inicial busca facilitar la adaptación del mercado y preparar a los consumidores para la nueva tecnología. A partir del tercer año, el porcentaje de cambio se reduce al 5%, manteniendo la cifra de 1286 vehículos por año. Esta fase más moderada ayuda a consolidar el cambio y a asegurar que la transición sea manejable.

A partir del nueve y diez, el plan se intensifica nuevamente al 10%, lo que permite añadir 2572 vehículos cada año, alcanzando un total acumulado de 18001 vehículos a gasolina al final del período. Este enfoque gradual es clave para lograr la reducción de emisiones de CO2 y mejorar la sostenibilidad ambiental.

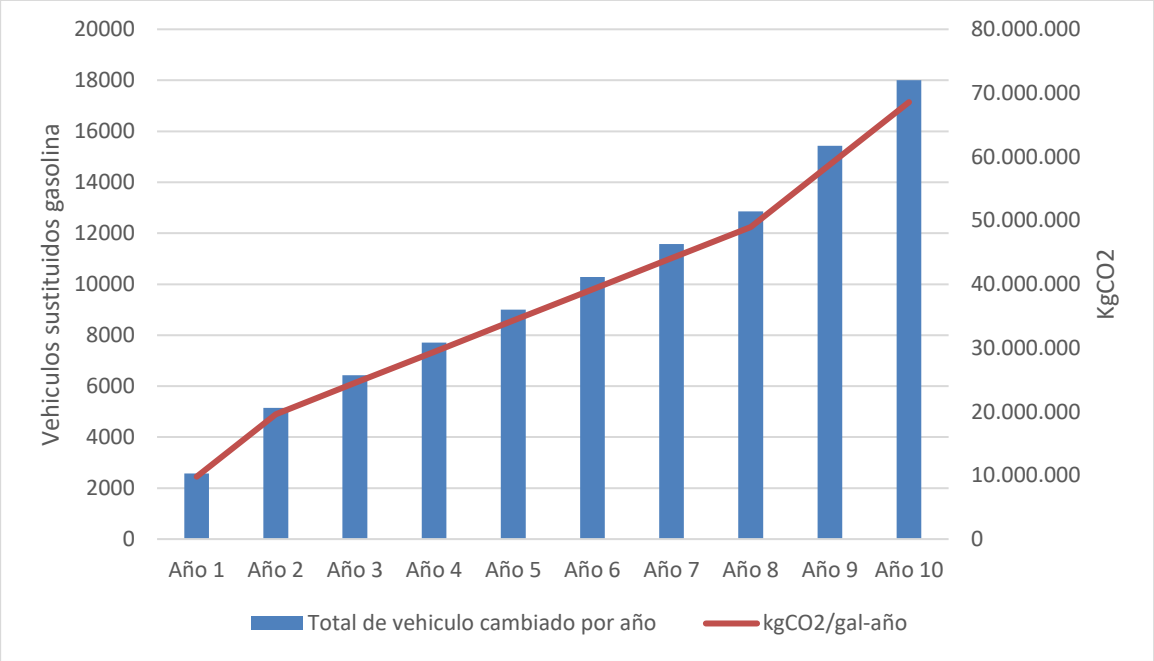


Figura 31. Reducción de emisiones de CO2 por cambiar el 70% de vehículos a Diesel a EV hasta el año 10. Fuente: Propia.

La Figura 31, analiza el impacto de la conversión del 70% de los vehículos diesel a EV en la reducción de emisiones de CO2 a lo largo de un período de 10 años. La gráfica correspondiente ilustra cómo la cantidad de vehículos diesel sustituidos por EV aumenta cada año, comenzando con un número menor en el primer año y escalando progresivamente hasta alcanzar su máximo en el décimo año.

El cambio gradual en la flota vehicular permite una reducción significativa de las emisiones de CO2, que se refleja en la línea de la gráfica que muestra la cantidad de kilogramos de CO2 ahorrados anualmente. Este ahorro en emisiones comienza en el primer año y se

incrementa con el tiempo, alcanzando su punto culminante en el décimo año, lo que subraya el impacto acumulativo de la sustitución de vehículos.

Adicionalmente, esta transición no solo contribuye a la disminución de las emisiones de CO2, sino que también mejora notablemente la calidad del aire y promueve la sostenibilidad ambiental en las islas. La adopción de vehículos eléctricos se presenta como una estrategia crucial para enfrentar los desafíos medioambientales actuales y futuros.

De las gráficas anteriores, en el año 10 se tendría con el cambio del 90% de la flota vehicular convencional a vehículos eléctricos se obtendrá la reducción de emisiones de un 89% de los 102.756.379 kg*CO2/año de generación de emisiones de la flota total del parque automotor del departamento, el 11% restante es el equiválete a los vehículos de carga pesada convencionales el cual, no se les aplico el cambio de tecnología.

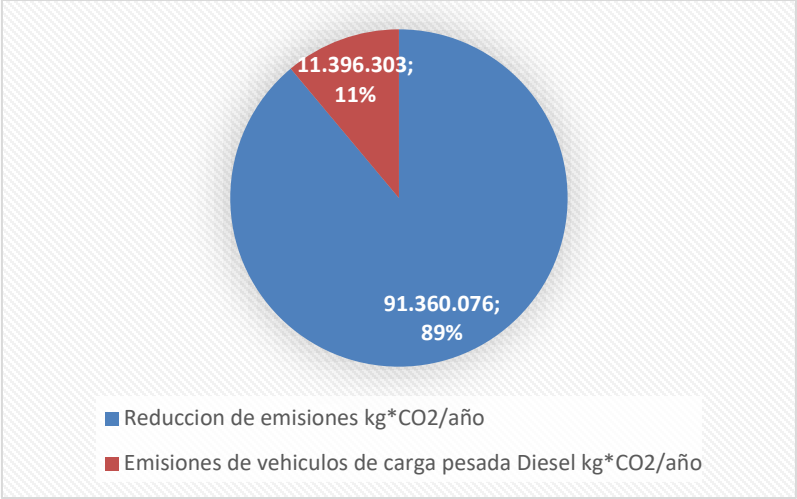


Figura 32. Reducción de emisiones vs emisiones de vehículos de carga pesada. Fuente: Propia.

Con lo anterior, podemos deducir que el ahorro de emisiones de CO2 con el cambio del 90% del parque automotor de vehículos Diesel y Gasolina es 91.360.076 kg*CO2/año.

8.2 CO_2 emitidos a la atmosfera por cargar EV al sistema de distribución local a base de Diesel.

La sociedad productora de energía del archipiélago SOPESA S.A. es una empresa de servicios públicos que presta un servicio exclusivo de generación, distribución y comercialización de energía en el departamento, cuenta con una capacidad instalada de plantas térmicas para el suministro de energía de 69 MW[2].

[2] https://sopesa.com/wp-content/uploads/2023/07/ct-gac-01-cartilla-de-seguridad.pdf

Para la generación de 1kWh en la sociedad productora de energía del archipiélago SOPESA S.A. necesitaría aproximadamente 15,78 galones de combustible Diesel[3].

Entonces, para generar 2600 kWh de energía para la recarga del vehículo eléctrico por año se realiza la siguiente:

$$Galones\ de\ combustible = \frac{2600\ kWh}{15.78 gal/1kWh} = 164{,}77 \quad \text{Ecuación 7}$$

Para realizar calcular la reducción de gases contaminantes a la atmosfera por no cargar el 90% del parque automotor en las islas a la red de distribución local, primero se debe de clasificar los vehículos por combustibles, entonces se estima que el 20% de los vehículos convencionales en la isla son a base de Diesel, el 70% son vehículos convencionales que funcionan con gasolina y el 10% son vehículos convencionales de carga pesada.

De la ecuación 7, se necesitarían 164,77 galones año de combustible Diesel para cargar un vehículo eléctrico de la red para recorrer 20.000km/año, con ese valor se puede calcular cuantos kilogramos de dióxido de carbono se genera por cargar un solo vehículo eléctrico por un (1) y diez (10) años.

gal de Diesel para generar 2600kWh	Factor de emisión CO2 Diesel marino KgCO2/gal	Emisiones kg*CO2/gal-año	Emisiones Diesel kg*CO2/gal-10 años
164,77	8,8632	1.460	14.603

Tabla 33. Generación de Dióxido de Carbono por cargar un vehículo eléctrico con el sistema de distribución local a base de Diesel. Fuente: Propia.

Las emisiones de CO2 generadas al cargar un vehículo eléctrico utilizando un sistema de distribución de energía basado en Diesel. Se utilizan dos datos clave para el cálculo: se requieren aproximadamente 164.77 galones de Diesel para generar 2600 kWh, y el factor de emisión de CO2 del Diesel marino es de 8.8632 kg CO2 por galón.

Los cálculos revelan que las emisiones anuales de CO2 al cargar el vehículo son de 1,460 kg. Si se considera un periodo de diez años, las emisiones totales alcanzan los 14,603 kg de CO2. Estos resultados subrayan el impacto ambiental significativo asociado a la carga de vehículos eléctricos cuando la energía proviene de combustibles fósiles como el Diesel.

[3] Interventoría ASE de EEDAS S.A E.S.P.

8.3 Generación de dióxido de carbono a 1 y 10 años por inyectar energía con proyectos solares o eólicos a la red de distribución local a base de Diesel para cargar un EV.

Para realizar los cálculos de cuanto es la expulsión de dióxido de carbono por generar energía a eléctrica a una electrolinera para recargar 2600kWh por un año, se toma el factor de emisión de la UPME 2022, de 0,154 T*CO2eq/MWh, donde este valor puede ser utilizado en proyectos que produzcan el desplazamiento de la electricidad generada con plantas de energías renovables en un sistema eléctrico o en su defecto a proyectos que resultan en ahorros de electricidad y si esa energía fuera suministrada por la red.

Energía recorrida año por vehículo	Factor de emisión kg*CO2/kWh	Emisiones kg*CO2eq/gal-año	Emisiones kg*TON*CO2/gal-año
2.600	0,154	400	4.004

Tabla 34. Generación de Dióxido de Carbono por cargar un vehículo eléctrico en el sistema de distribución local con inyección de energías solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia.

El factor de emisión para proyectos solares y eólicos en el sistema interconectado del país es de 0,154 TON*CO2eq/MWh, esto es debido a que el 50% de la generación eléctrica del país provine de energías renovables y que en el 2021 el 86.46% de la generación fue producto de recursos renovables y el 13.54% restante de recursos no renovables[4].En las islas el 100% generación de energía eléctrica es a base de combustible Diesel por lo que las emisiones se reducirían significativamente si se realiza inyección a la res con proyectos renovables para suplir el 90% de la flota vehicular y la energía.

El informe analiza las emisiones de CO2 generadas al cargar un vehículo eléctrico utilizando energías renovables, específicamente a través de sistemas de distribución con inyección de energía solar fotovoltaica y eólica. Para realizar este análisis, se consideran dos datos fundamentales: la energía recorrida anualmente por un vehículo, que es de 2,600 kWh, y el factor de emisión de CO2, que se sitúa en 0.154 kg CO2/kWh.

Los cálculos indican que las emisiones anuales de CO2 al cargar el vehículo eléctrico son de 400 kg CO2eq. Al proyectar estas cifras a un periodo de diez años, las emisiones totales alcanzan los 4,004 kg CO2eq. Esta comparación con las emisiones generadas por sistemas que utilizan Diesel revela una reducción significativa en el impacto ambiental al optar por energías renovables para la carga de vehículos eléctricos.

[4] https://www.xm.com.co/noticias/4482-20971-gwh-dia-fue-la-generacion-de-energia-en-colombia-ennoviembre#:~:text=Por%20fuente%20de%20energ%C3%ADa%2C%20el,con%20relaci%C3%B3n%20al%20mes%20anterior).

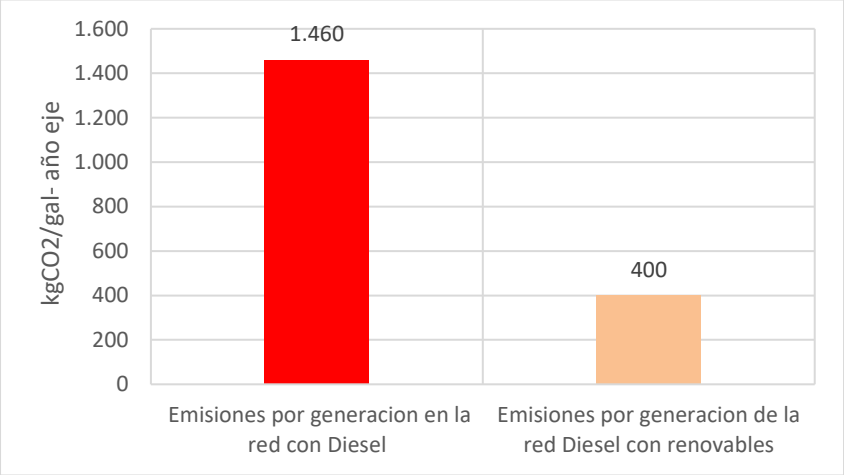


Figura 33. Reducción de emisiones por cargar un vehículo con la red de distribución pleno y la red con inyección de energías renovables. Fuente: Propia.

Las emisiones de CO2 generadas al cargar un vehículo eléctrico utilizando dos tipos de redes de distribución: una que depende exclusivamente de Diesel y otra que combina Diesel con energías renovables. En la primera opción, la red de distribución con Diesel genera emisiones de 1,460 kg de CO2 por kilovatio-hora (kWh) producido, lo que se representa en la gráfica con una barra roja alta, indicando un impacto ambiental significativo.

Por otro lado, la red de distribución que incluye energías renovables, como solar y eólica, presenta una drástica reducción de las emisiones, alcanzando solo 400 kg de CO2 por kWh. Esta mejora se visualiza con una barra naranja más baja en la gráfica. La incorporación de energías renovables en la red permite una disminución de aproximadamente el 72.6% en las emisiones de CO2, subrayando la importancia de integrar fuentes de energía limpia para mitigar el impacto ambiental.

La comparación entre ambas redes resalta las ventajas y desventajas de cada una. La red basada en Diesel, aunque más accesible y viable en ciertas regiones, genera una cantidad considerable de emisiones que contribuyen al cambio climático y a la contaminación del aire. En contraste, la red que combina Diesel con energías renovables, a pesar de requerir una inversión inicial más alta y depender de la disponibilidad de recursos, resulta ser mucho más sostenible a largo plazo debido a su considerable reducción de emisiones de CO2.

Se realiza el cálculo para hallar las emisiones de dióxido de carbono (CO2) por cargar los vehículos con la red de distribución local pleno de SOPESA S.A. y con la red de distribución de SOPESA S.A. pero con inyección con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos.

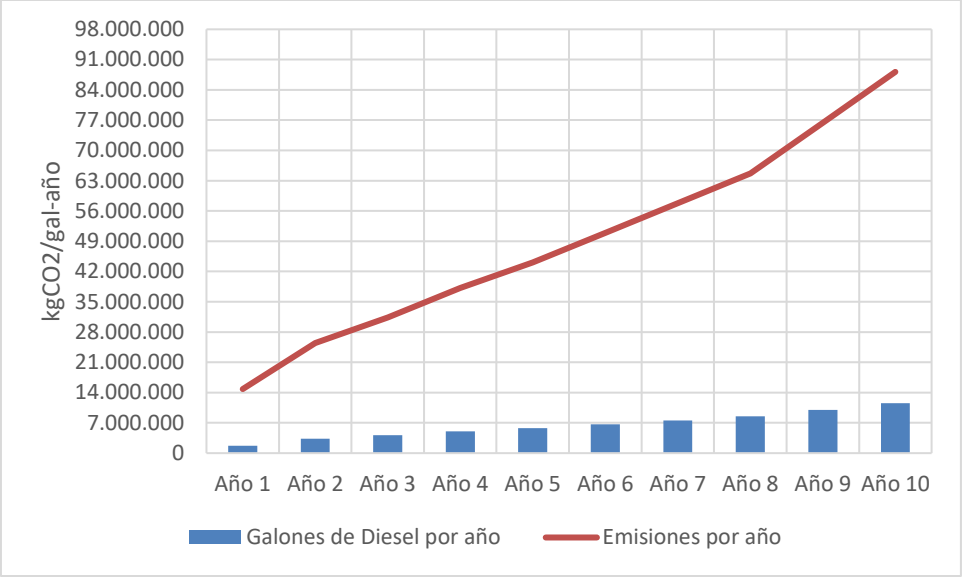


Figura 34: Emisiones de kg*CO2 generadas por cargar vehículos eléctricos en el sistema de distribución local a base de Diesel pleno hasta el año 10. Fuente: Propia.

Las emisiones de CO2 generadas por cargar vehículos eléctricos utilizando un sistema de distribución local basado completamente en Diesel a lo largo de 10 años. La gráfica muestra dos elementos clave: el consumo de Diesel, representado por barras azules, y las emisiones de CO2, ilustradas mediante una línea roja. A medida que avanza el tiempo, se observa un incremento tanto en el uso de Diesel como en las emisiones de CO2, lo que refleja una tendencia preocupante.

En el primer año, se registran las emisiones iniciales de CO2, y en el décimo año se alcanza el máximo, evidenciando el impacto acumulativo de esta dependencia del Diesel. Esta tendencia creciente en el consumo de combustible fósil y las correspondientes emisiones de CO2 destacan la urgencia de buscar alternativas más sostenibles.

La disminución de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO2eq) al cargar vehículos eléctricos utilizando una red de distribución local que combina Diesel con energías renovables, como la solar y eólica, durante un periodo de 10 años. La gráfica presentada ilustra dos aspectos importantes: el consumo de energía, representado por barras azules, y las emisiones de CO2eq, mostradas mediante una línea roja. Aunque las emisiones de CO2eq tienden a aumentar con el tiempo, la integración de energías renovables permite una reducción significativa en comparación con el uso exclusivo de Diesel.

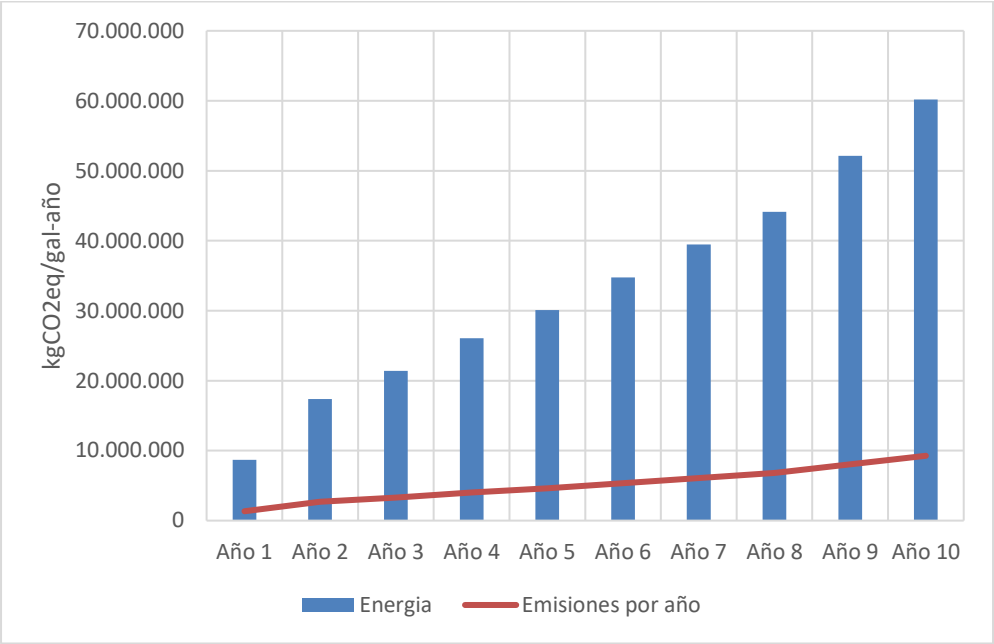


Figura 35: Disminución de emisiones de kg*CO2eq cargar vehículos eléctricos en la red de distribución local base de Diesel con inyección de energía solares y/o eólicos. Fuente: Propia.

En el primer año se registran las emisiones iniciales de CO2eq, mientras que en el décimo año se alcanzan las emisiones máximas, reflejando el impacto acumulativo de la combinación de fuentes de energía. A pesar de la tendencia creciente en las emisiones, el uso de energías renovables demuestra ser beneficioso para la sostenibilidad ambiental, al reducir considerablemente las emisiones de CO2eq.

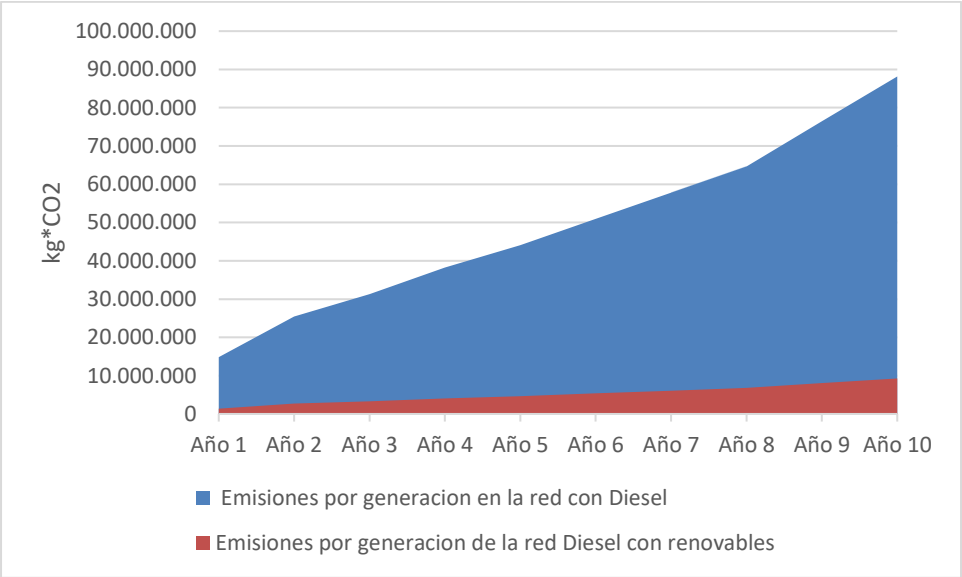


Figura 36. Diferencia de emisiones kg*CO2 por cargar vehículos con diferentes en la red convencional. Fuente: Propia.

El informe presenta una comparación de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) al cargar vehículos eléctricos utilizando dos tipos de redes de distribución durante un periodo de 10 años. Por un lado, se observa la red de distribución con Diesel, que se representa con barras azules. Esta red muestra un aumento significativo en las emisiones de CO2 cada año, alcanzando niveles muy altos al final del período analizado. Por otro lado, la red de distribución que combina Diesel y energías renovables se ilustra con barras rojas. Esta red mantiene las emisiones relativamente bajas y constantes a lo largo de la década.

La interpretación de los datos destaca que la red de distribución con Diesel genera considerablemente más emisiones de CO2, lo que pone de manifiesto su impacto ambiental negativo. En contraste, la red que incluye energías renovables muestra una reducción significativa en las emisiones, evidenciando los beneficios de integrar fuentes de energía limpia como la solar y la eólica.

8.4 Reducción del Óxido de nitrógeno (NOx) y de PM10

Para determinar los gases y las partículas contaminantes que se dejarían de emitir a la atmosfera por inyectar energía con proyectos renovables a red de distribución de 53GWh en el año 10 de este ejercicio.

Para hallar cuanto óxido de nitrógeno y el material particulado se toman los valores de los factores de emisión de embarcaciones portuarias y vehículos de navegación exterior, corregidos para un contenido de azufre de 15 partes por millón en embarcaciones portuarias y un contenido de azufre del 0,1 por ciento en vehículos de navegación exterior. Que al similarmente la energía de las islas son plantas térmicas que funcionan a base de combustible Diesel marino.

Minimum Power (kW)	NOX (g/kW-hr)	PM10 (g/kW-hr)
1,000+	9,8	0,007

Tabla 35. Factores de emisión para embarcaciones con potencia superior a los 1kW para plantas con funcionamiento de Diesel Marino. Fuente: (VOWTAP, 2014).

Los factores de emisión para embarcaciones con una potencia superior a 1 kW que operan con Diesel Marino son:

Óxidos de Nitrógeno (NOx): 9.8 gramos por kilovatio-hora (g/kW-h).

Material Particulado (PM10): 0.007 gramos por kilovatio-hora (g/kW-h).

Estos valores indican las cantidades de contaminantes emitidos por las plantas de motores diésel en embarcaciones. Los NOx contribuyen a la contaminación del aire y a la formación de ozono troposférico, mientras que el PM10 es perjudicial para la salud humana, particularmente para las vías respiratorias.

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
	13%	13%	6%	7%	6%	7%	7%	7%	12%	12%
Cambio de vehículos por años	3343	3343	1543	1800	1543	1800	1800	1800	3086	3086
Totales de vehículos por año	3343	6686	8229	10029	11572	13372	15172	16973	20058	23144
Energía requerida kWh	8.692.008	17.384.016	21.395.712	26.076.024	30.087.720	34.768.032	39.448.344	44.128.656	52.152.048	60.175.440

Tabla 36. Energía renovable requerida por años para la carga de los vehículos eléctricos en la red de distribución local de SOPESA S.A. Fuente: Propia.

El informe proporciona un análisis de la energía renovable necesaria para la carga de vehículos eléctricos en la red de distribución local de SOPESA S.A. A lo largo de un periodo de 10 años, se observa un aumento progresivo tanto en la cantidad de energía requerida como en el número total de vehículos eléctricos en circulación. En el primer año, se requiere un 13% de energía renovable para cargar 3,343 vehículos, lo que representa un total de 8,692,008 kWh de energía necesaria. Este porcentaje fluctúa entre el 6% y el 13% durante el periodo, y el número de vehículos eléctricos crece cada año, alcanzando los 23,144 en el décimo año.

Los datos muestran que, aunque el porcentaje de energía renovable varía, la energía requerida y el total de vehículos aumentan de manera constante. En el año 10, la cantidad de energía necesaria para cargar los vehículos eléctricos asciende a 60,175,440 kWh. Este incremento progresivo resalta la importancia de la integración de energías renovables en la red, ya que contribuye a la reducción de las emisiones de CO2, mejorando así la sostenibilidad ambiental.

Con la inyección de energías renovables solar fotovoltaico y/o eólica a la red de distribución local, se estima la reducción de emisiones para el año diez de 524 toneladas de óxido de nitrógeno (NOx) y 15.600 toneladas de material particulado PM10 para cargar los 23.144 vehículos que equivale al 90% del parque automotor en la isla.

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
	13%	13%	6%	7%	6%	7%	7%	7%	12%	12%
Energía no producida por combustible Diesel	8.692.008	17.384.016	21.395.712	26.076.024	30.087.720	34.768.032	39.448.344	44.128.656	52.152.048	60.175.440
NOX (g)	85.181.678	170.363.357	209.677.978	255.545.035	294.859.656	340.726.714	386.593.771	432.460.829	511.090.070	589.719.312
NOX (kg)	85.182	170.363	209.678	255.545	294.860	340.727	386.594	432.461	511.090	589.719
NOX (T)	85,2	170,4	209,7	255,5	294,9	340,7	386,6	432,5	511,1	589,7

Tabla 37. Óxido de nitrógeno NOx no emitido a la atmosfera por la carga de los vehículos eléctricos en la red de energía convencional de SOPESA S.A. Fuente: Propia.

La adopción de vehículos eléctricos y su carga en la red de energía convencional de SOPESA S.A. ha generado una significativa reducción en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) a lo largo de 10 años. Durante este período, las emisiones evitadas se incrementan de manera progresiva, alcanzando un total acumulado de 589,7 toneladas en el décimo año. Esto refleja el impacto positivo de la electrificación del transporte sobre la calidad del aire y la reducción de contaminantes atmosféricos.

En los primeros dos años, se observa una reducción del 13% en las emisiones de NOx, con un ahorro de 85,2 y 170,4 toneladas en cada año, respectivamente. A partir del tercer año y hasta el octavo, la reducción oscila entre un 6% y 7% anual, resultando en una disminución significativa pero más moderada de las emisiones. Sin embargo, en los últimos dos años, la reducción vuelve a aumentar al 12% anual, mostrando un ahorro de 511,1 toneladas en el noveno año y 589,7 toneladas en el décimo año.

La energía no producida por combustibles fósiles, en particular el diésel, ha sido clave para lograr estas reducciones de NOx. A lo largo del período de análisis, el incremento en la demanda de energía para cargar vehículos eléctricos ha sustituido la producción de energía basada en diésel, contribuyendo a una notable mejora en la calidad del aire. La reducción de las emisiones de NOx es fundamental, ya que este compuesto es uno de los principales responsables de la contaminación del aire y puede contribuir a problemas de salud como enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

El análisis demuestra que la transición hacia vehículos eléctricos tiene un impacto ambiental positivo, reduciendo significativamente las emisiones de contaminantes como el NOx. A medida que se expande la infraestructura de carga y aumenta el uso de vehículos eléctricos, se espera que estas reducciones continúen en el futuro, beneficiando tanto la salud pública como el medio ambiente.

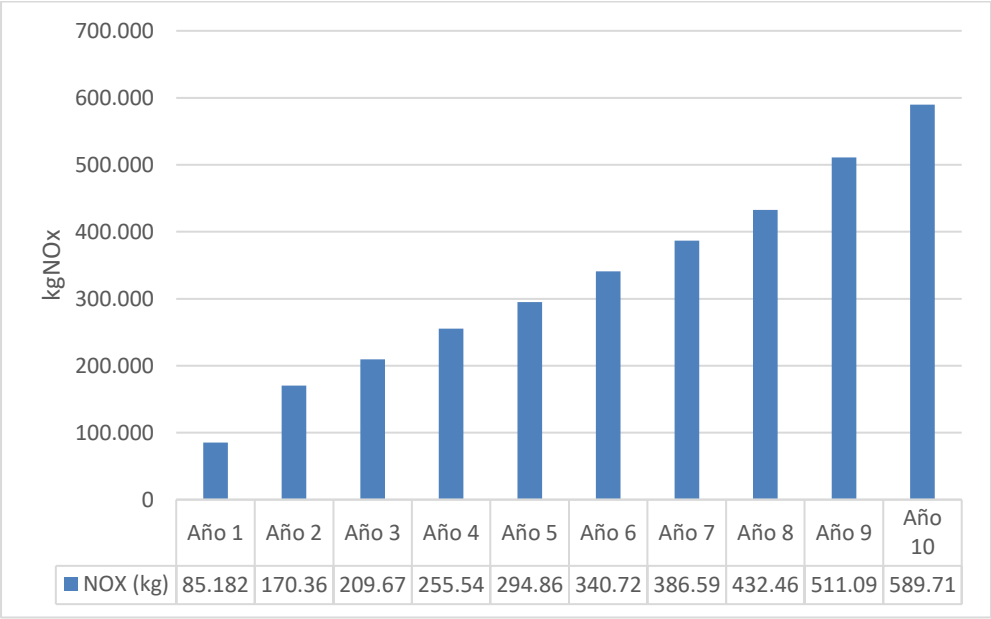


Figura 37. Reducción de Óxido de Nitrógeno NO_X por inyectar energía a la red con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia.

La reducción de emisiones de óxido de nitrógeno (NOx) lograda mediante la inyección de energía proveniente de proyectos solares fotovoltaicos y eólicos en la red de distribución durante un período de 10 años. Los datos reflejan un incremento significativo en la reducción de NOx cada año. Por ejemplo, en el primer año se logra una reducción de 85,182 kg, cifra que aumenta progresivamente, alcanzando 589,710 kg en el décimo año.

Esta tendencia creciente destaca el impacto positivo y acumulativo de la integración de energías renovables en la red. La disminución de NOx no solo contribuye a la mejora de la calidad del aire, sino que también reduce la contaminación atmosférica, lo que tiene beneficios directos para la salud pública y el medio ambiente.

Reducción de emisiones de CO2 por cambiar el 90% de vehículos a gasolina hasta el año 10.									
Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
	13%	13%	6%	7%	6%	7%	7%	7%	12%
Energía no producida por combustible Diesel	8.692.008	17.384.016	21.395.712	26.076.024	30.087.720	34.768.032	39.448.344	44.128.656	52.152.048
PM10 (g)	2.259.922	4.519.844	5.562.885	6.779.766	7.822.807	9.039.688	10.256.569	11.473.451	13.559.532
PM10 (kg)	2.260	4.520	5.563	6.780	7.823	9.040	10.257	11.473	13.560

PM10 (T)	2	5	6	7	8	9	10	11	14

Tabla 38. Reducción de material particulado PM_{10} por inyectar energía a la red con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia.

De la tabla 35: Energía renovable requerida por años para la carga de los vehículos eléctricos en la red de distribución local de SOPESA S.A. que equivalen a 20.573 vehículos a cambiar el 20% equivale en energía 13GWh.

Un análisis sobre la reducción de emisiones de CO2 al cambiar el 90% de los vehículos a gasolina en un período de 10 años. A continuación, se resumen los datos clave:

- Porcentaje de Energía no producida por Diesel: A lo largo de los años, se observa una variación en el porcentaje de energía no producida por combustible Diesel, que comienza en un 13% en el primer y segundo año, disminuyendo a un 6% y 7% en algunos años, y alcanzando un 12% en el noveno año.
- Energía no producida: La energía no producida por Diesel incrementa significativamente cada año, comenzando con 8,692,008 kWh en el primer año y llegando a 52,152,048 kWh en el noveno año, lo que indica un aumento progresivo en la reducción del uso de combustible Diesel.
- Emisiones de PM10: Las emisiones de material particulado (PM10) también se analizan, comenzando en 2,259,922 g en el primer año y aumentando a 13,559,532 g en el noveno año. Esto se traduce en un aumento de emisiones de PM10 de 2 T (toneladas) en el primer año a 14 T en el noveno año.

La transición hacia vehículos a gasolina y la consiguiente disminución en el uso de Diesel resulta en un incremento notable en la energía no producida por este combustible, contribuyendo así a una reducción en las emisiones de CO2 y mejorando la calidad del aire al disminuir las emisiones de PM10. Estos datos resaltan la importancia de adoptar alternativas más limpias para lograr un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental.

La Figura 38, que se analiza muestra la reducción de material particulado (PM10) al inyectar energía de proyectos solares fotovoltaicos y eólicos en la red de distribución durante un período de 10 años. A continuación, se presenta un resumen de los datos clave:

- Año 1: Se logra una reducción de 2,260 kg de PM10.
- Año 2: La reducción aumenta a 4,520 kg de PM10.
- Año 3: Se reducen 5,563 kg de PM10.
- Año 4: La reducción es de 6,780 kg de PM10.
- Año 5: Se alcanzan 7,823 kg de PM10.

- Año 6: La reducción llega a 9,040 kg de PM10.
- Año 7: Se reducen 10,257 kg de PM10.
- Año 8: La reducción es de 11,473 kg de PM10.
- Año 9: Se logra una reducción de 13,560 kg de PM10.
- Año 10: La reducción alcanza los 15,646 kg de PM10.

La tendencia creciente, debido a la reducción de PM10 muestra un aumento constante a lo largo de los años, lo que evidencia el impacto positivo acumulativo de la inyección de energías renovables en la red de distribución. El impacto ambiental contribuye con la disminución de PM10 es crucial para mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación atmosférica, beneficiando tanto la salud pública como el medio ambiente.

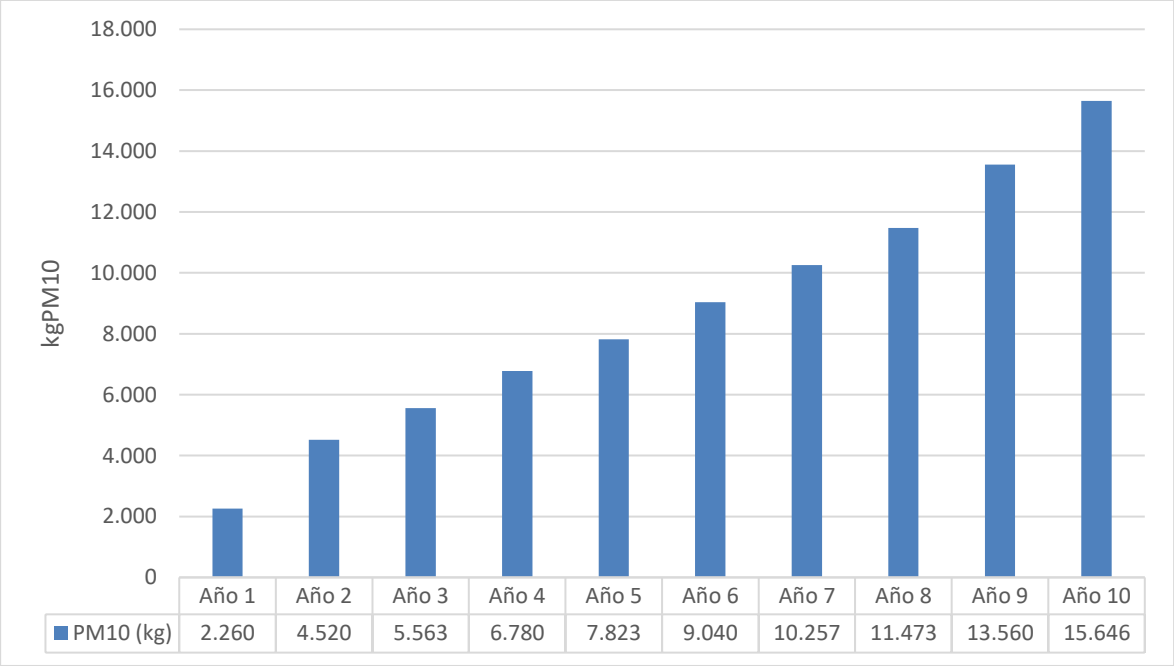


Figura 38. Reducción de material particulado por inyectar energía a la red con proyectos solares fotovoltaicos y eólicos. Fuente: Propia.

9. Conclusiones

El despliegue de infraestructura para vehículos eléctricos en San Andrés ha demostrado un desempeño energético superior en comparación con los vehículos tradicionales. Estos vehículos han mejorado la eficiencia energética en la isla, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles como el diésel. La conversión de energía almacenada en movimiento es alta, lo que optimiza el uso energético y disminuye la necesidad de generar electricidad a partir de diésel.

El impacto ambiental es notablemente positivo, con una reducción significativa en las emisiones de gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NOx), contribuyendo a la mejora de la calidad del aire. Durante un periodo de 10 años, se evitaron alrededor de 589.7 toneladas de emisiones de NOx, lo que protege el ecosistema local y mejora la salud pública. Al continuar promoviendo el uso de vehículos eléctricos y aumentar la proporción de energías renovables en la red, los beneficios ambientales podrían ser aún mayores, consolidando a San Andrés como un modelo de sostenibilidad en movilidad eléctrica.

Desde una perspectiva económica, el uso de vehículos eléctricos ofrece beneficios a largo plazo. Aunque la inversión inicial en infraestructura y vehículos eléctricos es elevada, los costos operativos y de mantenimiento son considerablemente menores que los de los vehículos a combustión. Esto se traduce en ahorros económicos significativos con el tiempo. Además, el despliegue de esta infraestructura ha creado nuevas oportunidades laborales, impulsando el crecimiento económico en sectores vinculados a energías limpias.

La metodología empleada combina un enfoque cuantitativo con componentes cualitativos, permitiendo una evaluación exhaustiva del desempeño energético y el impacto económico y ambiental de los vehículos eléctricos en San Andrés. La rigurosidad en los criterios de selección, el tamaño de la muestra y el procedimiento de muestreo asegura la representatividad de la población de estudio. La recolección de datos a partir de múltiples fuentes y la utilización de instrumentos adecuados han garantizado la obtención de información confiable y precisa, permitiendo que los resultados reflejen de manera efectiva el impacto del despliegue de infraestructura de vehículos eléctricos.

Para las islas, el principal criterio es respetar la reserva de la biosfera. La decisión de un cliente para cambiarse a movilidad eléctrica o adoptar modelos sostenibles se basa en tres

factores principales: financiero/económico, ambiental y social. Estos son los tres ejes de la sostenibilidad, y cada escenario tendrá un costo diferente.

En el caso de San Andrés, donde los recorridos son cortos, los márgenes de rentabilidad son menores para una persona común al comprar un vehículo convencional. Como se observó en las tablas, con una ganancia promedio de un CDT de $4,598,735.46 frente a un OPEX de $19’510.874,50 para su sostenibilidad anual, el capital se iría devaluando. En el otro escenario, si el vehículo se utiliza empresarialmente en negocios que generen mayores ganancias, sería más sostenible y rentable adquirir un vehículo convencional. La decisión dependerá del criterio que tenga más peso: financiero, económico, ambiental o social.

10. Bibliografía

Adheesh, S. R., Vasisht, M. S., & Ramasesha, S. K. (2016). Air-pollution and economics: diesel bus versus electric bus. *Current Science Association*, 5.

Alvarez, J. L. (2023). Los últmos avances tecnológicos en vehículos eléctricos. *tuteorica*.

Anand, K., Rekha, S., & Chirag, S. (2005). Journal of passenger cars: electronic and electrical system. En G. B. Determination, *Anand, Kulkarni; Rekha, Sapre; Chirag, Sonchal;* (págs. 233-239). SAE International.

Botero, M. C. (2023). ¿Los vehículos eléctricos son tan amigables con el ambiente como se cree? *Pesquisa Javeriana*.

Cai, W., Wu, X., Zhou, M., & Liang, Y. (2021). *Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles.* Hongqiao District: Hebei University of Technology.

Carroya.com. (21 de Marzo de 2023). *Carros eléctricos y convencionales ¿Cuál es más asequible en el país?* Obtenido de carroya.com: https://www.carroya.com/noticias/guias-de-compra-y-venta/carros-electricos-y-convencionales-cual-es-mas-asequible-en-el-pais

Conejero Roselló, J. D. (2015). *Evolution of mixture, formation and exhaust gas treatment systems in gasoline engines according to the EURO standards EU4 ane Eu5.* Valladolid: Universidad Valladolid.

Criado Muñoz, P. J. (2020). *Ensayo sobre acumuladores cinéticos.* Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

Donovan, C. (2023). *El Sistema Modular de Plataforma Eléctrica Premium de Porsche*. Obtenido de makinas.do: https://makinas.do/vehiculos-electricos-con-sistema-modular-de-plataformas/

Dunn, G., & Wang, M. (2022). *Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries.* Environmental science & technology, 46 22, 12704-10 .

Durango Escobar, F. D. (2023). *Estado del arte de la movilidad eléctrica en el sistema eléctrico colombiano.* Medellín: iTM.

Echeverry Montes, I. R. (2024). *Mejorar los vehículos eléctricos, la apuesta por un futuro energéticamente eficiente.* Bogotá: Pesquisa Javeriana.

ecodes. (2024). Infraestructura de recarga para vehículos eléctricos en España. *ecodes*. Obtenido de ecodes.org.

El espectador. (2022). *Carros eléctricos: ¿qué los diferencia de los convencionales?* Bogotá: El espectador.

Electric For All. (2024). *¿Cuáles son los tipos de vehículos eléctricos?* Obtenido de electricforall.org: https://www.electricforall.org/es/ev-basics/

enel.com.co. (2024). *Cómo hacer uso eficiente de la energía en tu hogar*. Obtenido de enel.com.co: https://www.enel.com.co/es/historias/a202204-eficiencia-energetica-todo-lo-que-debes-saber.html

Fabela, M., Hernández, M., & Cruz, M. (2022). *El sistema motriz en vehículos convencionales y en eléctricos.* Santiago de Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.

García González, R. (2021). *Análisis del potencial de reducción de emisiones de CO2 a través de la electrificación del parque automovilístico de Tenerife.* Tenerife: Universidad de La Laguna.

García Hernández, P. C. (2023). *La experiencia del cambio de la movilidad de combustión a eléctrica.* Madrid: Repositorio de la Universidad Pontificia Comilla.

García, G. (2022). Tesla ya incluye su batería estructural en el manual de instrucciones del Model Y. *Tecnofisis Global, SL*.

García, G., & García, E. (2024). *La transición al vehículo eléctrico.* Ministerio de Economía, Comercio y Empresa.

Hongwen, H., & Zhang, J. (2016). *Model Predictive Control for Energy Management of a Plug-in Hybrid Electric Bus.* Beijing: Beijing Institute of Technology.

Houh Lee, J., Gitano, H., Seng Eu, H., & Mohd Khalil, A. S. (2010). Development of Motorcycle Drive Cycles for Malaysia. *Small Engine Technology Conference & Exposition* (pág. 11). SAE Technical Paper.

Huerta, L. (2021). El lado oscuro de los vehículos eléctricos. *Gaceta UNAM*.

HYUNDAI. (2024). *kW y coches eléctricos: Todo lo que debes saber sobre su consumo y potencia eléctrica*. Obtenido de hyundai.com:

https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/eco-drive/tecnologia/cuantos-kw-necesita-coche-electrico

Iberdrola. (2024). *¿Qué es la eficiencia energética?* Iberdrola.

Iberdrola. (2024). *¿Qué es la movilidad eléctrica?* Obtenido de iberdrola.com: https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/movilidad-sostenible/movilidad-electrica

Islam, S., Ahsan, S., Rahman, K., & Amintanvir, F. (2023). *Advancements in Battery Technology for Electric Vehicles: A Comprehensive Analysis of Recent Developments.* Beamont: Lamar University.

Kumar, M., Panda, K. P., Naayagi, R., Thakur, R., & Panda, G. (2023). *Comprehensive Review of Electric Vehicle Technology and Its Impacts: Detailed Investigation of Charging Infrastructure, Power Management, and Control Techniques.* Shillong: National Institute of Technology Meghalaya.

Ley 1964 de 2019. (2019). Ministerio de Transporte.

López Sánchez, D. (2019). *Tecnologías de baterias.* Universidad de Valladolid: Valladolid.

LugEnergy. (2024). *¿Qué es un Vehículo Eléctrico?* Obtenido de lugenergy.com: https://www.lugenergy.com/que-es-vehiculo-electrico/

Mayorga Rodríguez, S. (2024). *Corredor verde que facilita la salida al norte del país de vehículos eléctricos mediante un punto de recarga compartido para los Santanderes: Una estrategia de integración de dos empresas del sector eléctrico, ESSA y CENS para fomentar la movilidad eléctr.* Bucaramanga: unab.

Minenergía; UPME; USAENE; SUMATORIA. (2024). *Costos de estaciones de carga rápida.* Bogotá: Minenergía.

Ministerio de Energía. (2024). *Tipos de vehículos eléctricos.* Gobierno de Chile.

newsroom. (2023). *Sistema modular de plataformas para vehículos eléctricos*. Obtenido de newsroom.porsche.com: https://newsroom.porsche.com/es_ES/electromovilidad/electromovilidad-tecnologia/es-porsche-electromovilidad-sistema-plataformas-vehiculos-electricos-porsche-egineering-31616.html

NHTSA. (2024). *Vehículos Eléctricos e Híbridos*. Obtenido de nhtsa.gov: https://www.nhtsa.gov/es/seguridad-de-vehiculos/vehiculos-electricos-e-hibridos

Niemeier, D. (2015). *Data collections driving cycle development: evaluation of data collections protocols.* Maryland: University of Meryland.

Omar Andrés Camacho. (2023). *Informe de rendición de cuentas.* Bogotá: Ministerio de minas y energía.

RACE. (2024). *¿Cuánta energía consume un coche eléctrico?* Obtenido de race.es: https://www.race.es/cuanta-energia-consume-coche-electrico

Rimpas, D., Kaminaris, S., Piromalis , D., Vokas, G., Arvanitis , K., & Karavas, C.-S. (2023). *Comparative Review of Motor Technologies for Electric Vehicles Powered by a Hybrid Energy Storage System Based on Multi-Criteria Analysis.* Egaleo: University of West Attica.

Rodiguez Vargas, D. C., Nocua Sánchez, M. C., & Lancheros Barragán, M. A. (2019). *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica.* Bogotá: Ministerio de amtiente y desarrollo sostenible.

Rodriguez, M., Bohórquez, A., & Díez, A. (2015). *Estudios sobre el desempeño de Vehículos Eléctricos Dependiendo de La Arquitectura de su Sistema de Tracción.* UPB.

San Andrés Islas será piloto en el uso de carros eléctricos en Colombia. (2024). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Sanz Arniz, I. (2015). *Análisis de la evolución y el impacto de los vehículos eléctricos en la economía europea.* Madrid: Universidad Pontificia ICAI ICADE Comillas.

sopesa. (Mayo de 2024). *Tarifas Reguladas para el mes de mayo*. Obtenido de sopesa.com: https://sopesa.com/wp-content/uploads/2024/05/publicacion-tarifa-mayo-2024.pdf

Sriniwas, A., Amal, J., Nandagopalan, C., Simhachalan, A., & al., e. (2011). A Real World Drive Cycle for India. *SIAT 2011* (pág. 7). SAE Technical Paper.

Taborelli, M. (2023). *Isla de San Andrés se prepara para tener un bus eléctrico*. Obtenido de mobilityportal.lat: https://mobilityportal.lat/san-andres-bus-electrico/

Torres Pamplona, M., Jaramillo Duque, A., & Ortiz Castrillón, J. (2021). *Vehículos Eléctricos Versus Convencionales en Colombia: Un Análisis Financiero Comparando Los Costos Totales de Propiedad.* Institución Universitaria Digital de Antioquia.

Trujillo, C., Sánchez, J., & Dávila, M. (2021). *Cargadores de baterías de mediana y baja capacidad paa vehículos eléctricos.* Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Tyler, N. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia .* Bogotá: University College London – Universidad de los Andes.

Universidad de los Andes. (2019). ¿Por qué es tan costoso un vehículo elétrico? *ACIEM*.

Urcelay Fernández de Arroyabe, A. (2023). *Estudio de algoritmos de control para la carga dinámica de vehículos eléctricos.* Málaga: Universidad de Málaga.

vboxmotorsport. (2024). *VBOX SPORT*. Obtenido de vboxmotorsport.co.uk: https://vboxmotorsport.co.uk/downloads/datasheets/VBS01-V3-data.pdf

Volkswagen. (2024). *Características más relevantes de un vehículo electrificado*. Obtenido de vwcanarias.com: https://www.vwcanarias.com/es/blog/caracteristicas-vehiculo-electrico.html

Zhou, X., Jiang, J., Hu, Z., & Hua, L. (2022). *Lightweight Materials in Electric Vehicles.* London: Imperial College London.