

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ESTADO DEL ARTE DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO COLOMBIANO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Docente Seminario de Profundización II:
Msc. Maria Vilma García Buitrago

Asesor de Monografía
Edwin Herlyt Lopera Mazo

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia
2023

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

Este trabajo tiene como objeto presentar un estado del arte de la movilidad eléctrica en Colombia realizado por medio de la consulta de publicaciones elaboradas por grupos de investigación, estudiantes y docentes universitarios, información técnica y comercial ofrecida por fabricantes de tecnologías aplicadas el sector, entidades gubernamentales y artículos de prensa.

Además de ofrecer una breve reseña de la historia y una contextualización de lo que es la movilidad eléctrica como tecnología y cuál es su estado actual y su prospectiva en el ámbito local para nuestro país, también presenta los resultados de algunos estudios que ayudan a concluir cual va a ser el impacto en la red eléctrica del sistema interconectado nacional de la esperada masificación del uso de vehículos eléctricos, teniendo en cuenta que el cambio de tecnología en el sector transporte es una herramienta fundamental para el cumplimiento de las metas gubernamentales de la transición energética que pretende reducir significativamente la emisión de gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Movilidad eléctrica, Vehículos eléctricos, Vehículos híbridos enchufables, Vehículos híbridos no enchufables, Estaciones de Carga, Electrolineras, Baterías, Baterías de ion de litio, transición energética, Reducción de emisiones.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

Para el cierre de una nueva e interesante etapa donde vuelvo a ser estudiante después de varios años, agradezco enormemente a quienes aportaron para que la experiencia fuera tan enriquecedora como lo fue:

A mis profesores del ITM: Daniel Hincapié, Karen Cacua, Mario Suárez, Adriana Trejos, Alejandro Morales y Alexander Valencia

A mis directores de proyecto de grado María Vilma García y Adrián Martínez.

A mi asesor: Edwin Herlyt Lopera

A mis compañeros que facilitaron todo con su don de gentes y gran capacidad de trabajo en equipo: Julio Aragón, Julio de la Barrera y Juan Esteban Rúa

Y obviamente a mi familia, que me regaló mucho de su tiempo, el que comparto con ellos, para que pudiera sacar adelante este proyecto: mi esposa Laura y mis hijos David y Andrea.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

EV Electrical Vehicle -Vehículo eléctrico.

PHEV Plug in hybrid Electric Vehicle – Vehículo híbrido eléctrico enchufable.

HEV Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico

ANDEMOS Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (Colombia)

PIGA Plan Institucional de Gestión Ambiental de la secretaria distrital de ambiente de Bogotá

GEI Gases de efecto invernadero

ONU Organización de las Naciones Unidas

IEA International Energy Agency

CMNUCC Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

XM Expertos en mercados

UPME Unidad de Planeación Minero Energética

ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas

IEC International Electrotechnical Comitee (organismo normalizador)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	MARCO TEÓRICO.....	8
2.1	GENERALIDADES.....	8
2.2	RESEÑA HISTÓRICA DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA	8
3.	ESTADO DEL ARTE	13
3.1	LA MOVILIDAD ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTA PARA MITIGACIÓN DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	13
3.2	MOVILIDAD ELÉCTRICA	15
3.2.1	Tipos de vehículos eléctricos.....	19
3.3	BATERÍAS	21
3.3.1	REUSO O RECICLAJE DE BATERÍAS.....	25
3.4	ESTACIONES DE CARGA (ELECTROLINERAS).....	26
3.4.1	Esquema de funcionamiento de una electrolinera y tipos de carga.....	27
3.5	LA MOVILIDAD ELÉCTRICA COMO CARGA PARA EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	29
4.	METODOLOGÍA.....	36
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
6.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	39
7.	REFERENCIAS	41

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del desarrollo social y económico del país y en general a nivel global el sector transporte es una de las actividades económicas de mayor importancia ya que las necesidades de la población para su desplazamiento y el de los productos de consumo desde un lugar a otro le han creado a la sociedad la necesidad de desarrollar, fabricar y comercializar vehículos para esos fines.

En Colombia, hablando de transporte terrestre, se sabe que históricamente se desestimuló el medio de transporte férreo y por lo tanto los carros se convirtieron en la alternativa más importante.

La flota de los vehículos utilitarios que son aquellos destinados al servicio de empresas comerciales, de producción y de transporte de pasajeros, como es natural, ha crecido a la par de la economía con la expansión de industrias de manufactura, de establecimientos comerciales y el crecimiento poblacional.

Adicionalmente en los últimos años se ha visto acelerado también el crecimiento del parque automotor tanto de carros como de motocicletas destinados al transporte particular, dicho aumento se ha dado por diferentes razones como lo son los créditos de más fácil adquisición, la necesidad de desplazamientos más ágiles, eficientes y disponibles que el transporte público y alguna mejora del poder adquisitivo en algunos sectores de la población.

Ese crecimiento lógicamente no viene exento de complicaciones y en las grandes ciudades se hace evidente, con las dificultades en la movilidad y los altos niveles de contaminación, que han convertido al transporte en el principal emisor de gases de efecto invernadero y por tanto protagonista de la problemática mundial de más impacto en la actualidad que es el calentamiento global. Con la necesidad de la mitigación de estos efectos, los gobiernos han acordado estrategias dentro de las cuales se ha identificado impulsar la movilidad eléctrica como una de las más importantes.

Pese a que el desarrollo del vehículo eléctrico data de más de 100 años pues sus primeros modelos se fabricaron en el siglo XIX, solo en los últimos años se ha visto un verdadero crecimiento en la producción y uso de estas tecnologías y a raíz de lo ya citado desde el punto de vista ambiental su participación en el mercado será cada vez mayor.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El objetivo de esta monografía es desarrollar un estado del arte a partir de la consulta de artículos científicos provenientes de diferentes fuentes especializadas en el tema de movilidad eléctrica y del sistema eléctrico colombiano tales como organismos estatales, investigaciones de grupos académicos, tesis universitarias entre otros buscando presentar los hechos más importantes sobre la historia de la movilidad eléctrica a nivel global, a nivel nacional, el estado actual de la misma en Colombia y una prospectiva de su crecimiento a corto plazo para de esta forma concluir y analizar posibles problemáticas que pueda conllevar la masificación de vehículos eléctricos en Colombia desde el punto de vista de infraestructura, servicios, entre otros y finalmente evidenciar si para un periodo de 7 años a partir del presente, es decir a 2030, el volumen de la carga relativa a la movilidad eléctrica se podrá atender con la infraestructura del sistema eléctrico colombiano sin requerimientos de crecimiento adicional al existente y al proyectado para ese periodo de tiempo.

El trabajo presenta inicialmente un marco teórico con los aspectos relevantes de contextualización de lo que se define como movilidad eléctrica y los hechos históricos asociados a esta. Posteriormente se presenta el estado del arte como tal tanto de la movilidad eléctrica como del sector eléctrico y se explica cómo se introduce la movilidad eléctrica como carga en para el sistema eléctrico para finalmente concluir si para el periodo de tiempo estimado el estado del sistema eléctrico permitirá asumir la carga de la movilidad eléctrica con suficiencia o que necesidades de crecimiento va a requerir.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico en el cual se define que es la movilidad eléctrica cuáles son los diferentes vehículos eléctricos que la conforman y se presenta un breve contexto histórico de los vehículos eléctricos.

2.1 GENERALIDADES

La movilidad eléctrica es el conjunto de los medios de transporte en los cuales su sistema de propulsión se desarrolla a partir de motores eléctricos en lugar de los motores de combustión o en combinación entre las dos tecnologías.

La ventaja de uno u otro sistema y la selección del tipo de vehículo a usar depende de las necesidades y preferencias del usuario final y del entorno en el cual se va a usar el vehículo, ya que un usuario que requiere un transporte individual puede optar por una motocicleta o bicicleta eléctrica, pero aquel que requiere de un vehículo familiar deberá mirar en las opciones eléctrica o híbrida de los automóviles o camionetas.

El usuario que requiere de viajes largos con periodicidad deberá evaluar la autonomía que le ofrece el vehículo y la posibilidad de encontrar con facilidad sitios de recarga u optar por un híbrido en caso de que esas posibilidades se vean limitadas.

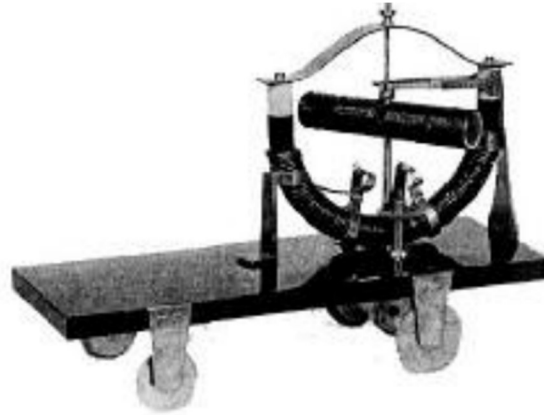
Enfocándose en Colombia, actualmente en sus ciudades, tanto en el transporte público como el privado, se encuentran funcionando vehículos eléctricos. Para el sector público se encuentran buses, trenes, tranvías, sistemas de cable, taxis, para el sector privado se encuentran vehículos (tanto automóviles como SUV o camionetas), motocicletas, bicicletas y patinetas.

2.2 RESEÑA HISTÓRICA DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA

La movilidad eléctrica data desde el siglo XIX, pues aún antes de la invención y masificación de los motores de combustión se probó con éxito el uso de las máquinas eléctricas para la movilidad, creando rudimentarios vehículos eléctricos que eran básicamente unas plataformas con ruedas, no usadas para transporte de personas como el presentado en la Figura 1 (Moreno, 2016).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

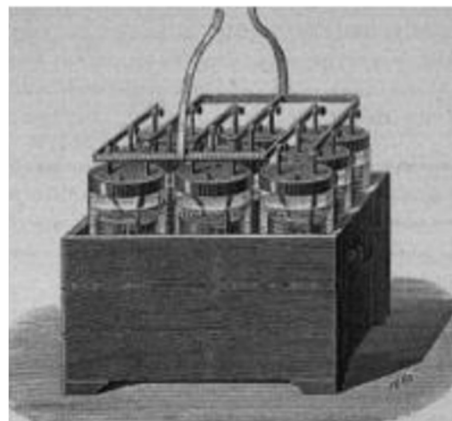
Figura 1. Vehículo eléctrico Anglos Yedik 1828 (Moreno, 2016)



La historia de los vehículos eléctricos se ha venido desarrollando paralelamente con la de las baterías. Desde 1800 el italiano Alessandro Volta ya había demostrado que la energía eléctrica podía ser almacenada químicamente, mientras tanto en 1821 Michael Faraday demostraba los principios de los motores y generadores eléctricos (Hoyer, 2008).

Las baterías recargables de ácido plomo (Figura 2) fueron desarrolladas por parte del belga Gastón Planté en 1860, como el resultado de la aplicación de otras invenciones que la precedieron. En 1873 Planté conoció y comenzó a trabajar con el ingeniero belga Zénobe Théophile Gramme, el cual venía trabajando en la producción de motores eléctricos (Fagoaga, 2021).

Figura 2. Primera batería recargable de Plomo-ácido desarrollada por Planté en 1860 (Fagoaga, 2021)



 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Las baterías de hierro-zinc fueron desarrolladas posteriormente a las de plomo-ácido y podían almacenar 40 % más de carga, pero su alto su costo hizo que se popularizaran para la aplicación en los vehículos eléctricos en ese entonces, las baterías de plomo-ácido, las cuales son desde entonces usadas también en los vehículos de combustión para el arranque de los motores (Hoyer, 2008).

Estas invenciones impulsaron la producción de diferentes prototipos de vehículos eléctricos cuyo elevado costo no los hacía asequibles; sin embargo, puede considerarse que es el nacimiento de la aplicación de la movilidad eléctrica en los vehículos livianos de pasajeros. En la Figura 3 se aprecia el modelo denominado Phaeton, el cual fue comercializado en 1902, tenía una autonomía de 18 millas y desarrollaba una velocidad de 14 mph; su costo era de 2000 USD (Moreno, 2016).

Figura 3. Carro eléctrico Phaeton desarrollado en 1902 (Moreno, 2016)



Por esos mismos años de comienzos del siglo XX se comenzaron a construir extensas carreteras para unir las diferentes ciudades de Estados Unidos, y por esa razón se requería de vehículos con mayor autonomía que la que podían ofrecer los eléctricos.

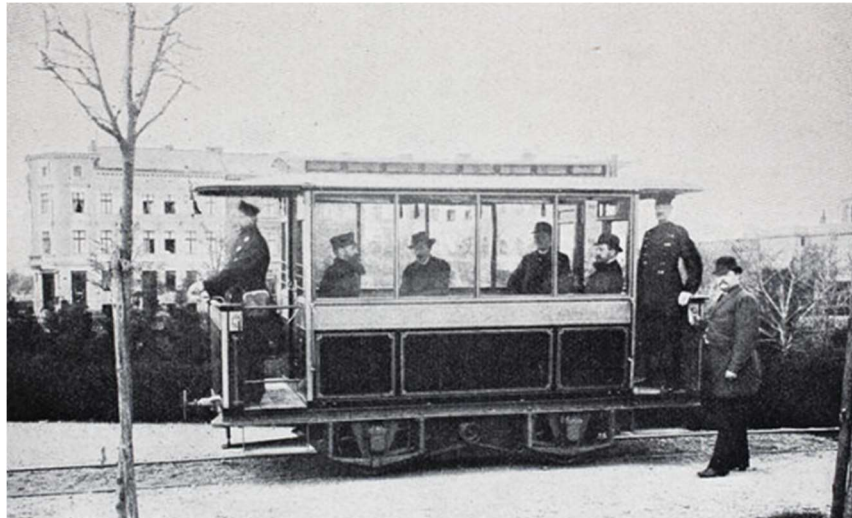
La invención de la producción en línea patentada por Henry Ford y el descubrimiento de ricos yacimientos petroleros en Estados Unidos, abarataron el precio del combustible para los autos de gasolina (Moreno, 2016).

Desde 1930, los vehículos eléctricos perdieron competitividad comercial con respecto a los de motores de combustión y a partir de entonces prácticamente el transporte fue exclusividad de este tipo de vehículos. Hubo unos cuantos intentos de volver a producir los vehículos eléctricos, incluso por las grandes marcas, pero paulatinamente volvían a desaparecer, superados por la cada vez más grande demanda de los vehículos con motor de combustión (Hoyer, 2008).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En el transporte férreo, la mayoría de los fabricantes comenzaron con la fabricación de tranvías que son trenes livianos para servicio urbano. En sus inicios los tranvías fueron de tracción animal. El primer tranvía eléctrico fue probado por Werner Von Siemens (fundador de la compañía Siemens) en Berlín en 1879 y puesto en servicio en 1881, se le denominó el Gross Lichterfelde, el cual se puede ver en la Figura 4.

Figura 4. Primer tranvía eléctrico 1881 (Bildagentur-online, 2018)



El desarrollo del tren eléctrico para ferrocarriles de montaña se fue dando de forma paralela a los tranvías desde finales de siglo con las primeras locomotoras desarrollados en Europa en forma paralela por las compañías ASEA y Brown Boverý que más tarde se fusionarían para crear ABB.

En la Figura 5 se puede ver una de las primeras locomotoras eléctricas en Europa que operaba en la línea Bugardof – Thun en Suiza y fue desarrollada por las firmas precursoras de ABB.

En épocas de la primera guerra mundial, el carbón sufrió escasez y esta necesidad impulsó que se electrificaran varios ferrocarriles, como el de Gotardo en Suiza en 1916. No obstante, ya desde comienzos de siglo se habían realizado con éxito electrificaciones de tramos cortos como el del túnel del Simplón también en territorio suizo.

En sus inicios se utilizaron motores asíncronos de inducción por las buenas condiciones que presentan estos tipos de motores para la tracción. Aunque estaba claro que la motorización de corriente continua era la ideal para esta aplicación, la infraestructura era rudimentaria y costosa y solo hasta la década del 60, la tecnología de semiconductores popularizó la rectificación de la corriente alterna, para convertir a corriente continua y operar los trenes eléctricos como lo hacen hoy en día, con líneas de entre 1500 Vdc y 3000 Vdc (Lang, 2010).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 5. Primera locomotora eléctrica para la línea de 40 km Burgdorf – Thun 1899 1828 (Lang, 2010)



En Colombia hubo algunos sistemas de transporte público eléctrico a principios del siglo XX, como el tranvía y trolebuses de Medellín, que sirvieron a la ciudad por cerca de 30 años, hasta que las empresas que los operaban debieron cerrar por conflictos sindicales y porque las pocas líneas que aún estaban en servicio dejaron de ser competitivas ante los buses con motores de combustión, cuyas flotas prácticamente cubrían la totalidad de las rutas del área metropolitana. Más recientemente el transporte público eléctrico tiene la entrada del primer gran proyecto de movilidad eléctrica cuando inicia operaciones en 1995 el Metro de Medellín, el cual desde su inicio y a la fecha ha logrado articular otro tipo de soluciones como cables y tranvía, también con tracción eléctrica y buses que inicialmente comenzaron con motores de gas, pero están siendo reemplazados por nuevos buses con motores eléctricos (Osses, Ibarra, & Vila, 2022).

En 2011 se realiza la primera exposición de automóviles eléctricos en Colombia y con ello se inició la comercialización de estos vehículos en el país. Actualmente la mayoría de las marcas que comercializan automóviles tienen sus modelos 100 % eléctricos o híbridos y cada vez crece más la infraestructura de estaciones de carga, incrementando la aceptación de los clientes y sus porcentajes de venta (Bogotá, 2021).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3. ESTADO DEL ARTE

La movilidad eléctrica ha experimentado un rápido avance en las últimas décadas, transformándose en un campo de investigación y desarrollo en constante evolución. En este estado del arte, se expone cual es el papel que juega la movilidad eléctrica como herramienta para cumplir las metas de descarbonización, mitigación de emisiones de los gases de efecto invernadero, exploraremos los diferentes tipos de vehículos que se tienen en la actualidad haciendo un breve recuento de cómo es su funcionamiento, examinando los diferentes aspectos acerca de las baterías que tienen relevancia, el estado actual y perspectivas de expansión de la infraestructura de carga y finalmente se presentarán resultados de análisis efectuados sobre el impacto de la movilidad eléctrica como carga del sistema interconectado nacional.

3.1 LA MOVILIDAD ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTA PARA MITIGACIÓN DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Para hablar de la movilidad eléctrica y la razón por la cual se ha vuelto un tema de alta importancia, se hace necesario hablar del tema ambiental, puesto que existe a nivel mundial la máxima preocupación por los graves efectos que viene evidenciando el calentamiento global causado por la emisión de gases de efecto invernadero de diferentes fuentes en las que el transporte representa el 14 % de dichas emisiones a nivel mundial. (Iniciativa Climática de México, 2021)

Según datos obtenidos por la Comisión Europea en 2015, Colombia emitía 1,7 toneladas de CO₂ per cápita y eso equivale al 0,22 % de las emisiones mundiales (Acevedo Navas & Morales Nieto, 2020).

El incremento del promedio de las emisiones de gases en los periodos de 2000 a 2015 fue de un 1 % con respecto al periodo de 1990 a 2000. La mayoría de las emisiones proviene de los países desarrollados y aunque las cifras que corresponden a Colombia indican que su participación en el global es realmente baja, el gobierno se viene comprometiendo con los planes que desde los diferentes estamentos internacionales encabezados por la ONU tienen como objetivo tener un mundo descarbonizado.

El Acuerdo de París llevado a cabo el 12 de diciembre de 2015, las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), hicieron un acuerdo para combatir el cambio climático y hacer las inversiones necesarias para bajar las emisiones de carbono (Mañes Gomis, Bermúdez Forn, & Araya Salas, 2018).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	04
			Fecha	24-02-2020

Esta unión internacional tiene clara la necesidad de ayudar a los países en vía de desarrollo y Colombia como participante de este acuerdo se comprometió a reducir el 20 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y deja claro que el transporte será uno de los sectores claves donde se va a buscar el cumplimiento de esa meta (Espinosa Valderrama, Cadena Monroy, & Behrentz, 2019).

Como ya se mencionó en el numeral 3.1, la meta del gobierno es que en 2030 haya 600 mil vehículos eléctricos circulando en el país y para ello estableció la Estrategia de Movilidad Eléctrica en la que están establecidos incentivos económicos consistentes para quienes decidan obtener vehículos eléctricos, sin embargo estudios de prospectiva y de análisis de las condiciones políticas, sociales y económicas que afectan a la población colombiana, dejan como resultado que aún en los escenarios más optimistas, el cumplimiento de esa meta será muy complicado.

Los costos de los vehículos no se espera que tengan una rebaja tan considerable como para que se vuelvan asequibles para las clases menos favorecidas, ni tampoco se espera que, en tan corto tiempo, las condiciones socio económicas de la población vayan a mejorar de manera considerable (Marín Tabares, Rodríguez Toro, Correa, & Rivero, 2021).

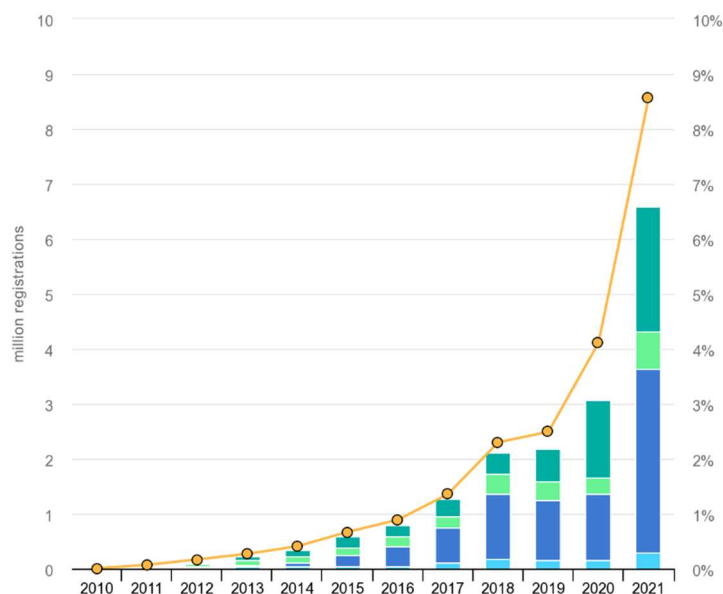
3.2 MOVILIDAD ELÉCTRICA

La movilidad eléctrica es el nombre que reciben los sistemas de transporte donde la principal fuente de energía que consumen los vehículos es la electricidad, aunque no necesariamente sea la única fuente, pues como se verá más adelante hay vehículos que combinan los motores eléctricos con motores de combustión, donde, pese aún requerir de combustibles fósiles, su porcentaje de emisiones baja considerablemente. La movilidad eléctrica comprende diferentes tipos de vehículos con aplicaciones diversas como el transporte público o privado de pasajeros (buses, trenes, taxis, carros, motos, bicicletas, patinetas) o el transporte de carga (camiones).

La evidente masificación del uso de Vehículos eléctricos (abreviado EV) a futuro trae consigo la necesidad del entendimiento del impacto de este aumento de carga en el sistema eléctrico, para de esta forma estar preparados para establecer los mecanismos que permitan suplir esa demanda en caso de que la infraestructura de generación, transmisión y distribución que se tenga para el momento en el cual, la carga aportada por la movilidad eléctrica sumada a las demás cargas ocasione que dicha infraestructura vaya a ser insuficiente. Igualmente, se debe analizar la necesidad del crecimiento de la infraestructura de carga tanto lenta como rápida, a medida que vaya creciendo la flota de EV en cada país.

Según la International Energy Agency IEA el mercado de los EV ha crecido de una manera tan dinámica que los vehículos de estas tecnologías que se vendieron en el año 2012 en el mundo (130.000) hoy día se venden en una sola semana. En el 2019 se vendieron 2.2 millones, en el 2020 fueron 3 millones y en 2021 se excedió el doble de las ventas llegando a 6,6 millones. En la Figura 6 se puede ver la tendencia de las ventas de los EV en el mundo en el periodo de 2010 a 2021

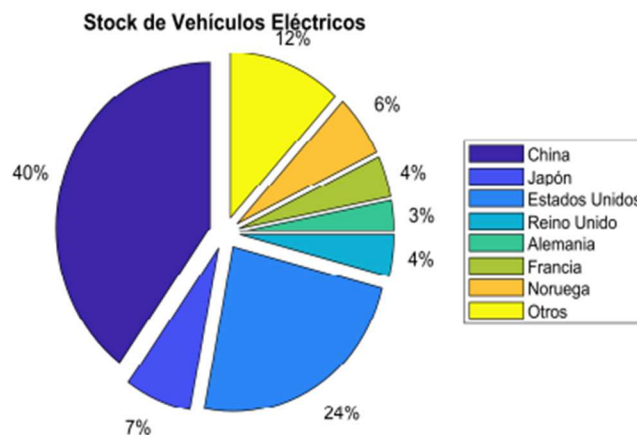
Figura 6. Ventas globales de EV en 2010-2021 (Paoli & Gur, 2022)



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La movilidad eléctrica en el mundo ha ido creciendo paulatinamente, pero claramente por las diferencias de poder adquisitivo que se tienen entre los ciudadanos de diferentes países del mundo este crecimiento ha sido desigual. Los países de economías más desarrolladas son los que tienen las cifras más altas de ventas de EV. En 2017, el 88% del stock de EV en el mundo se encontraba concentrado en tan solo 7 países que habían avanzado de manera más acelerada en este tema. Colombia se encontraba por lo tanto en el resto de los países del mundo que contaban entre todos con solamente un 12% del stock. Esa desigual distribución se puede observar en la Figura 7 (Trujillo Sandoval & García Torres, 2020).

Figura 7. Stock de Vehículos eléctricos por países en 2017 (Trujillo Sandoval & García Torres, 2020)



Volviendo a las cifras de la IEA, la tendencia continuaba con los mismos países al tope de ventas de EV, siendo China quien tiene las cifras más altas, pues en 2021 vendió 3,4 millones de EV, es decir más de la mitad de los que se vendieron en todo el mundo. Pero para el periodo entre 2017 y 2021 la tendencia cambió y los países de Europa desplazaron a Japón y Estados Unidos en los porcentajes de ventas de EV. En este mercado europeo Alemania es el líder con un 17% de las ventas totales. Los otros países con cifras representativas son Noruega, Suecia, Países Bajos, Reino Unido, Francia e Italia. Estados Unidos por su parte tuvo un incremento considerable en 2021 de alrededor de medio millón de EV nuevos.

En la Figura 8 se presentan las cifras de ventas por marcas en los países con mayor representatividad en el mercado de EV

Figura 8. Ventas de EV por marcas en 2021

Global top five automaker electric car sales by region in 2021

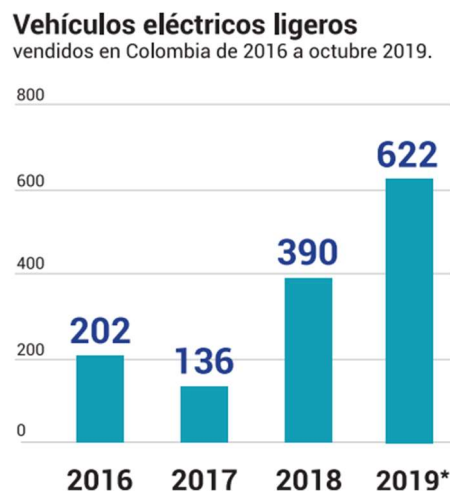
OEM	World	Europe	China	USA	Other
Tesla	936	170	321	352	93
VW Group	763	549	154	44	15
BYD	598	1	595	0	2
GM	517	0	486	25	6
Stellantis	385	324	14	42	5

Notes: In thousands of vehicles. Preliminary EV volumes data.

La tendencia de venta de vehículos eléctricos para Colombia seguirá al alza pues, aunque de forma muy lenta los precios de los vehículos irán bajando y adicionalmente contribuye el Gobierno colombiano pues viene incentivando por medio de leyes como la 1964 de julio de 2019 la compra de vehículos eléctricos. Esta ley hace descuentos en las tarifas de impuestos y seguros aplicados a los vehículos eléctricos y esto se suma además a otras medidas de gobiernos locales que dan a beneficios de exención a las medidas de restricción de circulación (pico y placa) Esto implica que el crecimiento va a continuar y se deberá analizar la infraestructura requerida para la atención de la carga que demanden los cargadores de estos vehículos

En la Figura 9 se puede apreciar la tendencia en aumento de la venta de los EV en el país:

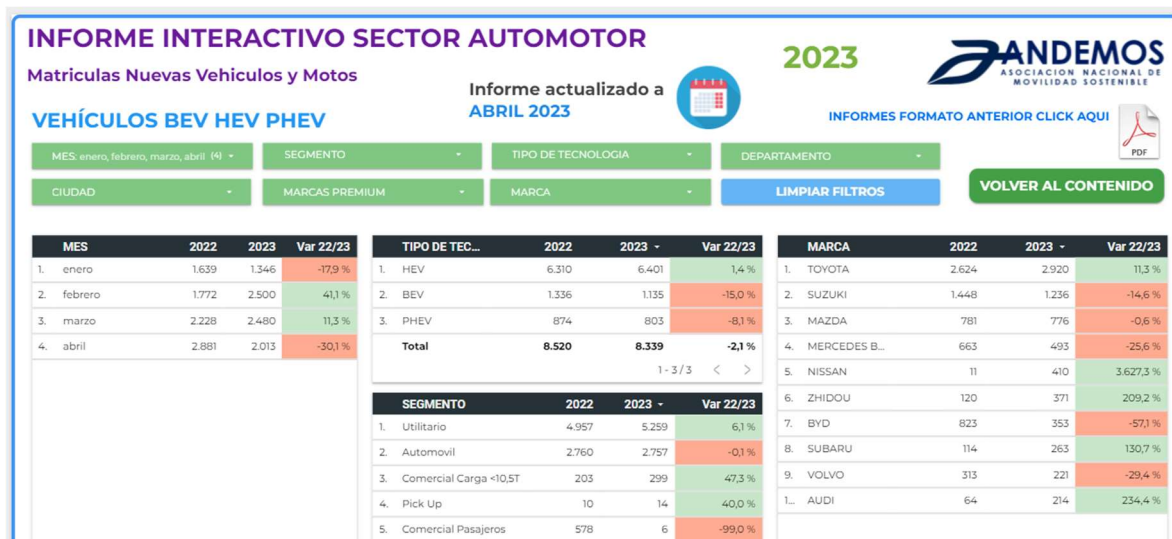
Figura 9. Venta de vehículos eléctricos ligeros en Colombia periodo de 2016 a 2019 (Gomis, Forn, & Salas, 2018)



 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

De acuerdo con Andemos (Agencia Nacional de Movilidad Sostenible) a fecha abril de 2023 se habían matriculado en Colombia 8339 vehículos entre BEV, HEV y PHEV, que para la misma fecha de 2022 representa un decremento del -2,1% lo cual se puede apreciar en la Figura 10, lo que arroja cierta preocupación en torno al cumplimiento de la meta para 2030 de tener para ese año 600 mil vehículos de estas tecnologías circulando en el país. Esta meta está en sintonía con el objetivo gubernamental de transición energética y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, trazados en el 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas donde la movilidad eléctrica es de la mayor importancia pues el transporte es el sector que más combustibles demanda. (Andemos Asociación Nacional de Movilidad Sostenible, 2023)

Figura 10. Reporte de matrículas de vehículos eléctricos e híbridos en abril de 2023 (Andemos Asociación Nacional de Movilidad Sostenible, 2023)



 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

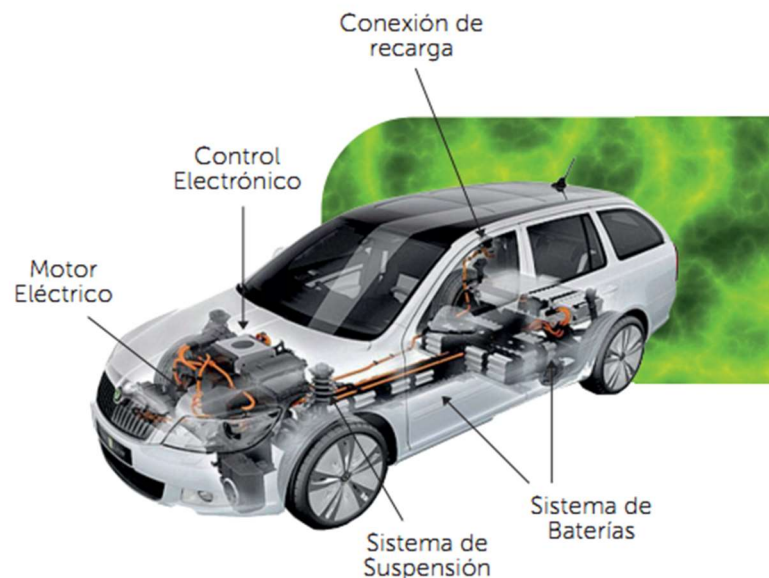
3.2.1 Tipos de vehículos eléctricos

Existe una gran variedad de vehículos eléctricos actualmente, puesto que comercialmente se ha buscado un mercado objetivo con diferentes necesidades para transportarse, por ello se tienen sistemas de transporte masivo como trenes y tranvías, de tipo familiar como automóviles y camionetas o de uso personal como motocicletas, bicicletas, scooters (patinetas).

Los automóviles en general se encuentran de diferentes tipos de acuerdo con la propulsión usada pues los hay 100 % eléctricos (abreviado EV por Electric Vehicle), los híbridos no enchufables (abreviado HEV por Hybrid Electric Vehicle) que cuentan con motores de combustión que trabajan a la par del motor eléctrico y que ayudan a la carga de las baterías por medio del frenado regenerativo y la energía que se produce cuando el auto se encuentra en descensos y finalmente los híbridos enchufables (abreviado PHEV por Plugged Hybrid Electric Vehicle) que son aquellos que cuentan igualmente con el motor de combustión, pero por contar con baterías de mayor tamaño requieren de un cargador externo para completar la carga de las baterías, aunque para estos también aplica el sistema de frenado regenerativo (Sánchez Vela, y otros, 2020).

De manera básica un carro eléctrico en su motorización consta del motor eléctrico, el control electrónico, el sistema de baterías y la conexión de recarga. La complejidad puede aumentar en la medida que se le agreguen otros elementos como inversores, frenos regenerativos, caja de marchas, que, dependiendo de las necesidades de los usuarios y su capacidad de adquisición, los ofrecen las diferentes marcas para la optimización de sus modelos (Bogotá, 2021). En la Figura 11 se puede ver la ubicación de las piezas básicas que componen el carro eléctrico.

Figura 11. Esquema motriz de un EV 100% eléctrico (Sánchez Vela, y otros, 2020)

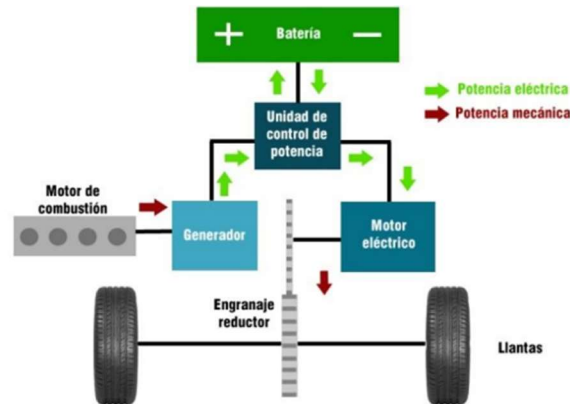


Los vehículos híbridos no enchufables se dividen a su vez en híbridos en serie, en paralelo y combinados dependiendo de cómo se ensamblen sus partes (Sánchez Vela, y otros, 2020).

A continuación, se presentan los dibujos de los esquemas motrices de los vehículos híbridos.

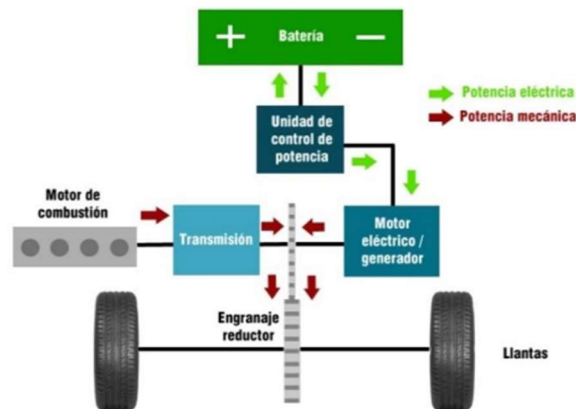
En la Figura 12 se presenta el esquema de un vehículo híbrido en serie, en este el motor eléctrico es el que produce el movimiento de las ruedas y la energía que alimenta el motor eléctrico llega o de la batería o del motor de combustión que actúa como generador.

Figura 12. Esquema motriz de un vehículo híbrido en serie (Sánchez Vela, y otros, 2020)



En la Figura 13 se presenta el esquema de híbrido en paralelo este esquema tanto el motor eléctrico como el de combustión acoplado por medio de una transmisión producen el movimiento de las ruedas y la energía que alimenta el motor eléctrico llega de la batería. La energía que se recupera en la frenada es la principal fuente de recarga de la batería.

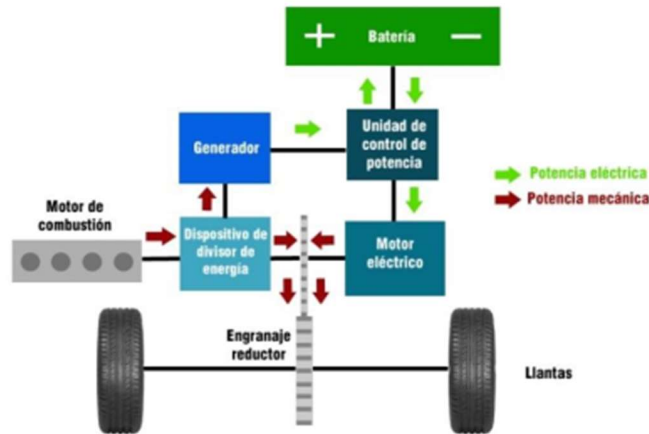
Figura 13. Esquema motriz de un vehículo híbrido en paralelo (Sánchez Vela, y otros, 2020)



 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Finalmente, se presenta en la Figura 14 el esquema combinado que mezcla los dos sistemas anteriores, la batería es cargada por el motor de combustión y el frenado regenerativo. En este caso, tanto el motor eléctrico como el de combustión están acoplados a la transmisión y pueden mover el auto de forma independiente o combinada.

Figura 14. Esquema motriz de un vehículo híbrido combinado (Sánchez Vela, y otros, 2020)



3.3 BATERÍAS

Las baterías son el medio más conocido y confiable de almacenamiento de energía eléctrica y debido a ello sus aplicaciones son bastante numerosas. Por supuesto, una de esas aplicaciones es la movilidad eléctrica para lo cual se constituyen en uno de los componentes más importantes y críticos, pues de su durabilidad, características de carga y hasta su disposición final son aspectos relevantes en la masificación de esta tecnología.

En general, una batería es un dispositivo que convierte energía química en eléctrica y que permite almacenar la energía. Los diferentes tipos y aplicaciones dependen de los materiales que conforman sus partes (ánodo, cátodo, electrolito) y las propiedades de esos materiales.

Los diferentes tipos de baterías que se han usado para la movilidad eléctrica son (Trujillo Sandoval & García Torres, 2020):

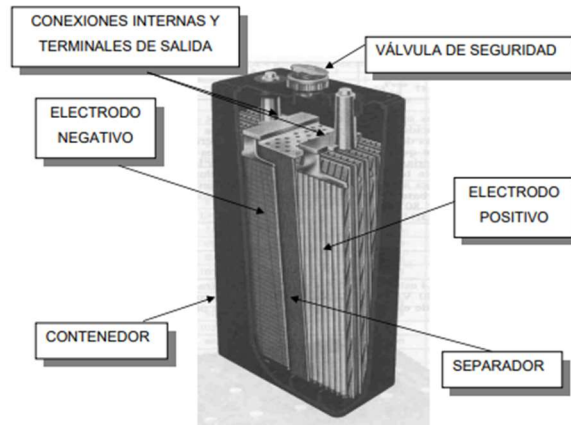
- Plomo ácido
- Níquel hierro
- Baterías alcalinas de magnesio
- Níquel – Cadmio
- Níquel – Hidruro metálico

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Ion de Litio
- Polímero de Litio

En la Figura 15 se presenta la estructura típica de una batería para aplicaciones de regímenes cíclicos de carga – descarga.

Figura 15. Estructura típica de una batería para aplicaciones de regímenes cíclicos de carga – descarga (Viera Pérez, 2003)

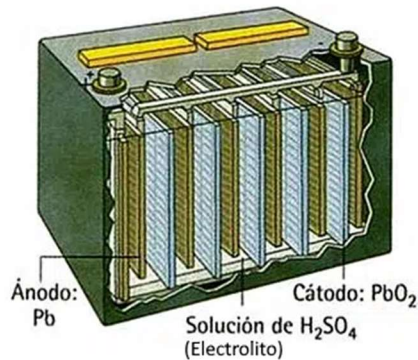


Inicialmente las tecnologías de baterías más utilizadas para la movilidad eléctrica fueron las baterías de plomo ácido y las basadas en níquel, tecnologías que datan del siglo XIX pues fueron inventadas en 1859 y 1899 respectivamente.

Las baterías de plomo ácido (Figura 16) tuvieron durante un siglo una posición dominante por provenir de una tecnología madurada, es decir muy estudiada y sus bajos costos. Su desventaja para el tema de la movilidad eléctrica es que tienen una densidad de carga baja, por lo que la industria enfocó investigaciones en otras tecnologías que permitieran mejorar ese parámetro para aumentar los tiempos de carga y la autonomía de los vehículos (Liu, Placke, & Chau, 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

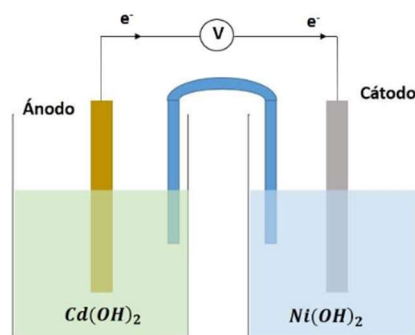
Figura 16. Esquema de una batería de plomo ácido (VT Batteries, 2021)



La batería de plomo-ácido funciona con electrodos conformados por plomo en el ánodo, óxido de plomo en el cátodo y el electrolito es de ácido sulfúrico.

Las baterías basadas en níquel son aquellas en las cuales el cátodo está fabricado de un oxihidróxido de níquel y para el ánodo se usan diferentes materiales como hierro, cobalto, zinc, como puede verse en la Figura 17 donde se muestra el esquema de una batería de Níquel Cadmio. Estas baterías tienen mejor desempeño que las de plomo ácido en lo que tiene que ver con su energía específica, soportan mejor las sobre cargas y sobre descargas, soportan mayores temperaturas y son más amigables con el medio ambiente pues sus componentes no son tóxicos. Su desventaja es que su vida útil es menor (Liu, Placke, & Chau, 2022).

Figura 17. Esquema de una batería de Níquel-Cadmio (Hive Blog, 2020)



Actualmente las baterías más utilizadas en los vehículos eléctricos son las de iones de litio, las cuales se posicionaron como las de mejor rendimiento pues soportan cargas a altas potencias por mayor tiempo, y como alternativa se tienen las baterías también basadas en litio que son litio ferrofosfato que usan litio, pero no cobalto y las de polímero de litio (Torres, 2022).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Las baterías de ion de litio (LIB) son baterías de desarrollo más bien reciente, su precursor fue el ingeniero John Bannister Goodenough alrededor de 1970. La popularización definitiva de las baterías de ion de litio vino con la adopción que la compañía japonesa de tecnología Sony hizo de esta tecnología como alternativa para sus cámaras de video, a finales de los 80. De acuerdo con la posibilidad o no de recarga hay baterías LIB clasificadas como recargables o no recargables (desechables).

Otra clasificación es según el tipo de electrolito que puede ser acuoso, no acuoso, híbrido (acuoso-no acuoso) o de estado sólido.

Las baterías de ion de litio, como se conocen actualmente, fueron desarrolladas desde 1985 y funcionan con un electrolito no acuoso que contienen iones de litio como electrodo positivo y materiales con carbono como electrodo negativo (Fagoaga, 2021). Este tipo de baterías electrolito alcanzan una energía específica extremadamente alta, comparable con la de la gasolina (Liu, Placke, & Chau, 2022).

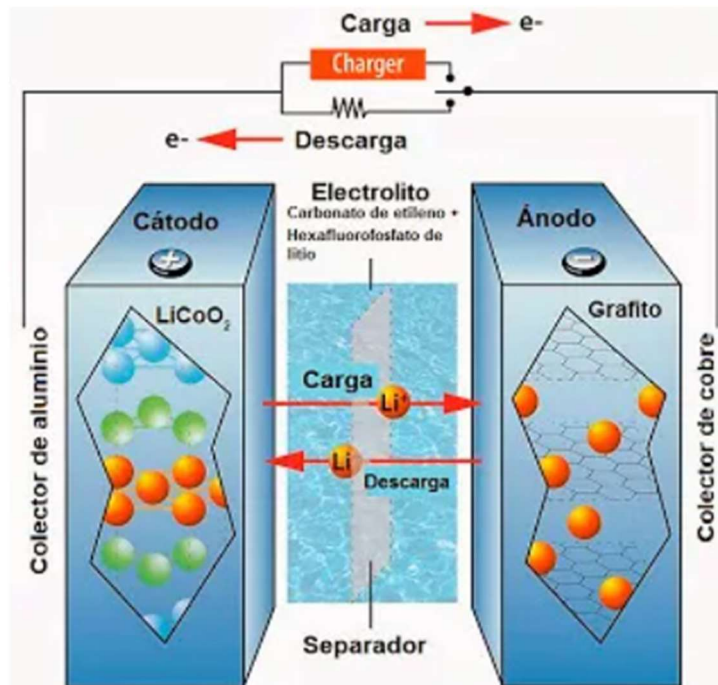
Una de las grandes ventajas de estas baterías es que al tener como elemento base para su fabricación el litio, que es el metal más liviano de la naturaleza, puesto que tiene únicamente 3 protones, permite la fabricación de baterías con menor peso.

Otras ventajas de estas baterías es que no requieren mantenimiento, no tienen efecto memoria y la relación de auto descarga de las baterías almacenadas es menor que la de los otros tipos de batería.

No están, sin embargo, libres de presentar desventajas siendo las principales que requieren un circuito de seguridad, pues se debe limitar el voltaje máximo de cada célula durante la carga y limitar el mínimo durante la descarga. También tienen pérdida de propiedades químicas por degradación de sus componentes en periodos relativamente cortos (Peña Ordóñez, 2011).

En la Figura 18 se muestra el esquema de una batería de ion de litio, donde se muestran los compuestos químicos componentes de sus diferentes partes.

Figura 18. Esquema de una batería de Ion de litio (Martil, 2019)



3.3.1 REUSO O RECICLAJE DE BATERÍAS

Tal como se ha mencionado, a los temas de autonomía y vida útil de las baterías se le agrega como problema la disposición final de las mismas y es un aspecto de la mayor importancia pues es necesario gestionar el tema para que el impacto benéfico para el medio ambiente de usar un sistema de transporte con cero emisiones, no se vea contrastado con el tema de desechos tóxicos generados por las baterías al final de su vida útil.

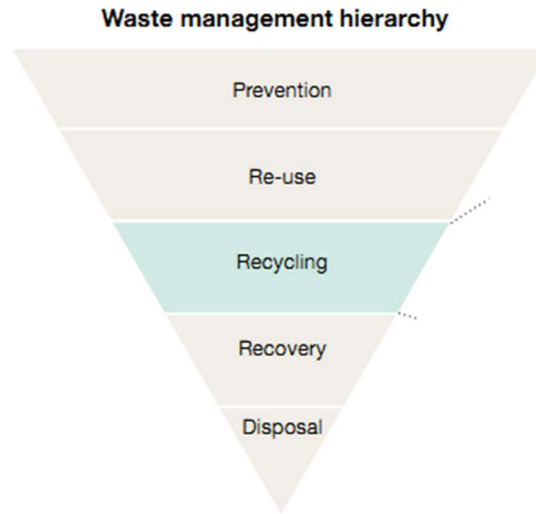
En Colombia la resolución 0372 de 2009, es la normativa mediante la cual se obliga a los fabricantes y comercializadores de baterías usadas de plomo ácido a que establezcan planes de devolución y reuso de este tipo de baterías (Ministerio del medio ambiente, 2009).

En 2017 se vendieron alrededor de 1 millón de vehículos eléctricos en el mundo y de esto se estima que se pueden producir 250 mil toneladas y media y un millón de metros cúbicos de desechos al final de la vida útil de los vehículos (Harper, Sommerville, & Driscoll, 2019).

Se menciona que existe una jerarquía de manejo de residuos en la cual es más importante el reuso que el reciclaje, en la Figura 19 se presenta dicha jerarquía.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 19 Jerarquía de manejo de desechos (Harper, Sommerville, & Driscoll, 2019)



En la gráfica se aprecia que dentro de la jerarquía de manejo de desechos, el reciclaje no constituye la mejor opción desde el punto de vista ambiental. En el caso de las baterías de uso en vehículos eléctricos, el reciclaje de estas tiene muchos beneficios ambientales y económicos. El hecho de que ya no contengan mercurio y ya no contengan materiales tóxicos ha generado una industria del reciclaje que recupera los materiales de la batería que pueden ser nuevamente usados y por consiguiente se reducen las labores de explotación de estos materiales que en muchos casos provienen de países en vía de desarrollo, donde las condiciones laborales de los trabajadores dedicados a esas tareas, son precarias y violatorias de las regulaciones laborales de esos países e incluso vulneran derechos humanos fundamentales, por lo que la opinión mundial ha comenzado a revisar esta situación para vigilar y regular (Gaines, 2014).

3.4 ESTACIONES DE CARGA (ELECTROLINERAS)

Una estación de carga de vehículos eléctricos también denominada electrolinera es un sitio en el cual se pueden enchufar y recargarse las baterías de los vehículos eléctricos. Básicamente funcionan como un tomacorriente convencional, pues la única operación que debe hacer el usuario es conectar el vehículo por medio de los conectores, como si se tratara de un electrodoméstico recargable.

Una limitación que ha tenido la expansión de la movilidad eléctrica es que en la actualidad la ubicación de las electrolineras se limita a las ciudades grandes y aun en estas la cantidad de estaciones de carga es limitada, esto hace poco atractiva la opción del vehículo eléctrico a cierto tipo de usuarios que utiliza el vehículo para hacer recorridos interdepartamentales de gran longitud.

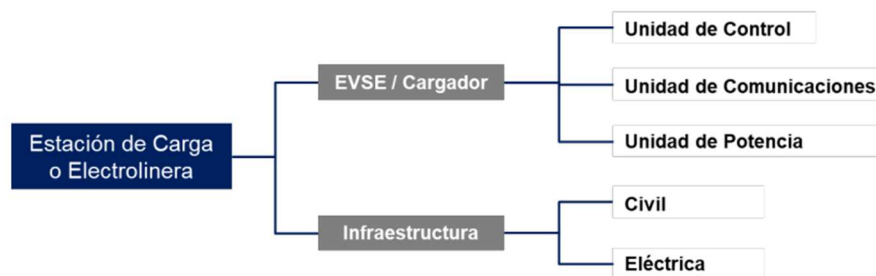
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3.4.1 Esquema de funcionamiento de una electrolinera y tipos de carga

En general las electrolineras al igual que una estación de servicio de combustible tienen una infraestructura de obra civil y eléctrica asociada para poder adecuar el sitio y las condiciones de funcionamiento.

Los cargadores como tal tienen asociadas básicamente 3 unidades, la unidad de potencia, de control y de comunicaciones, tal como se ve en la Figura 20

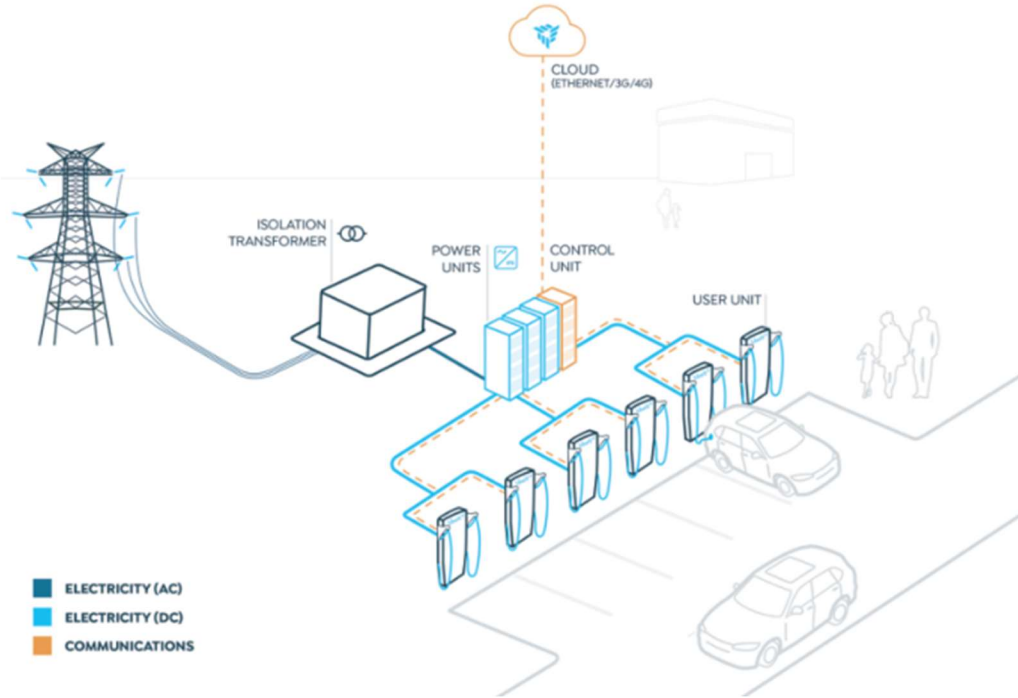
Figura 20 Esquema de componentes de la electrolinera (UPME, 2019)



Las estaciones de carga pueden ser de varios tipos, dependiendo el tipo de corriente usada, si es alterna o continua y la potencia del cargador es la que determina si es carga rápida o lenta.

Cuando se habla de estaciones de carga públicas que normalmente se instalan en sitios de parqueo, centros comerciales entre otros las estaciones de carga o electrolineras están compuestas en general por uno o varios cargadores, casi siempre de carga semirápida. Estos cargadores contienen a su vez unidades de vienen equipados con elementos de control, de comunicaciones y de potencia integrados. Para potencias mayores a 150 kW, los elementos de control pueden ser externos (ver Figura 21. La vida útil de una electrolinera puede estar alrededor de 10 años (UPME, 2019).

Figura 21 Esquema de electrolinera con elementos de control externos (UPME, 2019)



Los modos de carga son planteados por la norma IEC 61851-1. Los dos primeros modos corresponden a cargas de baterías en redes domésticas que no requieren infraestructura especial y, por lo tanto, su consumo queda embebido en el consumo de las cargas residenciales. Los modos que más demanda tienen por su velocidad de carga son de acuerdo con la norma el modo 3 y el modo 4, a continuación, se da una breve explicación de estos.

Modo 3 en corriente alterna (AC) también llamado de carga semirrápida, consiste en tener un equipo de carga, específico para el vehículo, con sus sistemas de control y protecciones. Soporta una corriente máxima de 63 A siendo el más común 32 A con niveles de tensión máximo de 230 V.

Modo 4 en corriente continua (CC). El cargador al que se conecta el vehículo hace la conversión de corriente alterna a corriente continua y por medio de esta se hace la carga. Este es un modo rápido con corrientes de hasta 400 A y una potencia máxima de 240 kW, con niveles de tensión máximo de hasta 600 V.

También se indica que depende del tipo de vehículo es el cargador que se debe usar, pues algunas marcas utilizan de un tipo y otras del otro. (Gutiérrez Giraldo, 2015)

Debido a que no hay unificación normativa para el tipo de conectores de los cargadores, existen diferentes tipos, tal como se puede apreciar en la Figura 22 la estandarización de los mismos se va haciendo generalmente por países, dependiendo de sus necesidades. Así, por ejemplo, el conector

CHAdEMO es el conector estandarizado en Japón, mientras que en Europa se estandarizó el Mennekes tipo 2 para carga lenta y el CCS1 para carga rápida. Los cargadores domésticos para carga lenta que pueden instalarse en los garajes privados de las residencias son similares a un tomacorriente común. (Race, 2022)

Figura 22 Esquema con los tipos de conectores (UPME, 2019)



En Colombia, la infraestructura de carga se concentra en las principales ciudades, siendo Medellín la que en 2019 tenía la mayor cantidad de centros de carga, seguida de Bogotá y Cali. Estos cargadores funcionan con carga lenta y semirrápida. Existe la deficiencia de que sobre las rutas nacionales no hay infraestructura de carga, esto implica que el viajero propietario de vehículos eléctricos queda sujeto a que la autonomía de su vehículo sea suficiente para emprender este tipo de viajes, pues solo podrá recargar al llegar a una ciudad grande. Adicionalmente, cabe anotar que la mayoría de esta infraestructura viene del sector privado. (Gomis, Forn, & Salas, 2018)

3.5 LA MOVILIDAD ELÉCTRICA COMO CARGA PARA EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL

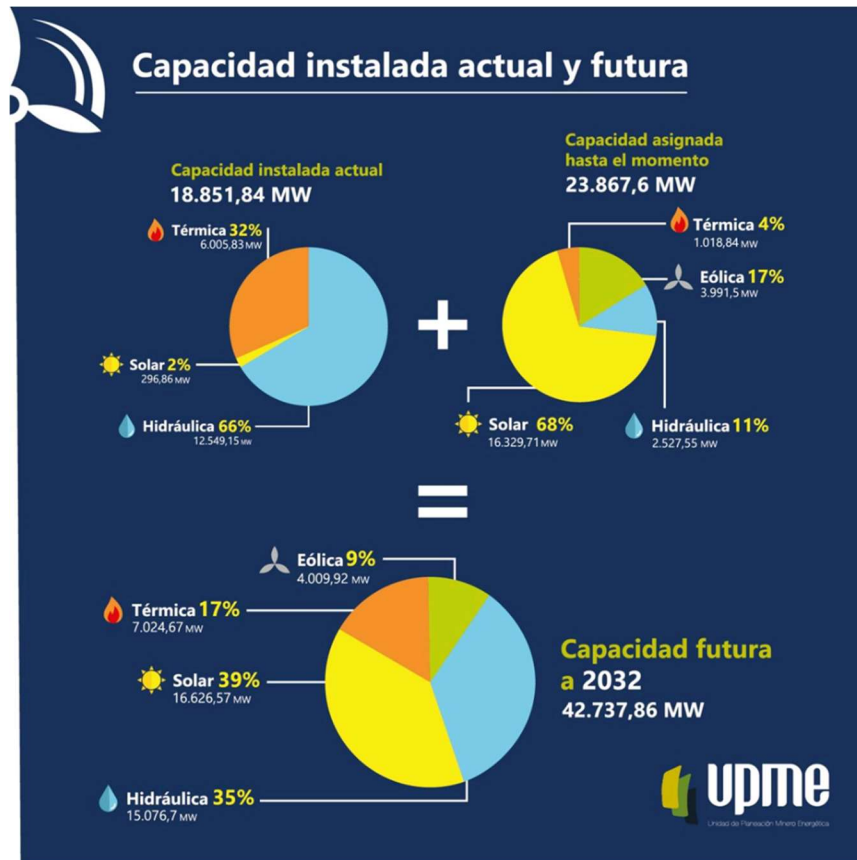
El servicio de suministro de energía eléctrica en Colombia actualmente se encuentra cubierto por operadores públicos y privados que se dividen en diferentes líneas de negocio de acuerdo con lo que se reglamentó a partir de las leyes 142 y 143 de 1994, a saber: la ley de servicios públicos y la ley eléctrica. Los diferentes negocios son el de generación, el de transporte y el de distribución y comercialización. Adicionalmente, el tamaño de la carga que consume cada usuario determina si es un usuario no regulado, que tiene la libertad de comprar la energía al operador que considere más conveniente o el regulado que debe adquirir la energía al operador que preste el servicio en su ubicación geográfica.

El sistema eléctrico colombiano atiende entonces cargas de diferente índole siendo su principal consumidor el sector industrial con un 42 %, posteriormente el minero con 26 %, el comercio de

productos, servicios, la construcción y la energía que consumen los hogares con el 32 % (Infografía El Colombiano, 2019, datos de Acolgen). Aún en estos porcentajes no aparece la movilidad eléctrica como un actor importante o no se ha cuantificado su tamaño pues la carga de los vehículos es un consumo embebido en los sectores ya cuantificados de comercio y doméstico, pues la infraestructura de carga se presenta en esos sectores.

De acuerdo con datos de XM en 2023 la infraestructura instalada de generación es de 18.998,79 MW entre los diferentes tipos de generación (XM, 2023) y se proyecta de acuerdo con el plan de expansión de referencia generación – transmisión definido por la UPME para 2032 llegar a 43.737,86 MW lo que supone un crecimiento del 230% en las cuales, en sintonía con la transición energética un alto porcentaje de la expansión (45%) sería en proyectos de energías renovables como se muestra en la Figura 24 (Villasante, UPME)

Figura 23 Capacidad instalada actual y futura del sistema eléctrico colombiano (Villasante, UPME)



El crecimiento la carga asociada a la movilidad eléctrica implica que la infraestructura construida y proyectada para el suministro de energía eléctrica en el país en el presente y en prospectiva para los siguientes años, debe ser tenida en cuenta y las necesidades de suministro de energía para este sector deberán ser identificadas y medidas, para poder garantizar que el sistema tenga suficiente capacidad para cumplir con el requerimiento.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Las necesidades no serán solamente los MWh que consumiría la carga eléctrica asociada a los vehículos, sino también la optimización de los equipos de carga, la masificación de los puntos de carga, así como para garantizar al usuario su movilidad por todo el territorio nacional. También pensar en otras alternativas a la carga como el uso de baterías de intercambio, disponibles en diferentes puntos, por ejemplo.

El estudio del efecto de la carga de vehículos eléctricos en una red eléctrica se debe hacer desde el análisis de varios aspectos como:

- ¿Dónde van a cargar los usuarios? Universidades, centros comerciales, viviendas de estratos superiores a 4 son las opciones más probables.
- Verificación de la cantidad y cargabilidad de los transformadores que deberán atender esa demanda.

(Ceballos Delgado, Caicedo Bravo, & Ospina Arango, 2016)

El grupo de investigación de Transmisión y distribución de potencia eléctrica de la Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín Colombia realizó en 2021 un trabajo investigativo denominado “Metodología para evaluar el impacto de vehículos eléctricos en las redes eléctricas usando Montecarlo” (Betancur, y otros, 2021). Este documento se citará con un grado de detalle un poco mayor debido a la importancia de sus resultados con respecto al objetivo de esta monografía.

El propósito del trabajo es realizar una modelación con el software Montecarlo, el cual es un método estadístico que usa muestras aleatorias de distribuciones probabilísticas para modelar un fenómeno que contiene elementos estocásticos, en este caso la carga de los vehículos y su impacto en la red eléctrica, lo cual depende de diferentes factores como son, las preferencias de carga que tienen que ver con las horas del día en que se realizan las cargas, el estado de carga (SOC por sigla en inglés State of Charge), las horas de carga entre otros.

El citado grupo de investigación realizó la modelación para las redes de transmisión del departamento de Antioquia, por lo tanto, en el artículo hace una explicación del funcionamiento de la red eléctrica que alimenta el departamento, describiendo su topología y cuantificando la cantidad de subestaciones y transformadores. Entendiendo que la infraestructura eléctrica en el departamento de Antioquia en generación, transmisión y distribución es un referente para el país y adicionalmente, que para el momento en que hicieron la simulación Antioquia era uno de los departamentos con mayor número de vehículos eléctricos matriculados, se considera que los resultados obtenidos pueden proyectarse al resto del país.

Utilizaron información de diferentes fabricantes de vehículos eléctricos e híbridos que se comercializan en el país de marcas como BMW, Mitsubishi, Renault, Nissan, Kia, entre otros, tomando para la modelación datos de capacidad de las baterías, funcionamiento y potencia de carga. La siguiente tabla de la Figura 24 muestra los valores representativos para vehículos 100 % eléctricos (BEV), híbridos enchufables (PHEV), taxis y buses eléctricos.

Figura 24 Información de carga para PEV (Betancur, y otros, 2021)

Table 2. Base PEVs.

Vehicle Type	Battery Capacity (kWh)	Performance (kWh/km)	Charging Power (kW)
BEV	28	0.1582	50.0 ¹ /7.6 ²
PHEV	11	0.2723	3.7
Taxi	61	0.1639	50.0 ¹ /7.6 ²
Bus	348	1.0000	190

¹ Fast charge, ² slow charge.

Posteriormente explica los escenarios con los cuales se hace la simulación para evaluar el impacto de los PEV en el sistema eléctrico colombiano que corresponden a un 5 %, 10 % y 15 % del reemplazo de vehículos de combustión por vehículos eléctricos o híbridos, teniendo como año para el cumplimiento de las metas 2030. Cabe recordar que la meta de los países que pertenecen a la iniciativa de vehículos eléctricos (EVI por su sigla en inglés) es de reemplazar a 2030 el 30 % de los vehículos a combustión. Con los datos actuales y de metas presupuestadas para Antioquia los resultados son los que se presentan en la siguiente tabla de la Figura 25:

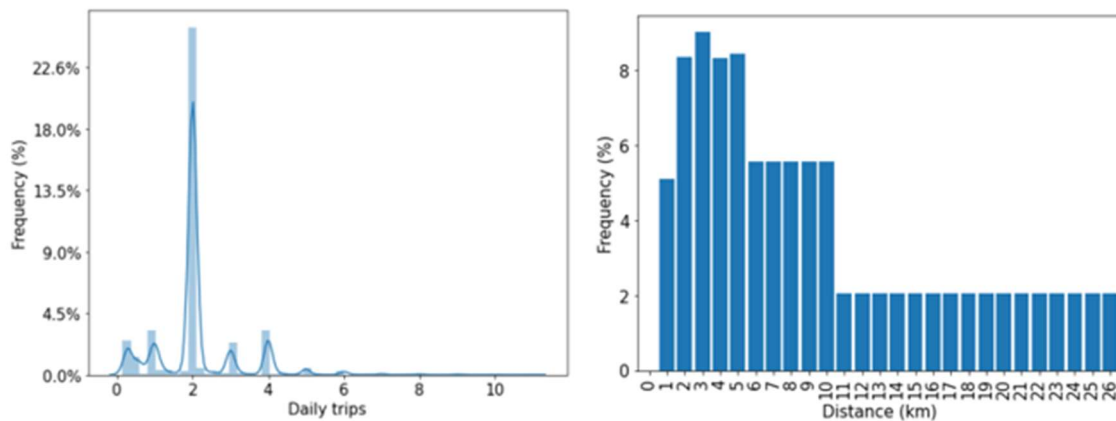
Figura 25 PEV estimados en Antioquia en 2030 (Betancur, y otros, 2021)

Table 3. Antioquia's estimated PEVs in 2030. Adapted from [1,26,27].

Vehicle Type	Relative Participation (%)	Low Penetration - 5%	Medium Penetration - 10%	High Penetration - 15%
BEVs	59.29	55,801	111,602	167,403
PHEVs	31.68	29,816	59,631	89,447
Taxis	8.41	7914	15,827	23,741
Buses	0.62	584	1167	1751

Los otros datos que se deben calcular o recopilar por medio de encuestas, son cantidad de viajes diarios y los de los recorridos diarios en millas (DM por Daily Mileage) presentado en la Figura 26

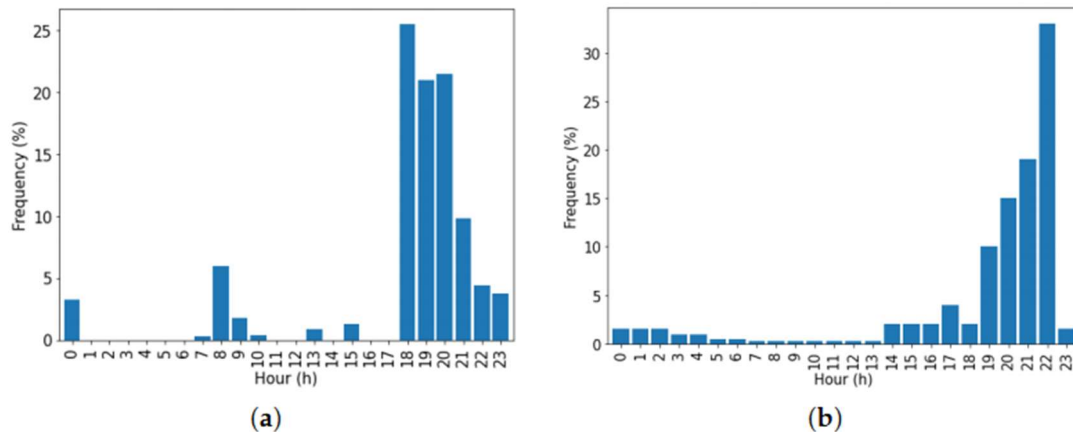
Figura 26 Gráficos de encuestas de viajes diarios y distancias por viaje (Betancur, y otros, 2021)



Se aprecia que el valor máximo de viajes diarios según las encuestas es de 2 para un valor superior cercano al 22 % y la máxima distancia de los viajes es de 3 km para un 10 % de la población encuestada.

Las horas de carga de vehículos particulares y de taxis (que se muestran en las gráficas siguientes de la Figura 27)

Figura 27 Histogramas de tiempos de inicio de carga (Betancur, y otros, 2021)



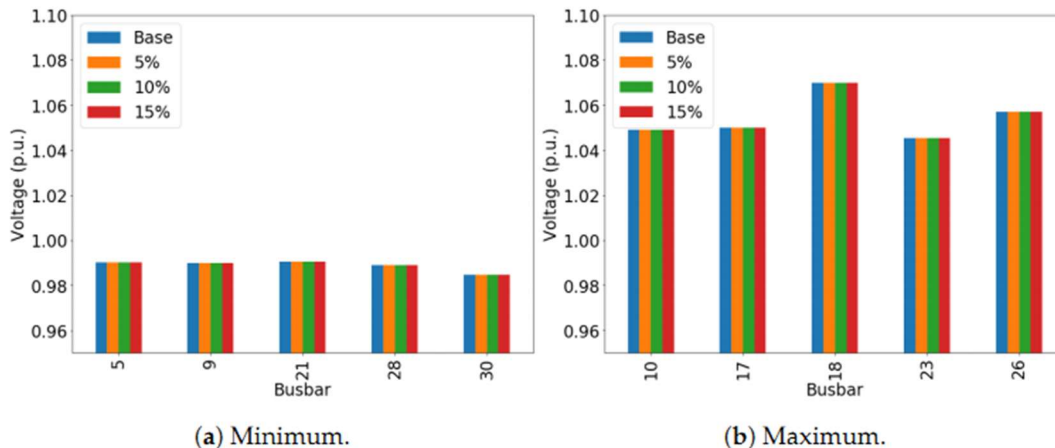
Start charging time histograms. (a) Private cars.

(b) Taxis.

De estas gráficas se aprecia que la hora pico de inicio de carga para vehículos particulares es las 6 de la tarde, mientras que para los taxis es a las 10 de la noche.

Finalmente, con esos datos ingresados, el software arroja los resultados del impacto en los barrajes de las subestaciones como se ve en el siguiente gráfico de la Figura 28:

Figura 28 Efecto de la carga de vehículos en los barrajes de las subestaciones (Betancur, y otros, 2021)

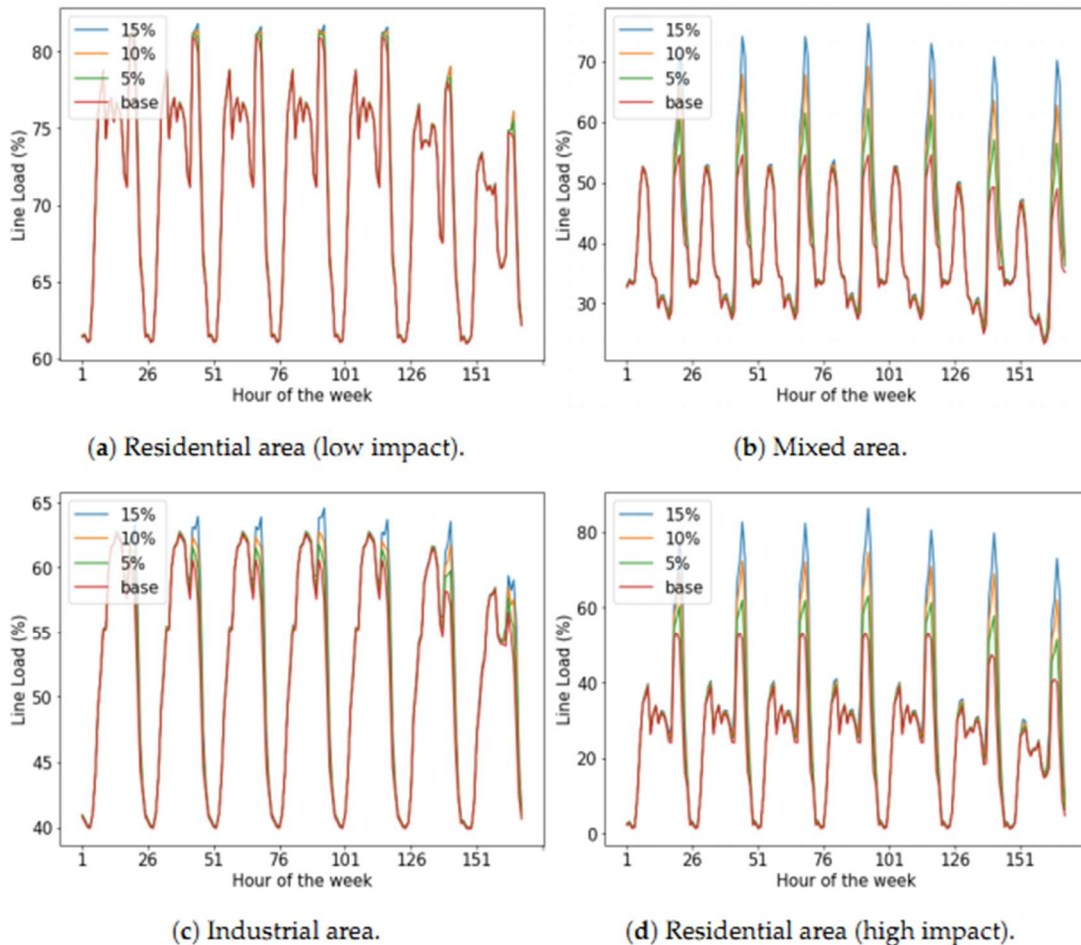


(a) Minimum.

(b) Maximum.

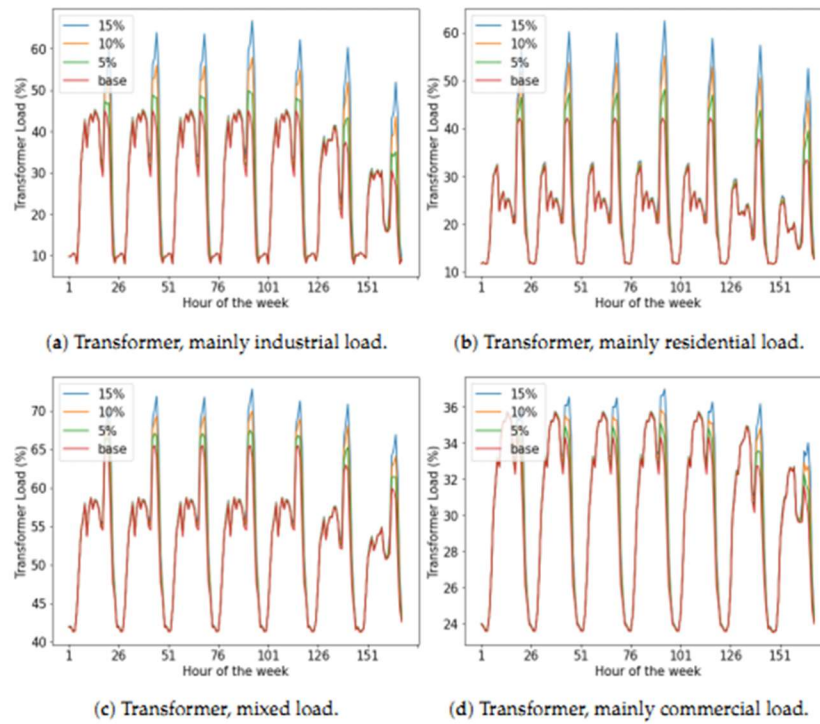
Las gráficas indican que tanto en el nivel mínimo como en el máximo de carga de los vehículos los valores de tensión caen por debajo o se suben por encima de los valores límites permitidos para la operación de los sistemas eléctricos que son 0,9 p.u y 1,1 p.u respectivamente.

Figura 29 Efecto de la carga de vehículos en la tensión de los diferentes sectores (Betancur, y otros, 2021)



En las gráficas de la Figura 29 se presenta el efecto de la carga de los vehículos en la tensión en los diferentes sectores, el residencial, mixto e industrial. El análisis arrojó que donde mayor impacto se presenta es en el residencial en las horas que siguen a las 18:00 que son las horas donde mayor coincidencia hay de usuarios cargando sus vehículos. Sin embargo, se apunta que el efecto es muy bajo, en los 3 escenarios (5%,10% y 15%).

Figura 30 Efecto de la carga de vehículos en la tensión de los transformadores (Betancur, y otros, 2021)



Finalmente, las gráficas de la Figura 30 presentan el efecto de la carga de los PEV en los transformadores en los diferentes sectores, se indica que de la hora 18 a la 24 el incremento de la carga en los transformadores si es significativo sobre todo en los transformadores que atienden la carga en sectores residenciales donde para el escenario del 15%, que es el de mayor crecimiento de los PEV, registra un 21,8%.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4. METODOLOGÍA

Para la elaboración de este estado del arte de la movilidad eléctrica en Colombia se han tomado en cuenta diferentes fuentes de carácter científico tales como grupos de investigación universitarios como el grupo de transmisión y distribución de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín que desarrollaron análisis y simulaciones que ofrecen resultados concluyentes sobre la temática tratada.

También se tienen como fuentes otros autores investigadores de universidades nacionales como la Universidad de los Andes, Universidad tecnológica de Pereira e internacionales como la Universidad de Oslo Noruega, Universidad de Málaga España, Engineering College de Doha Qatar entre otras.

Se consultaron además trabajos de grado universitario en diferentes universidades no solo colombianas sino internacionales, dichos trabajos tenían como objetivos optar a títulos no solo de pregrado sino también especializaciones, maestrías y doctorados de estos se obtuvo importante información de los procesos investigativos llevados a cabo por los estudiantes, además del análisis crítico de sus diferentes puntos de vista del tema.

También se verificó cual es la normatividad existente aplicada al tema de la movilidad eléctrica no solo a nivel local sino global. Se realizaron consultas en páginas web de instituciones educativas, gubernamentales, dedicadas el tema de manera concreta y para tener también el punto de vista de los elementos involucrados en el mercado también se consultaron artículos, páginas web y folletos elaborados por fabricantes y comercializadores de los diferentes elementos constitutivos de la movilidad eléctrica como los fabricantes de vehículos.

Finalmente, se complementa también con revisiones de prensa de artículos relacionados con el tema.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de este estado del arte desarrollado se pudo evidenciar que Colombia marcha de una forma lenta en su objetivo de contribuir a la descarbonización del ambiente por medio de la gradual masificación de la movilidad eléctrica, cuya meta es que para 2030 estén circulando 600 mil vehículos entre eléctricos e híbridos en el país.

Uno de los principales obstáculos para que no haya un avance más significativo en el cumplimiento de la meta es el alto costo que para los usuarios conlleva cambiar sus vehículos de combustión y altas emisiones a los vehículos eléctricos e híbridos.

El otro problema es el de las autonomías de los vehículos 100 % eléctricos, que aún no es acorde para los trayectos largos interdepartamentales pues no hay suficientes puntos intermedios de carga, en pueblos pequeños. Eso hace que para el transporte de pasajeros y de carga en largas distancias la movilidad 100 % eléctrica aun no sea una opción adecuada. Igual sucede para automóviles o motocicletas de usuarios que gusten de ese tipo de recorridos, constituyéndose los híbridos no enchufables en la mejor opción.

Para el sector urbano en ciudades grandes el transporte público la electrificación es muy viable y ya está migrando hacia allá y hablando de usuarios particulares con las facilidades de carga, aun en sus hogares, las patinetas, bicicletas, motocicletas e incluso automóviles son buenas opciones. No obstante, por ahora sigo considerando como mejor opción los vehículos híbridos pues aportan la tranquilidad de una autonomía dependiente de que esté presente uno de dos factores, o la carga de las baterías o el otro que aún tiene una muy alta disponibilidad como es el combustible tradicional para el motor de combustión.

La tecnología de baterías data de más de un siglo y lógicamente seguirá evolucionando pues estos equipos se han convertido en elementos fundamentales no solo para la movilidad eléctrica sino en general para todos los sistemas que tienen que ver con la transición energética pues son el elemento de almacenamiento por excelencia para todos los sistemas de generación de energías renovables no convencionales.

Respecto a las baterías que se usan para la movilidad eléctrica, se tiene que, aunque aún algunas marcas utilizan baterías de tecnologías como plomo ácido o baterías basadas en níquel, la alta eficiencia energética y su mejor relación con el medio ambiente por no contener elementos tóxicos ha hecho que las baterías basadas en litio sean las más usadas en la actualidad.

En este tema quedan por desarrollar diversos aspectos sobre los que los fabricantes continúan trabajando como es mejorar sus autonomías, su peso, sus condiciones de carga y descarga.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Otro punto crítico es el tema de disposición final de baterías sobre lo cual se está trabajando en reglamentación y están surgiendo compañías enfocadas en este fin que vieron en este problema una oportunidad de negocio.

Las estaciones de carga o lo que se conoce como electrolinerías es otro de los aspectos de la movilidad eléctrica de la máxima atención pues el crecimiento del parque automotor eléctrico o híbrido enchufable tiene que ir de la mano del crecimiento de la red de electrolinerías en el país. Actualmente se tiene poca confianza sobre la red de electrolinerías a lo largo del país pues su expansión ha sido muy lenta y limitada a grandes ciudades, por lo que podría decirse que los autos 100% eléctricos todavía tienen un carácter casi que netamente urbano, ya que sus autonomías y la distancia de ubicación entre estaciones de cargas, no les permiten hacer largos recorridos, no obstante que los fabricantes ofrecen cada vez mejores cifras de autonomía ya que ese es el elemento diferenciador que tienen para obtener el liderazgo en ventas.

Finalmente, frente a otra preocupación presente en el tema de la movilidad eléctrica la cual es que una posible masificación aumente la carga eléctrica asociada a esta a unos niveles que impacten la red del sistema eléctrico colombiano de tal forma que requiera de crecimientos adicionales a los ya proyectados, se encontró que diferentes estudios y simulaciones proyectan que ese aumento de carga en el sistema para diferentes escenarios de crecimiento de la movilidad eléctrica, para un corto plazo que es el año 2030, el efecto no va a ser significativo y los planes de expansión del sector eléctrico para esa fecha van a ser suficientes para el cubrimiento de esa demanda.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

De este estado del arte de la movilidad eléctrica se puede concluir que Colombia tiene metas claras con respecto a los temas de transición energética que buscan reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero en unos plazos determinados, jalonado por las políticas internacionales establecidas por los tratados en los cuales el país tiene participación.

Para el cumplimiento de estas metas la movilidad eléctrica es una herramienta fundamental pues en la actualidad la emisión de gases del sector transporte representan un gran porcentaje que se pretende reducir con la masificación de los vehículos de cero emisiones o emisiones bajas como son los híbridos.

Se observa que la competencia entre las marcas con respecto a estas tecnologías es fuerte, las tradicionales de mayor venta en el país introducen nuevos modelos y entran otras marcas a competir por lo que se presume que este factor conlleve a precios más asequibles y esto ayude a la esperada masificación.

Se concluye también que, a la fecha, las ventas de vehículos eléctricos o híbridos en Colombia aún son bajas, principalmente porque el costo de estos es elevado para un país en desarrollo donde la gran mayoría de su población pertenece a estratos medios o bajos y eso hace que no se tenga una visión optimista sobre el cumplimiento de las metas del gobierno de tener en el 2030 un parque automotor eléctrico de al menos 600.000 vehículos.

Adicionalmente, las marcas junto con sus empresas aliadas de fabricación de baterías deben seguir su enfoque en la optimización de las tecnologías lo que permita mejorar en eficiencia, economía, autonomía, pesos y demás factores que afecten el costo de los vehículos.

También se concluye que las investigaciones y la tecnología aplicada en la industria de las baterías ha tenido desde siempre como factor competitivo la búsqueda del aumento en la vida útil y su autonomía. Y se espera que ayuden a gestionar junto con los gobiernos las normativas de disposición final.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Otro punto de conclusión es que la cobertura de las electrolineras es necesario que se extienda a más regiones del país para que la movilidad eléctrica sea una opción real para los usuarios que usan sus vehículos para el turismo por las carreteras del país y principalmente para el transporte de pasajeros y de carga.

Para Colombia diferentes análisis y estudios arrojan que la masificación de la movilidad eléctrica no va a generar un gran impacto en la red eléctrica del sistema interconectado, pues esta tiene suficiente robustez y proyección de crecimiento para atender el crecimiento de la carga de otros sectores y de la movilidad eléctrica ante su eventual aumento. No obstante, estos estudios tienen una proyección dentro de un espacio de tiempo relativamente corto (2030) y se deberá continuar observando cómo se va comportando esa tendencia para determinar si se deben tomar medidas al respecto.

Finalmente, este trabajo puede ser complementado a futuro con la búsqueda de más información sobre estudios para el caso colombiano y contrastar con los aquí presentados para concluir si efectivamente la movilidad eléctrica no va a representar una preocupación para el país respecto a la suficiencia de su infraestructura eléctrica.

También considero que en todos y cada uno de los numerales en los que se presentó este estado del arte, se puede continuar aportando información que permita entender con mayor profundidad como funcionan las tecnologías, como se presenta y de que se trata la normalización aplicada y demás aspectos relevantes que aumenten el conocimiento respecto al tema.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

7. REFERENCIAS

- Acevedo Navas, C., & Morales Nieto, A. (2020). Proceso de decisión de vehículos eléctricos en Bogotá (Colombia). *Pensamiento y gestión*, 246-275.
- Andemos Asociación Nacional de Movilidad Sostenible. (abril de 2023). *Andemos Asociación Nacional de Movilidad Sostenible*. Obtenido de https://lookerstudio.google.com/reporting/ceb8deeb-3b00-4e08-8536-5a0f2ebb5cf2/page/p_llxee72y2c?s=hAG20Jsrms0
- Betancur, D., Duarte, L., Revollo, J., Restrepo, C., Díez, A., Isaac, I., . . . González, J. (2021). Methodology to Evaluate the Impact of Electric Vehicles on electrical networks using Monte Carlo. *Energies*, 1-16.
- Bildagentur-online. (1 de septiembre de 2018). *alamy.es*. Obtenido de Historical image collection: <https://www.alamy.es/el-gross-lichterfelde-tramway-fue-el-primer-tranvia-electrico-s-construido-por-la-empresa-siemens-halske-en-lichterfelde-berlin-y-entro-en-servicio-el-16-de-mayo-de-1881-alemania-mejor-reproduccion-digital-de-woodprint-desde-el-ano-18>
- Bogotá, S. D. (2021). *Boletín PIGA 34 Vehículos Eléctricos*. Bogotá: Alcaldía de Bogotá.
- Ceballos Delgado, J., Caicedo Bravo, R., & Ospina Arango, S. (2016). Una propuesta metodológica para dimensionar el impacto de los vehículos eléctricos sobre la red eléctrica. *Revista ingeniería*, 154-175.
- Espinosa Valderrama, M., Cadena Monroy, Á., & Behrentz, E. (2019). Challenges in greenhouse mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector. *Energy policy*, 111-122.
- Fagoaga, O. F. (2021). *Evolución histórica de las baterías aplicadas a los vehículos eléctricos de movilidad urbana. Aplicación de un caso práctico*. Cartagena - España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1-7.
- Gomis, G. M., Forn, E. B., & Salas, M. A. (2018). *Movilidad eléctrica: avances en américa latina y el caribe y oportunidades para la colaboración regional*. Panamá: ONU Medio Ambiente.
- Gutiérrez Giraldo, G. (2015). *Estudio del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución de energía eléctrica*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Harper, G., Sommerville, R. K., & Driscoll, L. e. (7 de Noviembre de 2019). *Recycling lithium - ion batteries from electric vehicles*. Obtenido de Nature 150: go.nature.com
- Hive Blog. (2020). Obtenido de <https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/bater-as-de-ni-cd-c-mo-funcionan--1600691248>
- Hoyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 63-71.
- Lang, N. (2010). Historia de la electrificación. *ABB Review*, 16-23.
- Liu, W., Placke, T., & Chau, K. (2022). Overview of batteries and battery management for electrical vehicles. *Energy Reports*, 4058-4084.
- Mañes Gomis, G., Bermúdez Forn, E., & Araya Salas, M. (2018). *Movilidad Eléctrica: avances en América Latina y el Caribe y oportunidades para la colaboración regional*. Panamá: ONU.
- Marín Tabares, E., Rodríguez Toro, C., Correa, D. A., & Rivero, S. (2021). *Análisis prospectivo del mercado de vehículos eléctricos en Colombia*. Cartagena: Asociación colombiana de facultades de ingeniería ACOFI.
- Martil, I. (21 de 02 de 2019). *Material Eléctrico*. Obtenido de Funcionamiento de una batería de Ion Litio: <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/opinion/ignacio-martil/2019/02/21/funcionamiento-de-una-bateria-de-ion-litio-pros-y-contras>
- Ministerio del medio ambiente. (26 de Febrero de 2009). *Resolución 0372 de 2009 Plan de gestión de devolución de productos posconsumo de baterías de plomo ácido*. Obtenido de Baterías usadas plomo ácido: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/baterias-usadas-plomo-acido/>
- Moreno, F. M. (2016). Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual Y Retos . *2nd Pan-American Interdisciplinary Conference* (págs. 1-14). Buenos Aires: Proceedings.
- Osses, M., Ibarra, C., & Vila, W. (2022). Transporte público eléctrico en Valparaíso y Medellín: Historias de movilidad intermodal sobre las que construir el futuro. *Revista Estudios de Transporte*, 1-19.
- Paoli, L., & Gur, T. (30 de Enero de 2022). *IEA (2022), Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales, IEA, Paris*. Obtenido de IEA (2022), Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales, IEA, Paris: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>
- Peña Ordóñez, C. (2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. Madrid: Universidad Carlos III.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Race. (25 de 08 de 2022). *race.es*. Obtenido de www.race.es/tipo-de-conectores-para-coches-electricos

Restrepo Mantilla, O. (14 de Febrero de 2022). *El carro colombiano*. Obtenido de Estos son los países donde más se vendieron autos eléctricos en 2021:
<https://www.elcarrocolombiano.com/industria/autos-electricos-paises-que-mas-vendieron-en-2021/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20la%20IEA%2C%20China%2C%20Europa,ventas%20de%20carros%20puramente%20el%C3%A9ctricos>.

Sánchez Vela, L., Fabela, M., Hernández, J., Flores Centeno, O., Vasquez Vega, D., Acevedo, C., & Eliseo, M. (2020). Estado del arte de la movilidad eléctrica en México. *Publicación técnica #596 Instituto mexicano de transporte*, 1-70.

Torres, D. (30 de Noviembre de 2022). *Todo lo que debes saber sobre las baterías de los autos eléctricos*. Obtenido de [bydauto.com.co](https://bydauto.com.co/blog/todo-lo-que-debes-saber-sobre-baterias-de-vehiculos-electricos/#:~:text=Existen%20dos%20tipos%20de%20bater%C3%ADas,energ%C3%A9tica%20y%20sin%20efecto%20memoria): <https://bydauto.com.co/blog/todo-lo-que-debes-saber-sobre-baterias-de-vehiculos-electricos/#:~:text=Existen%20dos%20tipos%20de%20bater%C3%ADas,energ%C3%A9tica%20y%20sin%20efecto%20memoria>.

Trujillo Sandoval, D., & García Torres, E. (2020). Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte. *Revista de I+D tecnológico*, 1-7.

UPME. (2019). *Documento 3 - Solicitud Pública de Ofertas No. 010 - 2019*. Bogotá: UPME.

Viera Pérez, J. (2003). *Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad, análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos*". Guijón: Universidad de Oviedo.

VT Batteries. (Mayo de 2021). *VT Batteries*. Obtenido de <https://vtpower.es/blog/2021/05/15/ventajas-y-desventajas-de-las-baterias-de-plomo-acido-y-litio/>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTE	 _____
FIRMA ASESOR	 _____
FECHA ENTREGA: 16 de junio de 2023	