



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

Alexandra Hoyos Rengifo

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para obtener el título de:
Magister en Ingeniería – Sistemas Energéticos

Director:

Carlos Jaime Franco Cardona, PhD.

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2023

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio de los impactos en el sector eléctrico colombiano debidos a la entrada de vehículos eléctricos, este tipo de estudios son requeridos debido a la ausencia de una política amplia alrededor de estos. El objetivo es proponer estrategias para mitigar dichos impactos en el país, uno de los insumos para esto es la identificación de políticas energéticas a nivel internacional que puedan implementarse en Colombia. Para lograrlo, el trabajo se articula teniendo en cuenta 4 aspectos fundamentales: tipo de carga de los vehículos eléctricos, demanda de electricidad en el sistema colombiano, mercado de energía y políticas energéticas; por lo tanto, se hace necesario una descripción y comprensión de estos 4 temas en el territorio nacional, en comparación a lo establecido internacionalmente. En relación al tipo de carga de vehículos eléctricos en Colombia se manejan 3 niveles de carga: carga lenta, carga semi rápida y carga rápida; los cuales manejan diferentes valores de potencia, por lo que requieren ser regulados para dar confiabilidad al suministro. En el contexto de la demanda, se analiza el estado actual de consumo y capacidad instalada, la curva diaria de demanda y la proyección de crecimiento para los próximos años. Con respecto al mercado de energía en el modelo colombiano de bolsa de energía, los precios son determinados por el último generador que supla la demanda y usualmente se maneja una única tarifa mensual, lo cual podría representar una limitante para modificar los picos de curva de demanda. Finalmente, se analizan las políticas energéticas existentes en Colombia para incentivar el uso de estas tecnologías.

Palabras Clave

Vehículos eléctricos, políticas energéticas, demanda de electricidad, tecnología de baterías, modos de carga.

Abstract

In the present work, a study of the impacts on the Colombian electricity sector due to the entry of electric vehicles is carried out, this type of study is required due to the absence of a broad policy around these. The objective is to propose strategies to mitigate these impacts in the country, one of the inputs for this is the identification of energy policies at the international level that can be implemented in Colombia. To achieve this, the work is articulated by considering 4 fundamental aspects: type of charge in electric vehicles, demand for electricity in the Colombian system, energy market, and energy policies; therefore, a description and understanding of these 4 issues in the territory under study is necessary, compared to what is established internationally. Regarding the type of electric vehicles charge in Colombia, 3 charge levels are handled: slow charge, semi-fast charge, and fast charge; these handle different power values, so they need to be regulated to give reliability to the supply. In the context of demand, the current state of consumption and installed capacity, the daily demand curve, and the growth projection for the coming years are analyzed. Regarding the energy market in the Colombian model of the energy exchange, the prices are determined by the last generator that supplies the demand and usually a single monthly rate is handled, which could represent a limitation to modifying the peaks of the demand curve. Finally, the existing energy policies in Colombia are analyzed to encourage the use of these technologies.

Keywords

Electric vehicles, energy policies, electricity demand, battery technology, charging modes.

Policies to mitigate the impact of the introduction of electric vehicles in the Colombian electricity sector.

Tabla de contenido

Resumen.....	2
Palabras Clave	2
Abstract	3
Keywords.....	3
Tabla de contenido.....	4
Introducción	8
Capítulo 1. Antecedentes.....	10
1.1. Panorama general de los vehículos eléctricos en países desarrollados y Colombia.....	10
1.2. Tipos de carga en los vehículos eléctricos.....	13
1.3. Demanda de electricidad en Colombia	13
1.4. Conclusiones del capítulo.....	15
Capítulo 2. Marco teórico	16
2.1. Tecnología de vehículos eléctricos.....	16
2.2. Panorama general del mercado de electricidad en Colombia	18
2.3. Conclusiones del capítulo.....	18
Capítulo 3. Revisión de literatura.....	19
3.1. Efectos de los vehículos eléctricos en las redes eléctricas.....	20
3.2. Políticas energéticas.....	22
3.3. Conclusiones del capítulo.....	23
Capítulo 4. Objetivos y Metodología.....	24
4.1. Objetivos	24
4.1.1. Objetivo General	24
4.1.2. Objetivos específicos.....	24
4.2. Metodología.....	24
Capítulo 5. Identificación de los impactos generados en los sistemas eléctricos a nivel internacional con la entrada de VE	26
5.1. Selección de países.....	26
5.1.1. Criterio 1.....	26
5.1.2. Criterio 2.....	26
5.2. Impactos en Noruega	27
5.3. Impactos en Islandia.....	28
5.4. Impactos en Suecia.....	29

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

5.5. Impactos en California	30
5.6. Impactos en Dinamarca.....	32
5.7. Impactos en Finlandia	33
5.8. Impactos en Países Bajos	34
5.9. Impactos en Alemania.....	35
5.10. Conclusiones del capítulo.....	36
Capítulo 6. Caracterización de las políticas energéticas adoptadas por los países seleccionados, para mitigar los impactos en las redes eléctricas debido a la penetración de VE	38
6.1. Estrategias en Noruega	38
6.2. Estrategias en California.....	39
6.3. Estrategias en Islandia.....	41
6.4. Estrategias en Dinamarca.....	41
6.5. Estrategias en Finlandia	43
6.6. Estrategias en Alemania	43
6.7. Caracterización de las estrategias.....	43
6.8. Conclusiones del capítulo.....	45
Capítulo 7. Estrategias para mitigar los impactos de la penetración de los VE en Colombia	46
7.1. Regulaciones alrededor de los vehículos eléctricos.....	46
7.2. Estrategias tomadas ante los desafíos presentados en el sistema eléctrico	47
7.3. Propuestas para mitigar los impactos en Colombia.....	48
7.4. Conclusiones del capítulo.....	50
Capítulo 8. Conclusiones	51
8.1. Conclusiones generales del trabajo final	51
8.2. Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos	51
8.2.1. Objetivo específico 1.....	51
8.2.2. Objetivo específico 2	51
8.2.3. Objetivo específico 3	52
8.2.4. Objetivo General	52
8.3. Trabajos futuros	53
Capítulo 9. Referencias	54

Lista de Tablas

Tabla 1 Autores relevantes en revisión de literatura.....	20
Tabla 2 Caracterización de estrategias por País.....	45
Tabla 3 Propuesta de estrategias para Colombia	50

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
VE	Vehículo(s) eléctrico(s)
CD	Corriente directa
CA	Corriente alterna
Minambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Alcolgen	Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica
ANDEMOS	Asociación Nacional de Movilidad Sostenible
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
HEV	Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
EREV	Extended Range Electric Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
BMS	Battery management system
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
MEM	Mercado de Energía Mayorista
CND	Centro Nacional de Despacho
EFV	Energía solar fotovoltaica
BC	Bombas de calor
CND	Centro Nacional de Despacho
EFV	Energía solar fotovoltaica
BC	Bombas de calor
GEI	Gases de efecto invernadero
CO2	Dióxido de carbono
MME	Ministerio de Minas y Energía
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
NVE	The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (Dirección de Recursos Hídricos y Energía de Noruega)
DSO	Distribution system operators (Operadores de sistema de distribución)
ISO	California Independent System Operator (Operador de sistema independiente de California)

Introducción

A lo largo de la historia se ha hecho evidente el fuerte impacto de la industrialización y el desarrollo en el medio ambiente, se han logrado importantes avances tecnológicos que han permitido que la sociedad obtenga una mejor calidad de vida y mejores condiciones para sobrevivir. Sin embargo, para obtener estos resultados se ha impactado al planeta con el aumento de gases de efecto invernadero, que es una condición crítica para garantizar la subsistencia de las especies. De acuerdo al informe sobre la brecha de emisiones 2021 emitido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), las estrategias que se han implementado para la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) han sido insuficientes para cumplir con el objetivo del Acuerdo de París para mantener la temperatura por debajo de 1,2°C para este siglo, al contrario la tendencia va en aumento a 2,7°C, en este sentido se deben tomar medidas para mitigar la brecha de emisiones y contribuir a la reducción del calentamiento global, especialmente en los sectores más emisores como lo es el sector de transporte con combustibles fósiles (UNEP & UNEP DTU, 2021).

En este contexto los organismos a nivel mundial hacen un llamado a incluir en las políticas de cada gobierno incentivos para la inclusión de vehículos eléctricos (VE) y modernización del transporte público, esto con el fin de aminorar los GEI debido al sector transporte. No obstante, la inclusión de vehículos eléctricos puede causar impactos en la red eléctrica amenazando la estabilidad del sistema. Por lo anterior, en el presente trabajo, se plantea proponer estrategias para mitigar los impactos de la entrada de los VE en el sistema eléctrico colombiano. Esto se hace basado en dos objetivos específicos que son, identificar los impactos en países desarrollados e identificar las políticas energéticas más viables para implementar en Colombia de acuerdo a trabajos previos realizados a nivel internacional.

Para desarrollar este trabajo, en primera instancia se hace una revisión de los antecedentes, enfocados en el panorama general de los VE con el fin de identificar el comportamiento que ha tenido en los últimos años, la inclusión de esta tecnología principalmente en Europa y su progreso en Colombia, encontrando que para el caso colombiano los porcentajes de entrada son muy bajos respecto a países europeos. También se hace una revisión a nivel nacional, factores como los niveles de recarga determinados por el Ministerio de Minas y Energía (MME), demanda general de electricidad y su proyección, además de la curva de demanda diaria que presenta el sistema, permiten identificar los posibles impactos en caso de incremento abrupto de la demanda, en este ámbito, se espera que entre 2021 a 2035 la demanda tenga un crecimiento promedio por año entre el 2,28 y el 2,68%.

En el presente trabajo también se mencionan los conceptos asociados al tipo de tecnología en los VE y las partes relevantes para su funcionamiento como lo es la batería y el sistema de recarga, además se describe de manera general el funcionamiento del mercado eléctrico colombiano, en donde se definen las tarifas diarias de energía de acuerdo a la capacidad de generación y la demanda de electricidad. De manera concluyente se puede evidenciar que el precio puede ser una variable impactada en caso de que la demanda aumente debido a la entrada de vehículos eléctricos.

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

Con miras a analizar trabajos previos realizados a nivel nacional e internacional, se realizó una búsqueda de literatura, donde se identificaron que algunas de las variables afectadas por la penetración de VE son las distorsiones armónicas, desbalances en los niveles de tensión, demanda y precios de la energía. De igual manera se revisa de manera general las políticas implementadas en otros países, entre las cuales se destaca la aplicación de precios dinámicos en las tarifas de energía.

Con lo mencionado anteriormente se define el alcance de este trabajo final de maestría, que incluye: reconocer el contexto general de la problemática alrededor de los vehículos eléctricos, identificación y revisión de trabajos previos que se han realizado a nivel internacional y nacional, consolidación de la información y formulación de las estrategias de mitigación mencionadas.

Capítulo 1. Antecedentes

En este capítulo se presenta una descripción del contexto de los vehículos eléctricos, los cuáles permiten aportar significativamente a la reducción de emisiones de dióxido carbono (CO₂), pero que al introducirse de manera masiva a la red eléctrica podrían generar impactos alrededor del mercado eléctrico. Para ello se hace una revisión del panorama de los VE en países desarrollados, la matriz eléctrica y demanda en Colombia, así como los tipos de carga de dichos vehículos.

1.1. Panorama general de los vehículos eléctricos en países desarrollados y Colombia

En la actualidad, los vehículos eléctricos son considerados una alternativa viable para mitigar el cambio climático, aportando positivamente en la reducción de emisiones. Hay cada vez más países incentivando el uso de este tipo de vehículos, algunos de los cuales se han preparado de manera que la infraestructura eléctrica permita su uso masivo; adicionalmente, se han encaminado a políticas energéticas y regulaciones para brindar apoyo tanto a los usuarios como a los operadores de red (Minambiente et al., 2019).

En este contexto, es importante resaltar el trabajo que han realizado países desarrollados, como los que integran la Unión Europea. De acuerdo con la federación de la industria eléctrica (Euroelectric), Europa cuenta con la infraestructura necesaria para la entrada masiva de vehículos eléctricos, indicando que puede soportar más de 100 millones de VE; además, los análisis indican que, con la entrada de los VE, la demanda total de energía eléctrica en Europa crecerá 1% anual para 2030 y en el sector transporte crecerá 11% cada año (Euroelectric, 2020), para lo cual se requieren esfuerzos gubernamentales y empresariales para afrontar estos retos.

El avance que ha tenido Europa en este sentido es impresionante, desde el año 2010 en las matrículas de nuevos vehículos eléctricos han mostrado un crecimiento significativo, pasando de menos de 2 mil vehículos en ese año a alrededor de 700 mil vehículos en 2020. En los últimos 2 años la demanda de VE se ha incrementado vertiginosamente. En la Figura 1, se evidencia que el incremento pasó de 3,5% en 2019 a 11% en 2020 (European Environment Agency, 2022).

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

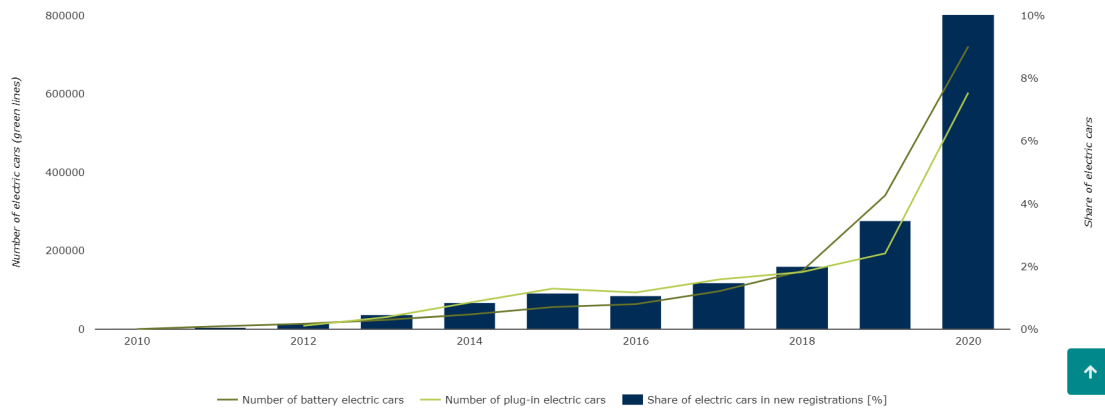


Figura 1 VE matriculados en Europa (European Environment Agency, 2022)

Para incentivar la entrada de los VE se han ideado estrategias tales como exención de impuestos y beneficios fiscales. Países como España, Portugal, Francia, Dinamarca cuentan con políticas de exención de impuestos, otros países como Reino Unido, Irlanda, Noruega, Suecia, han aplicado beneficios fiscales y hay otros países como Alemania, Bélgica, Países Bajos, Austria, que cuentan con ambos incentivos. En la Figura 2 se detallan los incentivos para los países mencionados (Euroelectric, 2020).

EV incentives across Europe

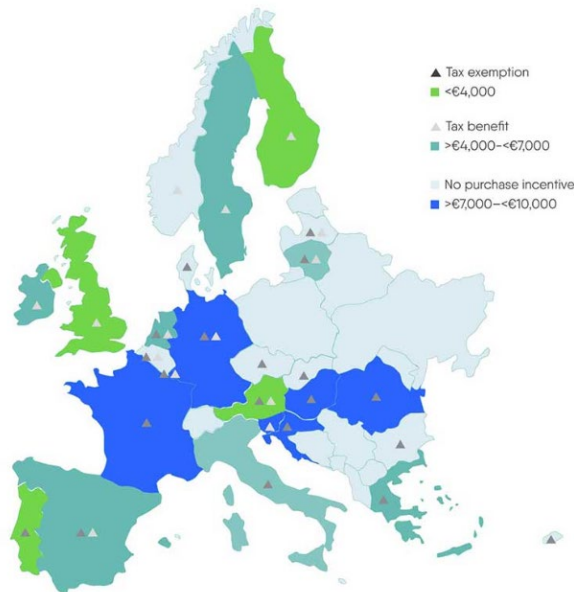


Figura 2 Incentivos para VE en Europa (Euroelectric, 2020)

Es importante tener presente que además del impacto en la demanda con la entrada de los VE, la red sufrirá otros efectos con la conexión masiva de estos equipos, la red podría sufrir variaciones de tensión, pérdida de energía, flujos de energía inestables lo que impactaría el precio de la energía (Euroelectric, 2020).

Con todas las políticas energéticas, incentivos y regulaciones implementados, se espera que para el año 2030 haya 65 millones de VE y que para 2035 entren 65 millones más (Euroelectric, 2020).

A diferencia de Europa en América Latina la entrada de los VE ha sido lenta, para el año 2021 en la categoría de vehículos híbridos y enchufables México lideró la adquisición con 42.447 unidades híbridas matriculadas y 3.492 unidades híbridas enchufables, en segundo lugar, estuvo Brasil con 32.130 y 2.141 respectivamente y en tercer lugar estuvo Colombia con 14.694 vehículos híbridos y 1.712 híbridos enchufables registrados (Revista Semana, 2022). Respecto a la categoría de vehículos de baterías (BEV – siglas en inglés) Colombia lidera el registro en 2021 con 1.296 unidades registradas, seguido de Brasil con 719 unidades y finalmente Argentina reporta 55 unidades (Duitama, 2022).

Para el caso colombiano en el año 2021 se evidenció un incremento de aproximadamente 200% respecto al año anterior, y de acuerdo a las cifras indicadas por la Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (Andemos) para el 2021 se registraron 17.702 unidades, de los cuales 14.694 fueron vehículos de tecnología Hybrid Electric Vehicle (HEV) o híbridos, 1.296 fueron Battery Electric Vehicle (BEV) o de batería y 1.712 fueron Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) o híbridos enchufables (Andemos, 2021a), un crecimiento similar se presentó durante el año 2022, donde se registraron 22.141 híbridos, 3.274 de batería y 2.430 híbridos enchufables para un total de 27.845 vehículos eléctricos que corresponden a un crecimiento total del 57,3% respecto al año 2021. Cabe resaltar que la cifra de los vehículos de baterías tuvo un crecimiento del 152% en el último año (Andemos, 2022). Esta tendencia de crecimiento que ha tenido en los últimos años se logra evidenciar en el la Figura 3.

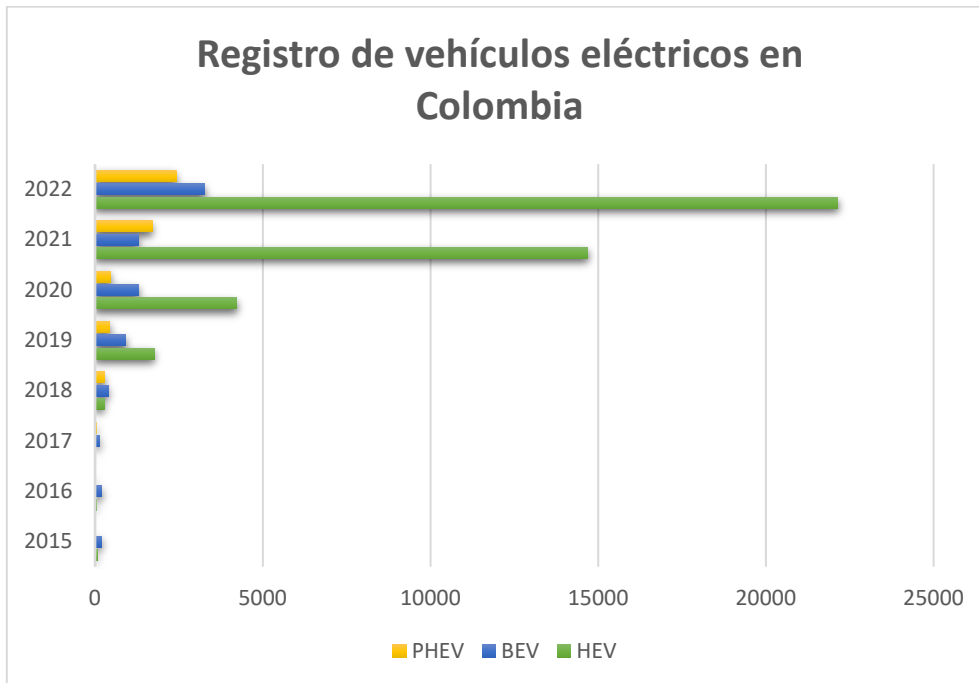


Figura 3 Registro de vehículos eléctricos en Colombia. Fuente: Elaboración propia con datos de (Andemos, 2021)

Para realizar el proceso de carga de los vehículos se han implementado puntos de carga en diferentes lugares del país, según el portal Electromaps Colombia cuenta con 393 puntos de recarga públicos ubicados en 171 ciudades diferentes a lo largo del territorio nacional para el 2021. Cabe aclarar que no están incluidos los cargadores privados (CREG, 2021a).

Colombia también cuenta con la implementación por parte de algunos operadores de red de medidores inteligentes, los cuales permiten que las concesionarias actúen remotamente en el corte y conexión de energía eléctrica, así como en el monitoreo en tiempo real del consumo de energía de la unidad consumidora. Medidores inteligentes también permiten la tarifación de acuerdo con el horario, el control de la micro generación (del consumidor para la red) y la caracterización de los perfiles de consumo con la introducción de nuevas aplicaciones (vehículos eléctricos, baterías, etc.) (NEC DE COLOMBIA S.A., 2022).

Para los dispositivos de medición, Colombia se ha fijado una meta actual de medida inteligente de energía eléctrica para 5,2 millones de colombianos, teniendo en cuenta que a la fecha hay instalados 240.000 medidores, y se pretende para el 2030 tener una cobertura de 75% de la población (Portafolio, 2022).

1.2. Tipos de carga en los vehículos eléctricos

De acuerdo a las definiciones del Ministerio de Minas y Energía, existen 3 niveles de carga, nivel 1 o carga lenta es aquel que utiliza un tomacorriente estándar de corriente alterna (CA) y su potencia nominal es inferior a 3.7 kW; el nivel 2 o carga semi-rápida, es aquel que requiere la instalación de una estación de carga con conexión a CA cuya potencia nominal se encuentra entre 3,7 kW a 22 kW; y el nivel 3 o carga rápida es aquel que consiste en una carga rápida con conexión a corriente alterna o corriente directa (CD), su potencia nominal es superior a 22 kW (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2020). Es importante notar que los niveles de carga usados en tendrán diferentes impactos en la red eléctrica.

1.3. Demanda de electricidad en Colombia

Como se evidencia en la Figura 4, la matriz eléctrica colombiana podría ser considerada una de la más limpias, ya que está compuesta mayormente de generación hidráulica con un porcentaje de la capacidad instalada de 68,3%, la energía térmica con 30,7% y a menores escalas: la energía solar (0,1%), la cogeneración (0,9%) y la eólica (0,1%) (Acolgen, 2022).

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

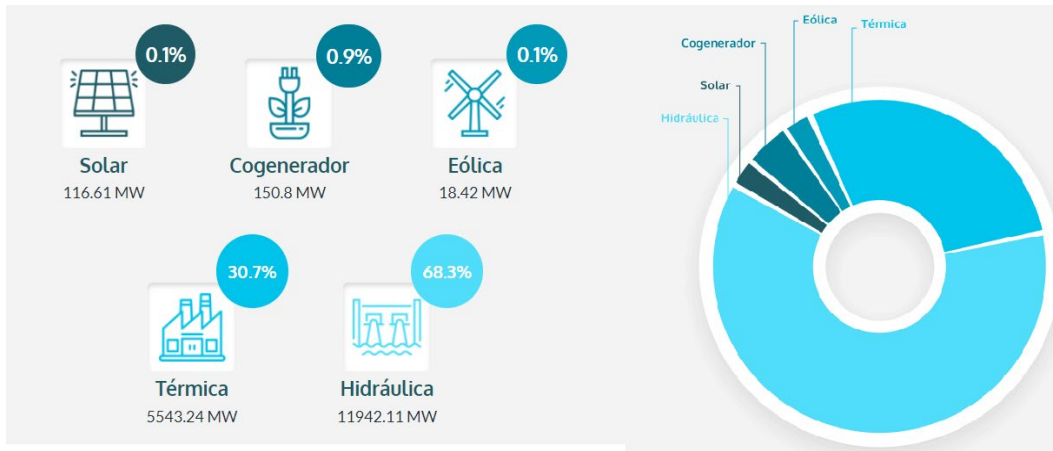


Figura 4 Capacidad instalada en Colombia (Acolgen, 2022)

Con la descripción anterior es posible identificar que la matriz de generación es fuertemente dependiente de las condiciones climáticas ya que el mayor porcentaje es aportado por fuentes hídricas que varían de acuerdo con fenómenos naturales como El Niño o La Niña, esto hace variable la generación hidráulica y la vuelve vulnerable ante un incremento abrupto en la demanda. (Climate Centre, 2021)

Es importante precisar que la demanda está dividida por sectores, donde se incluyen el sector residencial, comercial, industrial y otros. Dentro de esta distribución el mayor consumo lo tiene el sector residencial con un 39% de participación para el año 2020 (UPME, 2020b), de esta manera se vuelve crítico considerar la entrada de nuevas cargas en este sector como la proveniente de los vehículos eléctricos.

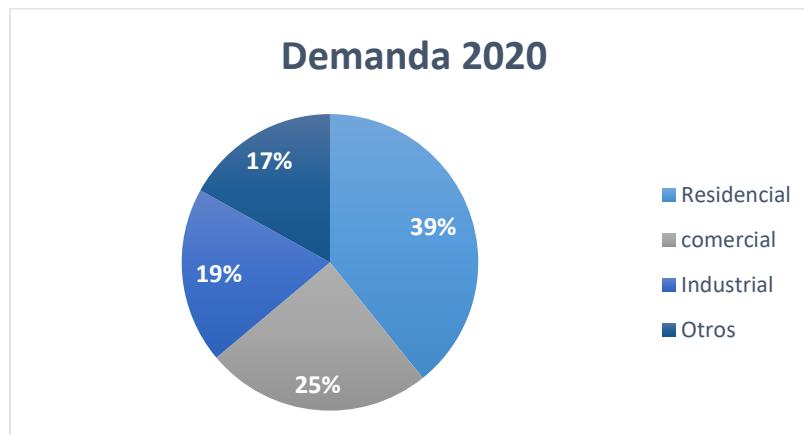


Figura 5 Demanda 2020. Elaboración propia con datos de (UPME, 2020b)

De acuerdo con datos de XM para el año 2021 la demanda total fue de 74.116,91 GWh, lo que representó un incremento de 5,51% respecto al año 2020, esto debido en gran parte a la

reactivación económica postpandemia, alcanzando su máximo histórico en los últimos 10 años (XM, 2021b).

Según la proyección de demanda se espera que la tendencia creciente se mantenga, se prevé que entre 2021 a 2035 se tenga un crecimiento promedio por año de entre el 2,28 y el 2,68% (UPME, 2020c). Esto muestra la tendencia de esta variable a aumentar año a año para lo cual la infraestructura de red eléctrica debe estar preparada, teniendo también en cuenta que el comportamiento de la demanda varía según el día de la semana y la hora. Para el caso colombiano los picos de demanda se presentan en dos puntos, entre las 11:00 am y 01:00 pm y entre las 06:00 pm y 09:00 pm, siendo este último el punto de mayor consumo de potencia eléctrica en el país tal y como se puede evidenciar en la Figura 6 (XM, 2021a).

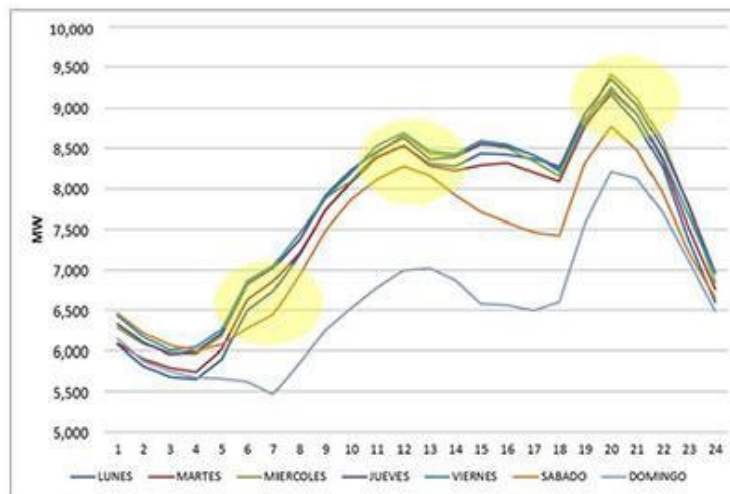


Figura 6 Curva de demanda promedio en Colombia (XM, 2021a)

La tendencia de crecimiento en la demanda eléctrica puede representar un riesgo, ya que la infraestructura eléctrica colombiana presenta una dependencia hidroeléctrica y ante escenarios de sequías prolongadas podría disminuir los niveles de los embalses y desestabilizar la seguridad del suministro. Se han realizado estudios y simulaciones encontrando que, en situaciones como daños en las plantas de respaldos y sequías prolongadas, o altas demandas o retrasos en la construcción de plantas, el margen entre la oferta y la demanda tiende a ser cero y por lo tanto se podría conducir a un mayor riesgo de apagones (Zapata et al., 2018).

1.4. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó de manera general los aspectos importantes para el desarrollo del presente trabajo, haciendo énfasis en el desafío que representa para Colombia la entrada de vehículos eléctricos y las condiciones actuales de la infraestructura eléctrica colombiana y el mercado de energía. Bajo el contexto planteado se hace necesario identificar los impactos que pueda generar la entrada masiva de VE y plantear estrategias para mitigarlos. En el siguiente capítulo se presenta el marco teórico usado en este trabajo final.

Capítulo 2. Marco teórico

Dentro del marco teórico se presentan las definiciones y conceptos de temas relevantes para el presente trabajo, se tiene en cuenta todo el avance tecnológico de los vehículos eléctricos en tanto a la clasificación, las partes fundamentales como lo es la batería, el tipo de carga y el sistema de gestión de batería, además se da una definición del funcionamiento del mercado eléctrico, teniendo en cuenta las variables que pueden verse afectadas con la entrada de los VE al sistema.

2.1. Tecnología de vehículos eléctricos

El desarrollo que ha tenido los VE en los últimos años ha sido muy grande, en la actualidad existen diferentes tipos como lo son, híbridos (Hybrid Electric Vehicle HEV), híbridos enchufables (Plug-in Hybrid Electric Vehicle PHEV) de extensión de rango (Extended Range Electric Vehicle EREV), eléctricos puros (Battery Electric Vehicle BEV), vehículos microhíbridos (Mild Hybrid Electric Vehicle MHEV) y Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) que son los vehículos que utilizan pilas de hidrógeno como fuente de energía (Sanchez, 2021).

El vehículo híbrido HEV cuenta con un motor de combustión y uno eléctrico, este VE puede trabajar en serie, paralelo o mixto y puede ser recargado automáticamente gracias al sistema de frenado regenerativo que posee. El vehículo eléctrico enchufable PHEV también cuenta con 2 motores, uno eléctrico y otro de combustión, y permite una autonomía de 25-50 km, como su nombre lo indica el método de recarga de la batería se hace conectándolo a la red eléctrica. Los VE de extensión de rango EREV, al igual que los anteriores cuenta con 2 motores, a diferencia de los híbridos, estos autos usan el motor eléctrico para producir el movimiento mientras que el motor de combustión es usado para producir la energía de alimentación del motor eléctrico, también se recarga a través de la red eléctrica. Finalmente, el vehículo eléctrico puro solo cuenta con un motor eléctrico y se recarga a través de la red eléctrica, dependiendo de la tecnología de las baterías estos autos pueden tener mayor o menor autonomía (Enel Perú, 2022).

El vehículo microhíbrido (MHEV) cuenta con un motor eléctrico tiene una función limitada pues solo se usa como apoyo en el arranque, la parada o en picos de demanda para conseguir un pequeño incremento del par o de la potencia según las necesidades del vehículo, pero no es capaz de mover el vehículo sin la ayuda del motor principal (Sanchez, 2021).

En general los vehículos eléctricos cuentan con 3 componentes fundamentales para su funcionamiento y que son relevantes para el presente trabajo: las baterías, el sistema de gestión de baterías y el método de recarga.

Existen muchos tipos de baterías que se usan en la fabricación de los VE, algunas de ellas son: de plomo ácido, níquel cadmio, níquel-MH, Ion-litio, níquel-cobalto-manganeso (NCM) y las baterías

basadas en litio fosfato de hierro (BYD). Las baterías de plomo ácido han dominado el mercado por su bajo costo y madurez tecnológica, sin embargo, su baja densidad energética y elevado peso las atrasa respecto a otras tecnologías. Las baterías de níquel-cadmio tienen bastantes ventajas ya que cuentan con una alta durabilidad, pueden llegar a descargas profundas sin sufrir daño y es posible reciclarlas, sin embargo, su alto costo las hace poco competitivas para uso en VE. Las baterías de níquel-MH cuentan con una buena densidad energética, permiten varios ciclos de carga y descarga, pueden operar en un rango amplio de temperatura y son reciclables. Las baterías de Ion-litio que son las más comunes en estos vehículos, poseen una densidad de energía y potencia específicas y un voltaje de la celda superior al del resto de baterías. Adicionalmente permiten la posibilidad de reciclaje y no requieren un alto mantenimiento, su peso es muy ligero, la descarga es lenta y el tiempo de recarga es relativamente rápido, lo que las vuelve la opción más viable (Sanchez, 2021).

La batería NCM es un tipo de batería de iones de litio, utiliza níquel, cobalto y manganeso como cátodo, ofreciendo una alta capacidad energética; sin embargo, no son tan seguras en caso de accidente (Oscar Magro, 2020). Por último, la batería BYD, basada en la química de litio fosfato de hierro, en la que se eliminan los módulos de celdas para dar paso a las hojas, las cuales se colocan en contacto directo, tampoco posee carcasa reduciendo cables y terminales casi del 100%, lo que en efecto reduce el peso y aumenta su eficiencia (Daniel Torres, 2021).

El sistema de gestión de baterías o BMS por su descripción en inglés, es un componente de seguridad integrado en los VE que se encarga del control de descarga y carga, determinación del estado de carga actual, determinación del estado de salud, balanceo de carga, grabación y comunicación. Por medio de la determinación de la carga actual se puede indicar el tiempo restante de operación del vehículo, lo cual es una alarma para el usuario. El cálculo de estado de salud se realiza comparando la capacidad actual total de la batería respecto a la capacidad total cuando se compra nuevo (Evexpert, 2022).

Como se mencionó anteriormente los vehículos eléctricos requieren ser recargados continuamente para operar todo su sistema. De manera general se podría decir que existen 3 tipos de carga: carga conductiva, carga inductiva y cambiando la batería. El método conductivo usa una conexión física o cableada para conectarse a través de un enchufe a la red eléctrica, el método inductivo no requiere ninguna conexión física, lo hace usando transmisión electromagnética que induce una corriente en los vehículos y esto les permite realizar la carga, este método no es tan común ya que representa un costo más alto respecto al primero y el último método mencionado se basa en intercambiar baterías, es decir, cuando se encuentren totalmente descargadas se puede ir a una estación de servicio a reemplazar por unas nuevas que estén cargadas; para que este intercambio se pueda ejecutar las baterías entre fabricantes deberían ser compatibles y estandarizadas para que cumplan con las mismas dimensiones, sin embargo, como esto podría ser una limitante para el diseño de los VE la mayoría de fabricantes tienden a rechazar este método (Dericioglu et al., 2018).

De acuerdo a lo anterior es posible evidenciar que el método más efectivo y más usado es el método conductivo, para este caso, en Colombia se cuenta con una clasificación de carga en 3 niveles, nivel 1 o carga lenta (menor a 3.7kW), nivel 2 o carga semirápida (entre 3.7kW y 22 kW) y nivel 3 o carga rápida (mayor a 22kW) (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 2020).

2.2. Panorama general del mercado de electricidad en Colombia

El mercado de energía en Colombia está dividido en dos segmentos, mercado regulado que incluye usuarios residenciales, comerciales e industriales con demandas menores a 55 MWh o 0,1 MW, y donde el servicio es contratado y prestado por empresas de comercialización; en este mercado la tarifa es regulada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Por otra parte, está el mercado no regulado, donde participa la industria y otros usuarios que superan los consumos anteriormente mencionados. Este último es atendido por los comercializadores a precios libremente acordados (Superservicios, 2020).

El Mercado de Energía Mayorista (MEM) se divide en dos secciones donde se puede transar la energía, esto es a través de contratos bilaterales y la Bolsa de energía, en esta última las operaciones o transacciones se hacen para el día siguiente, es decir; los generadores envían sus ofertas al operador, en este caso XM, indicando la cantidad de energía y precio por kWh que tienen disponibles para la venta y se ordena de menor a mayor hasta que se supla toda la demanda que se requiera en el siguiente día. El precio final lo da el último generador que complete toda la demanda (Larotta David, 2021), con esta información XM establece el despacho para cada hora donde se utilizan los recursos de menor precio cumpliendo con las condiciones límites del sistema: requisitos de reserva rodante, inflexibilidades de las plantas y las restricciones propias del sistema.

Cabe notar que pueden surgir eventos en el sistema que obligan a ajustar el programa inicial, ya sea por la salida de unidades, el aumento de disponibilidad de generación por entrada de unidades en mantenimiento, los cambios de los límites de transferencias ocasionados por modificaciones en la configuración de la red, entre otros. Los ajustes al programa inicial se denominan Redespacho (UPME, 2004).

Entendiendo la dinámica del mercado de energía es posible aclarar que, ante un incremento de la demanda, si se mantiene la misma capacidad instalada, se verá fuertemente afectado el precio de bolsa, el cual en términos generales es el precio de oferta del generador más costoso que se requiera para satisfacer la demanda.

2.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se definieron teóricamente los aspectos relevantes del presente trabajo, los cuales estuvieron enfocados en las diversas tecnologías de los vehículos eléctricos y el funcionamiento del mercado eléctrico colombiano, dichas definiciones van a permitir comprender mejor los impactos que se pueden generar en el sistema debido a la penetración de los VE. En el próximo capítulo se hará una revisión de los trabajos previos que se han realizado en torno a los vehículos eléctricos, específicamente en los impactos que se han generado en el sistema eléctrico debido a la entrada de estos. Se considerarán trabajos tanto nacionales como internacionales.

Capítulo 3. Revisión de literatura

Se realizó una búsqueda de literatura en la base de datos Scopus, con la ecuación TITLE ((electric AND mobility)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE , “re”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , “ENER”)). A partir de la cual se encontraron 127 documentos, de los cuales se analizaron 3 temáticas relacionadas al tema desarrollado en el presente trabajo y que mencionan aspectos importantes a nivel internacional, también se realizó una búsqueda en Google académico y documentos oficiales del estado colombiano para complementar la revisión de trabajos a nivel Latinoamérica, para ello se usaron los mismos criterios de búsqueda.

De los documentos obtenidos, se muestra a continuación 11 documentos que permiten ordenar de manera clara la revisión de literatura.

Autor	Año	Título
Dulau & Bica	2020	Effects of electric vehicles on power networks
Gupta et al	2021	Spatial analysis of distribution grid capacity and costs to enable massive deployment of PV, electric mobility and electric heating
Ignacio Doña	2020	Desarrollo de algoritmos de gestión de carga para vehículos eléctricos y evaluación de su impacto en redes de distribución
Bedoya Vélez	2017	Efectos del desarrollo tecnológico de las baterías en el Sistema Interconectado Nacional de Colombia.
Torres	2019	Impacto producido en la calidad de potencia de una red de distribución eléctrica residencial debido a la recarga de vehículos eléctricos
UPME	2020	Apoyo al despliegue de tecnologías de redes inteligentes en Colombia
Minambiente et al.	2019	Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica
República de Colombia	2019	LEY 1964 DE 2019

Congreso de la República	2021	Ley 2099 de 2021
MINENERGIA	2021	Resolución 40362 de 2021 MME
CREG	2020	Estrategias para la implementación de esquemas de señales de precios y cargos horarios a los usuarios finales en el SIN, para ser utilizados en programas de respuesta de la demanda

Tabla 1 Autores relevantes en revisión de literatura

En la siguiente sección se hace una reseña de los hallazgos de algunos de los estudios que se mostraron en la Tabla 1 acerca de los efectos de los vehículos eléctricos en las redes eléctricas y las estrategias implementadas.

3.1. Efectos de los vehículos eléctricos en las redes eléctricas

Es evidente que la entrada de los vehículos eléctricos de manera masiva en los diferentes sistemas tendrán un impacto en la red eléctrica, se han realizado varios estudios y revisiones alrededor del tema, donde se analiza los efectos de los VE en cuanto al nivel de voltaje, demanda de potencia y pérdidas de energía para diferentes niveles de penetración y escenarios de demanda de energía, en otros estudios se analiza el impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución de energía con respecto a la coincidencia de la oferta y la demanda de energía, respectivamente, las posibles violaciones de los límites de voltaje, la calidad de la energía y el desequilibrio de fase (Dulau & Bica, 2020).

En el trabajo realizado por Dulau y Bica (2020) se analizan varios casos de estudio que incluyen el impacto del nivel de tensión, la demanda de potencia y las pérdidas de potencia activa para diferentes niveles de penetración y escenarios de demanda de potencia de los vehículos eléctricos. Se plantean diferentes escenarios de carga rápida (50 kW) y lenta (22 kW) en los horarios a partir de las 16:00, a partir de las 23:00 y en diferentes horas. De acuerdo a los resultados obtenidos por los autores, en todos los escenarios analizados se tiene que: “el nivel de tensión disminuyó, pero se encuentra dentro de los límites regulados (ej. El nivel de tensión más bajo fue en el escenario 2 (carga de 50 kW a partir de las 16:00), a las 16:00 horas, 98,59% de la tensión nominal de barra en comparación con 99,05% para el caso sin VE en el mismo escenario). En los escenarios de carga rápida, la disminución del nivel de voltaje fue mayor que la carga regular debido a la alta demanda de energía en un período de tiempo más corto. La comparación de las pérdidas de potencia depende de la demanda de potencia en los escenarios respectivos. Entonces, cuando la demanda de energía del VE en carga rápida es alta, las pérdidas son mayores en comparación con la carga normal, mientras que, si la demanda de energía del VE en carga rápida es baja, las pérdidas son menores en comparación con la carga normal” (Dulau & Bica, 2020).

Gupta y otros (2021) analizaron el caso de Suiza basados en 3 elementos en la red, el despliegue fotovoltaico, la entrada de bombas de calor y la entrada de los vehículos eléctricos, en un horizonte de tiempo de 2035-2050, considerando el escenario del menor esfuerzo y el escenario de esfuerzo más agresivo. Para el primer caso se plantea que: “Para 2035, encontramos que el 5,8% de las conexiones domiciliarias sufren violación de tensión y alrededor de 222 km de líneas se sobrecargan por despliegue de cargadores de VE (865 MW), frente a solo el 3,6% y 111 km para bombas de calor (BC) (100 MW) y el 3,8% y 19 km para fotovoltaica (299 MW), respectivamente”. Adicionalmente indican que, ante el despliegue de los vehículos eléctricos, el 39% de las estaciones transformadores deben ser actualizadas. Para el segundo caso donde aplica un esfuerzo agresivo, los autores muestran los costos que implican el despliegue de energía solar fotovoltaica (EFV), BC y VE, además indican que para el 2035 que los vehículos eléctricos provocan el 9% de las violaciones de tensión en conexiones domiciliarias (Gupta et al., 2021).

La tesis realizada por el autor Agustín Ignacio Doña, enfocada en el sistema eléctrico de Chile, también coincide en que la entrada de VE tendrá un fuerte impacto en la demanda, además hace énfasis en la necesidad de implementar estrategias de carga con el fin de evitar el crecimiento innecesario de la capacidad instalada para suplir los picos de demanda (Doña, 2020).

Dentro del marco nacional, se destaca el trabajo realizado por Bedoya (2017), quien plantea los escenarios considerando la penetración de VE y sistemas fotovoltaicos, este trabajo menciona 4 importantes casos para el año 2031, el primero consiste en la participación de un 25% de VE en el parque automotor colombiano, el cual es recargado parcialmente en horas pico junto con la participación del 25% de sistemas fotovoltaicos del total de las viviendas, el segundo caso cuenta con los mismos porcentajes de participación pero los VE son recargados en horas valle, el tercer caso considera únicamente el 7% de vehículos, recargados en horas punta junto con una participación de 5% de casas con sistemas fotovoltaicos y el último caso maneja los mismos porcentajes pero con la recarga realizada en horas valle. Bajo lo planteado anteriormente, el autor concluye que el mayor cambio en margen de capacidad podría darse en el caso 1 seguido del caso 3, pues en estos escenarios se considera la recarga en horas punta lo que implica que el sistema debe contar con una mayor capacidad instalada para suplir la demanda en esas horas específicas (Bedoya Vélez, 2017).

En el trabajo desarrollado por Torres (2019), se analiza el efecto sobre la calidad de la potencia ante distintos casos de penetración de VE en un sistema de baja tensión de un conjunto residencial, se considera un nivel máximo de 8 VE, para los escenarios del 25, 50, 75 y 100% del total de VE. De acuerdo al modelo aplicado y resultados obtenidos, se considera despreciable el efecto sobre el factor de potencia y las perturbaciones en el nivel de tensión, mientras que el impacto en las distorsiones armónicas, los desbalances de tensión y demanda fue realmente significativo (Torres, 2019).

Según el informe desarrollado por la UPME en 2020 se tiene que: “El aumento en vehículos eléctricos tiene un impacto en la curva de carga, en promedio, aproximadamente en 500 MW el pico. Por lo tanto, es importante promover cambios en el comportamiento en la carga de vehículos eléctricos, para reducir el impacto que tendrán las cargas altas de los vehículos eléctricos. A medida

que va aumentando la demanda industrial y comercial que se proyecta entre los años 2040 y 2050, su participación en una respuesta en la demanda tiene un valor importante en reducir los picos en las redes de distribución de más de 1 kV” (UPME, 2020a).

3.2. Políticas energéticas

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el desarrollo de este trabajo es la implementación de políticas energéticas que han realizado los diferentes países para regular la entrada de vehículos eléctricos.

Dentro de la revisión de literatura que realizó Hoarau y Pérez (2018) indican que: “En los sistemas de energía, la regulación y las políticas tienen un gran impacto en el desarrollo tecnológico. Esto hace que sea crucial identificar las herramientas y los marcos regulatorios y políticos apropiados para explotar de manera eficiente las potencialidades del acoplamiento VE/EFV”, se mencionan por ejemplo la fijación de precios dinámicos que permite una mayor sinergia con la curva real de demanda, también incluye las condiciones de entrada de estas tecnologías, motivando a que las diferentes regulaciones del sistema eléctrico apunten a la facilidad de inclusión de estos vehículos, adicionalmente se plantea la inclusión de beneficios o subsidios por parte del gobierno para incentivar el uso de estos VE, esta última estrategia ya es usada en diferentes países (Hoarau & Perez, 2018).

Para el caso colombiano han sido pocas las estrategias o políticas para la inclusión de la tecnología de VE en el país, existen algunos incentivos tributarios y exenciones, sin embargo, se evidencian ciertos vacíos normativos en temas como construcción de la infraestructura, esquemas tarifarios y criterios técnicos necesarios para la operación, además de la falta de planes de desarrollo territorial que permitan la integración de estas tecnologías (Minambiente et al., 2019).

En temas normativos se ha evidenciado en los últimos 3 años, el desarrollo de resoluciones y decretos por parte del Ministerio de Minas y Energía y la Comisión de Regulación de Energía y Gas, dentro de los cuales se destaca:

LEY 1964 DE 2019: por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones (República de Colombia, 2019).

LEY 2099 DE 2021: por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones (Congreso de la República, 2021).

Resolución 40362 de 2021 Ministerio de Minas y Energía: establece los requisitos de aplicación del incentivo a la movilidad eléctrica señalado en el artículo 49 de la Ley 2099 de 2021 (MINENERGIA, 2021b).

Circular CREG 001 de 2021 Informe: Estrategias para la implementación de esquemas de señales de precios y cargos horarios a los usuarios finales en el Sistema Interconectado Nacional, para ser utilizados en programas de respuesta de la demanda (CREG, 2020).

3.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se realizó una revisión general de literatura, enfocada en trabajos previos acerca de los impactos de los VE en los sistemas eléctricos de algunos países y las políticas energéticas orientadas a esta tecnología. Se logró evidenciar que en la mayor parte de los estudios se ha encontrado afectación de las variables de tensión, demanda y la calidad de la potencia.

Teniendo en cuenta la revisión de literatura, antecedentes y marco teórico, en el siguiente capítulo se plantean los objetivos del presente trabajo final de maestría.

Capítulo 4. Objetivos y Metodología

Basado en el panorama descrito en los capítulos anteriores y habiendo analizado los puntos clave para el desarrollo de este trabajo, se plantean los siguientes objetivos:

4.1. Objetivos

4.1.1. Objetivo General

Proponer estrategias para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sistema eléctrico colombiano.

4.1.2. Objetivos específicos

Identificar los impactos de la entrada de los VE en los sistemas eléctricos a nivel internacional.

Caracterizar las políticas energéticas adoptadas por diferentes países para mitigar los impactos de la penetración de los VE en las redes eléctricas

Caracterizar estrategias que mitiguen los impactos de la penetración de los VE en Colombia de acuerdo con los trabajos previos revisados.

4.2. Metodología

Este trabajo tiene un enfoque aplicado y organizado de tal manera que busca realizar un análisis de los impactos en el sistema eléctrico colombiano generado por la penetración de los VE en Colombia y proponer estrategias para mitigarlos. A continuación, se muestra la metodología en función de la consecución de los objetivos específicos y objetivo general:

- Identificar los impactos de la entrada de los VE en los sistemas eléctricos a nivel internacional
 1. Elegir los países que tengan un mayor avance en el tema de VE, para realizar el estudio sobre ellos.
 2. Realizar una revisión de literatura y determinar cuáles son las variables del sistema eléctrico que pueden ser influenciadas por la entrada de VE
 3. Categorizar los tipos de impactos

- Caracterizar las políticas energéticas adoptadas por diferentes países para mitigar los impactos de la penetración de los VE en las redes eléctricas

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

1. Realizar una revisión de literatura en relación con las políticas energéticas existentes en los países con mayor avance en el tema.
 2. Agrupar en diferentes tipos las políticas energéticas alrededor del tema, en relación con las necesidades de cada país.
 3. Describir los efectos que ha tenido la implementación de dichas políticas energéticas.
- Caracterizar estrategias que mitiguen los impactos de la penetración de los VE en Colombia de acuerdo con los trabajos previos revisados.
 1. Realizar una revisión de las políticas energéticas existentes alrededor del tema en Colombia.
 2. Identificar los autores colombianos con aportes más significativos relacionados con la entrada de VE en el país.
 3. Comparar el comportamiento internacional respecto a la realidad colombiana.
 - Objetivo general: Proponer estrategias para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sistema eléctrico colombiano.
 1. Analizar los impactos en el ámbito nacional
 2. Proponer las estrategias de acuerdo con los análisis resultados de este trabajo

La metodología planteada se plasma en los siguientes capítulos, los cuales están organizados de la siguiente manera. En el Capítulo 5 se presenta el desarrollo del objetivo específico 1, haciendo énfasis en los impactos que ha tenido el sistema eléctrico de algunos países europeos y el Estado de California los cuales son considerados pioneros en asuntos relacionados a vehículos eléctricos. El capítulo 6 presenta las estrategias más representativas que han implementado o sugerido de cada uno de los países para mitigar los impactos debido a la penetración de los vehículos eléctricos. El capítulo 7 muestra las regulaciones y estrategias que se han pretendido implementar en el sistema colombiano a través del Ministerio de Minas y Energía, y la Comisión de Regulación de Energía y Gas y finalmente se plasman de manera concluyente las iniciativas que se pueden proponer para Colombia, basado en el análisis de los capítulos previos.

Capítulo 5. Identificación de los impactos generados en los sistemas eléctricos a nivel internacional con la entrada de VE

5.1. Selección de países

Considerando que existen países desarrollados que han tenido gran avance en el tema de inclusión de vehículos eléctricos tal y como se logró ver en los capítulos anteriores, se optó por analizar el comportamiento de los sistemas eléctricos ante la entrada de los VE en dichos países. Se tomaron dos criterios para de selección de los países a analizar. Uno de ellos es el mayor porcentaje de venta de vehículos eléctricos respecto a total de venta de vehículos en cada país en los últimos 3 años (2019-2021), y el otro criterio es la trayectoria que tenga un país (o estado) en políticas de inclusión de vehículos eléctricos, estos dos criterios son indicativos de la madurez de la penetración de los vehículos eléctricos en un país.

El periodo de tiempo de 3 años para el primer criterio se seleccionó considerando que en este lapso se han registrado las mayores tasas de penetración de vehículos eléctricos.

5.1.1. Criterio 1

Basado en lo anterior y de acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (IEA – siglas en inglés), la lista los países con mayor porcentaje de venta de vehículos eléctricos para el año 2021 en Europa la encabeza Noruega, seguido de Islandia, Suecia y Dinamarca (IEA, 2022), para el año 2020 Noruega alcanzó una cuota de ventas récord del 75 %, un tercio más que en 2019; en Islandia superó en 50%; el 30% en Suecia y alcanzó el 25% en Países Bajos (IEA, 2021). Las estadísticas para el año 2019, indicaron que la mayor participación de ventas totales de automóviles se tuvo en Europa, específicamente en Noruega con un 56% e Islandia con un 22%. En los Países Bajos, la cuota de mercado de los coches eléctricos aumentó al 15% en 2019 (IEA, 2020).

Según lo anterior es posible evidenciar que los países europeos son los que tienen mayor avance en el tema de movilidad eléctrica, en el top 7 europeo con más del 25% de venta de vehículos eléctricos están: Noruega, Islandia, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Países Bajos y Alemania, por tanto, se realizará una búsqueda detallada en cada uno de estos países para identificar las variables eléctricas que se han visto afectadas al tener más autos eléctricos en el sistema de distribución.

5.1.2. Criterio 2

En el estado de California desde 1990 se adoptó una norma del “Zero emission vehicle (ZEV)” donde se planteó la venta del 2% de vehículos livianos sin emisiones de contaminantes para 1998, más adelante esa cuota fue aumentada a 5% y luego a 10% (Collantes, 2006). Desde este contexto se podría decir que California lleva incursionando en el mercado de vehículos eléctricos más de 30 años, con lo cual se podría considerar que es un estado con suficiente trayectoria en materia de VE.

Según los criterios establecidos, los países en los que se va a profundizar en los impactos producidos por la penetración de los VE en los sistemas eléctricos son: Noruega, Islandia, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Países Bajos, Alemania y el estado de California.

5.2. Impactos en Noruega

El aumento significativo de la demanda puede generar efectos en la actual red de distribución, para el caso de Noruega y de acuerdo con la Dirección de Recursos Hídricos y Energía de Noruega (NVE – siglas en inglés) se tiene que un aumento promedio en la carga residencial de 5 kW sobrecargaría más del 30 % de los transformadores de distribución en Noruega (NVE, 2016). Además, la carga de vehículos eléctricos puede afectar negativamente la calidad de la energía y requerir actualizaciones o rediseño de las redes de distribución (Rizwan Khalid et al., 2019).

De acuerdo a los datos reportados por la NVE en el año 2016, el perfil de demanda diario presentaba un notable incremento al cargar VE en horas pico, de aproximadamente 0,5 kW en promedio, lo que representaba un reto para mantener confiable la red de distribución (NVE, 2016). Este incremento será más evidente en temporada de invierno donde el consumo es mayor debido al uso de calefactores.

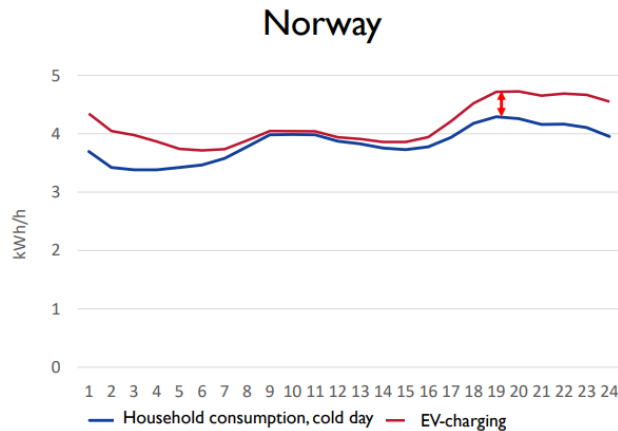


Figura 7 Consumo medio de los hogares en un día frío, incluido el consumo total de electricidad noruega 2016, fuente:(NVE, 2016)

La curva de demanda presentada en la Figura 7 muestra características similares a la de Colombia, donde las horas pico se dan entre las 6pm y 8pm, la penetración de vehículos eléctricos aumentará este pico de demanda, ya que es la hora con mayor probabilidad de carga.

El aumento de la demanda implicará el impacto de otras variables como lo es el precio de la energía de la energía, esto debido a que al tener mayor número de VE, aumentará la demanda de energía, por lo tanto habrá una afectación en los transformadores, los cables y demás, lo que conducirá a una mayor inspección y mantenimiento a la red o incluso inversión si se requiere modernizar la red, el costo de dicha inversión aumentará el capital social de los operadores de sistema de distribución

(DSO- siglas en inglés) y la regulación permite que el DSO cobre una tarifa más alta para cubrir los nuevos costos (Wangsness & Halse, 2021).

Según la Agencia Internacional de Energía, el consumo total de electricidad para vehículos eléctricos en los países nórdicos durante el año 2017 fue de 500 GWh, cuyo valor estuvo mayormente concentrado en Noruega, aproximadamente el 71%. En la Figura 8 se puede apreciar la distribución del consumo en los países nórdicos para ese año.

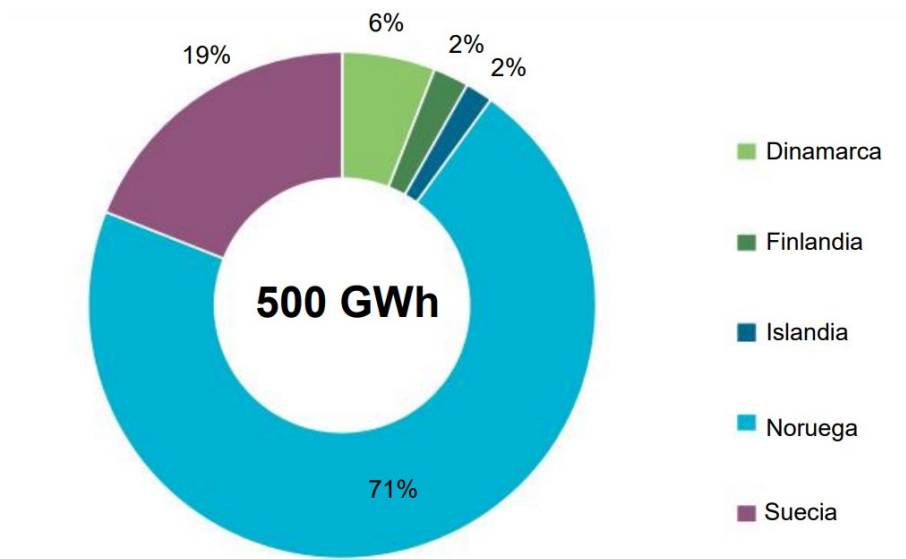


Figura 8 Consumo de electricidad para VEs en países nórdicos 2017, fuente: (International Energy Agency, 2018)

Adicional a la demanda y el precio, la calidad de la tensión se ve afectada por el aumento del consumo. Al aumentar el consumo, la corriente de línea aumenta, si se aumenta la corriente el voltaje a través de la línea caerá de acuerdo con la ley de Ohm de manera que el voltaje del generador y el voltaje de la carga serán diferentes (Wangsness & Halse, 2021).

5.3. Impactos en Islandia

Islandia es uno de los países que se ha sumado a los objetivos de desarrollo sostenible y acciones de cambio climático, dentro de las cuales están las reducciones de GEI en el sector transporte, adoptando políticas para la adquisición de vehículos eléctricos; esto lo ha convertido en el segundo país con mayor tasa de penetración de VE. Como en el caso anterior, la integración de estos VE a la red implica algunos efectos en el sistema, como lo es la adición a la carga eléctrica total demandada (Kevin Joseph Dillman et al., 2021).

La Figura 9 ilustra la curva de demanda diaria en Islandia, para los meses de enero y julio. Del mismo modo que Noruega en época de invierno el consumo aumenta (curva amarilla) por el uso de la red de calefacción, por lo tanto, la demanda en época de invierno será aún mayor con la entrada de vehículos eléctricos.

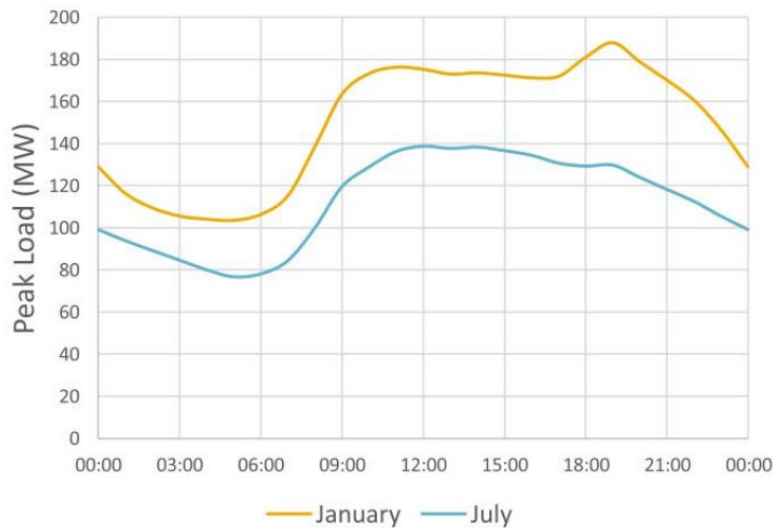


Figura 9 Curva de demanda diaria Islandia, fuente:(Kevin Joseph Dillman et al., 2021)

Según el trabajo realizado por Apiyo (2019), el aumento en la penetración de VE aumenta el consumo; por lo tanto, se producirá una disminución de los voltajes, como alternativa para contrarrestar este impacto, el autor propone instalar condensadores para aumentar los voltajes durante condiciones de carga pesada, y para el evidente aumento de demanda se plantea reforzar la red actualizando los equipos en el sistema, como utilizar conductores de mayor admitancia y usar transformadores con capacidades más altas, además de la gestión de la demanda de la red ya que podría usarse para reducir la demanda pico cambiando parte de la energía consumida durante estas horas a horas de carga fuera de pico (Apiyo, 2019).

5.4. Impactos en Suecia

Al igual que los otros países nórdicos, Suecia le ha apostado a la reducción de gases de efecto invernadero a través de la electromovilidad, para ello planea ser neutral en combustibles fósiles para 2045 y subsidiar la adquisición de vehículos ambientalmente amigables (International Trade Administration, 2022). Gracias a sus acciones, Suecia ha logrado encabezar la lista de países con mayor porcentaje de venta de vehículos eléctricos. Sin embargo, el creciente aumento VE en el sistema de movilidad, ha traído desafíos sociales y técnicos a la red eléctrica (Shimi et al., 2021).

Con el fin de analizar los desafíos que se presentan, los autores Shimi, Letha y Bollen (2021), de la mano con la Agencia Sueca de Energía, han emitido un informe de su investigación sobre la interacción entre la infraestructura de carga con la electromovilidad y la red eléctrica, cuyo foco está en los posibles impactos en las redes de baja y media tensión, explorando principalmente los problemas de calidad de la energía y la capacidad de alojamiento de la red. Bajo su investigación han encontrado de manera concluyente que los principales desafíos a los cuales se enfrenta la red son (Shimi et al., 2021):

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

- Cuando se propaga una caída de voltaje en a la red de distribución, puede amplificarse (red de alta impedancia) en función de la frecuencia de resonancia. Por lo tanto, incluso una caída poco profunda con un salto de ángulo de fase de 20° tiene un gran impacto en la carga del VE y la vida útil de la batería. Los VE mientras se descargan son más sensibles a las caídas asimétricas con salto de ángulo de fase, ya que provocan una alta sobretensión y oscilaciones en el enlace de corriente directa del cargador del VE. Este impacto es notable mientras se cargan menos vehículos eléctricos.
- El parpadeo de la luz debido a la rápida variación de voltaje causada por la carga de los VE depende principalmente de la cantidad de VE conectados, la topología de las lámparas LED utilizadas por los clientes y la impedancia de la red. Aunque el parpadeo es más prominente en una red más débil (impedancia de red alta), depende principalmente de la topología de la lámpara.
- El impacto de la carga de vehículos eléctricos durante el día es menor que el impacto durante la noche y también depende del factor de coincidencia relativa entre EFV y VE. La probabilidad de subtensión para monofásicos y trifásicos es muy pequeña durante el día y alta durante la noche. La probabilidad de una violación de bajo voltaje aumenta con el aumento de la potencia de carga y el nivel de penetración.
- Un estudio sobre el impacto de la temperatura en la capacidad de alojamiento de VE infirió que al introducir el coeficiente de temperatura hay una disminución de alrededor del 30 % en la capacidad de acogida durante los meses más fríos debido a la rápida descarga de las baterías.

5.5. Impactos en California

Actualmente California cuenta con un parque automotor de 1 millón de vehículos eléctricos y enchufables los cuales representan un aumento en la demanda de energía eléctrica de menos del 1% y dadas las diferentes políticas adoptadas como el plan de cero ventas de vehículos a gasolina se espera que para el 2030 haya al menos 5 millones de vehículos los cuales representarán el 5% de la demanda (American Scientific, 2022).

Adicionalmente, un estudio de la revista Physics Today indica de manera general que para Estados Unidos la carga de vehículos eléctricos representa el 0,2% del consumo de energía, sin embargo, al agregar de manera masiva el transporte eléctrico, la demanda podría aumentar a un 24% (Kramer, 2022).

Se puede apreciar en la Figura 10 la curva de demanda diaria que se tuvo en California para el año 2021, donde se evidencia que el mayor pico se da aproximadamente entre las 5 pm y 9 pm. Ante este pico de demanda investigadores proponen que para que los vehículos eléctricos no tengan gran efecto en la red eléctrica, se debe mejorar la infraestructura de carga pública y en el lugar de trabajo, de esta manera se reduce los encendidos nocturnos y se puede aprovechar significativamente la energía solar (LATIMES, 2022), y según datos de la comisión de energía de California el porcentaje de generación de energía solar es considerable, para el año 2021 fue de 17,1%, es decir 33,260 GW

(2021 Total System Electric Generation, 2021) una porción relevante respecto a la demanda que representan actualmente los VE (<1%).

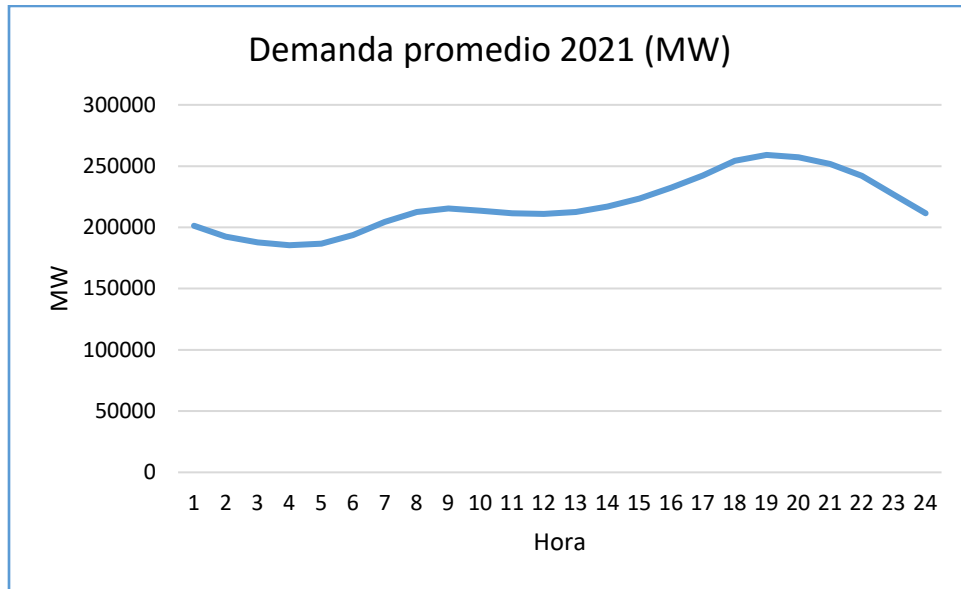


Figura 10 Demanda diaria California (Fuente: Elaboración propia con datos de (CAISO, 2021))

El aumento del consumo de energía representa un verdadero reto para los operadores de la red de distribución ya que deben buscar de la mano con las entidades reguladoras, las medidas para mitigar los picos de demanda y robustecer la infraestructura eléctrica para no exceder la capacidad con la integración masiva de VE, pues según el informe realizado por Jenn y Highleyman (2022), cuando las cargas exceden la capacidad máxima de la infraestructura existente, podría conducirse a una degradación acelerada de los equipos en la red. Para el caso expuesto en este informe, donde se simula el escenario de 6 millones de VE adoptados en California, se encontró que más de una quinta parte de los alimentadores exceden su capacidad debido a eventos de sobrecarga (Jenn & Highleyman Jake, 2022).

El caso de California es muy particular ya que tiene metas bastante ambiciosas para reducir los gases de efecto invernadero, tan solo en agosto del 2022 se planteó la prohibición de los coches de gasolina a partir de 2035 (BBC News, 2022), sin embargo, la situación contrasta con las recientes noticias sobre ola de calor que se está presentando en el estado donde el Operador Independiente del Sistema de California (ISO - siglas en inglés) solicitó a todo los usuarios reducir el consumo de energía entre las 4 pm y 9pm ya que debido a las altas temperaturas hay incremento de consumo por los equipos de aire acondicionado y dicha situación podría desestabilizar la red (New York Times, 2022). Es evidente la necesidad de reforzar la red eléctrica de acuerdo al crecimiento de la demanda y buscar estrategias para mitigar los impactos que se puedan generar.

5.6. Impactos en Dinamarca

Dinamarca es uno de los países que le está apostando a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, descarbonizando el sector transporte, ya que las emisiones en este sector representan aproximadamente el 33% del total (Strunge Kany et al., 2022). La estrategia gubernamental propuesta, es detener la venta de automóviles nuevos de gasolina y diésel a partir de 2030 y detener la venta de automóviles híbridos enchufables a partir de 2035, de esta manera se reducirían los GEI.

Este cambio en el parque automotor produciría unos efectos en el sistema eléctrico del país que han sido analizados por diferentes investigadores, según un estudio realizado por Andersen, Jacobsen y Gunkel (2021), se tiene que la eficiencia de los vehículos, la capacidad de la batería, la tecnología de carga, el patrón de conducción y el comportamiento del consumidor son elementos fundamentales a considerar en el perfil de carga. Basados en los anteriores elementos, los autores simularon varios escenarios considerando 3 perfiles de carga: en el primer escenario el 75% del consumo eléctrico de los VE se carga en casa, el 15% en el trabajo y el 10% en estaciones de carga rápida, en el segundo escenario el 85% del consumo eléctrico de los VE se carga en casa, el 15% en estaciones de carga grandes, pequeñas y rápidas, y finalmente en el tercer escenario el 60% del consumo eléctrico de los VE se carga en casa, el 15% en el trabajo y el 25% en estaciones de carga rápida. Bajo los escenarios planteados se concluye que el consumo de los VE prolonga principalmente el pico de la tarde sumándose al consumo durante la tarde y la noche, especialmente durante el invierno (Andersen et al., 2021).

De acuerdo a un análisis realizado por la empresa Utiligize, se prevé que para el 2035 habrá en circulación 741.196 coches eléctricos, distribuidos principalmente en las grandes ciudades donde la densidad poblacional es mayor. En la Figura 11 se muestra el mapa de calor de la distribución de VE para el año 2030, las zonas resaltadas en verde, son las de mayor densidad con una cantidad de 1.097 VE por km² (Utiligize, 2021).

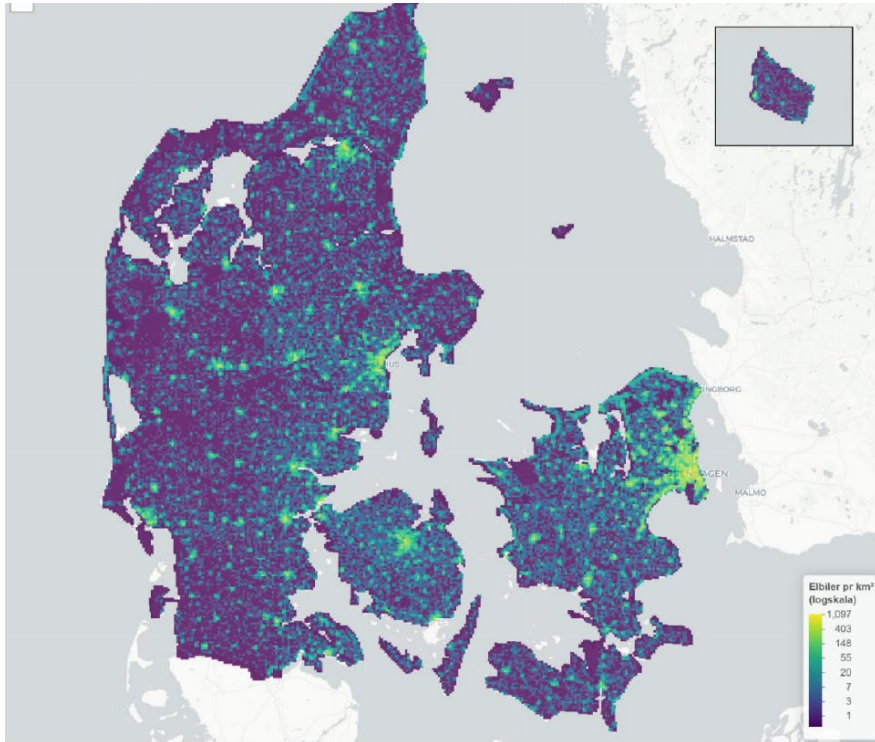


Figura 11 Distribución de VE 2030 - Dinamarca, fuente: (Utiligize, 2021)

Debido a la alta concentración de vehículos que se prevén para 2030 los autores del informe de Utiligize analizaron que habrá un fuerte impacto en los costos de inversión para modernizar y robustecer la red, se espera que en el periodo 2021-2030 haya una inversión de 29,83 mil millones coronas danesas (4,35 mil millones de USD), y en el periodo 2030-2040 se espera una inversión de 36,77 mil millones de coronas danesas (5,36 mil millones de USD) (Utiligize, 2021). Es evidente que se generará un fuerte impacto en términos de inversión debido a los VE y estos costos podrían ser pasados al usuario final.

5.7. Impactos en Finlandia

Finlandia es un país relativamente pequeño demográficamente, tiene una población aproximada de 5.5 millones de habitantes (Banco Mundial, 2021) y una densidad de tan solo 18 habitantes por kilómetro cuadrado, la mayor concentración demográfica está en la capital, Helsinki con 1,2 millones de habitantes. En 2021, había aproximadamente 77 mil autos híbridos y cerca de 22,9 mil autos eléctricos registrados en el país (Statista, 2022a) y el porcentaje ventas de vehículos eléctricos para ese año representó el 31%.

De acuerdo a lo reportado por el operador del sistema de transmisión Fingrid, el objetivo del gobierno finlandés durante 2018 donde se establecía tener 250.000 vehículos eléctricos para el 2030 representaba un consumo de alrededor 0,8 TWh de electricidad al año (2000 MWh diarios) que es la cantidad de energía producida anualmente por 50-60 aerogeneradores, el operador también indicaba que incluso si se reemplazara por vehículos eléctricos los 3 millones de

automóviles y camionetas existentes en Finlandia, solo aumentaría el consumo de electricidad del país en aproximadamente un 10% (Fingrid, 2018).

Considerando este incremento de consumo, Fingrid analizó que un cuarto de millón de automóviles aumentaría la necesidad de energía eléctrica hasta en 100-200 MW durante las horas de la mañana y la tarde de un día bajo cero, cuando el consumo de electricidad suele ser más alto (Fingrid, 2018).

5.8. Impactos en Países Bajos

Países Bajos está dentro del top 5 de los países más preparados para la adopción de vehículos eléctricos, ya que tiene la mayor densidad de puntos de carga. Países Bajos tiene el mayor número de cargadores de vehículos eléctricos públicos de todos los países evaluados, y a nivel mundial se ubica después de China, con casi un cargador por cada 2 km de carretera (Invest in Holland, 2021).

Además, cuenta con el centro de conocimiento e innovación en el campo de la infraestructura de carga inteligente ElaadNL que junto con los operadores de la red se preparan para un futuro con movilidad eléctrica y carga sostenible. Esta entidad, se encarga de supervisar la infraestructura de carga de vehículos eléctricos y coordinar las conexiones entre las estaciones de carga públicas y la red eléctrica (Elaadnl, 2022).

Con la información recolectada, ElaadNL ha creado una base de datos con el fin de analizar el comportamiento de carga y la distribución de la misma. En la Figura 12 se muestra la distribución de los tiempos de llegada de los conductores de vehículos eléctricos a las estaciones de carga entre semana, donde se evidencia que en días laborales el mayor porcentaje de eventos de carga entre las 6 am y 12 pm se realiza en el lugar de trabajo con un pico entre las 8:15 am y las 9:00 am, y en el horario tarde-noche, el mayor porcentaje de eventos de carga se realiza en estaciones privadas, con un pico entre las 6:00 pm y las 6:45 pm (ElaadNL, 2020).

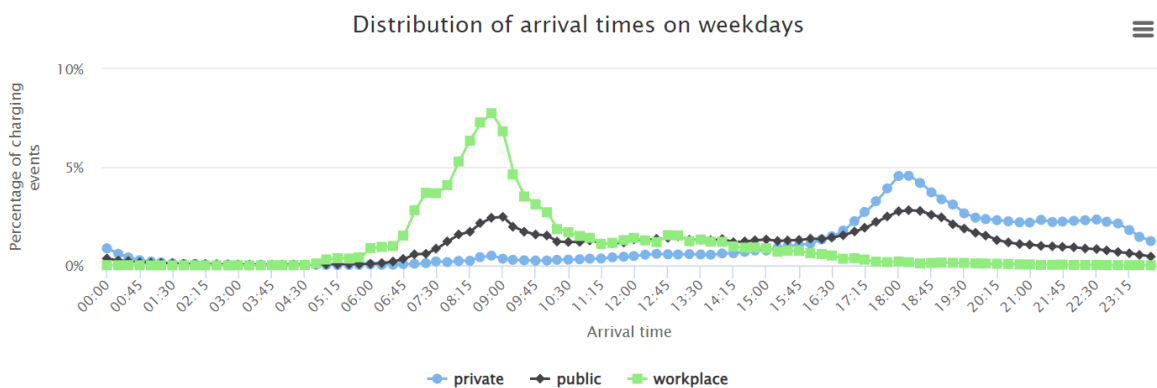


Figura 12 Porcentaje de eventos de carga entre semana, fuente: (ElaadNL, 2020)

Un comportamiento diferente se presenta los fines de semana, pues el mayor porcentaje de eventos de carga tiene su pico entre las 4:30 pm a las 6:30 pm, en lugares privados. Dicho comportamiento se puede observar en la Figura 13.

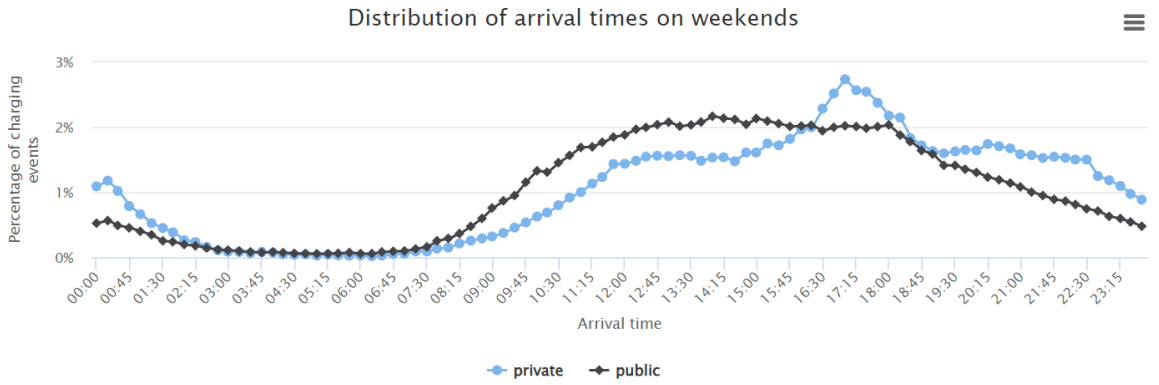


Figura 13 Porcentaje de eventos de carga fines de semana, fuente:(ElaadNL, 2020)

Toda la base de datos que ha construido el instituto ElaadNL junto con los operadores de red, es esencial para administrar la carga de los vehículos, ya que según el operador de red Stedin, con mayor porcentaje de autos eléctricos en carretera, implica más demanda de puntos de recarga y por lo tanto mayor capacidad en la red eléctrica para entregar dicha energía y la mejor manera de cargar automóviles es con 'Carga inteligente'. Este método permite una carga eficiente, por ejemplo, en momentos en que hay mucha energía solar disponible. Esta administración de carga, evitará cualquier inversión costosa e innecesaria (STEDIN, 2017).

5.9. Impactos en Alemania

Alemania es considerada la mayor economía de Europa, por lo cual tiene un papel principal en las estrategias para la reducción de los GEI, en este caso Alemania se ha comprometido a reducir las emisiones de CO2 en un 55% para 2030. Para el año 2022 las emisiones del sector del transporte en Alemania debían reducirse entre un 42% y un 44% y la movilidad eléctrica es uno de los pilares para aportar en este objetivo (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021).

Según el escenario base planteado por McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice, alrededor de 8 millones de autos eléctricos estarán en circulación en Alemania para el año 2030, estos representan aproximadamente el 15% de todos los automóviles que se espera que estén en circulación y se espera que los VE representen entre el 40% y 60 % de las ventas nuevas para esa fecha. Este volumen de vehículos impactará directamente el consumo de electricidad, produciendo un incremento de un 4% (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021).

En la Figura 14 se puede observar la tendencia de crecimiento del consumo desde 2020 hasta 2040 considerando el escenario base, es decir teniendo en cuenta la entrada de 8 millones de vehículos eléctricos y se evidencia que para el año 2030 habrá un incremento de alrededor de 25TWh.

The deployment of eight million electric vehicles by 2030 will entail an increase in energy volume of approximately 4 percent.

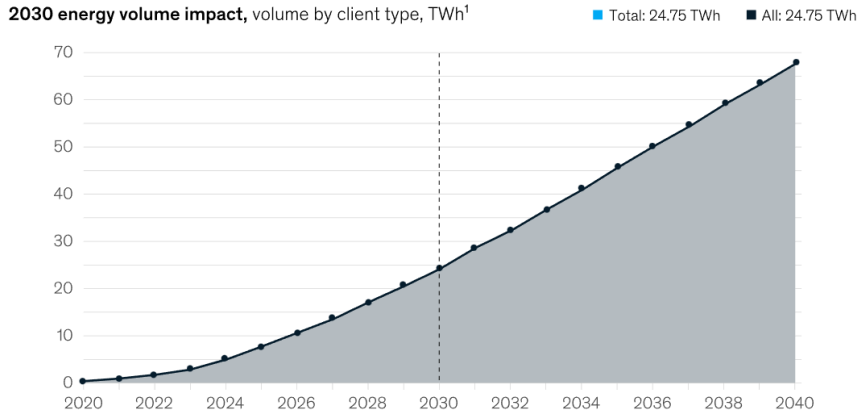


Figura 14 Impacto en el consumo de energía con la entrada de 8M VEs, fuente:(McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021)

El artículo desarrollado por McKinsey's Electric Power permite evidenciar que habrá un pico muy alto entre las 6 pm y 8 pm debido a la carga de los VE en casa, en el trabajo, en garajes públicos, estaciones públicas de carga rápida y en centros de flotas. Dado que la gestión de carga pública y de flota tiene mayor dificultad para ser administrada respecto a la carga doméstica, se puede decir que se generará un estrés adicional a la red. Bajo un escenario de carga totalmente no administrado, se podrían agregar hasta 7 GW adicionales de energía a la demanda máxima para 2030, un aumento del 8 por ciento sobre el pico actual (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021)

Dentro del análisis también se detectó la necesidad de mejorar la infraestructura de red por las congestiones que sufrirá el sistema de distribución eléctrico. Los principales componentes de infraestructura que requieren ser mejorados o reemplazados son los transformadores residenciales en áreas con alta penetración de vehículos eléctricos y, en menor medida, circuitos y aparellaje eléctrico. Las estimaciones muestran un aumento en las actualizaciones de transformadores cuando tres millones de vehículos eléctricos estén en funcionamiento, lo que podría ocurrir en 2025. Las simulaciones muestran que el costo total para actualizar los transformadores residenciales podría ascender a más de 5.000 millones de euros para 2030 (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021).

5.10. Conclusiones del capítulo

De acuerdo a lo revisado en los diferentes países se podría decir que hay un patrón repetitivo dentro de los impactos encontrados, ya que en todos coincide que la penetración de VE produce un incremento en la demanda de energía eléctrica. También es importante mencionar que parte de la información consultada indica que hasta ahora no hay resultados certeros de lo que sucede en la red eléctrica de cada uno de los países, sino que se han realizado estudios para años posteriores previendo el posible impacto que se produciría por el aumento de la tasa de VE en el sistema eléctrico. Esta condición de ausencia de información, podría deberse a que la adopción de vehículos

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

eléctricos ha sido de manera gradual por lo que se ha asumido toda la carga eléctrica sin tener en cuenta los efectos causados en los sistemas de distribución y en general en el sistema eléctrico. En el siguiente capítulo se mostrará las estrategias y políticas que han implementado o que se han sugerido en los países para aliviar los impactos.

Capítulo 6. Caracterización de las políticas energéticas adoptadas por los países seleccionados, para mitigar los impactos en las redes eléctricas debido a la penetración de VE

En el presente capítulo se hará una revisión de las políticas energéticas y estrategias más representativas, que han sido adoptadas por los países Noruega, Islandia, Dinamarca, Finlandia, Alemania y el estado de California para mitigar los efectos en el sistema eléctrico causado por los VE. El detalle de la información permitirá entender el panorama global alrededor del tema objeto de este trabajo y proporcionará un esquema de opciones para implementar en Colombia.

6.1. Estrategias en Noruega

Según la Agencia Internacional de Energía, una estrategia importante que puede ayudar a reducir el efecto de la carga masiva de VE es la gestión de la demanda, donde se incluyen medidas como retrasar o acelerar el tiempo de carga para que esta se produzca en periodos de baja demanda u horas valle, lo que incluye detener o iniciar el proceso de carga en el momento más oportuno, entre otros. Dicha gestión puede permitir el uso coordinado y efectivo de la capacidad eléctrica del sistema. Sin embargo, para tener control del momento y la cantidad de consumo de energía, es fundamental contar con sistemas de medición inteligente (International Energy Agency, 2018).

Otra de las estrategias que se plantean para mitigar el impacto de los VE es la fijación de tarifas dinámicas (gestión de la demanda implícita), donde se tengan precios flexibles en función del tiempo u horario en el que sea usado (International Energy Agency, 2018). Noruega además de establecer tarifas dinámicas, desde el 2017 planeó un mecanismo de fijación de precios basado en la utilización de la capacidad para ser implementado a partir del 2019 de manera voluntaria (NVE, 2016).

Desde julio de 2022 Noruega ha implementado un esquema de alquiler de electricidad online buscando distribuir el consumo de electricidad de manera más uniforme a lo largo del día y de esa manera mantener los costos bajos, en este nuevo modelo se plantea la diferenciación según la potencia, es decir, cuánta capacidad necesita en la red eléctrica. Los que necesitan mucha capacidad pagan más que los que necesitan menor capacidad, adicionalmente el costo puede variar a lo largo del día y del año (NVE, 2022).

La Figura 15 ilustra cómo Noruega puede ahorrar unos 1.101 millones de dólares (11.000 millones de coronas noruegas) mediante la gestión de la carga, trasladando la carga de los períodos pico a los períodos de baja demanda durante la noche.

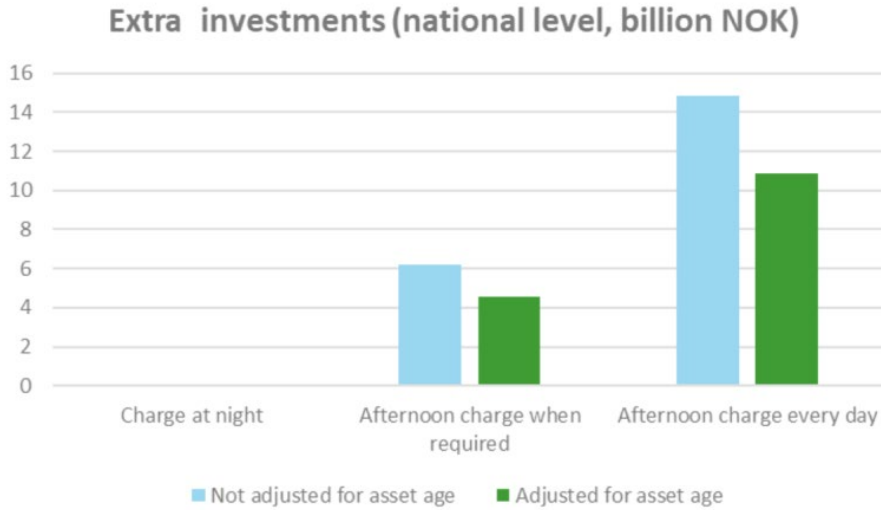


Figura 15 Ahorro mediante la gestión de carga, fuente:(DNV, 2022)

Con el fin de impulsar el desarrollo del comercio flexible, se requiere un diseño de mercado inteligente, es decir que se busque aplanar la curva de demanda para aprovechar el potencial de la carga inteligente (DNV, 2022).

Uno de impactos vistos previamente es el incremento del costo de la energía a raíz del aumento de la demanda de la energía, las modernizaciones requeridas en la red, entre otros, para dicho efecto la NVE propone tres incentivos con el fin de reducir los costes de la red:

1. Nuevas tarifas de red basadas en la capacidad (proceso en curso desde 2015).
2. Tarifa de conexión: el usuario tiene que pagar el costo de la red, si no hay suficiente capacidad.
3. Conexión no firme (Christer Skotland & The Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2020), la cual:
 - Permite a las empresas de la red reducir el consumo en los términos acordados.
 - Hace posible conectar a los clientes más rápido y posponer o evitar inversiones en la red.(Christer Skotland & The Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2020)

6.2. Estrategias en California

Según el instituto Rocky Mountain existen soluciones de administración de energía que permite un intercambio monetizable entre el operador de red, en este caso CAISO, y los usuarios de vehículos eléctricos. El instituto muestra un análisis ilustrativo para el año 2031 considerando un perfil de demanda con y sin administración de la carga. En la Figura 16 se detalla el control de la demandada de VE que es posible tener al ser administrada la carga correctamente, reduciendo el pico entre las 6 pm y las 8 pm (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021).

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

Energy management solutions provide monetizable site and grid services CAISO¹ illustrative 2031 grid profile with and without managed charging

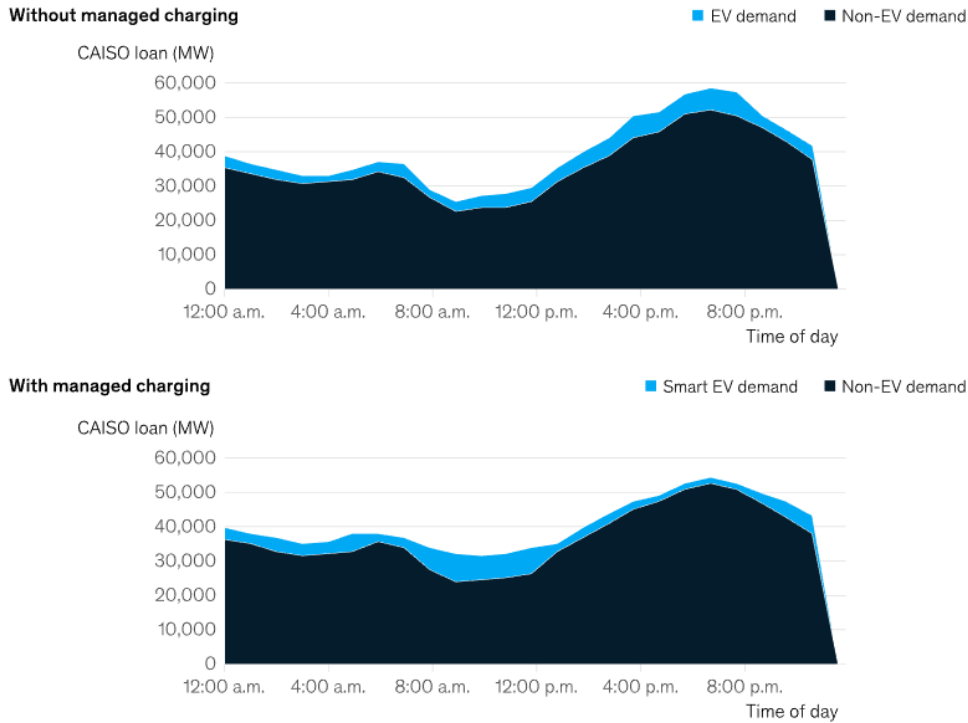


Figura 16 Curva de demanda diaria en california con carga y sin carga administrada, fuente: (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021)

Se han desarrollado varios proyectos alrededor del tema de carga inteligente, uno de ellos es el llevado a cabo Nuvve Holding Corp (NVVE.O), una empresa de vehículos a la red con sede en California, que en conjunto con la compañía Stonepeak formó la empresa Levo, la cual aportó \$ 750 millones, para permitir que los propietarios de flota electrifiquen sus vehículos y se permita la venta energía a las empresas de servicios públicos a través de su plataforma patentada de vehículo a la red (V2G) (Nuvve, 2021).

Según lo indicado en la página web oficial de Nuvve, la plataforma V2G ayuda a reducir el costo total de propiedad de VE al permitir que las baterías de VE almacenen energía, incluida energía limpia y de bajo costo de energías renovables como la solar y la eólica, y luego descarguen esta energía almacenada de manera segura a la red mientras los vehículos están estacionados y enchufados. La plataforma aprovecha el exceso combinado de energía almacenada de múltiples baterías VE para formar plantas de energía virtuales (VPP) y luego vende esta energía almacenada a la red. Al permitir que los vehículos eléctricos sirvan como "almacenamiento sobre ruedas", Nuvve ayuda a integrar las energías renovables y estabilizar la red (Nuvve, 2021).

6.3. Estrategias en Islandia

Una de las opciones que se ha planteado en Islandia, es la implementación de cargadores con equilibrio dinámico, que consisten en un sistema de almacenamiento de energía eléctrica que está conectado a la red. Es una fuente de alimentación de corriente alterna monofásica aislada, que se puede incorporar a una estación de carga y que permite cargar el vehículo eléctrico a un cierto nivel y monitorear constantemente el voltaje del VE. El valor agregado de este dispositivo está en que es capaz de adaptar la capacidad de carga (o potencia de carga) a la demanda actual, es decir, garantiza que se mantenga el equilibrio energético general del sistema (BENY, 2022).

Si se considera el caso en el que varios cargadores (diferentes al presentado) realizan el proceso de carga simultáneamente, se puede generar un alto consumo de energía del sistema eléctrico, este aumento repentino de energía puede sobrecargar la red eléctrica. El cargador de equilibrio de carga dinámico resuelve este problema ya que puede distribuir la carga de la red de manera uniforme entre varios cargadores de vehículos eléctricos y proteger el sistema de energía del daño causado por la sobrecarga (BENY, 2022).

El cargador de equilibrio de carga dinámico reduce la carga de la red, lo que conduce a ahorros de energía y preservación la red. En general, dicho cargador detecta la carga de la red eléctrica, ajusta la corriente del cargador y controla la carga. Puede controlar la frecuencia de carga y la corriente. De esta manera, puede cambiar la potencia y la corriente de carga para proteger el sistema de energía de la sobrecarga. Además, tiene la ventaja de cambiar la frecuencia y el voltaje de CA durante la carga (BENY, 2022).

Por otra parte, según el autor Apiyo (2019), el aumento en la penetración de VE producirá una caída de tensión para lo cual se propone la instalación de condensadores para aumentar los voltajes durante condiciones de carga pesada (Apiyo, 2019).

6.4. Estrategias en Dinamarca

De acuerdo a un análisis realizado por Dansk Energi, para garantizar la integración de los vehículos eléctricos de manera correcta y garantizar la estabilidad económica y técnica se deben seguir las siguientes recomendaciones (DANSK ENERGI, 2021):

1. La regulación debe complementar las políticas de ingresos e incentivos donde se permita a los operadores de red, cubrir las inversiones necesarias que respalden los objetivos de clima político.
2. Premiar y promover el consumo flexible como se menciona a continuación:
 - Promover la carga inteligente e incentivar a que los daneses realicen el proceso de carga cuando no haya congestión eléctrica.
 - Las estaciones de carga deben ser flexibles y permitir el control de forma remota, es decir, que se habilite o deshabilite el flujo eléctrico de manera remota en horarios donde la

demanda sea baja. Se obtendrá como ventaja precios más bajos para los clientes finales y permitirá aprovechar mejor la capacidad de red existente y evitar inversiones innecesarias en la red, lo cual también se ve reflejado en las tarifas estables.

- Se deben implementar las recomendaciones del equipo de crecimiento para energía verde y tecnología ambiental, las iniciativas mejorarán el acceso a los datos de consumo de electricidad.
 - Es necesario un registro más detallado de las estaciones de carga y los coches eléctricos, con el fin de tener una base de datos lo suficientemente robusta para tomar decisiones sobre las inversiones para respaldar la transformación verde del transporte. De esta forma, se reduce el riesgo tanto de sobreinversión como de subinversión en la red eléctrica. Dansk Energi recomienda que sea posible para las empresas de la red eléctrica obtener descripciones geográficas de la cantidad de autos eléctricos con la posibilidad de extraer las direcciones de los propietarios de los autos, teniendo en cuenta las normas del Reglamento General de Protección de Datos de la Unión Europea (GDPR) en los casos en que sea necesario.
 - Todos los cargadores nuevos, con una potencia de carga superior a 3,6 kW, deberán ser trifásicos, de manera que se mantenga la calidad técnica de la red eléctrica y se asegure la utilización efectiva de la capacidad de la red eléctrica.
3. Crear incentivos para que los propietarios y operadores de automóviles inviertan en estaciones de carga flexibles, esto debido a que en este momento los VE se pueden cargar desde un enchufe domestico normal, por lo tanto, es necesario tomar medidas para que se usen los métodos de carga seguros y rápidos. Para este caso se recomienda (DANSK ENERGI, 2021):
- La instalación de estaciones de carga flexibles debe estar cubierta por el esquema BoligJob (vivienda -trabajo). Instalar una estación de carga controlada a distancia cuesta alrededor de 1.459 dólares, la instalación de una estación de carga controlada a distancia debe volver a estar cubierta por el esquema BoligJob, de modo que el propietario del automóvil eléctrico pueda deducir los salarios de los electricistas y el trabajo de excavación de los impuestos.
 - Eximir del pago de tributos e impuestos a las estaciones de carga cuando se trata de los coches de empresa. Los empleados con coche eléctrico o coche híbrido de carga como coche de empresa deben poder disponer de un punto de carga a control remoto pagado por el empleador instalado en casa, sin que el valor del soporte de carga esté sujeto a impuestos.
 - Se debe implementar la propuesta del gobierno danés para invertir 17,5 millones de dólares en infraestructura de carga, destinadas así:
 - Cargadores rápidos en asociaciones de viviendas/edificios de apartamentos
 - Estaciones de carga Lightning: Las estaciones de carga Lightning permiten cargar un coche eléctrico en aproximadamente 10 minutos, pero, debido al alto costo, estas estaciones no pueden ser asumidas por el usuario y se debe destinar una parte de la inversión a la instalación y conexión a red de cargadores Lightning.
 - Permitir la instalación de cargadores de Lightning en las autopistas.

6.5. Estrategias en Finlandia

Dado que los vehículos eléctricos están compuestos por baterías, las cuales pueden almacenar energía, estas pueden ser usadas como mecanismo de flexibilidad en la red, pues se espera que para el 2040 la capacidad de almacenamiento de los vehículos eléctricos a través de sus baterías sume más de 30 TWh, una cantidad considerable teniendo en cuenta que consumo total de Finlandia estuvo alrededor de los 86 TWh para el año 2019 (Virta, 2021).

Una alternativa adicional que se plantea es la carga inteligente, también conocida como carga V1G, donde el vehículo eléctrico y el dispositivo de carga comparten una conexión de datos que permite administrar de manera inteligente la carga. La carga inteligente hace un uso óptimo de la energía que está disponible durante un cierto período de tiempo. Este método también permite almacenar en energía renovable durante el día y en la noche cuando se presenta el pico más alto de consumo se puede descargar para aliviar la presión del mercado. De esta manera, las baterías de VE no solo se pueden usar para ayudar a estabilizar la red, sino que los propietarios de VE tendrán la oportunidad de ganar dinero por este servicio (Virta, 2021).

En Finlandia también está disponible la carga V2G (Virta, 2021). Para este tipo de carga ya existe un estándar regulatorio ISO 15118-20 mediante el cual se definen los requisitos de comunicación inalámbrica tanto para la carga conductiva como para la carga inalámbrica, así como los requisitos de comunicación para el dispositivo de conexión automática y los servicios de información sobre el estado de carga y control (ISO, 2022).

6.6. Estrategias en Alemania

Dentro de las estrategias indicadas por McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice se debe gestionar los tiempos de carga de los clientes teniendo en cuenta los hábitos de carga de los clientes, por ejemplo, para Alemania la forma típica de la carga eléctrica durante los meses de invierno experimenta un fuerte aumento entre las 6 pm y las 8 pm. Este tiempo coincide con el momento en que un dueño de casa típico enchufa un VE después de regresar del trabajo (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021).

Por lo anterior, se hace necesario vincular a los usuarios de VE en programas de administración de carga y brindar incentivos para cargar durante horas valle implementando sistemas de tarifas diferenciales, de esta manera se podrá mover la carga doméstica de las 10 pm a las 4 am. Como resultado, la curva de carga máxima se aplanará en aproximadamente un 80% en otros escenarios administrados (McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice., 2021).

6.7. Caracterización de las estrategias

De acuerdo a lo consultado para cada país, es posible deducir que gran parte de las estrategias para mitigar los impactos de los VE, aún no han sido implementadas y solo son análisis de diferentes

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

autores que buscan brindar la mejor solución para el creciente aumento de vehículos eléctricos en la red, adicionalmente se evidencia que en todos los países coincide como estrategia la carga inteligente o gestión de la demanda.

Según este contexto se muestra a continuación un resumen de las estrategias, caracterizadas según su enfoque.

País	Impacto			
	Aumento de la demanda de Energía	Aumentos en el precio de la energía	Necesidad de modernización de la red	Caída de tensión
Noruega	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión de la demanda - Tarifas dinámicas* 	<ul style="list-style-type: none"> - Tarifas basadas en la capacidad* - Tarifa de conexión - Conexión no firme 	<ul style="list-style-type: none"> - Tarifa más alta para cubrir los costos 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A.
California	<ul style="list-style-type: none"> - Administración de la carga inteligente* 	<ul style="list-style-type: none"> - Venta de energía almacenada en los VE*. 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A.
Islandia	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos cargadores inteligentes* 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalación de condensadores
Dinamarca	<ul style="list-style-type: none"> - Carga inteligente - Estaciones de carga flexibles controladas remotamente 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivos a los operadores de red - Inversión en infraestructura de carga. - Registro detallado de estación de carga para evitar la sobreinversión 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A.
Finlandia	<ul style="list-style-type: none"> - Carga inteligente 	<ul style="list-style-type: none"> - Venta de energía almacenada en los VE* 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A. 	<ul style="list-style-type: none"> - N.A.

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

Alemania	- Administración de la carga - Tarifas diferenciales	N.A.	N.A.	N.A.
Países Bajos	- Carga inteligente	N.A.	N.A.	N.A.

* Estrategias que han sido implementadas.

Tabla 2 Caracterización de estrategias por país

6.8. Conclusiones del capítulo

Un punto clave que se muestra en la información consultada es que la mejor manera de tener control sobre la carga de los vehículos eléctricos es la carga inteligente, la revisión que se hizo de los 6 países coincide en este aspecto. Dicha administración de carga permite reducir el consumo de energía eléctrica en horas pico para pasarlo a horas valle, lo que evita inversiones innecesarias en la red. Cabe mencionar que parte de las propuestas planteadas aún no han sido implementadas, sino que son sugerencias realizadas por expertos en el tema y operadores de red.

En el siguiente capítulo se realiza una exploración en la regulación colombiana para determinar las políticas que se han puesto en marcha o que se busca implementar en el país. Basado en la información que sea detectada y de acuerdo a lo analizado para los países europeos y California, se plantearán las estrategias para Colombia.

Capítulo 7. Estrategias para mitigar los impactos de la penetración de los VE en Colombia

En este capítulo se presenta para el caso colombiano, las políticas o regulaciones que se han desarrollado desde el Ministerio de Minas y Energía cuya función principal es formular, adoptar, dirigir y coordinar la política en materia de uso racional de energía y desde la CREG, que se encarga de regular los servicios de electricidad y gas en el país. Adicionalmente se muestran las estrategias que se han tomado ante los desafíos que representa el incremento de VE en el sistema eléctrico colombiano.

7.1. Regulaciones alrededor de los vehículos eléctricos

En Colombia se han desarrollado una serie de normativas alrededor de los vehículos eléctricos que han permitido el mayor ingreso de vehículos eléctricos al país, para ello entró en vigencia en 2019 la ley numero 1164 por medio de la cual se promueven el uso de VE en Colombia, donde quedaron plasmadas las siguientes disposiciones (República de Colombia, 2019):

1. Disminución del impuesto vehicular al 1% del valor comercial.
2. Descuento sobre la revisión técnico-mecánico y descuento del 10% sobre el seguro obligatorio de accidentes de tránsito (SOAT).
3. Exención de las medidas de restricción a la circulación vehicular.
4. Parqueaderos preferenciales.
5. Cuotas mínimas para entidades públicas de la compra de 30% de vehículos eléctricos respecto a la cantidad anual para el año 2025 y para el 2035 el 100% de los vehículos de los sistemas Bus Rapid Transit (BRT) del país deben ser eléctricos.
6. Para el año 2022, 5 estaciones de carga rápida en cada municipio, 20 estaciones de carga rápida en Bogotá que hasta ahora no se ha cumplido.
7. Para nuevas construcciones urbanísticas se debe contar con acometidas que soporten carga de VE.

Adicionalmente hay otros beneficios tributarios implementado como lo es la reducción en el impuesto a las ventas (IVA) al 5% y una tarifa tributaria para la importación de vehículos eléctricos e híbridos de 0% y 5% respectivamente (UPME, 2019).

Otra normativa que se ha desarrollado en torno a esta tecnología de electromovilidad es la resolución 40223 de 09 de julio de 2021 mediante la cual se establecen las condiciones mínimas de estandarización y de mercado para la implementación de infraestructura para vehículos eléctricos e híbridos enchufables. Esta resolución se hizo de acuerdo a un análisis del mercado de vehículos eléctricos en Colombia, de los conectores más utilizados, de las empresas nacionales y extranjeras proveedoras de cargadores con sus diferentes tipos de conectores, de tendencias a nivel internacional en estandarización, y características técnicas de los tipos de conectores más utilizados. Además, menciona los siguientes aspectos (MINENERGIA, 2021a):

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

- El suministro de energía eléctrica para vehículos eléctricos e híbridos enchufables en estaciones de carga es un servicio de carga y no abarca la actividad de comercialización.
- El precio del servicio de carga en estaciones de carga será fijado de manera libre.
- Recomienda a la CREG analizar las señales de la tarifa para considerar la participación activa de vehículos eléctricos con el fin de habilitar nuevos esquemas de transacciones y gestión de la energía además de revisar la pertinencia de establecer la medición diferenciada para vehículos eléctricos e híbridos enchufables.

De la mano a la resolución anterior, también se dio origen a la Ley 2099 de 2021, la cual establece en el artículo 49 que las empresas prestadoras del Servicio Público Urbano de Transporte Masivo de Pasajeros no estarán sujetos a la contribución prevista en el artículo 47 de la Ley 143 de 1994 y el artículo 89.1 de la Ley 142 de 1994 y demás que lo complementen, modifiquen o sustituyan, respecto de la energía que efectivamente destinen a la carga o propulsión de vehículos eléctricos o sistemas eléctricos de transporte masivo de pasajeros (Congreso de la República, 2021). Para ello se estableció a Resolución CREG 171 de 2021 con el fin de que puedan hacer una medición diferenciada de la energía usando como alternativas la independización de la instalación o un sistema de medición al interior de la instalación (CREG, 2021b).

Como complemento a lo anterior el Ministerio de Minas y Energía expidió la Resolución 40362 de 2021, mediante la cual reglamenta el artículo 49 de la Ley 2099 de 2021, y establece como beneficiarios del incentivo a las empresas prestadoras del servicio público urbano de transporte masivo de pasajeros, y a los usuarios residenciales de los estratos 5 y 6, los usuarios comerciales e industriales que posean u operen una estación de carga (MINENERGIA, 2021b).

La implementación de las regulaciones y normativa para favorecer y promover el uso de vehículos eléctricos ha permitido que Colombia se consolide como el líder en la comercialización de vehículos ligeros eléctricos de batería (BEV) en América Latina y el Caribe con 1.296 registros de dicho tipo de vehículos para el año 2021, mientras que en la categoría de los eléctricos híbridos enchufables quedó en segundo lugar con 1700 registros de este tipo (Statista, 2022b).

7.2. Estrategias tomadas ante los desafíos presentados en el sistema eléctrico

Según un estudio impulsado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) que tenía como objetivo la identificación de los desafíos tanto regulatorios como comerciales y técnicas alrededor de la movilidad eléctrica en Colombia, determinó que en la regulación actual no está definido el reconocimiento de los costos de inversión de los operadores de red en la electromovilidad, la fijación de tarifas específicas para la recarga, la normalización de instalaciones y equipos para la recarga, la adopción de medidas que permitan la gestión de la demanda de vehículos eléctricos y la planificación de la ubicación de las estaciones de recarga (CREG, 2021a).

De acuerdo a los desafíos hallados fueron planteadas por parte de la CREG, las siguientes propuestas relacionadas con la movilidad eléctrica:

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

- Modernización de la metodología tarifaria para remunerar a los Operadores de Sistemas de Distribución de energía eléctrica, a ser desarrollada en el mediano plazo (2021 – 2025).
- Realizar un diseño tarifario flexible, es decir, realizar los ajustes necesarios en cada eslabón del costo unitario, que promueva la participación de la demanda y de señales para la participación de recursos energéticos distribuidos (DER – sigla en inglés), a implementarse en el corto plazo (2021 – 2025).

Adicionalmente, un estudio previo realizado por la UPME indica que: La conexión del elevado número de vehículos eléctricos, que esperaba alcanzarse con las medidas contenidas en la Ley de Movilidad Eléctrica tendrá impactos relevantes sobre el funcionamiento de los sistemas de distribución de las principales ciudades: mayores pérdidas de energía, alteraciones en el voltaje de las redes, sobrecarga en las subestaciones. Por lo anterior se hace necesario hacer que las tarifas para la carga de estos vehículos reflejen mejor el impacto de su conexión a la red de distribución, para ello, se planteó cambio en las tarifas de energía, tarifas horarias para incentivar conductas eficientes de carga y descarga, y tarifas binomias para dimensionar las exigencias de potencia a la red cuando se implementan estaciones de carga rápida (UPME, 2020a).

Otra consideración que realizó la UPME es la funcionalidad Vehicle to Grid (V2G), que implica que el vehículo es capaz no solo de cargar su batería cuando se conecta a la red eléctrica sino también de descargar a la misma la energía existente en su batería, sin embargo, esta modalidad tiene un riesgo alto de reducir la vida útil de la batería, y aunque se viene desarrollando tecnología para que el desgaste sea cada vez menor, este impacto puede afectar el balance de costos y beneficios de la participación de los propietarios de vehículos en la prestación de servicios a la red eléctrica (UPME, 2020a).

7.3. Propuestas para mitigar los impactos en Colombia

En Colombia al igual que en los países analizados, la inclusión de VE supone varios desafíos en términos de alteraciones en el sistema eléctrico. Por lo tanto, basado en los análisis de los países europeos y California se plantea la Tabla 3, la cual resume las propuestas que se establecen para el país:

Impacto	Estrategia Propuesta para Colombia	Estado actual
Aumento de la demanda de energía	- Administración de carga inteligente a través de tarifas dinámicas: con esta propuesta se pretende mover el consumo de horas pico (6 pm a 8 pm) a horas valle, pues dado que el usuario recibe una remuneración (menor costo de energía), este tomará hábitos de carga diferentes que son más eficientes en el sistema eléctrico.	-La CREG ha adelantado un proyecto en donde se estudia las estrategias para la implementación de esquemas de señales de precios y cargos horarios a los usuarios finales en el SIN (CREG, 2020). Dichas estrategias estas en proceso de revisión.

		<p>-Por método MICMAC: Se propone la estrategia de adoptar un modelo de tarificación por horas para impulsar la instalación de sistemas de generación y almacenamiento de energía (Betancur-Ramos et al., 2022)</p> <p>-Simulación: Sistemas fotovoltaicos para compensar la demanda (Bedoya Vélez, 2017).</p>
Remuneración para operadores de red por inversión en electromovilidad	-Modificar la metodología tarifaria de modo que el costo de la inversión sea trasladado a los usuarios finales.	<p>-Se ha emitido un informe donde se plasma la revisión de la actual fórmula de traslado de costos al usuario de energía en Colombia, que ayuda a tener una visión mejor enfocada para aplicar nueva metodología (CREG, 2020).</p> <p>- Simulación: Maximización de los beneficios para comercializadores u operadores de red, usando la descarga de los vehículos mediante la metodología V2G (Rojas et al., 2018).</p>
Alteraciones en el voltaje de las redes y sobrecarga en las subestaciones	Para evitar estos efectos adversos en la red eléctrica se plantea la administración de la carga inteligente, tal como se detalla en las estrategias para el aumento de la demanda de energía, con lo cual se reduce el consumo en horas pico y por lo tanto se evitaría la sobrecarga de las subestaciones y las caídas de tensiones.	<p>-Implementación de esquemas de señales de precios y cargos horarios a los usuarios finales en el SIN (CREG, 2020).</p> <p>-Simulación: Mejora de los perfiles de tensión usando la descarga de los vehículos mediante la metodología V2G (Rojas et al., 2018)</p>

Tabla 3 Propuesta de estrategias para Colombia

7.4. Conclusiones del capítulo

En Colombia el camino hacia la movilidad es reciente y las regulaciones alrededor del tema aún más. Ha sido en los últimos 2 años donde se han emitido resoluciones y leyes para estudiar los fenómenos asociados a los VE y para proponer la hoja de ruta hacia la transición energética. En este sentido, se podría decir que los avances son muy pocos, sin embargo, ya se ha puesto el foco en puntos estratégicos como lo es la actualización de la remuneración de operadores de red y el diseño de un esquema tarifario flexible o dinámico para resolver los impactos asociados a los VE.

Se resalta los trabajos de simulación que han sido desarrollados por investigadores, en donde se plantean estrategias como la inclusión de sistemas solares fotovoltaicos para equilibrar la demanda, la tarificación por horas para el precio de la energía y la implementación de la metodología V2G la cual brinda la posibilidad de que la energía almacenada en los VE sea descargada a la red, sin embargo, para la implementación de esta última, se requiere una comunicación inteligente entre el vehículo eléctrico, la estación de carga y la infraestructura, que actualmente Colombia no posee (UPME, 2020a).

Capítulo 8. Conclusiones

8.1. Conclusiones generales del trabajo final

De acuerdo a lo evidenciado en los anteriores capítulos de este trabajo, los países con mayor avance en temas de movilidad eléctrica se encuentran en el continente europeo y el estado California, por tal razón es importante considerar las estrategias y políticas que ellos han implementado como punto de partida para desarrollar las estrategias en Colombia. Según lo analizado, en los países Noruega, Islandia, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Países Bajos, Alemania y el estado de California se presenta un patrón común en el aumento de la demanda debido a la entrada de VE y como estrategia todos coinciden en la implementación de gestión de carga inteligente.

En el contexto colombiano el desarrollo de políticas y normativas alrededor de movilidad eléctrica es incipiente ya que hacen falta incentivos y regulaciones para atacar un problema que aún no es tan apreciable, actualmente hay ausencia de información de los efectos reales que ha producido la penetración de VE, lo que dificulta la proyección a futuro de esta tecnología.

8.2. Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos

8.2.1. Objetivo específico 1

“Identificar los impactos de la entrada de los VE en los sistemas eléctricos a nivel internacional”

En el capítulo 5 se plasmó el análisis informativo que se realizó para los países Noruega, Islandia, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Países Bajos, Alemania y el estado de California, donde se logró identificar que el impacto más relevante que coincide en cada uno de los países es el aumento de la demanda de energía eléctrica debido a la penetración de VE en el sistema, además se detectaron otros impactos tales como: el aumento en el precio de la energía debido a costos de inversión pasados al usuario final, la necesidad de modernizar la red para atender la creciente demanda y las caídas de tensión por conexión de cargas adicionales en el sistema de distribución. Es importante resaltar que en algunos países los valores evidenciados alrededor del aumento de la demanda no han sido calculados para el estado actual, sino que son proyecciones para próximos años.

8.2.2. Objetivo específico 2

“Caracterizar las políticas energéticas adoptadas por diferentes países para mitigar los impactos de la penetración de los VE en las redes eléctricas”

De acuerdo a lo revisado en el capítulo 6, donde se consultaron los diferentes informes y disposiciones de los operadores de red en los países Noruega, Islandia, Dinamarca, Finlandia, Alemania, Países Bajos y el estado de California, acerca de las políticas y estrategias que se han implementado o que se buscan implementar para mitigar los efectos de los vehículos eléctricos en

las redes eléctricas, se determinó que la mejor manera de reducir los impactos es hacer una gestión inteligente de la carga, ya que por medio de esta se puede aplanar la curva de demanda y evitar inversiones innecesarias en modernizaciones de la red, además que si se cuenta con equipos de medición se puede construir una base de datos que lleva a realizar predicciones más certeras.

Como se puede evidenciar en la Tabla 2 las estrategias que ya han sido implementadas en algunos de países son:

- Administración de la carga inteligente, tarifas dinámicas, tarifas basadas en la capacidad, venta de energía almacenada en los VE y dispositivos cargadores inteligentes. La información recolectada permite deducir que los países europeos tienen gran avance en términos de movilidad eléctrica y que las estrategias implementadas en cada uno de ellos podría ser un punto de partida para analizar el caso colombiano.

8.2.3. Objetivo específico 3

“Caracterizar estrategias que mitiguen los impactos de la penetración de los VE en Colombia de acuerdo con los trabajos previos revisados”

Para llevar a cabo este objetivo, se hizo una revisión documental de los organismos que están al frente de temas de energía en Colombia, como lo son el Ministerio de Minas y Energía, y la Comisión de Regulación de Energía y Gas, el contenido encontrado quedó plasmado en el capítulo 7. Se evidencia que el mayor avance regulatorio en temas de movilidad se ha dado en los últimos 2 años donde se han emitido resoluciones y leyes que han permitido formular la hoja de ruta hacia la transición energética en torno a la movilidad eléctrica. El foco en el cual está trabajando actualmente la CREG es la actualización de la remuneración de operadores de red y el diseño de un esquema tarifario flexible o dinámico para resolver los impactos asociados a los VE.

Colombia ha iniciado el proceso de desarrollo de las estrategias planteadas, pero por ahora están sobre el papel y no han sido implementadas.

8.2.4. Objetivo General

“Proponer estrategias para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sistema eléctrico colombiano”

Según los resultados de búsqueda obtenidos en el capítulo 7, se identificó que los impactos más relevantes para el sistema colombiano serían: el aumento de la demanda de energía, el esquema de remuneración para operadores de red por inversión en electromovilidad y las alteraciones en el voltaje de las redes y sobrecarga en las subestaciones. Para ello se propone implementar un sistema de gestión de carga inteligente que permite controlar la curva de demanda diaria y con esto reducir las caídas de tensión y sobrecarga de subestaciones y equipos. También se propone modificar la metodología tarifaria para que los costos de inversión (instalación de puntos de carga y demás) se trasladen hacia el usuario final y de este modo el operador de red recupere lo invertido.

Estas estrategias ya están siendo trabajadas por los organismos encargados, pero aún no se han establecido de manera oficial. Por ahora hacen parte de la revisión de la agenda de la CREG y MME.

8.3. Trabajos futuros

Se observó que es necesario una base de datos más robusta para brindar un mejor estimado del comportamiento de la demanda diaria al incluir vehículos eléctricos en el sistema y determinar los hábitos de carga de los usuarios. Por lo que se propone como trabajo futuro el registro de información detallado que pueda llevarse a cabo junto con operadores de red que tengan implementados medidores inteligentes en sus redes de distribución.

Una vez se presente la mejora en la cantidad de información, se pueden realizar simulaciones certeras para proyectar los efectos de una mayor tasa de penetración en la demanda de energía a lo largo de los años, considerando los escenarios de hábitos de carga que se hayan podido determinar hasta el momento, por ejemplo, el hábito de carga en días laborales y en los fines de semana que suelen ser diferentes.

Capítulo 9. Referencias

- 2021 Total System Electric Generation. (2021). <https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/california-electricity-data/2021-total-system-electric-generation>
- Acolgen. (2022). *Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica*. <https://acolgen.org.co/>
- American Scientific. (2022). *Por qué los vehículos eléctricos no interrumpirán la red - Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/why-electric-vehicles-wont-break-the-grid/>
- Andemos. (2021). *Informe Vehículos HEV, PHEV y BEV*.
- Andemos. (2022). *INFORMES INTERACTIVOS ANDEMOS › Bev Phev Hev 2022*. https://datastudio.google.com/u/0/reporting/ceb8deeb-3b00-4e08-8536-5a0f2ebb5cf2/page/p_tltbs0vvr
- Andersen, F. M., Jacobsen, H. K., & Gunkel, P. A. (2021). Hourly charging profiles for electric vehicles and their effect on the aggregated consumption profile in Denmark. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106900>
- Apiyo, W. A. (2019). *Impact analysis of electric vehicles charging on the Icelandic Power System*.
- Banco Mundial. (2021). *Población, total - Finland | Data*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=FI>
- BBC News. (2022, August). *“Es un momento histórico”: California prohíbe la venta de autos nuevos de gasolina a partir de 2035, el primer estado de EE.UU. en hacerlo - BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-62682922>
- Bedoya Vélez, L. F. (2017). *Efectos del desarrollo tecnológico de las baterías en el Sistema Interconectado Nacional de Colombia*.
- BENY. (2022). *Todo lo que necesita es el balanceo de carga dinámico de EV Charger*. <https://www.beny.com/is/what-is-dynamic-load-management-and-how-it-works/>
- Betancur-Ramos, A., Grimaldo-Guerrero, J., William Grimaldo-Guerrero, J., Rivera-Alvarado, J., & Gómez-Mesino, E. (2022). International Journal of Energy Economics and Policy Users, Vehicles Electrics, and Energy Markets in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy* |, 12(5), 11–17. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13272>

CAISO. (2021). *California ISO - Reliability Requirements*.
<http://www.caiso.com/planning/Pages/ReliabilityRequirements/Default.aspx#Historical>

Christer Skotland, & The Norwegian Water Resources and Energy Directorate. (2020). *EVS IN NORWAY: Impact on the grid, and how to deal with it*.

Climate Centre. (2021). *Climate fact sheet Colombia*. <https://www.climatecentre.org/wp-content/uploads/RCCC-ICRC-Country-profiles-Colombia.pdf>

Collantes, G. (2006). (PDF) *El mandato de vehículos de cero emisiones de California: un estudio del proceso de políticas, 1990-2004*.
https://www.researchgate.net/publication/46439793_The_California_Zero-Emission_Vehicle_Mandate_A_Study_of_the_Policy_Process_1990-2004

Congreso de la República. (2021). *Ley 2099 de 2021*.
https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/ley_2099_2021.htm#49

CREG. (2020). *Estrategias para la implementación de esquemas de señales de precios y cargos horarios a los usuarios finales en el SIN, para ser utilizados en programas de respuesta de la demanda*.
[http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/5d44ab7a34e3a42a052586620063ceab/\\$FILE/Circular001-2021%20Informe.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/5d44ab7a34e3a42a052586620063ceab/$FILE/Circular001-2021%20Informe.pdf)

CREG. (2021a). *NUEVOS SERVICIOS: MOVILIDAD ELÉCTRICA DOCUMENTO DE CONSULTA*.
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24230999/EstrategiaNacionalMovilidadElectrica2020.pdf>

CREG. (2021b). *Resolución 171 de 2021 CREG*.
https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0171_2021.htm

Daniel Torres. (2021). *Blade Battery, la nueva tecnología de BYD más segura y eficiente*.
<https://bydauto.com.co/blog/blade-battery-explicada-a-profundidad/>

DANSK ENERGI. (2021). *Er elnettet klar til elbilerne?*

Dericioglu, C., Yirik, E., Unal, E., Cuma, M. U., Onur, B., & Tumay, M. (2018). A REVIEW OF CHARGING TECHNOLOGIES FOR COMMERCIAL ELECTRIC VEHICLES. *International Journal of Advances on Automotive and Technology Promech Corp. Press*, 2(1), 61–70.
<https://doi.org/10.15659/ijaat.18.01.892>

DNV. (2022). *Norwegian electric vehicles revolution drives grid investments and managed EV charging can save millions*. <https://www.dnv.com/article/norwegian-electric-vehicles-revolution-drives-grid-investments-and-managed-ev-charging-can-save-millions-179377>

Doña, A. (2020). *Desarrollo de algoritmos de gestion de carga para vehiculos eléctricos y evaluacion de su impacto en redes de distribución*.

- Duitama, K. (2022, March 29). *Colombia vuelve a ser líder en el registro de vehículos eléctricos en América Latina*. <https://www.larepublica.co/especiales/negocios-sostenibles/colombia-vuelve-a-ser-lider-en-el-registro-de-vehiculos-electricos-en-america-latina-3330314>
- Dulau, L. I., & Bica, D. (2020). Effects of electric vehicles on power networks. *Procedia Manufacturing*, 46, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.054>
- ElaadNL. (2020). *ElaadNL Open Datasets for Electric Mobility Research | Update April 2020*. https://platform.elaad.io/analyses/ElaadNL_opendata.php
- Elaadnl. (2022). *Sobre nosotros • ElaadNL*. <https://elaad.nl/en/about-us/>
- Enel Perú. (2022). *¿Qué es un auto eléctrico y qué tipos hay?* - 10.154.61.238. <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/que-es-un-auto-electrico-y-que-tipos-hay.html>
- Euroelectric. (2020). *Power sector accelerating e-mobility Can utilities turn EVs into a grid asset?* https://www.researchgate.net/publication/297055070_Impacts_of_electric_vehicles_charging_on_distribution_grid.
- European Environment Agency. (2022). *New registrations of electric vehicles in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles>
- Evexpert. (2022). *Sistema de gestión de baterías*. <https://www.evexpert.es/eshop1/centro-de-conocimiento/sistema-de-gestion-de-baterias>
- Fingrid. (2018). *Coches eléctricos, ¿amenaza u oportunidad?* - Fingrid-lehti. <https://www.fingridlehti.fi/en/electric-cars-threat-or-opportunity/#9311e14c>
- Gupta, R., Pena-Bello, A., Streicher, K. N., Roduner, C., Thöni, D., Patel, M. K., & Parra, D. (2021). Spatial analysis of distribution grid capacity and costs to enable massive deployment of PV, electric mobility and electric heating. *Applied Energy*, 287, 116504. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.116504>
- Hoarau, Q., & Perez, Y. (2018). Interactions between electric mobility and photovoltaic generation: A review. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304751>
- IEA. (2020). *Global EV Outlook 2020*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf
- IEA. (2021). *Global EV outlook 2021*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVO Outlook2021.pdf>
- International Energy Agency. (2018). *Nordic EV Outlook 2018*. <https://www.nordicenergy.org/wordpress/wp-content/uploads/2018/05/NordicEVO Outlook2018.pdf>

18e8bd70615e&sid=7de8887b4227e34c746a40c9b8bf5c5948b1gxrqa&type=client&ua=525b05515b56055a54&rr=75f786b57828f7b4

Kevin Joseph Dillman, Reza Fazeli, Ehsan Shafiei, Jon Orvar G. Jonsson, Hakon Valur Haraldsson, & Brynhildur Davíðsdóttir. (2021). Spatiotemporal analysis of the impact of electric vehicle integration on Reykjavik's electrical system at the city and distribution system level. *Elsevier*. [https://pdf.sciencedirectassets.com/271922/1-s2.0-S0957178720X00063/1-s2.0-S0957178720301387/main.pdf?X-Amz-Security-](https://pdf.sciencedirectassets.com/271922/1-s2.0-S0957178720X00063/1-s2.0-S0957178720301387/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEcaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCICXIOpQBV5joqmX8%2BcM%2BxMIYf0nOUhx6%2BJGT3pS83d5mAiEAh54K29TFORP78IHNU%2Fdqozr8tFOMeCg5UTb1GSdTkSsqzAQIHxAFGgwwNTkwMDM1NDY4NjUiDEPNkUMUL4w7mfRbaCqpBGTy2FtgFd%2BNKHWfGfGyGEnAef141azANBQK4eBU2wU0ZiNyCWpj%2BzVyAoKrmCLYNtixEvaUrpsMj8M%2BjCgZxPtQoJj77IDrV744%2Bze6z0je%2Fzy75KW1FN07O1Y2ErskceY905pMG7RWlyvu2560hUMxJL4LjMj6QoEmc4jEVy8X3yztDZ3GnVzLI4TBwCxZrg03ipy56yWPKt5RkAtG0U1qilZZYDvp3iYdlMooGNete%2Fi400HjSACs5A%2Be94y8L%2F5195tkISwD%2FDnbdxZiUdQXkir34I9B4XPzXYMWDViwfoXwrXIRI8NCvEwS2jVeTAC6Rqay3BqNMg1Vi6f2Gqtc1s%2FxoHGTAI9es3YNHYRzEq%2FXHttjvMCD8FZQ%2FclHB85f8fTNg6PT%2B0cuOGkdduW%2BWMFrsH6hXVCdbSt6%2B0K3bhPI5%2FFq6z6BXsOAXI28t9AMEuPJNMnMPg7KSH7TkHgdXVTzwNVJMhvhREnbi8dBERfAmXNWJDSVi79SfF%2FP3xwZ8l1Z9jqVW1v%2Ft5Cry%2FW8s1ILUtNByeT54NmIM5nVEA9CUdHB2ttsOlqM%2FVBUWVak5aFBNueaeNaciwRX7BsUgQ%2B2L4Ox%2B2s9zlwHlrMpcxpTuir03RdVg3peyht6VXvFcaKKGm11vbMiwTamuDPWF6jb%2BEvf%2FdW6Ec1SAmcWSgR6QZuGfLxKD5rkpyGCotYa79jadRbctj8shUxNaFhLHmZx4Tswz6S3mgY6qQGsc%2BSTooSwkzFcSUpMpyqOI1D%2BDE1r59adWMr0T2C5wJlIk7%2B7ptS%2FIakI%2F9V1vSHDzLxGJxLLVo3%2BlrGU1dLoE78UmDNDVqgCfaYG5b3a1XFX4p%2FBH6F4n%2B0yG351CyXGqMmx6N8obRNvmk1w4PhXihG7z51sdt%2FZUuDKTrDOpnNjiMaFKH7cWwcUf4pmuWy7Lis0%2FTIBs23Ue3EgA1AgwuWlpp9Dwuer&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Date=20221017T235230Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=300&X-Amz-Credential=ASIAQ3PHCVTYXU7TKYVH%2F20221017%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Signature=c0abc9a1879efb4fb597d296d693c5d3e4086b056be438d7efeffe177e6ec204&has=h=d77decf97ae1d2a51aeb241fb12de3d09d0f99b8882553d012c75229875c6b1c&host=68042c943591013ac2b2430a89b270f6af2c76d8dfd086a07176afe7c76c2c61&pii=S0957178720301387&tid=spdf-54318c99-6d07-466a-8221-fd7fd45853b6&sid=72f4012f53a0a44ff43a75a1c267ee571e1dgxrqa&type=client&ua=525b01050552045a52&rr=75bcf2c51dd0f77a)

Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEcaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCICXIOpQBV5joqmX8%2BcM%2BxMIYf0nOUhx6%2BJGT3pS83d5mAiEAh54K29TFORP78IHNU%2Fdqozr8tFOMeCg5UTb1GSdTkSsqzAQIHxAFGgwwNTkwMDM1NDY4NjUiDEPNkUMUL4w7mfRbaCqpBGTy2FtgFd%2BNKHWfGfGyGEnAef141azANBQK4eBU2wU0ZiNyCWpj%2BzVyAoKrmCLYNtixEvaUrpsMj8M%2BjCgZxPtQoJj77IDrV744%2Bze6z0je%2Fzy75KW1FN07O1Y2ErskceY905pMG7RWlyvu2560hUMxJL4LjMj6QoEmc4jEVy8X3yztDZ3GnVzLI4TBwCxZrg03ipy56yWPKt5RkAtG0U1qilZZYDvp3iYdlMooGNete%2Fi400HjSACs5A%2Be94y8L%2F5195tkISwD%2FDnbdxZiUdQXkir34I9B4XPzXYMWDViwfoXwrXIRI8NCvEwS2jVeTAC6Rqay3BqNMg1Vi6f2Gqtc1s%2FxoHGTAI9es3YNHYRzEq%2FXHttjvMCD8FZQ%2FclHB85f8fTNg6PT%2B0cuOGkdduW%2BWMFrsH6hXVCdbSt6%2B0K3bhPI5%2FFq6z6BXsOAXI28t9AMEuPJNMnMPg7KSH7TkHgdXVTzwNVJMhvhREnbi8dBERfAmXNWJDSVi79SfF%2FP3xwZ8l1Z9jqVW1v%2Ft5Cry%2FW8s1ILUtNByeT54NmIM5nVEA9CUdHB2ttsOlqM%2FVBUWVak5aFBNueaeNaciwRX7BsUgQ%2B2L4Ox%2B2s9zlwHlrMpcxpTuir03RdVg3peyht6VXvFcaKKGm11vbMiwTamuDPWF6jb%2BEvf%2FdW6Ec1SAmcWSgR6QZuGfLxKD5rkpyGCotYa79jadRbctj8shUxNaFhLHmZx4Tswz6S3mgY6qQGsc%2BSTooSwkzFcSUpMpyqOI1D%2BDE1r59adWMr0T2C5wJlIk7%2B7ptS%2FIakI%2F9V1vSHDzLxGJxLLVo3%2BlrGU1dLoE78UmDNDVqgCfaYG5b3a1XFX4p%2FBH6F4n%2B0yG351CyXGqMmx6N8obRNvmk1w4PhXihG7z51sdt%2FZUuDKTrDOpnNjiMaFKH7cWwcUf4pmuWy7Lis0%2FTIBs23Ue3EgA1AgwuWlpp9Dwuer&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Date=20221017T235230Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=300&X-Amz-Credential=ASIAQ3PHCVTYXU7TKYVH%2F20221017%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Signature=c0abc9a1879efb4fb597d296d693c5d3e4086b056be438d7efeffe177e6ec204&has=h=d77decf97ae1d2a51aeb241fb12de3d09d0f99b8882553d012c75229875c6b1c&host=68042c943591013ac2b2430a89b270f6af2c76d8dfd086a07176afe7c76c2c61&pii=S0957178720301387&tid=spdf-54318c99-6d07-466a-8221-fd7fd45853b6&sid=72f4012f53a0a44ff43a75a1c267ee571e1dgxrqa&type=client&ua=525b01050552045a52&rr=75bcf2c51dd0f77a

Kramer, D. (2022). Electrification of cars and trucks likely won't disrupt the grid. *Physics Today*, 75(4), 22. <https://doi.org/10.1063/PT.3.4978>

Larotta David. (2021). *La lógica de la bolsa de energía*. <https://www.aescol.com/es/la-logica-de-la-bolsa-de-energia>

LATIMES. (2022). *Charging electric cars during day could help grid, study says - Los Angeles Times*. <https://www.latimes.com/california/story/2022-09-24/california-electric-vehicles-daytime-charging-power-grid-study>

McKinsey's Electric Power & Natural Gas Practice. (2021). *El impacto de la electromovilidad en la red eléctrica alemana | McKinsey*. <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-impact-of-electromobility-on-the-german-electric-grid>

Minambiente, Minenergía, Mintransporte, & UPME. (2019). *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica REPÚBLICA DE COLOMBIA*. www.minambiente.gov.co

MINENERGIA. (2021a). *Resolución 40223 de 2021 MME*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40223_2021.htm

MINENERGIA. (2021b). *Resolución 40362 de 2021 MME*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40362_2021.htm

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. (2020). *Condiciones mínimas de mercado para vehículos eléctricos*.

NEC DE COLOMBIA S.A. (2022). *Medidores Inteligentes: Smart Grid | NEC*. https://co.nec.com/es_CO/solutions/government/smartgrid/smartmeters.html

New York Times. (2022, September). *En medio de la ola de calor, California pide a los propietarios de vehículos eléctricos que limiten la carga - The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2022/09/01/us/california-heat-wave-flex-alert-ac-ev-charging.html>

Nuvve. (2021). *Nuvve and Stonepeak Finalize "Levo" Joint Venture Providing up to \$750 Million in Funding to Electrify Fleets - NUVVE Holding Corp*. <https://nuvve.com/nuvve-and-stonepeak-finalize-levo-joint-venture/>

NVE. (2016). *What do electric cars mean for the power grid?* http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_74.pdf

NVE. (2022). *Nuevo alquiler online (a partir del 1 de julio de 2022) - NVE*. <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/kunde/nett/ny-nettleie-fra-1-juli-2022/>

Oscar Magro. (2020). *Batería NCM, NCA y LFP, ¿qué es cada una y cuál es mejor para tu coche eléctrico?* <https://www.motor.es/que-es/bateria-ncm-nca-lfp>

Portafolio. (2022). *Los medidores inteligentes llegan a 6 millones de usuarios | Empresas | Negocios | Portafolio*. <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/los-medidores-inteligentes-llegan-a-6-millones-de-usuarios-561482>

- Republica de Colombia. (2019). *LEY 1964 DE 2019*. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636>
- Revista Semana. (2022, May 24). *Crece la venta de vehículos eléctricos en América Latina, con Colombia a la vanguardia*. <https://www.semana.com/sostenible/articulo/crece-la-venta-de-vehiculos-electricos-en-america-latina-con-colombia-a-la-vanguardia/202213/>
- Rizwan Khalid, M., Saad Alam, M., Sarwar, A., & Jamil Asghar, M. (2019). *A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid*. <https://doi.org/10.1016/j.etrn.2019.100006>
- Rojas, K., Nieto, J., & Marulanda, G. (2018). *View of Technical and economical impacts for marketers due to the implementation of electric vehicles in Colombia | Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/2105/2685>
- Sanchez, J. (2021). *MODELADO DE SISTEMAS DE GESTIÓN TÉRMICA EN BATERÍAS PARA VEHÍCULOS HÍBRIDOS MEDIANTE EL USO DE NANOFLUIDOS*
- Shimi, S., Letha, S., & Bollen, M. (2021). *Impact of Electric Vehicle Charging on The Power Grid*.
- Statista. (2022a). *Finlandia: número de coches eléctricos e híbridos 2021 | estatista*. <https://www.statista.com/statistics/1177464/number-of-electric-and-hybrid-passenger-cars-in-finland/>
- Statista. (2022b). *Venta de vehículos eléctricos en América Latina*. <https://es.statista.com/estadisticas/1181574/registros-vehiculos-ligeros-electricos-america-latina-pais/>
- STEDIN. (2017). *Research points at explosive future growth of electric vehicles in the Netherlands | Stedin*. <https://www.stedin.net/over-stedin/pers-en-media/persberichten/research-points-at-explosive-future-growth-of-electric-vehicles-in-the-netherlands>
- Strunge Kany, M., Mathiesen, B. V., Skov, I. R., Korberg, A. D., Zinck Thellufsen, J., Lund, H., Sorknaes, P., & Chang, M. (2022). *Energy efficient decarbonisation strategy for the Danish transport sector by 2045*. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100063>
- Superservicios. (2020). *Mercado de Energía Mayorista | Superservicios - Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*. <https://www.superservicios.gov.co/servicios-vigilados/energia-gas-combustible/energia/mercado-de-energia-mayorista>
- Torres, S. (2019). *Impacto producido en la calidad de potencia de una red de distribución eléctrica residencial debido a la recarga de vehículos eléctricos*.
- UNEP, & UNEP DTU. (2021). *Emissions Gap Report 2021*.
- UPME. (2004). *Repositorio UPME: Una visión del mercado eléctrico Colombiano*. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/829>

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

UPME. (2019). *ESTRATEGIA NACIONAL DE MOVILIDAD ELECTRICA*.
<https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>

UPME. (2020a). *Apoyo al despliegue de tecnologías de redes inteligentes en Colombia*.
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Reporte_Final_Despliegue_Reddes_Inteligentes.pdf

UPME. (2020b). *BECOENERGTICO*.
<https://www1.upme.gov.co/informacioncifras/paginas/BECOENERGTICO.aspx>

UPME. (2020c). *Proyeccion demanda energía eléctrica y gas natural 2021-2035*.
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyeccion_Demanda_Energia_Junio_2021.pdf

Utiligize. (2021). *DER's påvirkning af eldistributionsnettet i Danmark*. www.utiligize.com

Virta. (2021). *Cazador de mitos: los vehículos eléctricos sobrecargarán la red eléctrica | Virta*.
<https://www.virta.global/blog/myth-buster-electric-vehicles-will-overload-the-power-grid>

Wangsness, P. B., & Halse, A. H. (2021). *The Impact of Electric Vehicle Density on Local Grid Costs: Empirical Evidence from Norway*. <https://doi.org/10.5547/01956574.42.5.pwan>

XM. (2021a). *Históricos de demanda*. <https://www.xm.com.co/consumo/historicos-de-demanda>

XM. (2021b, January 19). *Demanda de energía en 2021 marca máximos históricos | Portal XM*.
<https://www.xm.com.co/noticias/4590-demanda-de-energia-en-2021-marca-maximos-historicos>

Zapata, S., Castañeda, M., Garces, E., Franco, C., & Dyner, I. (2018). *Assessing security of supply in a largely hydroelectricity-based system: The Colombian case*.
<https://pdf.sciencedirectassets.com/271090/1-s2.0-S0360544218X00127/1-s2.0-S0360544218309447/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEAAcXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIgWcRWkhjTOFlqdbdRQPCzHlkQaMd7AnyfnemHyWm1QGAIaOMz%2Fq6ZvNlWlBktzViX51xaJb%2BuT9oKfbTTt%2Fi8tNyqzBQg4EAUaDDA1OTAwMzU0Njg2NSIMcErcWQ%2F8psrETfOfKpAFanoX94mWx4FuW4OcM39rAhPPh5xCvYyMfor9VIXrzRBr36uAXHBxp8RBdwHI5Jt%2FFLLccdi%2Bsf4rs%2BHM5fQtGdEZ74v2mdmEvzXt2GrRd%2FA5WiERbUUuD9GRpqdHw7ZjwBYIal8x4nsvW4JpArONRJDx8rn28y1115%2FNLM%2Bd3ybYUgHn0I8Ts7kCgUjH%2Bt5Rgagjq%2B6jyRvf2idB5di9dpwxTxTuQZxTXplqC7s%2Fv8LkMtev2airm4TFkgxSdV3TVV8ldB2CUW5edhcnGSi1STD5tWg6M%2F61%2BFwyKcHkzZDck2BiGKRI0PisLWLMk3IzHDiV4BIMQBU5FpawX5nH5IhQZR6066ecSreVX9%2B7Dgr92fVoGl4pdY8Yd7xp08BcuZ4TMgDu0Sbrw3art48%2BkUGQcIlcNQqthmUuPqbOwvNrV0SJGwl2PM60aDLvZKYcQ%2F7KThR7%2F%2BRdUopHLSiDiRWLkM7B5jtd2O1RyPPJaBp3EBsAl82LHiC%2Fit5GPtsZukPwmkQd2Mj9kq1DZHBhSA2%2FmqZvtYvF3qkx9a7b%2FLFVUNrtW8GWCJwb9BNeur7LyvDAguLBoH%2BJcgluj0CHUn3aOasLUKukWSK8aw%2BHJnjDWbz5W%2FwDKC5cyv2V3SRG5sf47GPOY4SQiHdiFyLASBUNEvNo2ut55mleJ455SP2yhX0SXcik4fo8kQXfRVOMCg%2FJtheCAM>

Políticas para mitigar el impacto de la entrada de vehículos eléctricos en el sector eléctrico colombiano

MVhyqsQlyl4%2FHUSZfypM7O4z%2FUA8rcm5r9Cu2Qo8%2BqX3liS%2BWwrh7gasN0MvhQQi
V%2BhWwwmgNxrCN6o6UrS7Xg%2BDpPcyTeiwbl5D5PVJ2g%2FcUtnkzsiWpqY5nXxoz1Cewq
3htFdZFEPOD0l6d%2BQwkPqBG3AIFZTiYw2IPyoQY6sgHv0dwFTB%2F6SU8mnENqQ3PwwRuy
3AMwq82IASBtUmpVhGs%2BZSrZaXUQzjAhYOfQmC6Q5L6mhNI7Z1Jr%2FMWHXQik7a3tZee
YYEM2%2FOiu616VHNiTvT2%2BNIJxBFAF0wdGqL3PwGm9JOgv6x%2F2DoMC7ivCMwzFey50i
mwar71iOy5YuOOGa%2BIt2MUqkffpsqZ9IixQrHH7PA%2FY07pR%2Fs2gOFsMtsmY4lpVk0b5f
3wPVhMrcApl&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-
Date=20230417T003346Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=300&X-Amz-
Credential=ASIAQ3PHCVTYZZHEKQXB%2F20230417%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-
Amz-
Signature=53df4c0bb9112c6151fdce1b4abd221de35774d31fd70840f3edbf5fcb1fc77b&hash
=6af23c0b973ba029dae5ff4a539122c643efbd19ecc08cebb6e7c795fca3c648&host=68042c9
43591013ac2b2430a89b270f6af2c76d8dfd086a07176afe7c76c2c61&pii=S036054421830944
7&tid=spdf-e92c86c0-40cf-40b9-8862-
1826ab9814f1&sid=e951a9c087a77440cc7943c7d65accf90fadgxrqa&type=client&tsoh=d3d3
LXNjaWVuY2VkaXJlY3QtY29tLmV6cHJveHkudW5hbC5lZHUuY28%3D&ua=050f500058525a57
555b&rr=7b909415de17f7b4&cc=co