



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Geraldine Evelyn Gálvez Fuentes

Optimización de estrategia descentralizada de carga para vehículos eléctricos en una red de distribución

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrica



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Optimización de estrategia descentralizada de carga para vehículo eléctricos en una red de distribución

Geraldine Evelyn Gálvez Fuentes

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrica,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Jorge Mendoza Baeza

Profesor Guía

Sr. Miguel López Gonzalez

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth

Secretario Academico

Valparaíso, 26 de Febrero de 2018

A mis padres Fernando y Jeannette, sin el apoyo de ellos no habría llegado hasta aquí.

*Mis hermanas Jocelyn y Fernanda que me han dado su apoyo incondicional y sobre todo por darme
sobrinos.*

A mis sobrinos Emilia, Sofía y Clemente.

Agradecimientos

A los primeros que debo a agradecer es a mi familia, mamá, papá, hermanas y abuela, por apoyarme siempre en esta etapa de educación, por no esperar la esperanza de que lo lograría, gracias por todo.

Gracias Tío Coto, sin usted hubó sido mucho más difícil.

Agradecer a “Los Cabros”, Simón, Matías, Nelson, José, Ignacio y Nicolás, por hacer grato este camino, por siempre hacerme reír por sus tonteras, por esos carretes inolvidables, por esas tardes de estudio que siempre hicieron más agradables, por ser una más, por eso y más son los mejores compañeros que pude tener. También a mis compañeros de generación por el apoyo Christopher, Carlos, Alejandro, Camilo, Francisco, Felipe y Julio, ¡lo logramos!

Alan Henríquez por tenerme paciencia en esas tardes de estudio, por explicarme una y otra vez cuando no entendía, por ser como eres.

Omayra Chandía, simplemente por llegar y hacerme compañía en esta “carrera de hombre” y estar siempre ahí.

Y por último y no menos importante, Juan Astudillo, por caer literalmente del cielo y ayudarme en mi proyecto, gran parte de esto es gracias a ti.

Gracias a todos por el apoyo.

Valparaíso, 26 de febrero de 2018

G.G

Resumen

En los últimos años se ha adquirido una gran conciencia ambiental, lo que ha generado un cambio a nivel mundial buscando disminuir la emanación de gases de efecto invernadero. Una de las soluciones es la utilización de vehículos eléctricos.

Es por esto por lo que ha crecido el mercado de estos vehículos, lo que ha traído consigo un impacto en la red de distribución modificando la curva de demanda de energía, que por lo general es predecible. Este impacto se debe principalmente a la carga de estos vehículos. Es por esta razón que se debe generar una nueva planificación y operación de la red.

Para realizar esta planificación se han creado diferentes modos de carga, estos son centralizados, que trata de que un tercero es quien indica cuando y donde cargar los vehículos eléctricos, y el modo descentralizado donde es el usuario es quien decide donde y cuando cargar el vehículo, pero como se sabe que este modo causa mucho efecto en la red de distribución, la distribuidora trata de incentivar a los usuarios a cargar los vehículos en ciertos horarios, buscando así que la curva de demanda sea plana.

Anteriormente, se desarrolló en el software Matlab, la optimización de una estrategia centralizada, en la cual se busca un intervalo de hora para ir conectando los vehículos a la red y en cuántas zonas se debe dividir la red para así disminuir el impacto. Es por esto, que este proyecto busca optimizar una estrategia descentralizada, para comparar ambas estrategias.

La estrategia descentralizada, se basa en que se busca un tipo de incentivo, para que los usuarios carguen el vehículo después del horario punta, para esto se ofrece diferentes precios. La estrategia se explicará con mayor detalle en la sección 6.1.

La optimización se realiza mediante la Búsqueda Exhaustiva, ya que las posibles soluciones al problema son limitadas.

Finalmente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con las estrategias previamente desarrolladas, entre ellas se encuentran: estrategia sin control, Off-Peak y centralizada n°1, centralizada n°2 y descentralizada.

Palabras claves: red de distribución, vehículo eléctrico, optimización, descentralizado, sistema.

Abstract

In recent years a great environmental awareness has been acquired, which has generated a global change seeking to reduce the emission of greenhouse gases. One of the solutions is the use of electric vehicles.

Therefore, the market for these vehicles has grown, which has brought with it an impact on the distribution network by modifying the energy demand curve, which is generally predictable. This impact is mainly due to the loading of these vehicles. It is for this reason that a new planning and operation of the network must be generated.

To carry out this planning, different loading modes have been created, they are centralized, it is about a third party who indicates when and where to charge the electric vehicles, and the decentralized mode where the user is the one who decides where and when to load the vehicle, but as it is known that this mode has a great effect on the distribution network, the distributor tries to encourage users to load the vehicles at certain times, thus looking for a flat demand curve.

Previously, the Matlab software was developed to optimize a centralized strategy, in which an interval of time is sought to connect the vehicles to the network and in how many areas the network must be divided in order to reduce the impact. This is why this project seeks to optimize a decentralized strategy, to compare both strategies.

The decentralized strategy is based on looking for a type of incentive, for users to load the vehicle after peak hours, for this different price are offered. The strategy will be explained in more detail in section 6.1

The optimization is done through the Exhaustive Search, since the possible solutions to the problem are limited.

Finally, a comparison of the results obtained with previously developed strategies is made, among them are: strategy without control, Off-Peak and centralized n°1, centralized n°2 and decentralized.

Keywords: distribution network, electric vehicle, optimization, decentralized, system.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos.....	2
1 Red de Distribución Eléctrica.....	3
1.1 Sistema de Distribución Eléctrica.....	3
1.2 Clasificación de los Sistemas de Distribución Eléctrica según zona geográfica.....	6
1.2.1 Sistema de Distribucion Urbana.....	6
1.2.2 Sistema de Distribucion Rural.....	6
1.3 Clasificación de los Sistemas de Distribución Eléctrica según el tipo de carga.....	6
1.3.1 Redes de Distribución para Carga Residencial.....	6
1.3.2 Redes de Distribución para Cargas Comerciales.....	7
1.3.3 Redes de Distribución para Cargas Industriales.....	7
1.3.4 Redes de Distribución para Carga de Alumbrado Público.....	7
1.3.5 Redes de distribucion para Cargas Mixtas.....	7
1.4 Característica de carga.....	7
1.4.1 Carga Residencial.....	7
1.4.2 Carga Comercial.....	8
1.4.3 Carga Industrial.....	8
1.5 Redes Eléctricas Inteligente.....	9
1.6 Generación Distribuida.....	9
1.7 Impacto de la Generación Distribuida.....	10
2 Vehículos Eléctricos.....	12
2.1 Hitoria del Vehículo Eléctrico.....	12
2.2 Tipos de Vehículos Eléctricos.....	13
2.2.1 Vehículo Eléctrico Hibrido (VEH).....	13
2.2.2 Vehículos Eléctricos de Bateria (VEB).....	14
2.2.3 Vehículos Eléctricos Enchufables (PHV).....	14
2.2.4 Vehículos Eléctricos de Combustible (VEC).....	15
2.3 Descripción técnica de los Vehículos Eléctricos.....	15
2.4 Principales componentes de un Vehículo Eléctrico.....	16
2.4.1 Cargador.....	16
2.4.2 Bateria.....	17

2.4.3	Convertor.....	18
2.4.4	Inversor	18
2.4.5	Motor Eléctrico	18
2.4.6	Convertidores de Potencia.	19
2.4.7	Frenos regenerativos.	20
2.5	Mercado de los Vehículos Eléctricos.....	21
2.6	Impacto de los Vehículos Eléctricos en la Red de Distribución.	22
2.6.1	Efecto de la carga de Vehículos Eléctricos en la demanda eléctrica del sistema.	22
2.7	Carga de los Vehículos Eléctricos enchufables.	23
2.7.1	Perfiles de carga de los Vehículos Eléctricos.....	23
2.7.2	Métodos de carga de los Vehículos Eléctricos.....	25
2.8	Estrategia de cargas de los Vehículos Eléctricos.	27
2.8.1	Estrategia de carga no controlada	28
2.8.2	Estrategia de carga Multi-Tarifa	29
2.8.3	Estrategia de carga inteligente	29
2.8.4	Estrategia V2G.....	30
3	Problema de asignación de tráfico.....	34
3.1	Fundamentos de la asignación de tráfico.	35
3.2	Modelos de asignación de tráfico.	36
3.2.1	Modelos estáticos de asignación de tráfico.	36
3.2.2	Modelos dinámicos de asignación de tráfico.	38
3.3	Modelo de Multicommodity	41
4	Revisión Bibliográfica.....	42
4.1	Consideraciones generales.	42
4.2	Optimización de la carga vehículo eléctrico.	42
4.2.1	Optimización mediante estaciones de carga.....	44
4.3	Trabajos importantes para el desarrollo de este trabajo.	44
5	Descripción plataforma.....	46
5.1	Optimización de la plataforma.....	49
5.2	Propuesta de optimización de carga descentralizada.	49
5.2.1	Formulación del problema.	50
5.3	Optimización por Búsqueda Exhaustiva.	52
5.4	Datos e información de la red eléctrica.....	52
5.5	Datos para la simulación.....	53
5.5.1	Variable de decisión.....	53
5.6	Vehículos eléctricos.....	54
6	Resultados y comparaciones.....	55
6.1	Estrategia descentralizada.....	55
6.1.1	Escenario con 10% de Vehículos Eléctricos.	55
6.1.2	Escenario con un 30% de Vehículos Eléctricos.	57
6.1.3	Escenario con un 50% de Vehículos Eléctricos.	58
6.2	Comparación de estrategias.	60
6.2.1	Pérdidas de energía del sistema.	61

6.2.2 Pérdidas de energía provocada por los Vehículos Eléctricos	61
6.2.3 Cargabilidad máxima de las líneas del sistema	62
Discusión y conclusiones	64
Bibliografía	66

Introducción

Desde el asentamiento de las ciudades existe la necesidad de movilizarse entre ellas, por lo que siempre se ha buscado la forma más eficaz de poder realizarlas. Con el aumento del precio del petróleo y la alta emisión de gases de efecto invernadero en los últimos años, han impulsado el desarrollo de los vehículos eléctricos. En los últimos años se han desarrollado diferentes prototipos y modelos comerciales que demuestran una tendencia hacia una propulsión eléctrica.

Los vehículos eléctricos obtienen su energía al conectarse a la red eléctrica, por lo que al aumentar el parque vehicular se espera una gran conexión a la red trayendo consigo un impacto a la planificación y control que ya se tiene de la red eléctrica. Por lo que este cambio traería modificaciones a la demanda de la energía eléctrica, por consecuencia habrá nuevos desafíos de poder determinar la posible curva de demanda que se generaría con esta nueva carga, determinada por la necesidad de los usuarios.

Por esto, se desea comparar cual sería el mejor método de carga, ya sea la descentralizada, la cual consiste en que es el usuario quien decide donde y cuando recargar su vehículo, o la centralizada la cual consiste en que se crean incentivos para que el usuario recargue sus vehículos en horarios donde no haya peak de demanda.

Por ello, distintos proyectos de investigación nivel nacional e internacional tratan de evaluar el impacto y proponer soluciones teniendo en cuenta que la magnitud del impacto dependerá de cuándo, dónde y cómo se realice la carga de los vehículos eléctricos.

La interrogante de los autores en estudios de investigación es como determinar la proporción de vehículos eléctricos que se conectarán a la red de distribución, dado que existe una casi nula la cantidad de datos reales sobre su implantación. Algunos artículos solo consideran modelos de vehículos híbridos conectables [1], otros solamente vehículos eléctricos a batería [2].

En cuanto a cómo se considera la movilidad para el modelo del consumo de los vehículos eléctricos, hay propuestas que relacionan la movilidad y el consumo eléctrico. La generación de un modelo de simulación de transporte se puede realizar con distintas variables y existen diversas propuestas según el grado de profundidad y de estocasticidad que se quiere considerar. Una de las variables más utilizadas en los modelos de movilidad para la predicción de demanda de los vehículos eléctricos que se conectarán a la red es la distancia media recorrida.

Es por esto, que se ha creado una plataforma desarrollada en Matlab, en la cual se puede obtener el impacto que tendría en la red eléctrica el aumento de demanda a causa de la carga de vehículos eléctricos.

Al ya saber el impacto que se tendrá en la red eléctrica, se busca la forma de minimizar este impacto, por lo que se desarrolla una optimización de carga centralizada, donde el dueño de la red de distribución indica a cliente donde y cuando carga el vehículo, es por esta razón que en este proyecto se desarrollará una estrategia para una carga descentralizada, donde se encontrará una forma de hacer que el usuario cargue el vehículo en un horario donde se vea menos afectada la red eléctrica. Para ello, se realizará una revisión bibliográfica en la cual se han desarrollado diferentes métodos de optimización

En este trabajo se estudiará los resultados del impacto que producirán la implantación masiva de vehículos eléctricos sobre una red de distribución. En base a los trabajos previamente desarrollados y el análisis de resultados obtenidos aplicando diversas estrategias de cargas.

Ya se desarrolló la estrategia centralizada de carga de vehículos, por lo que se busca ahora en encontrar una estrategia descentralizada aplicando optimización, mejorando así los resultados obtenidos en los otros trabajos desarrollados y comparando con la estrategia centralizada optimizada.

Objetivos generales

- Desarrollar un modelo descentralizado de carga de Vehículo Eléctrico y comprar su desempeño con los modelos centralizados de carga desarrollados previamente. Para ello se debe estudiar y mejorar la plataforma de simulaciones ya desarrolladas con el fin de realizar una comparación efectiva de ambos modelos.

Objetivos específicos

- Estudiar los vehículos eléctricos y los modelos de carga utilizados comúnmente.
- Estudiar y generar mejoras a la plataforma de simulación desarrollada previamente en ambiente Matlab.
- Proponer e implementar una estrategia de optimización descentralizada de carga de los vehículos eléctrica.
- Realizar las comparaciones respectivas entre los modelos.

1 Red de Distribución Eléctrica

1.1 Sistema de Distribución Eléctrica.

Los sistemas de distribución eléctrica son parte del sistema de suministro eléctrico cuyo fin es el entregar energía eléctrica desde la subestación hasta los usuarios finales, cumpliendo con las normas establecidas. La comisión nacional de energía (CNE) la define como; “Aquellos sistemas constituidos por las líneas, subestaciones y equipos que permiten prestar el servicio de distribuir la electricidad hasta los consumidores finales, localizados en ciertas zonas de concesión geográfica explícitamente limitadas, o bien a usuarios ubicados fuera de zonas de concesión geográficas explícitamente limitadas, o bien usuarios ubicados fuera de zonas de concesión que se conecten a instalaciones de una concesionaria mediante líneas propias o de terceros”.

La mayor parte de la energía eléctrica proviene de largas líneas de transmisión, cuyo fin es transportar la energía generada por las centrales ubicada lejos del centro de consumos, en Chile las principales generadoras de energía eléctricas se basan en hidroeléctricas, de carbón, eólica y fotovoltaicas.

Estas distancias que se tiene que cubrir, provoca grandes pérdidas en el sistema, aumentado los costos. A nivel de distribución los flujos solían ser unidireccionales debido a las características radiales de la red, pero la tendencia es que la red de distribución se vuelva más activa, en donde no solo se abastecen consumidores, sino que también se conecten pequeñas unidades generadores en el área, que permiten hacer usufructo de la cercanía a las cargas [3].

La distribución tiene diferentes niveles de tensión dependiendo de la legislación y normativa de cada país. En Chile, el sistema de distribución opera en diferentes niveles, desde los 12 a 23 [kV]. Según la magnitud del voltaje se distinguen dos subsistemas:

- Sistema de distribución primario: formado por instalaciones que proporcionan energía en media tensión a los centros transformadores y redes de baja tensión. En zonas urbanas, las tensiones de

estas redes son típicamente de 12 [kV], 13,2 [kV] o 15 [kV], mientras que en las zonas rurales las tensiones suelen ser de 23 [kV].

- Sistema de distribución secundario: proveen energía en baja tensión, 380 [V] fase-fase o 220 [V] fase-neutro, a los usuarios finales.

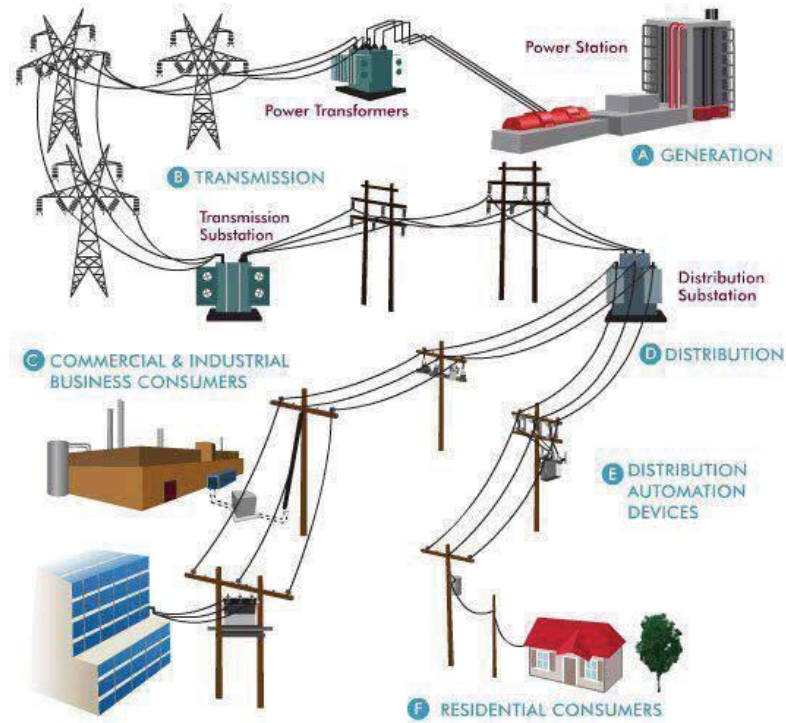


Figura 1-1: Estructura del sistema eléctrico [4].

También, existen dos tipos de alimentación en el sistema de distribución estos son:

- Sistema radial: se caracteriza por la alimentación por uno solo de sus extremos transmitiendo la energía en forma radial a los receptores y el emisor. Además, presenta un cableado en las partes.
- Sistema en anillado: se caracteriza por tener dos de sus extremos alimentados, quedando estos puntos intercalados en el anillo o bucle.

Estos dos sistemas se pueden observar en la figura 1-2.

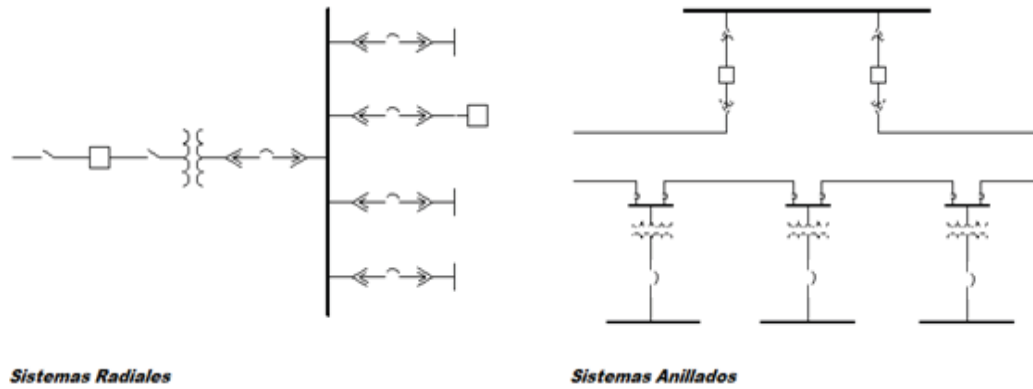


Figura 1-2: Sistema radial y anillado [4].

En los sistemas de distribución es más probable que haya fallas, estos se deben a: vandalismo, envejecimiento o falta de mantención del aislamiento, accidentes de tránsito o condiciones naturales como caídas de ramas, rayos, pájaros, entre otros.

La energía distribuida que llega a cada sector se muestra en la Fig.1-3, en esta imagen se puede observar que la mayor cantidad de energía va para el área de minería, por lo que el sector que más consume energía eléctrica es industrial con un total de 62%, mientras que la residencial solo tiene un 16%. Estos porcentajes, son un promedio en Chile, estos valores dependerán de cada ciudad, ya que los sectores predeterminados van variando.

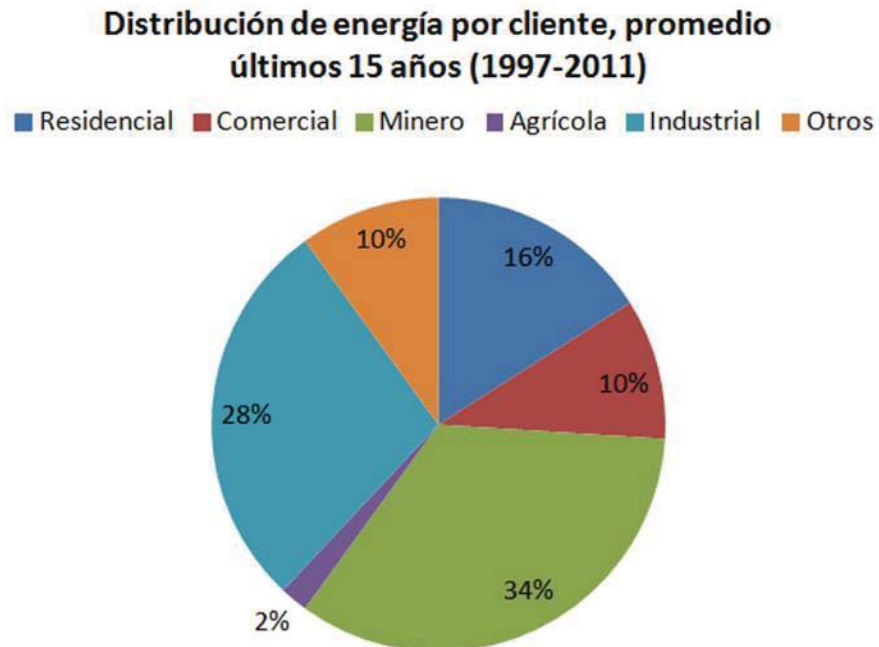


Figura 1-3: Distribución de energía por cliente en Chile [5].

1.2 Clasificación de los Sistemas de Distribución Eléctrica según zona geográfica.

1.2.1 Sistema de Distribucion Urbana.

Alimenta la distribución de energía eléctrica a poblaciones y centros urbanos de gran consumo, pero con una densidad de carga pequeña. Las principales características de las redes de distribución urbana son [6]:

- Usuarios muy concentrados
- Cargas bifilares, trifilares y trifásicas.
- Facilidad de accesos.
- Es necesario coordinar los trazados de la red eléctrica con las redes telefónicas, redes de acueducto, alcantarillados y otras redes, igualmente tener en cuenta los parámetros de las edificaciones.
- Se usan conductores de aluminio, cobre y ACSR.
- Facilidad de transporte desde los proveedores de materiales y equipos de sitio de obra.
- Transformadores generalmente trifásicos en áreas de alta densidad de carga y monofásicos trifilares en áreas de carga moderada.
- El trabajo puede ser mecanizado.
- La separación entre conductores y estructuras de baja y media tensión son menores.
- En caso de remodelaciones y arreglos es necesario coordinar con la empresa de energía los cortes y servicios.

1.2.2 Sistema de Distribucion Rural.

Estos sistemas son los encargados de suministrar las zonas de menor densidad de carga, por lo cual requiere de soluciones especiales en cuanto a quipos, debido a las distancias largas y cargas pequeñas. Lo que genera un elevado costo de los kWh consumido.

Las principales características de las redes de distribución rural son [6]:

- Usuarios muy dispersos.
- Cargas generalmente monofásicas.
- Dificultad de acceso en las zonas montañosas lo que implica extra-costo en el transporte y manejo de materiales.
- En zonas de difícil acceso se usa postes de madera inmunizado.
- Los transformadores por lo general son monofásicos.
- A menudo es necesario efectuar desmonte en la zona.

1.3 Clasificación de los Sistemas de Distribución Eléctrica según el tipo de carga.

1.3.1 Redes de Distribución para Carga Residencial.

Estas redes comprenden básicamente los edificios de apartamentos, multifuncionales, condominios, urbanizaciones, entre otro. Estas cargas se caracterizan por ser eminentemente resistivas (alumbrado y calefacción) y aparatos domésticos de pequeñas características reactivas. De acuerdo al nivel de vida y a los hábitos de los consumidores residenciales y teniendo en cuenta que en los centros urbanos las personas se

agrupan en sectores bien definidos, de acuerdo a las clases socioeconómicas, los abonados residenciales se clasifican en [6]:

- Zona clase alta: constituida por usuarios que tienen un alto consumo de energía eléctrica.
- Zona clase media: conformado por usuarios que tienen un consumo moderado de energía eléctrica.
- Zona clase baja: conformado por usuarios de barrios populares que tienen un consumo bajo de energía eléctrica.
- Zona tugurial: dentro de la cual están los usuarios de los asentamientos espontáneos sin ninguna planeación urbana y que presentan un consumo muy bajo de energía.

1.3.2 Redes de Distribución para Cargas Comerciales.

Caracterizadas por ser resistivas y se localizan en áreas céntricas de las ciudades donde se realizan actividades comerciales, centro comerciales y edificios de oficinas. Tienen algún componente inductivo que bajan un poco el factor de potencia. Hoy en día predominan cargas muy sensibles que introducen armónicos.

1.3.3 Redes de Distribución para Cargas Industriales.

Caracterizadas por tener componente de energía reactiva debido a la gran cantidad de motores conectados. Con frecuencia se hace necesario corregir el factor de potencia. Además de las redes independientes para fuerza motriz es indispensable distinguir otras para calefacción y alumbrado. A estas cargas se les controla el consumo de reactivos y se les realiza gestión de carga pues tiene doble tarifa (alta y baja) para evitar que su máximo coincida con el de la carga residencial.

1.3.4 Redes de Distribución para Carga de Alumbrado Público.

Para contribuir a la seguridad ciudadana en las horas nocturnas se instalan redes que alimentan lámparas de mercurio y sodio de carácter resistivo en la vía pública.

1.3.5 Redes de distribución para Cargas Mixtas.

En este tipo de redes se tiene varias de estas cargas en una misma red de distribución. No muy deseables pues se dificulta el control de pérdidas.

1.4 Característica de carga.

Para la adecuada configuración de una red eléctrica, es importante conocer la demanda energética en términos temporales y espaciales. En esta sección se incluyen los datos que nos darán una buena aproximación del comportamiento de las distintas cargas.

1.4.1 Carga Residencial.

Como se puede observar en la Fig. 1-4, el peak de consumo de potencia se encuentra entre las 20 y 23 horas, horario promedio en el que desciende la luz natural y en el cual la mayor parte de la población se encuentra en su hogar. Y el mínimo consumo, se encuentra entre las 01 y 05 horas.

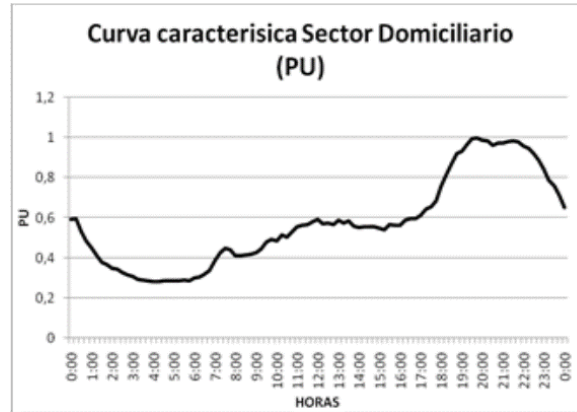


Figura 1-4: Demanda promedio típica de carga residencial.

1.4.2 Carga Comercial.

Como se puede observar en la Fig.1-5, el peak de demanda ocurre entre las 9 y 13 horas, donde comienza el horario de trabajo y comienza a disminuir a las 19 horas, donde la jornada laboral termina.

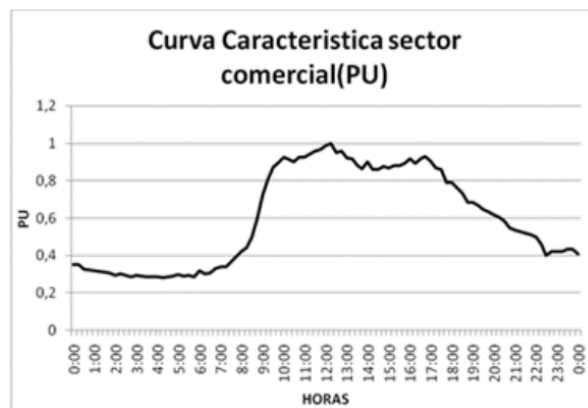


Figura 1-5: Demanda promedio típica de carga comercial.

1.4.3 Carga Industrial

En la Fig. 1-6 se puede observar la curva de la demanda típica de una carga industrial, se puede concluir que la potencia absorbida es más constante, debido a la tarifa diferida que tienen y por el control de su factor de potencia como se dijo anteriormente.

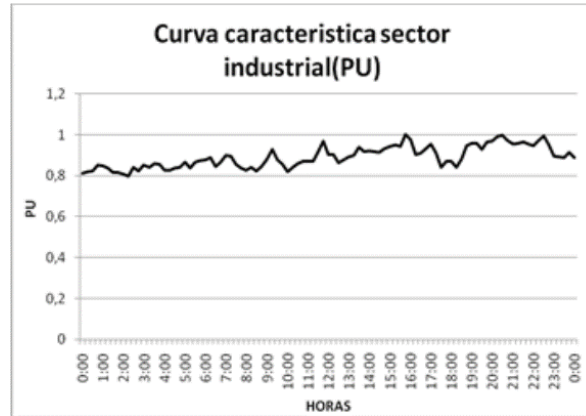


Figura 1-6: Demanda promedio típica de carga industrial.

En este trabajo se dará énfasis a la demanda de una carga residencial urbana y comercial, ya que en estos sectores es donde se concentrará la conexión de los vehículos eléctricos a la red.

1.5 Redes Eléctricas Inteligente.

La red eléctrica inteligente (o REI; *smart grid* en inglés) es una forma de gestión eficiente de la electricidad que utiliza la tecnología informática para optimizar la producción y la distribución de electricidad con el fin de equilibrar la oferta y la demanda entre productores y consumidores.

El término de red inteligente se asocia a menudo con el concepto de medidores inteligentes capaces de ofrecer una facturación detallada por franjas horarias, lo que permitiría a los consumidores no solo elegir las mejores tarifas, sino también discernir entre las horas de consumo, lo que a su vez permitirá un mejor uso de la red. Este sistema también permitiría mapear con más precisión el consumo y anticipar mejor las necesidades futuras a nivel más local.

La irrupción de las energías renovables en el panorama energético ha cambiado notablemente los flujos de energía en la red eléctrica: ahora los usuarios no solo consumen, sino también producen electricidad a través de la misma red. Por tanto, el flujo de energía es ahora bidireccional. Una red inteligente envía electricidad desde los proveedores a los consumidores usando tecnología digital bidireccional para controlar las necesidades del consumidor. Esto ayuda a ahorrar energía, reducir costes e incrementar la usabilidad y transparencia.

El usar la energía de manera eficiente ayuda a reducir las emisiones de CO_2 y el calentamiento global.

1.6 Generación Distribuida.

La Generación Distribuida (GD) o descentralizada es una parte fundamental en una ciudad inteligente, y consiste en la generación de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación instaladas cerca del consumo.

La GD es una cooperación entre micro-generación y generación de las centrales convencionales.

Esta distribución hace que la generación sea más equilibrada y que la ciudad no dependa tanto de las grandes centrales. Además, la micro-generación implica el uso de las energías renovables, lo que reducirá las emisiones de CO_2 .

Las principales características de la generación distribuida son [7]:

- Reduce las pérdidas en la red eléctrica. Estar más cerca del consumidor supone que las redes de transporte sean más cortas. Por lo tanto, la generación distribuida supone menos pérdidas de energía en el transporte de electricidad desde la generación hasta el consumidor. Esto también influye en el ahorro a la hora de elevar la tensión eléctrica para su transporte.
- Mejora la fiabilidad y la calidad del sistema eléctrico. Como hay pequeñas fuentes de generación, repartidas por el territorio, el fallo de una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema eléctrico.
- Potencia reducida. Las unidades de micro-generación suelen tener potencias inferiores a 3 [kW] aunque en general se suele decir que no sobrepasan 10[kW] de potencia instalada.
- Energía renovable. En la generación distribuida está muy presente las energías renovables, ya que al estar tan cerca del consumo, son más adecuadas.

1.7 Impacto de la Generación Distribuida

Los sistemas de distribución han sido diseñados para recibir energía en alta tensión y suministrarla a los consumidores. La introducción de la Generación Distribuida presenta un conjunto de nuevas condiciones en la red y como consecuencia de la aparición de nuevos problemas técnicos que deben ser estudiados al considerar la conexión de Generación Distribuida. Los parámetros del sistema eléctrico de distribución que pueden variar con la introducción de Generación Distribuida son los flujos de potencia, pérdidas, variaciones de tensión, niveles de fallo, etc. [8]

- *Flujo de potencia:* Con la implementación de la GD, pueden aparecer flujos de potencias inversos, y la red pasar de ser un sistema pasivo alimentado cargas, a un sistema activo donde los flujos de potencia y tensiones son determinados por generación y carga. En los casos en que la potencia generada por la GD es mayor que la consumida por las cargas conectadas, la potencia sobrante es transferida a través de las subestaciones primarias a la red de transporte de AT. Esta posibilidad de flujos de potencias inversos, pueden presentar algún problema en los transformadores donde se realiza a operación de control automático de la relación de transformación (taps), para regular la tensión en el lado de BT de los transformadores.
- *Variación de los niveles de tensión:* La operación de un GD tenderá a elevar el nivel local de tensión en la red a la cual está conectado, especialmente si el generador se conecta a un circuito de tensión regulada. Esto puede provocar conflictos ya que los niveles de tensión deben mantenerse dentro del porcentaje dictado por la norma. Operando el GD a un factor de potencia inductivo, en el cual absorbe potencia reactiva, tiende a reducir la elevación de la tensión. Sin embargo, las pérdidas en la red se incrementan. Las pérdidas se reducen considerablemente, cuanto más cerca esté la generación de la carga. Por otra parte, la reducción en las pérdidas y la mejora en la variación de la tensión pueden ser mejoradas si el generador produce potencia reactiva. Para conseguir esto el generador debe operar a un factor de potencia capacitivo. El arranque de un GD puede causar saltos bruscos de los niveles de tensión en la red de distribución. Estos saltos bruscos son causados por las corrientes de arranque, las cuales aparecen cuando los transformadores o los generadores de inducción son energizados. Los generadores síncronos no inducen corrientes de arranque altas por ellos mismos, pero sus

transformadores, pueden hacerlo cuando son energizados. Saltos bruscos de tensión pueden ocurrir cuando un generador es desconectado bruscamente de la red debido a un fallo u otra ocurrencia. [8]

2 Vehículos Eléctricos

Un vehículo eléctrico es aquel que se impulsa con la fuerza que produce un motor alimentado por electricidad.

Un vehículo eléctrico transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. El elemento conductor que tienen en su interior tiende a moverse cuando está dentro de un campo magnético y recibe corriente eléctrica.

Los motores eléctricos ofrecen más ventajas frente a los de combustión, empezando por un menor tamaño y peso, además de una mayor sencillez técnica.

Su utilización presenta ventajas desde el punto de vista medioambiental, ya que permite disminuir el nivel de emisiones de CO_2 a la atmósfera.

2.1 Historia del Vehículo Eléctrico.

El vehículo eléctrico fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron, hasta el punto de existir los eléctricos anteriores al motor de cuatro tiempos sobre el que Diésel (motor diésel) y Otto (gasolina), basaron el automóvil actual. Entre 1832 y 1839, el hombre de negocios escocés Robert Anderson, inventó el primer vehículo eléctrico puro. El profesor Sibrandus Stratingh de Groninga, en los Países Bajos, diseñó y construyó con ayuda de su asistente Christopher Becker un vehículo eléctrico a escala reducida en 1835 [9].

Al mejorar la pila eléctrica, por parte de los franceses, allanó el camino para los vehículos eléctricos. En 1867 en París, el inventor austriaco Franz Kravogl mostró un ciclo de dos ruedas con motor eléctrico. Luego en 1881, el francés Gustave Trouve demostró un automóvil de tres ruedas [9].

Justo antes de 1900, antes de la preeminencia de los motores de combustión interna, los automóviles eléctricos realizaron registros de velocidad y distancia notable, entre los que destacan la ruptura de la barrera de los 100 [km/h] [9].

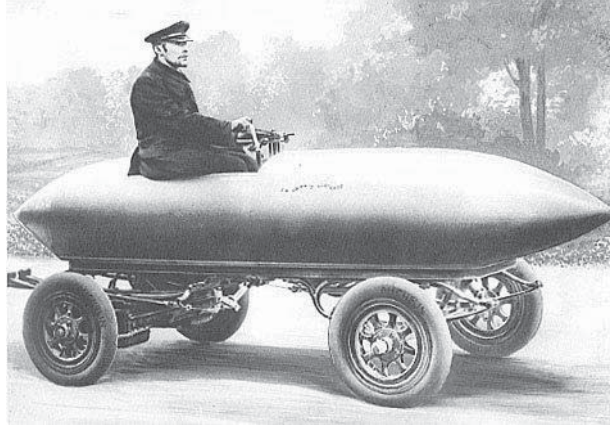


Figura 2-1: Camille Jenatton y su Jamais Contente, el primer vehículo eléctrico en superar los 100 km/h [9].

A finales de 1930, la industria del vehículo eléctrico desapareció por completo, quedando relegada a algunas aplicaciones industriales muy concretas, como montacargas, toros elevadores de batería eléctrica, o más recientemente carros de golf eléctricos, con los primeros modelos de Lektra en 1954.

La crisis del petróleo fue el detonante de su posterior reaparición, forzando a los fabricantes de vehículos convencionales a mejorar la eficiencia mientras se buscaban alternativas al petróleo, una materia prima de origen extranjero que podía provocar gran efecto en la economía occidental si empezaba a escasear.

Algunas iniciativas legislativas de exigir vehículos de emisión cero impulsaron a las grandes automovilísticas a investigar en este campo. El estado de California, el más contaminado de EEUU, fue el pionero con su Zero Emission Mandate.

A finales de los 90 General Motors creó el primer vehículo eléctrico de alta prestación, empujado por las leyes medioambientales del estado de California. La restricción de las emisiones de gases efecto invernadero promovido por protocolos como el de Kioto es uno de los motivos más importantes que marcan el desarrollo del vehículo eléctrico, junto con la mentalización social sobre problemas de medioambientales y el aumento significativo del precio del petróleo.

En el año 2011 Bruselas presentó el plan llamado “Transporte 2050”. El objetivo es reducir en un 50% los autos de gasolina y gasóleo hasta el 2030, para que 20 años más tarde, en 2050, ya no existan estos tipos de auto en las ciudades europeas y sean sustituidos por otros alimentados por combustibles “limpios”: eléctricos e hidrógenos o híbridos [10].

2.2 Tipos de Vehículos Eléctricos.

2.2.1 Vehículo Eléctrico Híbrido (VEH).

Es un vehículo de propulsión alternativa combinando un motor eléctrico y un motor de combustión, el primer híbrido data del 1899, realizado por los hermanos Henri y Nicolas Pieper, que tenía un motor de gasolina unido a uno eléctrico bajo el asiento. A velocidad de crucero el motor eléctrico generaba electricidad para las baterías, para luego dar potencia extra al subir pendientes o acelerar.

Existen distintos tipos de vehículos híbridos según el acoplamiento de los motores, estos son:

- *Sistema paralelo:* el motor térmico es la principal fuente de energía y el motor eléctrico actúa aportando más potencia al sistema. El motor eléctrico ofrece su potencia en la salida y en la aceleración, cuando el motor térmico consume más. Este sistema es muy simple, por lo que se puede implementar este sistema a vehículos ya existentes, sin la necesidad de diseños específicos y facilita la equiparación de su coste al de un vehículo convencional.
- *Sistema combinado:* el motor eléctrico funciona en solitario a baja velocidad, mientras que, en alta velocidad, el motor térmico y eléctrico trabajan a la vez. El motor térmico combina las funciones de propulsión del vehículo y de alimentación del generador, que provee de energía al motor eléctrico, lo que suele aumentar la eficiencia del sistema. El Toyota Prius utiliza este sistema.
- *Sistema en serie:* el vehículo funciona solo con el motor eléctrico, que obtiene la energía desde un generador alimentado por el motor térmico. El Opel Ampera utiliza este sistema.

A nivel mundial en 2016 ya circulaban más de 58 millones de vehículos híbridos eléctricos livianos, liderados por EEUU y Japón, seguido por Europa. A nivel mundial los modelos híbridos más vendidos son fabricados por las empresas Toyota Motor Corporation, con 9 millones en todo el mundo hasta abril de 2016, Honda Motor Co, con más de 1,35 millones hasta junio del 2014, Ford Motor Corporation, con más de 424 mil en EEUU hasta junio de 2015 y Grupo Hyundai con 200 mil hasta marzo de 2014.

2.2.2 Vehículos Eléctricos de Batería (VEB).

Es un vehículo de propulsión alternativa impulsado por un motor eléctrico alimentado por unas baterías.

Como se sabe, las baterías han tenido un alto costo de fabricación, peso y tiempo de recarga con escasa vida útil, lo que limita la fabricación masiva de vehículos eléctricos de batería. Pero el avance tecnológico ha solucionado algunos de estos problemas, por esto se han fabricado estos tipos de vehículos.

Las desventajas de este tipo de vehículo son: baja densidad de energía en comparación con un vehículo de combustible, la recargas por lo general son muy lentas, lo que es un problema con los pocos puntos de carga que hay disponibles. Y por último el alto costo de su batería.

2.2.3 Vehículos Eléctricos Enchufables (PHV).

Estos vehículos cuentan con baterías que pueden ser cargadas enchufando el vehículo a una fuente externa de energía eléctrica. Este tipo de vehículo tiene la característica de un híbrido y un eléctrico, ya que está dotado de un motor de combustión interna y de un motor eléctrico acompañado de un paquete de materias, pero con la diferencia que éstas pueden recargarse enchufándolo a un sistema de suministro eléctrico.

El primer vehículo de producción comercial del mundo fue el Sena F3DM, fabricado por la empresa china BYD Auto, lanzado en diciembre de 2008.

En el 2010, los modelos Toyota Prius o Ford Escae Hybrid, fueron modificados para utilizar baterías recargables y están dotados de un mayor número de baterías para extender el rango de operación en modo exclusivamente eléctricos.

Estos vehículos pueden viajar 32 [km] sin utilizar la propulsión del motor de combustión interna. Las principales características son:

- Obtienen su energía de propulsión de una batería con capacidad de por lo menos 4 [kWh].
- Pueden ser recargado de una fuente externa de electricidad para efectos de su poder de propulsión.
- Es un vehículo automotor liviano.

Su principal desventaja es el tamaño del paquete de baterías y su peso adicional, así su seguridad y durabilidad. Y los pocos lugares disponibles para poder cargar los vehículos.

2.2.4 Vehículos Eléctricos de Combustible (VEC).

Es cualquier vehículo que use una celda de combustible para producir energía automotriz. Las celdas de combustible en los vehículos de hidrogeno crean electricidad para hacer funcionar un motor eléctrico usando hidrogeno o un combustible de hidrocarbano y oxigeno del aire.

La eficiencia de la celda de combustible es limitada, debido a que se requiere energía para separar el hidrogeno de compuestos naturales (como el agua, gas, etc.), también para compactarlo ya sea por compresión o licuefacción, más la pérdida de energía al convertirlo en electricidad con las celdas de combustible, lo cual deja solamente un 25% de su uso práctico.

Todas las celdas de combustible están compuestas de tres partes: un electrolito, un ánodo y un cátodo. Estas funcionan de manera similar a la de una batería convencional, pero en vez de recargarse, estas son almacenadas con hidrogeno.

2.3 Descripción técnica de los Vehículos Eléctricos.

El vehículo eléctrico no difiere demasiado de un vehículo convencional. El principal cambio reside en el cambio de sistema de propulsión, pero el resto del vehículo permanece prácticamente inalterado.

En [11] se explica el funcionamiento básico de un vehículo eléctrico, se da como ejemplo un vehículo eléctrico puro.

Se pueden encontrar diferentes funcionamientos en los distintos vehículos eléctricos, esto se debe a una mejor eficiencia, por esto se les incorpora frenado regenerativo o un motor de combustión interna. En la figura 2-2, se pueden ver los distintos esquemas según el tipo de vehículo

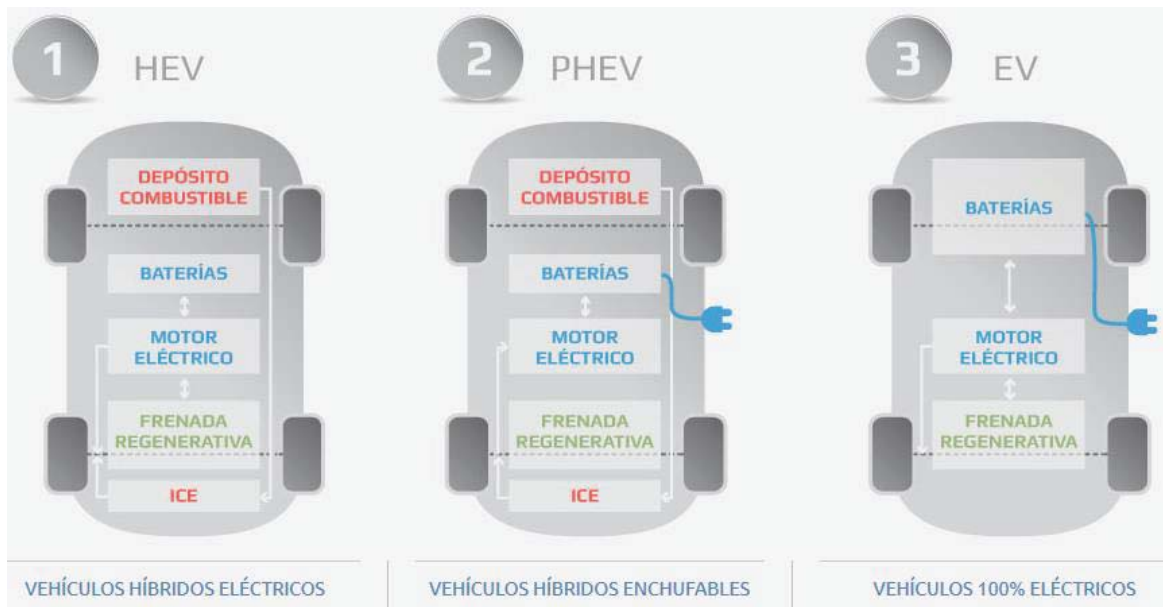


Figura 2-2: Vehículo Eléctrico y sus principales componentes [12].

2.4 Principales componentes de un Vehículo Eléctrico.

Un vehículo eléctrico se compone básicamente de los siguientes elementos:

2.4.1 Cargador.

El cargador o transformador convertidor es aquel elemento que absorbe la electricidad de forma alterna directamente desde la red y la transforma en corriente continua, para así poder cargar la batería principal.

Existen tipos de recargas para baterías, estas se conocen como recargas convencionales o recarga rápida. La rapidez de la recarga se obtiene según el tipo de corriente eléctrica, alterna o continua, obteniendo distintos niveles de amperaje y, en consecuencia, de potencia eléctrica.

Endesa España, en su página web, clasifica los tipos de carga de la siguiente manera:

- *Recarga convencional:* la carga convencional aplica niveles de potencia que implican una carga con una duración de 8 horas aproximadamente. La carga convencional monofásica emplea la intensidad y voltaje eléctricos del mismo nivel que la propia vivienda (16[A] y 220 [V]). Estos implican que la potencia eléctrica que puede entregar el punto para este tipo de cargas es aproximadamente 3,7 [kW] [13].
- *Recarga Semi-Rápida:* esta recarga aplica niveles de potencia que implica una carga con una duración de unas 4 horas aproximadamente. La carga semi-rápida emplea 32 A de intensidad y 230 V de voltaje eléctrico. Esto implica que la potencia eléctrica que puede entregar el punto para este tipo de cargas es de aproximadamente 7,3 kW. Esta solución es óptima, como en el caso de la recarga convencional, para recargar el vehículo eléctrico durante la noche en un garaje [13].
- *Recarga rápida:* supone que en 15 minutos se puede cargar el 65% de la batería. La carga rápida emplea una mayor intensidad eléctrica y, además, entrega la energía en corriente continua, obteniéndose una potencia de salida de alrededor de 50 [kW]. Esta solución es la que, desde el punto de vista del cliente, se asemeja a sus hábitos actuales de repostaje con un vehículo de combustión.

Las exigencias a nivel eléctrico son mayores que en la recarga convencional. Lo que puede implicar la necesidad de adecuación de la red eléctrica existente [13]

2.4.2 Batería.

Este es uno de los principales elementos de un vehículo eléctrico, ya que le da la autonomía y el precio que este tendrá. Las baterías almacenan la electricidad mediante elementos electroquímicos, un proceso con pérdidas mínimas que permiten un rendimiento próximo al 100%. Las baterías deben entregar la energía en cualquier momento, por lo que soportan finitos ciclos de carga y descarga completos, llamado ciclo de vida.

Las baterías utilizadas en los distintos vehículos se pueden observar en la tabla 2-1.

Tabla 2-1 Modelos de EV y sus baterías [14].

Compañía	Modelo	Tecnología de Batería
GM	Chevrolet volt	Li-ion
	Saturn Vue Hybrid	NiMH
Ford	Escape, Fusion, MKZ HEV	NiMH
	Escape PHEV	Li-ion
Toyota	Prius, Lexus	NiMH
Honda	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	Sonata	Polímero de litio
Chrysler	Chrysler 200C EV	Li-ion
BMW	X6	NiMH
	Mini E (2012)	Li-ion
BYD	E6	Li-ion
Daimler Benz	ML450, S400	NiMH
	Smart EV (2010)	Li-ion
Mitsubishi	iMiEV	Li-ion
Nissan	Altima	NiMH
	Leaf (2010)	Li-ion
Tesla	Roadster (2009)	Li-ion
Think	Think EV	Li-ion, Sal fundida

Como se puede observar en la tabla 2-1 la batería más utilizadas son de ion de litio (Li-ion) y las de níquel e hidruro metálico (NiMH). Las baterías NiMH son utilizadas en la mayoría de los casos como una fuente de energía secundaria en vehículos híbridos, en donde son usadas en conjunto con un motor, mientras que las baterías Li-ion son usadas como fuente primaria de energía en vehículo eléctrico de batería.

Las baterías Li-ion almacenan más energía que las NiMH, pero, por otro lado, padecen de un alto costo y menos seguras.

En la tabla 2-2 se resumen las principales especificaciones técnicas de las baterías utilizadas por los fabricantes de los vehículos eléctricos a nivel internacional, entre ellas las baterías anteriores mencionadas.

Tabla 2-2 Baterías eléctricas y sus propiedades [14].

Batería	Potencial (ΔV)/V	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía útil (Wh/l)	Ciclos de vida	Eficiencia
Plomo ácido	2.1	252 (35)	70	500-1000	>80%
NiCd	1.3	244 (35)	100	800	75%
NiMH	1.3	240 (75)	240	750-1200+	70%
Li-ion	4.1	410 (180)	400	1000+	>95%
Na/S	2.1	792(170)	345	800+	80%
Na/NiCl ₂	2.6	787(115)	190	1200+	80%

2.4.3 Conversor

El conversor transforma la alta tensión de corriente continua, que aporta la batería principal, en baja tensión de corriente continua. Este tipo de corriente es el que se utiliza para alimentar las baterías auxiliares de 12 [V], que son las que alimentan los componentes auxiliares eléctricos del vehículo.

2.4.4 Inversor

Los inversores u onduladores son los encargados de transformar la corriente continua que cede la batería principal, en corriente alterna. DE esa manera se puede alimentar el motor en corriente alterna del vehículo eléctrico.

En el caso del vehículo con corriente continua, este componente no existe.

2.4.5 Motor Eléctrico

El motor de un vehículo eléctrico puede ser un motor de corriente alterna o continua. La diferencia entre estos los dos tipos, principalmente, es la forma de alimentación. El de corriente continua se alimenta directamente desde la batería principal, y el de corriente alterna se alimenta a través de la energía que emite la batería previamente transformada e corriente alterna a través del inversor [15]

Los motores para vehículos eléctricos e híbridos se pueden clasificar en dos grupos:

- Motor con escobillas (colector): Estos consiste básicamente en motores DC, los cuales por su estructura son menos confiable y menos aptos para altas velocidades, además de requerir un mantenimiento más seguido que otros tipos de motores. A pesar de estas desventajas, el motor con escobillas ocupa un sitio importante en la propulsión eléctrica debido a su control más simple y tecnología consolidada.
- Motores sin escobillas: En la actualidad han ganado ventaja sobre los motores DC gracias a una mayor eficiencia, mayor densidad de energía menor costo operativo. Además, presentan una mayor confiabilidad y requieren mucho menos mantenimiento en comparación a los motores con escobilla, por lo que se han vuelto más atractivo. Dentro de estos motores, los más utilizados son los motores de inducción, principalmente por su bajo costo, alta confiabilidad y escasa mantención requerida.

Sin embargo, el control que requieren estos motores es complejo, y pueden sufrir de bajas en su eficiencia para cargas ligeras y un rango limitado de operación de potencia constante [15].

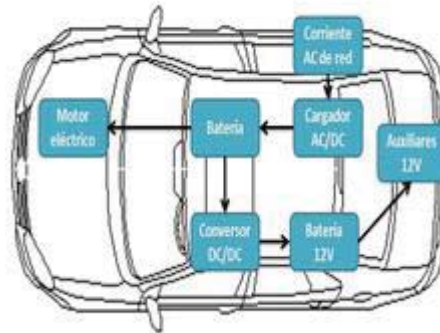


Figura 2-3: Esquema general sobre los componentes de un vehículo eléctrico con motor en corriente continua [15].

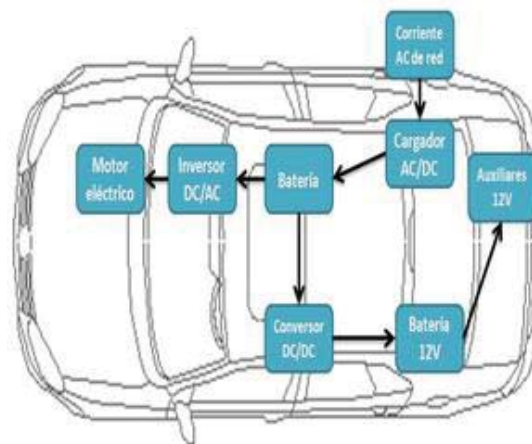


Figura 2-4: Esquema general sobre los componentes de un vehículo electro con motor de corriente alterna [15].

2.4.6 Convertidores de Potencia.

Se le llama convertidores de potencia a los dispositivos que utilizan semiconductores para convertir una forma de energía en otra. Estas conversiones pueden ser de CC a CA, CC a CC de otra magnitud, CA a CC o CA de otra magnitud y/o frecuencia.

Los vehículos eléctricos deben contar con varios convertidores para su operación, entre ellos se cuentan los rectificadores y convertidores DC/DC para la carga de la batería, los inversores para alimentar los motores (generalmente AC). En la figura 2-5 se muestra un esquema básico de la red interna de un vehículo eléctrico de baterías.

Además, para la propulsión de los vehículos eléctricos, los motores suelen energizarse con fuentes DC (baterías, celdas de combustible) con una tensión en los terminales aproximadamente constante. Es por esto que se hace necesario incorporar inversores DC/AC de frecuencia y tensión variable para alimentar al motor.

Para control de tensión o frecuencia constante en un motor de inducción, se utiliza PWM sinusoidal, que es más recomendable en motores que operan con regulación de baja velocidad. Sin embargo, para variaciones rápidas de frecuencia y velocidad, presenta una respuesta pobre, además de una baja eficiencia de operación debido a un bajo factor de potencia, razón por la cual ha sido desarrollado en los últimos 20 años la tecnología del control vectorial, que supera la mayoría de las desventajas del control de tensión o frecuencias constantes en motores AC. El mismo tipo de control se aplica a motores síncronos [15].

En el caso de los motores sin escobillas (BLDC), se controla el torque indirectamente a través de un control de corriente, en el cual el controlador envía las señales de disparo al inversor que conecta la fuente con el motor, según cual sea la corriente deseada y según la información que recibe de los sensores sobre la posición del rotor. En aplicaciones de tracción, puede requerirse un control de velocidad, por ejemplo, el auto-crucero. Muchas aplicaciones de alto rendimiento incluyen retroalimentación de corriente DC para proteger la unidad y el motor de sobre-corrientes. El controlador de velocidad puede ser cualquier tipo de controlador clásico (un controlador PI, por ejemplo) o uno más avanzado (como un controlador de inteligencia artificial) [15].

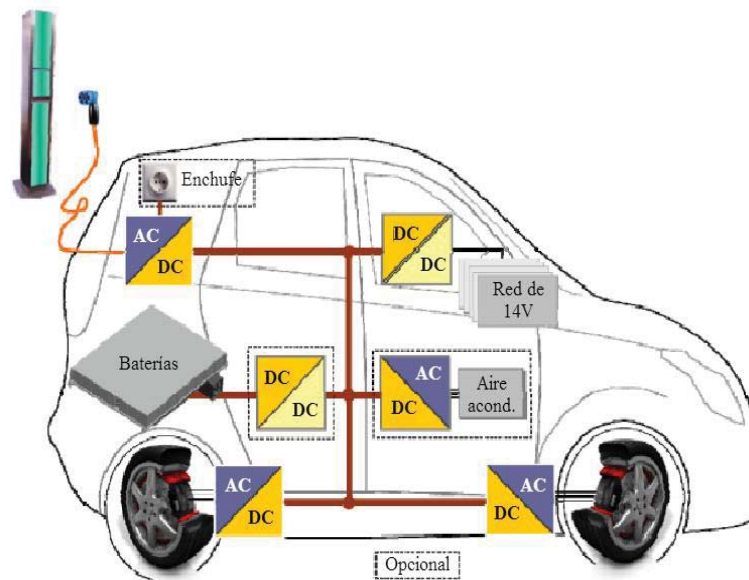


Figura 2-5: Estructura básica de una red de tensión en un VEB [7].

2.4.7 Frenos regenerativos.

Los frenos regenerativos es un dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica, por lo que es una característica más beneficiosa de un vehículo eléctrico.

El desempeño del freno en un vehículo es un punto clave de su seguridad, y debido a que debe disminuir la velocidad rápidamente mientras mantiene la dirección controlable por el manubrio, se requiere que el sistema de frenado sea capaz de proporcionar el suficiente torque en todas las ruedas. Por lo general, el torque que se requiere es mucho mayor al torque que puede producir el motor eléctrico, razón por la cual, en los VE, VEH y FCV, los sistemas de frenado por fricción mecánica deben coexistir en el frenado regenerativo eléctrico. Por lo tanto, este es un sistema híbrido de frenado.

2.5 Mercado de los Vehículos Eléctricos.

De apoco los vehículos eléctricos van ganando terreno en el mercado automovilístico. En España, en los últimos meses de noviembre a febrero se han comercializado 5.537 vehículos híbridos, que representan un 90% más que en el mismo periodo 12 meses antes [16].

La lenta penetración de estos vehículos, menos contaminantes, en España está impulsada en buena medida por el mercado madrileño que concentra casi el 36% de la venta de los vehículos y cuyo avance se ha acelerado en los últimos meses.

En Chile existen algunas marcas tales como Mitsubishi, BMW y Renault con vehículos de este tipo y aunque desde la primera afirman que los vehículos eléctricos llevan ya varios años en el país, no se ha logrado la penetración en el mercado automotriz que se esperaba como en otros países.

Dentro de sus razones se explican la falta de un respaldo y garantía para contar con expertos que asesoren antes y después de la compra, el precio del dólar, el miedo a cambiar de tecnología y el valor del automóvil.

La marca japonesa, que firmó un acuerdo para favorecer y facilitar la recarga de autos eléctricos, fue pionera en esta área, al traer en 2011 el Mitsubishi i-MiEV, el primer automóvil 100% eléctrico de la historia fabricado en forma masiva. Tiene un valor de \$30.500.000 y puede recargarse desde un enchufe convencional conectado a la red eléctrica por ocho horas.

Al tener un rendimiento de hasta 160 kilómetros, lo que se gastaría en cargarlo según los datos de Chilectra (\$1.600 por 130 [km]) serían \$2.276. En cambio, con el mismo de un auto con motor diésel más vendido el primer semestre (Mitsubishi L-200) el gasto sería de \$11.873, teniendo en cuenta que rinde 9,5 kilómetros por litro de bencina.

En tanto, la marca alemana a fines del año 2014 escogió Chile para comenzar con la distribución y venta en Sudamérica del vehículo 100% eléctrico, BMW i3, y el BMW i8 (puede ser híbrido). Sus precios para agosto de 2015 van desde los US\$ 55.900 (más de \$37 millones), es decir, un auto que estaría dentro de la categoría de lujo, un sector que en los últimos cinco años ha crecido un 60%.

Estos modelos incorporan un cargador con dos tipos de potencia: 3,7 [kWh] y 7,4 [kWh]. Teniendo en cuenta que 1 [kW/h] en Chilectra cuesta \$102,5, el gasto sería de \$379,25 y \$758,5, respectivamente.

Por su parte, la compañía francesa lanzó cuatro modelos “Zero Emission” (Z.E.) que se recargan a través de un “punto fijo” o “wallbox” en un rango de entre media y nueve horas: Zoe y Kangoo que tienen un valor de \$24.990.000; Fluence de \$19.990.000; y Twizy, de \$14.490.000.

Estos vehículos tienen un rendimiento de hasta 185 kilómetros con el motor cargado por lo que se gastarían \$2.276 en electricidad, mientras que comparado con el Mitsubishi L-200 sería de \$13.728. En el caso del impuesto verde, las personas con este tipo de vehículos se ahorrarían \$579.040, mientras que por multas por no cumplir con la restricción (1 a 1,5 UTM) y por no respetar los ejes ambientales (1 UTM) serían entre \$44.067 y \$66.100 [17].

A continuación, se muestra una tabla con los precios de los vehículos eléctricos que se pueden encontrar en Chile:

Tabla 2-3: Precio de vehículos eléctricos en Chile [18].

Modelo	Tipo	Rendimiento energético en ciudad	Precio [pesos]
Renault Kangoo ZE Furgón	Eléctrico	6,5 [km/kWh]	\$17.000.000
BYD E6 Automóvil	Eléctrico	4,9 [km/kWh]	\$35.000.000
Hyundai Ioniq eléctrico	Eléctrico	10 [km/kWh]	\$23.990.000
Mitsubishi Outlander PHEV	Hibrido	4,3 [km/kWh]	\$24.990.000
Renault Fluence ZE Sedan	Eléctrico	6,6 [km/kWh]	\$10.990.000
BMW i3 HatchBack	Eléctrico	7,2 [km/kWh]	\$42.387.680
Renault ZOE ZE HatchBack	Eléctrico	6,8 [km/kWh]	\$24.990.000
Mitsubishi I-MIEV HatchBack	Eléctrico	5,3 [km/kWh]	\$30.500.000

2.6 Impacto de los Vehículos Eléctricos en la Red de Distribución.

Cuando un vehículo comienza a cargarse, este es otro consumidor para la red eléctrica, al igual que lo es cualquiera de los electrodomésticos del hogar, por esto es muy importante saber el impacto que tendría la carga de los vehículos eléctricos cuando el parque vehicular aumente.

Estos efectos que tendrían en la red de distribución se agrupan en relación con la capacidad de las redes, calidad y continuidad del suministro, considerando la posibilidad de que los vehículos eléctricos generen un proceso de carga o descarga desde y hacia el sistema eléctrico.

2.6.1 Efecto de la carga de Vehículos Eléctricos en la demanda eléctrica del sistema.

Dentro de la incertidumbre para pronosticar cual será la penetración de vehículos eléctrico en el futuro, existen diversos estudios que plantean un crecimiento exponencial. Aunque actualmente la gran mayoría de los

vehículos eléctricos son híbridos no enchufables, se espera que en el futuro se comercializaran más híbridos enchufables puramente eléctricos.

La recarga masiva de las baterías de los vehículos tendrá un impacto en la demanda del sistema eléctrico, se sabe que la demanda en una urbe va variando según temporada determinada por la temperatura, número de días laborales y actividad económica de la población.

La combinación de estos factores determina que la curva de carga diaria de un día se caracteriza por lo general por un mayor consumo en las horas del mediodía y la tarde y un menor consumo en la madrugada, lo que puede variar según las estaciones del año y se acentúa en los días de demanda máxima anual del sistema.

Siempre es deseable medidas de eficiencia y gestión de la demanda que busquen mejorar la curva de demanda o de carga mediante el desplazamiento de consumos en punta a periodos de valle, esto debido a que si el factor de utilización de consumos es consistentemente el precio medio de la electricidad aumentara de modo de financiar los costos fijos asociados a la generación, cuyos valores depende de la fuente de generación.

2.7 Carga de los Vehículos Eléctricos enchufables.

2.7.1 Perfiles de carga de los Vehículos Eléctricos

Un factor clave para la carga de los VE es la potencia, esta está en función de la tensión y la corriente de conexión a la red, donde la capacidad de la batería determinara el tiempo de carga completa.

La carga de las baterías son muy similares y se puede dividir en ciertas etapas, como se muestra en la figura 2-7, en la primera etapa, de una hora, se carga la batería con una corriente constante hasta que el nivel de voltaje de las celdas alcanza el umbral de tensión superior, luego, en la hora tres las baterías se cargan un nivel constante de tensión mientras la corriente disminuye en un intervalo de 3 a 5% del valor nominal. Por último, la tasa de carga disminuye al final del periodo de carga, después de estar cargado completamente, continua con un porcentaje de variación muy pequeño, donde hay un componente de auto descarga para cuando la batería está cargada de manera de compensar el efecto.

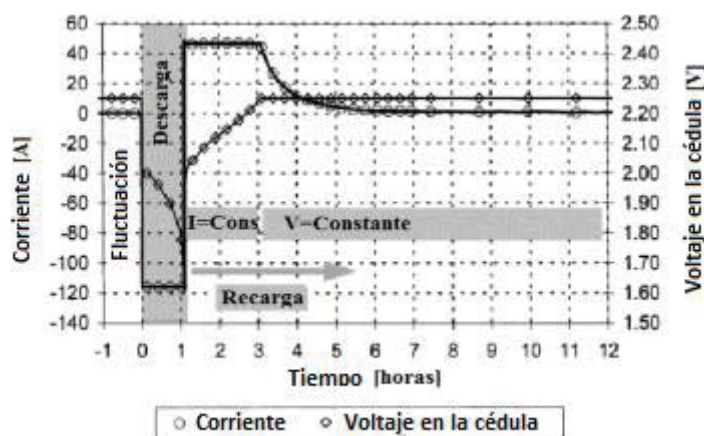


Figura 2-6: Ciclo de carga de una batería plomo-ácido [1].

Ahora bien, llevando esta carga de batería a los VE, se puede ver los tiempos de carga según el modelo de vehículo eléctrico, mostrado en la tabla 2-3, donde se compara los tiempos según capacidad de la batería para cargarse desde un 20% a un 100% a un rango de 20 millas específicamente para vehículos eléctricos híbridos.

Tabla 2-4: Tiempos de carga según capacidad [19].

Tipo de PHEV	Capacidad (kwh)	Características del circuito de carga (Vac/15A)	Tiempo de carga (horas)
Sedan-Compacto	5.1	120	3.9 – 5.4
Sedan-Tamaño medio	5.9	120	4.4 – 5.9
Vehículo deportivo utilitario-tamaño medio	7.7	120	5.4 – 5.9
Vehículo deportivo utilitario- Tamaño Grande	9.3	120	6.3 – 8.2

De esta tabla se puede concluir que a mayor capacidad de la batería esta tiende a aumentar el tiempo de carga.

Con estos datos se puede llegar a una carga estándar en los Estados Unidos [19], con una suposición de que la energía suministrada a la batería es constante, tanto la corriente como la tensión. Así, se puede observar en la figura 2-8 un perfil de carga con una tasa constante del vehículo eléctrico, lo que hace que se cargue en menos tiempo.

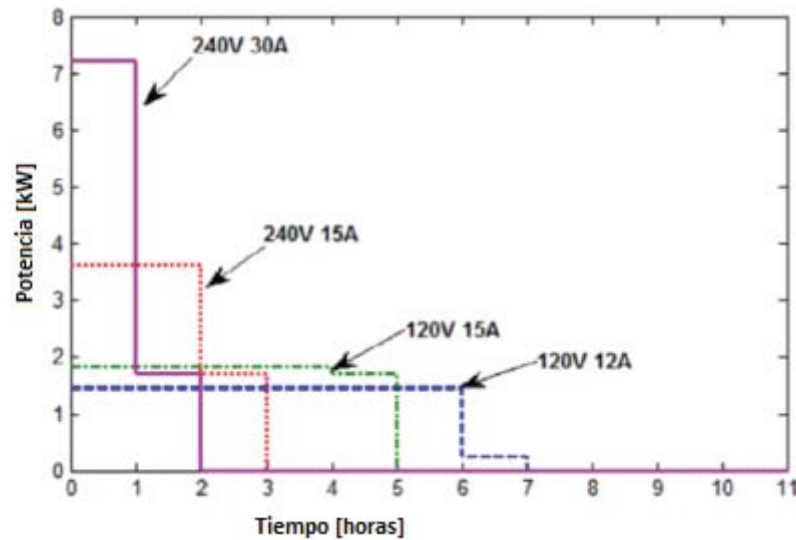


Figura 2-7: Perfil de carga típica de un vehículo eléctrico [20].

Por lo tanto, cuando se tienen características de voltaje y corriente constante se puede predecir la carga de los vehículos eléctricos, con pequeñas variaciones de tiempo, dependiendo de la característica del cargador utilizado para la recarga. Sin embargo, con este nivel constante de energía, algunos vehículos eléctricos no podrían ser cargados, esto se debe a que estén conectados a la misma red, y esta no tenga la capacidad suficiente.

Como la demanda es variante en el tiempo según el consumidor, esto podría facilitar a que la disponibilidad de la red no este habilitado para nuevas conexiones de vehículos eléctricos, por lo que el operador responsable

de que el sistema sea estable, se ve obligado a buscar soluciones que mejoren la capacidad total del sistema durante las 24 horas del día. Además, existe el problema de aleatoriedad de la carga por parte de los usuarios, ya que como no hay incentivos para que se cargue los vehículos en donde la energía es más barata, o coordinación de la demanda adicional generada por la carga, el impacto de la conexión podría ir más allá del sistema de distribución, transmisión y generación. El contexto del uso de la infraestructura actual está siendo estudiado para que las consecuencias de esta demanda adicional sean superadas por la gestión de la demanda del sistema, como lo es la incorporación de nuevos conceptos como lo es la Red Inteligente.

2.7.2 Métodos de carga de los Vehículos Eléctricos.

En 1991, todo el comité de trabajo EPRI se reunió con el fin de invitar a los interesados en la industria de vehículos eléctricos establecer elementos de consenso sobre los métodos y requisitos de carga de los vehículos. En esta reunión fueron definidos 4 niveles de carga, que se registraron en el Código Eléctrico Nacional (NEC), registrándose en la norma IEC-61851, la cual establece:

- Modo carga 1: Es aquel modo de carga de un vehículo eléctrico, que se realiza por medio de un enchufe clásico doméstico, y que se destina temporalmente o de forma constante a la carga de vehículo. Este método es el más sencillo, se utiliza un conector Schuko.



Figura 2-8: Ejemplo modo de carga 1.

- Modo carga 2: Recarga con comunicación de parámetros de nivel bajo. Se conecta un dispositivo intermedio en el cable de carga para tener un control del estado de carga. Este modo de carga también se puede realizar con el conector Schuko.



Figura 2-10: Ejemplo modo de carga 2.

- Modo de carga 3: Nivel de comunicación de parámetros de carga entre el vehículo eléctrico y el punto de recarga elevados. Los dispositivos de control de carga, llamado Wall-box, se encuentran en el interior del punto de recarga, el cable de recarga lleva incorporados los cables de intercambio de datos. Se utilizan conectores tipo 1, tipo 2 y tipo 3.



Figura 2-11: Ejemplo modo carga 3.



Figura 2-12: Conectores tipo 1, tipo 2 y tipo 3 respectivamente.

- Modo de carga 4: Modo de carga en corriente continua. Grado elevado de comunicación de parámetros de carga entre vehículo y el punto de recarga. Para recargas rápidas. Conectores CHAdeMO y COMBO. Restringido normalmente a estaciones de carga.



Figura 2-13: Ejemplo modo de carga 4.



Figura 2-14: Conector tipo CHAdeMO. [21]

El modo estándar de recarga más habitual, en España, y el recomendado por los fabricantes es el modo3, con los conectores tipo 1 y 2.

2.8 Estrategia de cargas de los Vehículos Eléctricos.

Como se ha mencionado anteriormente, la carga de vehículos eléctricos traería dificultades a la red eléctrica, como por ejemplo el aumento de pérdida, sobrecarga de transformadores, entre otros. Con la entrada de esta nueva carga, la demanda de energía variaría demasiado, por lo que se tendría que buscar una forma de integración de ésta de manera inteligente, para disminuir lo más posible los problemas que esta podría traer, y a su vez mejorar las baterías de los vehículos.



Figura 2-15: Estrategias de carga [22].

2.8.1 Estrategia de carga no controlada

Está más que una estrategia, es lo que pasa habitualmente con los usuarios al momento de usar la electricidad, el cliente puede disponer de la electricidad cuando estime conveniente, por lo que se supone que se cargara el vehículo luego del día laboral, lo que provocaría una mayor demanda en el horario punta, como se ve en la figura 2-16.

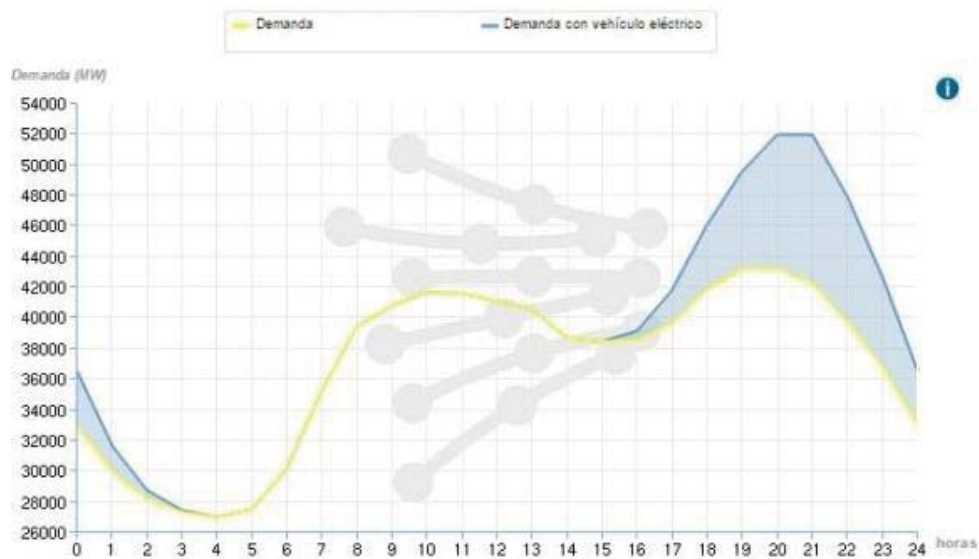


Figura 2-16: Curva demanda [23].

Esto no es bueno, ya que entre más plana la curva de demanda mejor, por lo que las principales desventajas de esta carga son:

- Incremento de demanda máxima en horario punta, esto puede llevar a sobrecarga de líneas y transformadores.
- Incremento de las emisiones de CO_2 asociadas a la generación, esto se debe a que se utilizaría generadoras convencionales para poder abastecer la demanda, ya que su generación es más constante que las ERNC, y eventualmente, la energía sería más cara.
- Reforzamiento de la red, para evitar la sobrecarga en las líneas y transformadores. De lo contrario la carga masiva de vehículos eléctricos sería imposible en algunas zonas.

2.8.2 Estrategia de carga Multi-Tarifa

Esta carga se basa en los precios tarifarios de la energía, por lo que sigue una estructura no controlada, pero estimula la carga de vehículos fuera del horario punta, ofreciendo menores precios. EL objetivo de esta estrategia es potenciar la transferencia de la carga adicional asociada a las cargas de los vehículos eléctricos hacia horas con menos consumo, aliviando así la curva de consumo de las horas punta. La mayor desventaja de esta estrategia es que todo depende del usuario, por lo que no se garantiza una mejora significativa en las condiciones de requerimiento de la red.

2.8.3 Estrategia de carga inteligente

Esta estrategia permite al usuario programar perfiles de carga con un punto de recarga, con el fin de obtener ayuda y beneficios económicos. En España, este se realiza mediante la aplicación de Renault ZOE [23].

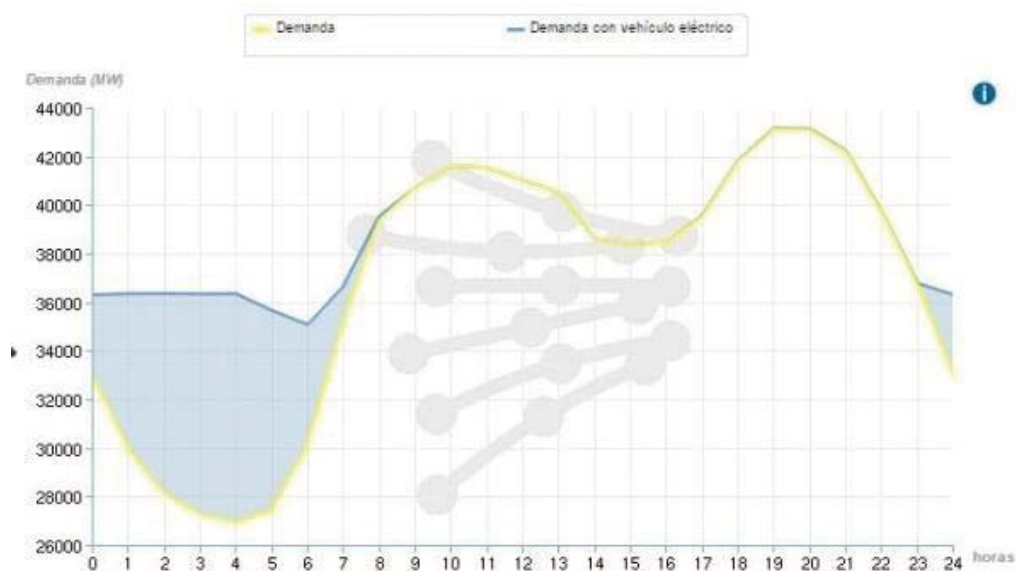


Figura 2-17: Curva demanda [23].

Con esta estrategia, se busca que los usuarios carguen sus vehículos en los horarios con menos demanda, ósea en la noche, así la curva de demanda se volvería más plana. Las principales ventajas de esta estrategia son:

- No se aumenta la demanda máxima.
- Se aprovecha de mejor manera las energías renovables. Hay muchas ocasiones en las que hay exceso de producción eólica en horas nocturnas que se podría aprovechar mejor con este sistema.
- Se produce menos daño a la red de distribución, ya que no hay aumento de potencia.

2.8.4 Estrategia V2G

Del inglés *vehicle-to-grid*, esta estrategia consiste en una carga bidireccional, esto quiere decir que el vehículo puede entregar electricidad a la red en los momentos que no se use para el transporte. El objetivo principal es la de que esta estrategia proporcione equilibrio a la red, en las horas valles el V2G se cargará, y en las horas de más demanda dará potencia a la red. Esta estrategia es una extensión de carga inteligente que permite que los vehículos eléctricos sean capaces de inyectar energía a la red.

La principal desventaja de esta estrategia es la degradación prematura de las baterías y la pérdida de energía durante su funcionamiento. Sus beneficios es proporcionar servicios auxiliares y compensar desviaciones causadas por fuentes renovables intermitentes.

Para poder utilizar esta estrategia, es necesario adaptar dispositivos electrónicos que actúen como interfaz entre los vehículos eléctricos y el punto de carga, para así poder funcionar de forma bidireccional. Para lograr esto último, de forma de que se cumpla la gestión técnica y económica, se necesita la existencia de una nueva entidad, conocida como agregador [24]. La principal función es reunir una cantidad significativa de vehículos eléctricos dentro una región y trabajar como una interfaz entre las diferentes entidades del sistema eléctrico.

Esta carga, puede ser implementada en dos diferentes modos de control: centralizada y descentralizada. Las funciones del agregador varían según distintos tipos:

- **Arquitectura de control centralizado.**

Se conoce también como control directo, en donde el agregador es el responsable de la gestión directa de la carga de los vehículos eléctricos bajo la misma región, también puede gestionar un puesto de carga que controla otro estacionamiento de vehículos eléctricos.

Otra función del agregador es de predecir la demanda diaria basa en datos históricos. Con estos datos el agregador obtiene un perfil de los vehículos eléctricos, el cual los utiliza para comunicarse con el operador del sistema de distribución, y este verifica que este perfil no comprometa el funcionamiento de la red. Una vez aprobado, el agregador estudia las ofertas de adquisición de energía del mercado, para luego evaluar el operador del sistema de transmisión, con el fin de determinar si se requiere cambio de perfil de demanda en caso de que ocurra algún problema en la red de transmisión. Si no hay problemas en la red el agregador comienza con la carga en tiempo real de los vehículos eléctricos que estén conectado a algún punto de recarga.

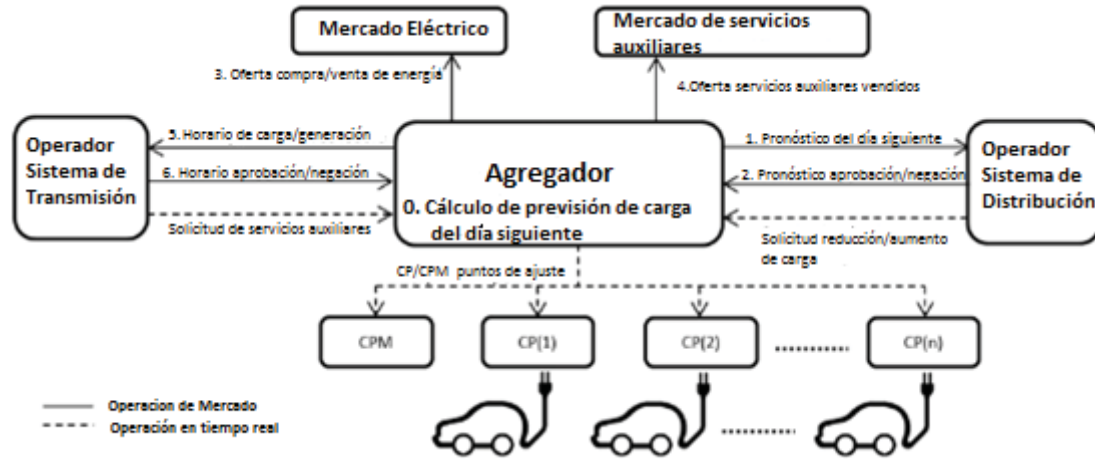


Figura 2-18: Arquitectura de control centralizado propuesto en [25].

El agregador es el encargado de ver el estado inicial de carga de las baterías y las preferencias del usuario.

Con esta información, el agregador aplicará algoritmo para alcanzar los objetivos propuestos, mientras se satisfacen las necesidades de los propietarios de los vehículos eléctricos. Para esto, todos los puntos establecidos serán enviados a través de computadores. Dentro de cada vehículo, la unidad de control recibirá la puesta en marcha y actuará el cargador/inversor estableciendo la potencia necesaria para la carga/descarga.

Las principales desventajas de este control se deben a su forma de centralización de la gestión de datos. Por lo tanto, es necesario disponer de un sistema de copia de seguridad para minimizar los riesgos de una falla del sistema. Otra falla que se puede generar es debida a la cantidad de datos almacenado por el agregador, como van aumentando los vehículos conectados, los datos también aumentan, por lo que se puede dificultar el manejo, al momento de transferir y procesar los datos, una forma de solucionar esta posible falla es con un sistema de comunicación, pero esto son muchos más caros. Otra desventaja, para el usuario sería la poca privacidad que se genera, ya que se conocerían los hábitos de transporte de cada vehículo.

- **Arquitectura de control descentralizado.**

Conocida también como directa, distribuida o de control local, al contrario que la anterior, esta se centraliza en cada vehículo eléctrico, por lo que se necesitaría que el vehículo sea inteligente, para así sea este quien tome la decisión de cuándo y cuánto se cargara. Esta decisión puede ser influenciada por un criterio preestablecido. Esta influencia se puede dar en forma de señales de los precios o de control que se pueden enviar desde un agregador o directamente desde la utilidad, así cada vehículo autónomamente buscaría optimizar el coste de la carga.

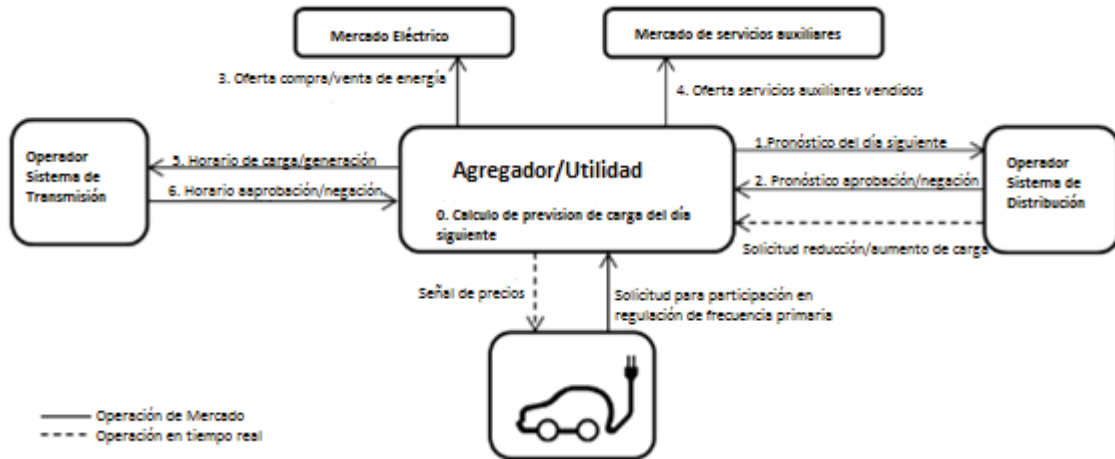


Figura 2-19: Arquitectura de control descentralizada [26].

Para lograr la inteligencia de los vehículos eléctricos, se necesita un hardware dedicado para procesar los datos. En el concepto V2G, los vehículos se pueden considerar como una generación y almacenamiento distribuido, pero son móviles, ósea se van conectado en diferentes puntos, por lo que se necesitaría computadores en los diferentes puntos y continuar experimentando el mismo nivel de calidad de servicios y funciones, concepto conocido como itinerancia. Este concepto requiere que los vehículos eléctricos tienen que saber cómo es el intercambio de potencia bidireccional con la red, la inteligencia para tomar decisiones basadas en el medio ambiente y una potencia de cálculo adecuado para realizar las tareas requeridas.

Por lo que, para poder cumplir con esto tres requisitos se necesita un integrador que permita las diferentes estrategias de carga y participación en el mercado, pero estos integradores tienen una desventaja, que son su potencia computacional limitada. Lo que provoca limitaciones para el concepto de V2G y para evitarlas se debe mejorar el sistema lo que provoca grandes costos en los vehículos eléctricos. Este costo adicional, se puede evitar usando un agente móvil externo, como se muestra en la figura 2-20.

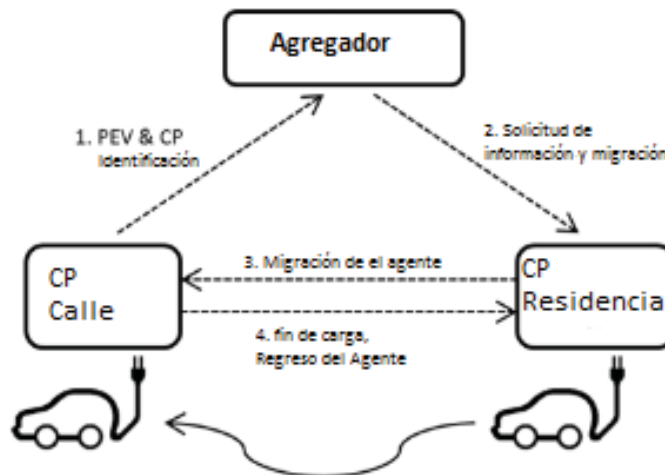


Figura 2-20: Aplicación de concepto de agente móvil para vehículo eléctrico [27].

Este agente es el que contiene la información e inteligencia para controlar la carga/descarga de las baterías de los vehículos a nivel local. Luego de que esté cargado y salga de la zona residencial, la batería comenzará a descargarse según la distancia recorrida, el tráfico y comportamiento del conductor. Luego de esto, si aún queda energía en la batería ésta se podría entregar a la red, por lo que se necesitaría enviar la información al nuevo punto de conexión, lo que hace el agente móvil.

La información es enviada mediante un mensaje de identificación enviada al agregador, este mensaje contiene la identidad del vehículo y la ubicación del computador (lugar de residencia). Luego, al tener la información necesaria esta es enviada al nuevo punto de conexión. Este sistema solo es factible si existe algún tipo de infraestructura de comunicación que pueda ser instalado en cada punto de recarga.

3 Problema de asignación de tráfico

En este capítulo se presentará los conceptos previos y necesarios para la elaboración del modelo de asignación de tráfico.

El problema de tráfico ha sido un inconveniente muy difícil de encontrar solución, donde la mayor dificultad es el modelamiento, ya que se deben considerar las condiciones de saturación de la red, o cuando la función de costo de viaje sobre el arco depende, además del flujo de propio arco, de los flujos de otros arcos.

Los modelos de asignación de tráfico requieren de expresiones funcionales que dividan el tiempo/costo de viaje en cada arco en función del vector de flujo en los arcos de la red. Las funciones de costos dependen de un conjunto de parámetros. Algunos de ellos son estimados basándose en consideraciones físicas de los propios arcos, como su longitud, su capacidad o la velocidad media en el arco sin flujo; pero por otra existe un cierto grado de libertad.

La complejidad de los sistemas de transporte actuales ha mostrado la conveniencia de contar con herramientas analíticas que permiten al planificador disponer de un adecuado conocimiento del sistema y poder hacer predicciones. El uso de modelos matemáticos ha sido de gran utilidad en la identificación de soluciones para lograr los objetivos propuestos en mejorar el funcionamiento del sistema, constituyéndose en una gran ayuda para los procesos de planificación y de toma de decisión, ya que el objetivo de los análisis es la obtención de descripciones macroscópicas de los flujos de tráfico a partir del comportamiento de los conductores o usuarios.

Por lo que el proceso de planificación del transporte consta de las siguientes fases:

- **Recopilación de datos:** Comprende cualquier tipo de datos que explique cómo se comporta el sistema de transporte. Por lo que se considera:
 - Datos relativos a la infraestructura de transporte y su evolución.
 - Datos relativos a la necesidad de transporte y a la utilización de la infraestructura.
 - Factores tales como la utilización del terreno y distribución de la renta y tipo de empleo y estructura de las ciudades y conurbaciones (unión de ciudades debido a su crecimiento).
- **Análisis y ajuste de modelos:** Los modelos que se utilizan, y que son generados a partir de los datos de la fase anterior, habitualmente se aplican secuencialmente y se clasifican en:
 - Fase de generación de viajes/atracción de viajes: El esquema empieza considerando una zonificación del área de estudio, una codificación de la red de transporte y la obtención de una base de datos para el estudio. Estos datos están referidos al nivel de actividad económica y demográfica de cada zona que incluye el nivel de empleo, localización de

centros comerciales, zonas recreativas, centros escolares, etc. Y son empleados para estimar el número de viajes generados y atraídos por cada zona considerada en el estudio. Tras esta fase se obtiene una modelización de la red de transporte mediante un grafo $G=(N, A)$ donde A y N son el conjunto de arcos (dirigidos) y nodos respectivamente. El significado de los arcos depende de si la red es tráfico o de transporte público. En el primer caso los arcos están asociados a las calles y los nodos a las intersecciones. En el segundo caso cada nodo está asociado a una parada y cada arco representa los posibles desplazamientos entre paradas que un usuario puede efectuar. Hay arcos asociados a movimientos en el vehículo, andando o esperando.

- Fase de distribución zonal: En esta fase se obtiene la distribución de los viajes sobre el espacio, esto quiere decir que se obtiene el número de viajes que se efectúan de una zona a otra, obteniéndose la denominada matriz de viaje origen-destino (O-D). En esta fase se obtiene un conjunto de pares ordenados de $N \times N$ y la demanda de viajes (que inicialmente se considera fija). Se denota este conjunto de pares de demandas por W y cada par O-D por $w = (i, j)$, donde i es el origen y j es el destino. Por lo que se denota \bar{g}_w la demanda total de viajes para el par w .
- Fase de partición modal: Cuando los usuarios eligen el modo de transporte con el que satisfacen sus necesidades de viaje. En esta fase se obtiene una matriz O-D para cada modo de transporte.
- Fase de asignación: Finalmente, cada matriz de demanda O-D es asignada a un conjunto de rutas en la red de transporte. Usualmente se efectúa una asignación de tráfico por un lado (vehículo privado) y por otro lado asignación a la red de transporte público.

Los modelos que integran la fase de asignación en redes congestionadas ya sean estas de tráfico o de transporte público, forman un modelo de equilibrio de Nash, en la que los usuarios del sistema de transporte son los jugadores del juego de equilibrio, y en el que sus estrategias pueden consistir en la elección de la ruta, el modo de transporte, la realización o no del viaje, etc., pero siempre adoptando la mejor estrategia.

3.1 Fundamentos de la asignación de tráfico.

El problema de asignación de los viajes describe a la red de tráfico. Durante este proceso se utiliza un conjunto de reglas y principios para asignar una matriz O-D en la red de tráfico y así producir un conjunto de flujos en los arcos de éstas. Este no es el único objetivo, hay varios que no se reciben en la práctica el mismo énfasis en todas las situaciones y tampoco se puede alcanzar en todo el mismo nivel de certeza. Los objetivos primarios de los métodos de asignación son:

- Obtener buenas medidas agregadas de la red, por ejemplo, flujos totales en los arcos.
- Estimar coste (tiempo) de viajar de zona a zona para un nivel dado de demanda de viajes.
- Obtener flujos razonables en los arcos e identificar arcos muy congestionados.

Mientras que los objetivos secundarios son:

- Estimar las rutas utilizadas para cada par origen-destino.
- Analizar cuales pares origen-destino utilizan un arco o un camino particular.

Los datos básicos necesarios para los modelos de asignación son:

- Una matriz O-D que exprese la demanda de viajes estimada para un intervalo de tiempo determinado.
- Una red, específicamente conformada por los arcos y sus propiedades.

La premisa básica en la asignación es la suposición de n viajero racional, esto es, un viajero que escoge la ruta que le ofrece el menor costo. Se cree que hay un número de factores que influye en la elección de la ruta entre dos puntos, esto incluyen el tiempo de viaje, la distancia, el costo monetario, la gestión y tasco. La construcción de una expresión generalizada de costes que incorpore todos estos elementos es una tarea difícil. Además, no es práctico tratar de modelar todos los factores en un modelo de asignación de tráfico, y, por tanto, las aproximaciones son inevitable. Las aproximaciones más comunes es considerar solo dos factores en la elección de rutas el costo de tiempo y el costo monetario, además, se consideran el coste monetario proporcional a la distancia del viaje. La mayoría de los programas de asignación de tráfico permiten que el usuario asigne pesos al tiempo del viaje y la distancia para representar las percepciones de los conductores en cuanto a estos dos factores. La suma ponderada de estos dos valores llega a ser un costo generalizado utilizado para estimar la elección de ruta. Por otra parte, hay evidencias que sugieren que, por lo menos en el tráfico urbano de vehículos privados, el tiempo es el factor dominante en la elección de rutas. Sin embargo, es un hecho que conductores diferentes escogen rutas diferentes cuando viajan entre los mismos dos puntos, esto puede deberse a dos tipos de razones:

- Diferencias en las percepciones individuales de lo que constituye la mejor ruta, individuos diferentes no sólo pueden incorporar factores diferentes en su función generalizada de costos sino percibirlos de forma distintas.
- Los efectos de la congestión que primero afectan a las rutas más corta y hacen sus costos generalizados comparables a rutas que inicialmente fueron menos atractivas.

Los distintos tipos de modelos de asignación son más o menos adecuados para considerar estas influencias. Se entiende que las hipótesis sobre las decisiones tomadas por los conductores para la elección de las rutas, la más natural es la de suponer que estos eligen la ruta que les represente un costo mínimo hacia su destino bajo las condiciones de tráfico existentes en la ruta elegida. El resultado de la adopción de este criterio por los conductores lleva a una situación en la que ningún conductor puede reducir el costo de su desplazamiento mediante cambio de su ruta, llegándose así a un equilibrio, que es consecuencia de su competición en igualdad de conocimiento de las posibilidades que ofrece el sistema de transporte. Este criterio se ha denominado “criterio de usuario-óptimo”, caracterizado este por el hecho de que todas las rutas usadas poseen iguales costos marginales. Wardrop fue el primero en establecer dos criterios de elección de ruta a los que se conoce como los dos principios de Wardrop. Sin embargo, han surgido algunas objeciones acerca de las hipótesis sobre el comportamiento de los usuarios y, por lo tanto, sobre la aplicabilidad del modelo de equilibrio de Wardrop.

3.2 Modelos de asignación de tráfico.

Con el tiempo se han desarrollado diferentes modelos de asignación de tráfico, ya sea estáticos o dinámicos, estos son:

3.2.1 Modelos estáticos de asignación de tráfico.

Los modelos estáticos asumen una situación estacionaria de la demanda. Esta suposición es válida para problemas planteados en un contexto de planificación estratégica o táctica, mientras que para aspectos operacionales se debería recurrir a modelos dinámicos.

Una vez conocida la movilidad en la zona de estudio, actual o futura, y definida la red de transporte que ha de soportarla, se trata de simular el comportamiento de ésta a través de obtención de las cargas en la red que se deriven de la matriz de O-D.

Existen modelos diferentes de asignación para redes de transporte público y privado, habiendo experimentado un mayor desarrollo los empleados para el transporte privado.

A partir de la red varia real, se selecciona un grafo, que garantice todos los posibles itinerarios coherente entre cada par de demanda.

La modelización de la red supone la descripción de esta de acuerdo con unas normas, las propias del programa informático que se emplee y que, en general suelen ser:

- Nodos extremos del arco.
- Distancia entre nodos.
- Velocidad o tiempo de viaje.
- Tipo de infraestructura.
- Tipo de área atravesada.

A grandes rasgos, los modelos de asignación de tráfico estáticos se centran en unas pocas horas del día, como las horas punta, y trabajan con valores medios (demandas, tiempos, flujos, etc.) durante el periodo de estudio.

El problema partirá del número de usuarios que van a viajar en cada par origen-destino e intentará modelar el comportamiento de éstos en la red de transporte, intentando predecir las rutas que elegirán dentro de las distintas rutas o caminos posibles. Con esto se considerará modelar el flujo de tráfico en cada uno de los tramos que componen la red viaria, evaluando la congestión de cada tramo.

Los distintos modelos de asignación estáticos se pueden clasificar en función de cómo se considera que el usuario percibe el costo que le supone atravesar un arco. Si se asume que todos los usuarios perciben el costo de la mínima manera y además, conocen los costos de todas las rutas (tienen información perfecta) se estará considerando modelos de asignación determinista. Sin embargo, en la realidad, las percepciones de los costos están sujetas a variaciones y los usuarios eligen la ruta de acuerdo con su percepción, si se consideran los costos de esta forma surgen los modelos de asignación estocásticos.

Modelo de asignación determinística.

Existen numerosos modelos que pertenecen a esta clase, todos ellos se pueden clasificar en función de que los costos en los arcos se consideran separables o no separables (asimétricos).

Los costos de los arcos separables son los que al atravesar un arco de la red no depende del nivel de flujo en los restantes arcos; en caso contrario, se considera que los costos son no separables.

Además, estos modelos se pueden clasificar según se considere o no que el costo de viaje en un arco depende o no del flujo en los arcos de la red, lo que origina modelos con y sin congestión. Los primeros son adecuados para centros urbanos y los segundos para zonas interurbanas.

Los modelos sin congestión son modelos también conocidos como modelos de asignación toda o nada. En ellos primero se determinan los caminos o rutas de costos generalizado mínimo entre todos los pares O-D.

Para cada par O-D se asignan todos los viajes de dicho par por dichos caminos. Finalmente, conocidos los flujos de cada ruta se obtienen los flujos en los arcos de la red.

Cuando se considera el efecto de la congestión, los modelos matemáticos más utilizados son los modelos de asignación de tráfico en equilibrio que postulan que, en el equilibrio, todos los caminos utilizados, que unen un mismo par O-D, tienen el mismo costo.

Wardrop estableció sus dos principios, que formalizó la noción de equilibrio e introdujeron el postulado de comportamiento alternativo en el sentido de minimizar el costo total de todos los viajes efectuados en la red.

Así el primer principio de Wardrop establece que: “Los costos de viaje de todas las rutas usadas en el equilibrio son iguales y menores que en los incurrirá un único vehículo que utilizará una ruta distinta a la que utiliza en ese momento”.

Esto quiere decir, que, en el equilibrio, ningún usuario puede reducir el costo de su viaje mediante cambio de ruta.

Los flujos de tráfico que satisfacen este principio se les llama flujos óptimos para el usuario, pues cada usuario elige la ruta que percibe como mejor para él. En el otro extremo, los flujos óptimos para el sistema son caracterizados por el segundo principio de Wardrop como estados en los que el tiempo promedio de viaje es mínimo, es decir, que los usuarios eligen la ruta de modo que se minimice el tiempo total de transporte en la red. El primer principio es utilizado para modelar el comportamiento de los usuarios, mientras que el segundo es usado como un criterio para diseñar la red de transporte.

Modelos de asignación estocástica.

Análogamente a la clasificación anterior, se puede distinguir entre modelos con congestión y no congestión. En un entorno de no congestión, el esquema es común para todos los modelos. A continuación, para cada par O-D, en función del costo de las rutas, se crea la matriz de probabilidad de elección de ruta, para cada par, se asignan los viajes a las rutas creadas, en función de la matriz de probabilidad de elección de ruta, finalmente, conocidos los flujos de ruta, se obtienen los volúmenes en los arcos.

La diferencia fundamental entre los distintos métodos de este tipo estriba en la forma en que se calcula las probabilidades de elección de las rutas. En general se aplica el concepto de la teoría de la utilidad, considerando los costos en los caminos como variables aleatorias.

3.2.2 Modelos dinámicos de asignación de tráfico.

El problema de asignación dinámica de tráfico consiste en la estimación de los flujos de vehículos que utilizan los diferentes tramos de la red, de manera variable con el tiempo, constituyendo por tanto una extensión del problema de asignación convencional o en equilibrio.

Principalmente se ha desarrollado modelos deterministas de asignación dinámica de tráfico bajo tres aproximaciones:

- Simulación.
- Programación matemática.
- Control óptimo sobre redes.

Si bien, algunas de las formulaciones en programación matemáticas pueden contemplarse como problemas en control óptimo discreto y, a su vez, las formulaciones en control óptimo (continuas) se aproximan mediante programación matemática para su resolución quedando reducidas, en definitiva, a programación matemática.

Este modelo considera que los usuarios minimizan sus tiempos de viaje actualizando continuamente sus rutas elegidas de acuerdo con las condiciones del tráfico.

Dado una red G , capacidades de flujo \bar{f} , tiempos de tránsito libre \bar{t} y la matriz de pares O-D, la resolución de un problema de asignación de tráfico busca encontrar la solución de equilibrio de la red que asigna el conjunto determinado de conductores que satisfacen la demanda entre los orígenes y los destinos dados y respeta todas las hipótesis del modelo en particular, con el fin de alcanzar uno de los dos estados siguientes:

- Equilibrio social: el cual establece que el tiempo total de viaje, es igual a la suma de los tiempos de viaje de cada conductor, es minimizado. En este caso, se asume que la elección de rutas es realizada por un coordinador central (por ejemplo, el estado) y ninguna elección es dejada a los conductores. Esto equivaldría a que cada conductor se comportase de forma cooperativa escogiendo su ruta de forma tal que asegure el uso más eficiente del sistema completo.
- Equilibrio de usuario: el cual establece que cada conductor escoge su ruta más corta, lo que se puede traducir en que cada usuario busca, de forma no cooperativa, minimizar su propio tiempo de viaje. Los conductores no tienen incentivo alguno a cambiar unilateralmente su actual ruta, alcanzado un equilibrio Nash. En contraste al equilibrio social, en este caso los conductores no son gestionados por un coordinador central, sino por su propio egoísmo.

Existen dos formas básicas de modelar el costo de un arco con su flujo. El modelo de Nesterov y De Palma estipula que el flujo total por los arcos es limitado, y que no existe penalización de tiempo mientras el flujo por un arco cualquiera sea menor a su capacidad. Por otro lado, el modelo planteado por Beckmann propone que el tiempo de cada arco este en función de flujo, de forma estrictamente creciente. [28]

Nótese que, en el caso de este último modelo, al depender el costo de un arco de su flujo, el aumento del costo se puede explicar con la formación de embotellamientos, creado por la atracción de los conductores hacia los caminos con menor costo. Los usuarios continuarán formando congestión hasta que el costo suba lo suficiente para hacer que otros caminos, anteriormente poco competitivos, se vuelvan más atractivos. Incluso si en este periodo de tiempo, es mejor para un conductor individual ir por el camino con mayor flujo que sigue siendo más atractivo, su acción resultara en un incremento en el tiempo de todos los conductores en ese marco, lo que claramente va en contra de un uso eficiente del sistema completo (donde la suma de los tiempos de cada viaje debe ser lo más pequeña posible). Por lo tanto, en redes donde las demandas O-D son lo suficientemente pequeña (o en su defecto, la capacidad de los arcos sea lo suficientemente grande), y considerando que la elección de un camino aumentara el costo de todos los viajes realizados en ese marco, el equilibrio social evitara, en la medida de lo posible, la formación de embotellamientos mientras exista rutas alternativas descongestionadas. [28]

Una de las funciones de latencia típica (funciones que definen el costo de una ruta en función de flujo que circula en ella) son las funciones Bureau of Public Road (BPR) las cuales tienen la forma:

$$l_a(f^{(a)}) = \bar{t}^{(a)} \left(1 + \alpha \left(\frac{f^{(a)}}{\bar{f}^{(a)}} \right)^\beta \right) \quad (3-1)$$

Donde:

$l_a(f^{(a)})$: Tiempo o costo del arco a dado un flujo $f^{(a)}$.

$\bar{t}^{(a)}$: Tiempo o costo del arco a sin congestión.

$\bar{f}^{(a)}$: Capacidad del arco a por unidad de tiempo.

$f^{(a)}$: Flujo o cantidad de viajes que circula por el arco a .

Y α, β son parámetros, generalmente $0 < \alpha < 1$ y $\beta \in \mathbb{N} - \{0\}$

Por lo tanto, para el caso en que se busca el óptimo global, la función objetivo corresponde a:

$$\text{Min} \sum_{\alpha \in A} f^{(\alpha)} \cdot t^{(\alpha)} \quad (3-2)$$

Lo que equivale a minimizar los tiempos de todos los flujos, mientras que para el caso en el que se busca el óptimo individual, la función objetivo variará levemente:

$$\text{Min} \sum_{\alpha \in A} t^{(\alpha)} \quad (3-3)$$

Lo que equivale a minimizar los tiempos de todos los arcos, “independientemente” de los flujos que le correspondan a casa uno (aunque dependiendo del modelo utilizado, el tiempo de cada arco puede ser una función del flujo de éste).

Sobre las restricciones, éstas tienen básicamente la siguiente estructura:

$$f^{(\alpha)} = \sum_{\alpha \in A} f_k^{(\alpha)} \quad (3-4)$$

$$E \cdot f_k = \delta_k \quad (3-5)$$

Donde E es la matriz de incidencia nodo-arco definida como:

$$E_{ij} := \begin{cases} -1 & \text{si } i \text{ es la cola del arco } j \\ 1 & \text{si } i \text{ es la cabeza del arco } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3-6)$$

Y δ_k es el vector de demanda nodal, definido como:

$$\delta_k := \begin{cases} -\delta_k & \text{si } i \text{ es el origen del par } OD_k \\ \delta_k & \text{si } i \text{ es el destino del par } OD_k \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3-7)$$

Además, se debe tomar en cuenta la restricción de no negatividad de los flujos.

3.3 Modelo de Multicommodity

Otra forma de abordar el problema es a través del planteo de un problema de flujo de multicommodities, en donde existen múltiples “commodities” (demandas de flujo) entre los distintos pares de nodos origen y destino.

En este caso la función objetivo quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{\alpha \in A} \sum_{k \in OD} f_k^{(\alpha)} \cdot t_k^{(\alpha)} \quad (3-8)$$

Y estaría sujeta a las siguientes restricciones:

- Restricción de capacidad mutua: en caso de haber límite de capacidad. Su expresión se muestra a continuación:

$$\sum_{k \in OD} f_k^{(\alpha)} \leq \bar{f}^{(\alpha)} \quad (3-9)$$

Donde:

$f_k^{(\alpha)}$: Flujo o cantidad de viajes pertenecientes al “commodity” k que circula por el arco a .

$\bar{f}^{(\alpha)}$: Capacidad del arco a por unidad de tiempo.

Es posible que no exista una restricción de capacidad explícita, sino que la restricción se refleja en un fuerte castigo en el costo del arco a medida que aumenta el flujo a partir de cierto punto (el cuál sería la capacidad máxima del arco), como ocurre cuando se utiliza una función tipo BPR.

En caso de que se utilice una función de costo como la BPR, es necesario linealizarla a través de una aproximación por recta. Además, se debe tener en cuenta que estas formulaciones son convexas y por lo tanto tienen una ventaja importante: permite que el problema pueda ser resuelto más rápido y eficientemente utilizando “solver” comerciales como el CPLEX [29].

- Restricciones de balance de flujo.

En estas restricciones se tendrá que la sumatoria de los flujos de una “commodity” que llegan a un nodo menos la sumatoria de los flujos de la misma “commodity” que salen de ese nodo debe ser igual al flujo completo si el nodo es un nodo origen, flujo completo negativo si el nodo es nodo de destino, o 0 si el nodo es un nodo de paso:

$$\sum_{k \in OD} f_k^n - \sum_{k \in OD} f_k^{-n} = \begin{cases} f_k^n & \text{si } n \text{ es el nodo de llegada} \\ -f_k^{-n} & \text{si } n \text{ es el nodo de salida} \\ 0 & \text{si } n \text{ es nodo de paso} \end{cases} \quad (3-10)$$

Donde:

f_k^n : Flujo o cantidad de viajes pertenecientes al “commodity” k que llega al nodo n .

f_k^{-n} : Flujo o cantidad de viajes pertenecientes al “commodity” k que sale al nodo n .

Además, se deben considerar las restricciones de no negatividad en los flujos por los arcos.

4 Revisión Bibliográfica

4.1 Consideraciones generales.

Como consideraciones generales, se asume que los vehículos eléctricos enchufables tienen una máxima capacidad de almacenamiento de 10-11 [kWh], sin embargo, se recomienda utilizar solo 70% o 80% de la capacidad total de la batería para optimizar su expectativa de vida (muy relevante para los dueños de vehículos eléctrico), por lo que se tendría una capacidad disponible de 7-8,8 [kWh]. Asumiendo un 88% de eficiencia en el proceso de conversión de energía alterna de la red a energía continua almacenada en la batería, serían requeridos desde el punto de carga 8-10 [kWh] aproximadamente [30] [31].

Además, se suele asumir una potencia máxima de carga (al menos en la residencia o lugar de trabajo, donde la instalación eléctrica no está especialmente condicionada) de 4 [kW], que es lo máximo posible sin que haya necesidad de cambiar el cableado, lo que significaría un mayor costo [30] [31]. La carga de las baterías al comienzo de la simulación puede ser obtenida mediante funciones de probabilidad, o bien asumir que es 0 o 100% al momento de comenzar la simulación.

En general, se le suele dar preferencia a la carga en la vivienda, dejando de lado la carga en electrolinerías, puesto que esta no se podría controlar por ser esencialmente de la carga rápida. Además, en el caso de la carga libre o descoordinada, el flujo de potencia en general se considera constante hasta que la batería se encuentre plenamente cargada. Sin embargo, algunos consideran la carga rápida en sus análisis [32].

También se suelen utilizar flujos de carga probabilísticos (utilizando métodos como el de Montecarlo) debido a que, si bien existen perfiles de carga conocidos dependiendo del tipo de carga, estos pueden presentar pequeñas variaciones día a día. Las simulaciones además se realizan en periodos de 24 horas, por lo que el perfil de carga debe ser el de un día completo.

4.2 Optimización de la carga vehículo eléctrico.

Con el crecimiento del mercado vehículos eléctricos, se ha empezado a investigar el impacto que tendrá la carga de estos vehículos en la red de distribución. Para ellos se han presentado diferentes escenarios, en los cuales se encuentran la carga centralizada, descentralizada y considerando la tecnología de V2G.

Luego de tener los resultados de estos dos escenarios y al llegar a una conclusión a gran escala, que la recarga menos dañina a la red de distribución es la carga centralizada, ya que el usuario no tiene el poder de decisión cuando carga el vehículo. Se desea buscar una forma de optimizar la carga descentralizada, buscando algún método para que de alguna u otra manera el usuario tenga más opciones de cargar el vehículo en horario que sean menos invasivo para la red de distribución.

Por ello, en [33], se investiga una metodología de optimización descentralizada para coordinar la carga de los vehículos eléctricos, para así contribuir con el control de la tensión en un alimentador eléctrico de distribución residencial. Esto apunta a mantener los niveles de tensión en función de la potencia inyectada de los vehículos eléctricos usando el enfoque de matriz de sensibilidad. La optimización descentralizada es probada con los diferentes métodos, global y local, cuando los vehículos toman en cuenta su impacto en todos los nodos de la red o solo en una vecindad local de su punto de conexión. Los vehículos eléctricos también pueden actualizar sus decisiones de forma asincrónica o sincrónica. Mientras que solo el enfoque global con actualización asincrónica ha probado converger, usando resultados de teoría de juegos, las simulaciones muestran el potencial de otros algoritmos para los cuales se necesitan pocas iteraciones o poca información.

Los autores de [34] proponen una estrategia óptima de programación de carga, que se basa en un enfoque de carga de la red al vehículo (G2V) y del vehículo a la red (V2G), para maximizar la penetración de vehículos eléctricos enchufables al lugar de trabajo. Se usa un patrón de conducción modelado con métodos estadísticos usando funciones de densidad de probabilidad. Basándose en a este patrón, se genera el requerimiento energético de los vehículos eléctricos. Luego, con el algoritmo genético (GA) con inicialización heurística se realiza la programación de carga óptima de los vehículos eléctricos. Esta estrategia es beneficiosa para minimizar el costo total diario incurrido por el operador de estacionamiento, reducir la carga máxima de la res, proporcionar servicio de regulación de frecuencia y, por último, evitar la sobrecarga del transformador y las líneas de distribución.

En [35] se realiza un trabajo centrado en el modo de conducción, para determinar las rutas de conducción de los vehículos eléctricos y evaluar las distancias de conducción y el número de carga rápidas correspondientes. El método utiliza matrices adyacentes y distancias basadas en la teoría gráfica y la programación dinámica, la cual busca la ruta de conducción óptima con el número de cargas de batería y de distancia mínima de conducción, de una manera racional, sistemática y eficiente. Se realiza el modelo aproximado de distancia por carretera de Osaka, Japón. En este estudio se aclara la distancia media de conducción diaria de los vehículos eléctricos en relación con la distancia entre cargadores de baterías rápidas.

Como la capacidad de carga de las baterías de los vehículos es limitada, la conducción óptima de un vehículo eléctrico es importante para utilizar la carga disponible de una manera eficiente y para completar el total de la ruta. Por lo que en [36] se busca una nueva estrategia de planificación de viaje mediante la práctica de conducción óptima (ODS). Este análisis se hace mediante el algoritmo genético, el cual trata de responder tres objetivos los cuales son: minimizar el tiempo de viaje, minimizar el consumo de energía y maximizar la comodidad del usuario. El sistema propuesto presenta la ODS para el conductor junto con el intervalo correspondiente, el estado de carga de la batería y el tiempo de disparo para seleccionar el mejor viaje. Con esta estrategia se ahorra energía, también proporciona una guía para mejorar varios inconvenientes relacionados con los vehículos eléctricos. En otro estudio [37], en el cual también se utiliza la optimización de la carga de la batería, Se utiliza un modelo estocástico, debido a la naturaleza de incertidumbre de los datos de tiempo de carga y descarga de la batería y los movimientos del vehículo. Este trabajo consta de dos partes, el primero es el de carga/descarga de la batería, para esto se trabajó con el modelo de Monte Carlo, en el cual se busca la carga máxima sin afectar a la demanda de energía eléctrica. Y en segunda instancia se busca el mejor punto de carga, con el fin de proponer un buen punto de funcionamiento, el desequilibrio de tensión y la pérdida de potencia durante la hora punta. Con el algoritmo creado para esto, se puede observar que la pérdida de potencia y el desequilibrio de tensión son menores. Por lo tanto, se puede decir que utilizando una ubicación optima de vehículos eléctricos, se puede mejorar el punto de operación del sistema.

En el trabajo [38] se realiza una aplicación de la reconfiguración de la red de distribución mediante interruptores seccionados al haber una alta penetración de vehículos eléctricos. Primero, se genera y validan diferentes perfiles de carga domestica basándose en datos obtenidos desde una subestación, para carga rápidas y lentas. Luego se cuantifica el impacto de la penetración creciente de los vehículos eléctricos en el ámbito de restricción térmica y tensión de la red. Para saber con exactitud donde se deben conectar los nuevos interruptores y el tiempo de operación se realiza un método de intercambio de sucursales.

Otra forma de optimizar la carga es a través de disminuir los costos para los usuarios, es así como en [39], se busca minimizar este costo, basándose en los requisitos del usuario, considerando la condición de la carretera del sistema de tráfico y los recursos de carga disponible en las estaciones de carga. Para ello, todos los factores que influyen en la carga de reserva se traducen en pesos y luego se asignan a los bordes correspondientes del grafico de la red de tráfico. En esta optimización se reserva de carga se pueden tomar decisiones razonables y planificar rutas correspondientes que satisfacen las diferentes demandas de los usuarios. Pero en este trabajo el impacto de la reserva de la carga en la red eléctrica no se considera.

Los autores de [40] proponen un método para que la red de distribución soporte la creciente penetración de vehículos eléctricos. Para esto, se desarrolló un método en el cual se considera un refuerzo de la capacidad de los sistemas de distribución en conjunto con sus decisiones de operación y los coordina bajo el mismo marco para minimizar los costos totales del sistema para acomodar vehículos eléctricos. Las variables no tangibles, como el comportamiento de carga y la demanda de carga convencional, están representadas por múltiples escenarios probabilísticos. Se consideran cargas centralizadas y descentralizadas. También se considera la fiabilidad del sistema. Con el algoritmo heurístico cambiando con el análisis de confiabilidad, se puede determinar la solución óptima, lo que implica la mejor sincronización, ubicación t capacidad para instalar unidades de generación distribuida y componentes de la red.

4.2.1 Optimización mediante estaciones de carga.

En el trabajo [41], se busca optimizar la carga estableciendo estaciones de carga móvil (MCS), la cual se espera que estén disponible más tiempo que una carga fija. Por lo que este análisis se hace a través de red heterogénea. En primera instancia, se presenta un nuevo modelo de red heterogénea para mejorar la comunicación entre los vehículos eléctricos y MCS. Después, se realiza un nuevo modelo para tomar decisión óptima para MCS para programar la carga de los vehículos eléctricos. Y, por último, se crea un algoritmo de optimización para encontrar el mejor punto de colocación del MCS basándose en la demanda de carga y costo de mantención.

Al igual que [42], se busca un modelo para optimizar la ubicación de las estaciones públicas de carga rápida. En este caso se utiliza un modelo estocástico de localización de flujo (SFCLM). En primera instancia, los centros de carga están centrados alrededor de centros urbano. A medida que aumenta el número de estaciones, algunas se encuentran afuera de la región para proporcionar una red de carga extendida, En este trabajo se demostró los beneficios de la red de estaciones de carga en términos de cuantos vehículos eléctricos son capaces de completar su viaje diario al cargar mediodía, estos serían un 60%. Por último, se compara la SFCLM con un modelo determinístico, en el que los flujos de vehículos eléctricos se establecen igual a sus valores esperados.

4.3 Trabajos importantes para el desarrollo de este trabajo.

Con el objetivo de cuantificar el impacto de los vehículos eléctricos sobre la red de distribución, se desarrolla una plataforma que aproxima el comportamiento de los vehículos eléctricos dentro de una ciudad y su

respectiva demanda de energía. Partiendo por [43] en donde se desarrolla un modelo que permite cuantificar la energía adicional solicitada al sistema eléctrico causado por la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos.

En [22] y [44] se desarrolla una nueva plataforma de simulación del comportamiento de los vehículos eléctricos dentro de un contexto urbano y que además permite el estudio de diferentes estrategias de carga de las baterías por parte de los usuarios. Este modelo diseñado incluye interacción de flujos vehiculares y una función de costo de los viajes dependientes de flujos que varían con respecto a la hora. Además, entrega una variable en los escenarios de estudios, dependiendo de las características sociales, económicas y eléctricas.

Bajo los resultados obtenidos para distintas estrategias de carga, ambos autores proponen estrategias de carga con el fin de disminuir la curva de demanda, esto lo hacen llevando las cargas de los vehículos en horarios valles. En [22] se trabaja una estrategia que las cargas se lleven a diferentes sectores de la red con un desfase de una hora, para que así no haya una alta demanda por la conexión de los vehículos eléctricos. Y en [44] se presenta la estrategia descentralizada, donde se evita la comunicación de los usuarios de los vehículos eléctricos con terceros, como por ejemplo la empresa distribuidora de energía eléctrica, con el fin de evitar la alta demanda mediante la implementación de tres curvas de precios diferentes para un mismo alimentador.

5 Descripción plataforma

En este capítulo se explicará el funcionamiento de la plataforma ya desarrollada. En grandes rasgos, el programa funciona como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 5.1.

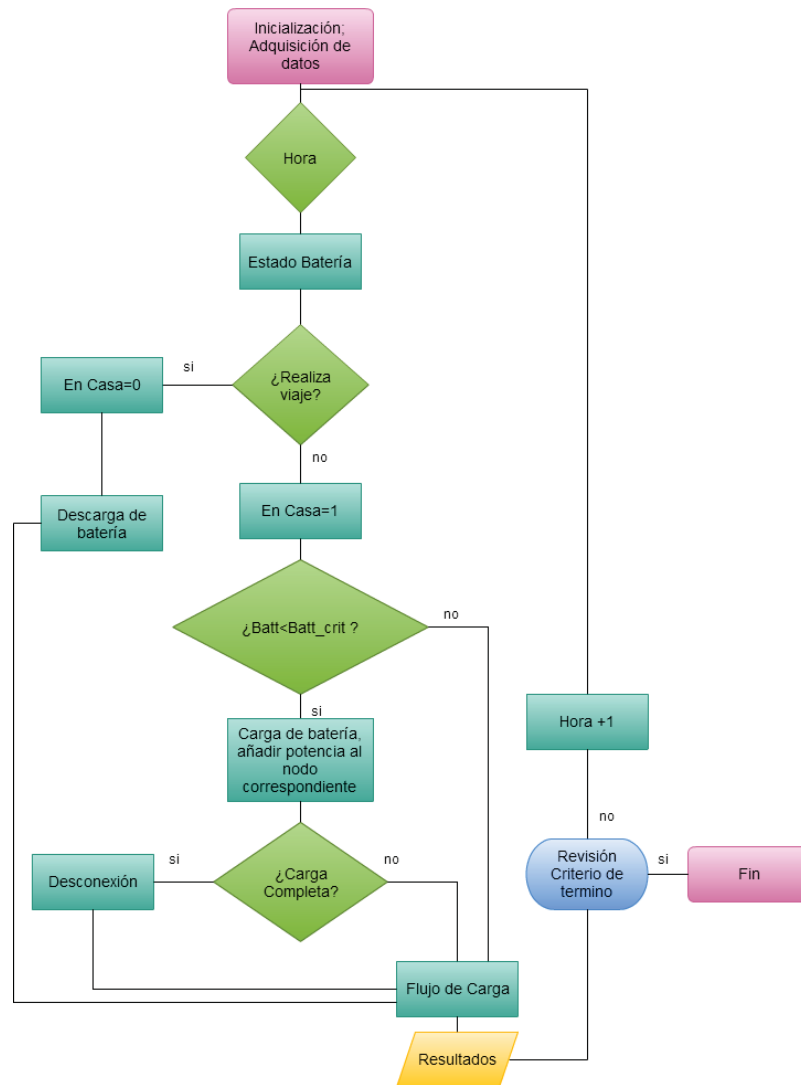


Figura 5-1: Diagrama de bloque carga libre.

Para poder comenzar con las simulaciones, se deben agregar ciertos datos de interés, que se podrán agregar desde un Excel para la comodidad de los usuarios que no maneje la plataforma Matlab, estos datos son:

- Porcentaje de penetración de vehículos.
- Cantidad de vehículos.
- Capacidad de batería de los vehículos.
- Rango de distancia que puede recorrer el vehículo.
- Potencia de carga.

Luego de ingresar estos datos, se debe estimar el estado de la batería, para esto se crea la función “Porcentaje_critico_bateria” en el cual el programa designa el valor crítico de la carga de la batería de acuerdo con una distribución de probabilidad, como se muestra en la figura 5-2. Luego de tener este valor, se debe asignar el porcentaje de cada vehículo que se considerara en el parque vehicular a analizar, para ello se realiza lo mostrado en la figura 5-3. Después, a cada vehículo eléctrico se le asignará un porcentaje de batería, que no supere el 100% y no sea menor que el 40%, así cada vehículo tendrá una carga inicial.

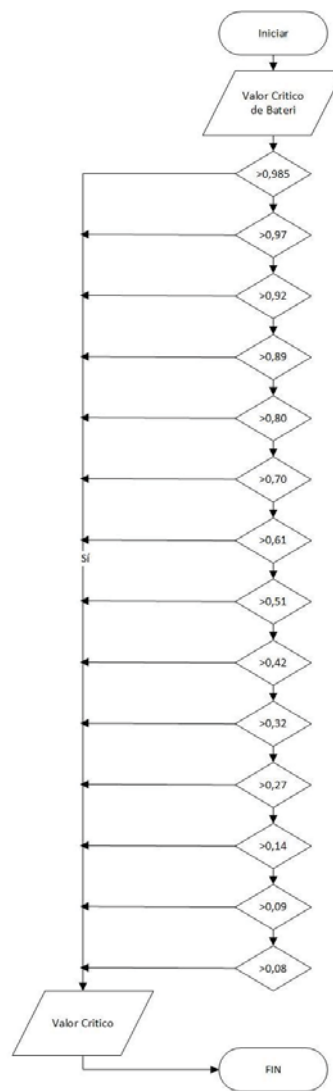


Figura 5-2: Diagrama de flujo definición porcentaje critico de batería.

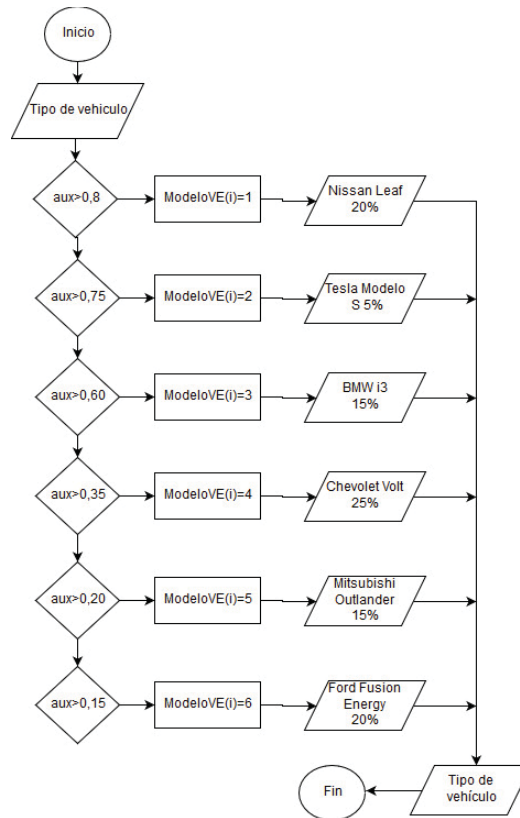


Figura 5-3: Diagrama de flujo porcentaje de vehículo eléctrico en parque automotriz.

Teniendo los parámetros del vehículo ya definidos para comenzar las iteraciones de la simulación, se deben definir los perfiles de los viajeros, en este programa se definen dos, los cuales son viajero asalariado, los cuales son personas que trabajan de lunes a viernes, y los viajeros jubilados, los cuales no trabajan y se encuentran en la casa la mayor parte del día. Para ambos perfiles, se crea una probabilidad de a qué hora del día se realizará el viaje, ya sea de ida o de regreso a la casa, y la probabilidad de que estos viajes sean largos o cortos dependiendo del día de la semana.

Para la probabilidad del viaje sea largo o corto se realiza una matriz con el porcentaje de probabilidad de que el viaje sea corto en la semana o fin de semana y lo mismo para viajes largos, separados por perfil asalariado y jubilado, estos porcentajes fueron calculados en [22], gracias a la plataforma GesitranBioBío.

Al tener todos estos datos, se comienza con la iteración del sistema, donde se tiene un contador de días y se restablece la hora de viaje de ida y vuelta según la distribución probabilística que da la primera configuración de los parámetros. Luego, según la probabilidad de a qué hora del día se realizará el viaje y el perfil de usuario que se fija, se le asigna la curva de precio según sector en el cual se encuentre ubicado. Se comienza a verificar el estado de batería y si se encuentra en el domicilio.

Como es la primera iteración, se comienza con lunes, entonces según perfil seleccionado, se establece la hora de ida y vuelta de un viaje corto y a su vez de un viaje largo, en este caso se asigna una probabilidad si es viaje es hacia Talcahuano, San Pedro de la Paz y Hualpén, ciudades cercanas a Concepción. Luego se hace lo mismo para el fin de semana.

Si se realiza viaje se comprueba estado de carga del vehículo, luego nuevamente se establece si el vehículo se encuentra en la casa y si es así se comienza a cargar el vehículo, como se muestra en la figura 5-4.

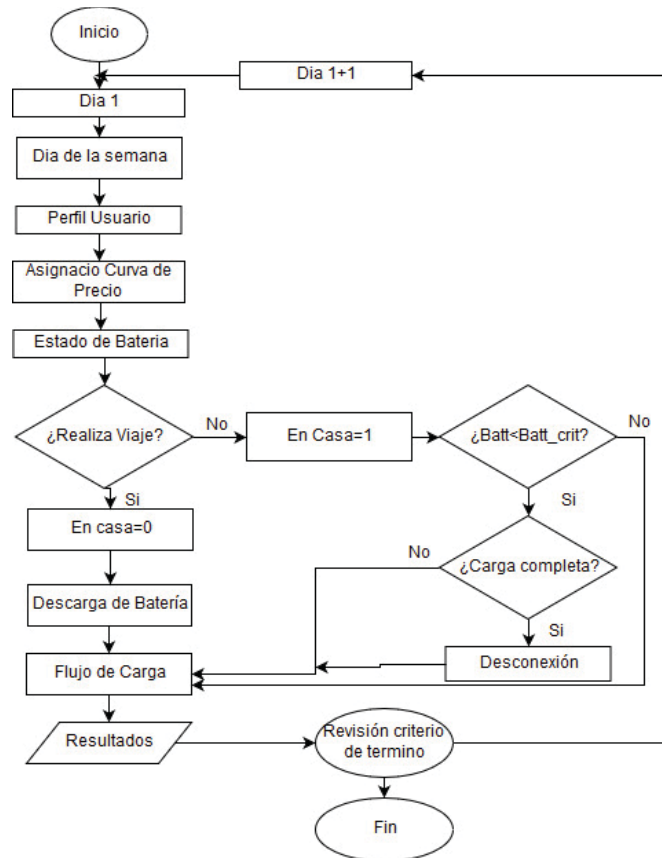


Figura 5-4: Diagrama de flujo

5.1 Optimización de la plataforma

Para comenzar este capítulo y antes de implementar la nueva, se realizarán modificaciones al programa creado en Matlab para que sea más accesible a cualquier usuario, para ello se crean plantillas Excel, para ingresar los datos más relevantes, estos son la cantidad de total de vehículos eléctricos, el porcentaje de penetración a analizar, el porcentaje de cada vehículo en circulación y los parámetros de los vehículos, tales como, capacidad de batería, distancia óptima y potencia de carga.

Luego de realizar estas modificaciones, se reducen el número de líneas del sistema, para ello se utiliza la evaluación de variable, a través de funciones de Matlab.

La primera reducción que se realiza es la parte en que se ve que están cargadas las baterías, para ello se crea la función “Porcentaje_critico_bateria”, el cual de 34 líneas solo quedan dos. Se realiza lo mismo para el porcentaje de cada vehículo eléctrico que se encontrara en circulación, por lo que se crea la función “Tipo_vehiculo”.

5.2 Propuesta de optimización de carga descentralizada.

Luego de revisar, el trabajo realizado en [22] y [44], y sabiendo que el impacto de la carga de los vehículos eléctrico en la red de distribución es inevitable, se trata de minimizar las pérdidas y cargabilidad del sistema.

En la carga descentralizada no se puede evitar el peak de demanda en horario punta, debido a que es el usuario es quien decide donde y cuando cargar su vehículo y se asume que lo realiza al momento de llegar al su hogar, luego del trabajo.

Es por esto que se asignara tres curvas de precio (alto, medio y bajo), los cuales se distribuirán durante los horarios de punta baja como se muestra en la figura 6-1, a un tercio de los transformadores o nodos de cada alimentador, para que haya una mejor distribución en la demanda.

Las curvas cubrirán desde las 20 a las 8 horas, donde se considera un tiempo de 12 horas de carga, el cual se considera que el vehículo se pueda cargar al 100%.

Estas 12 horas se dividirán en 3 intervalos de 4 horas cada uno, debido a que la red eléctrica se divide en 3 sectores, para que no se sobre cargue la red. Dentro de estos intervalos de hora se le asignara una de las curvas de precio, ya sea alta, medio o baja, donde se representarán con 3,2 y 1 respectivamente, a cada uno de los sectores de la red, así cada vez que se conecte un vehículo a la red tendrá su curva de precio respectiva.

Por lo que se buscará cual es el orden que deben cumplir las curvas dentro de cada sector de la red para que haya menos efectos negativos dentro de esta.

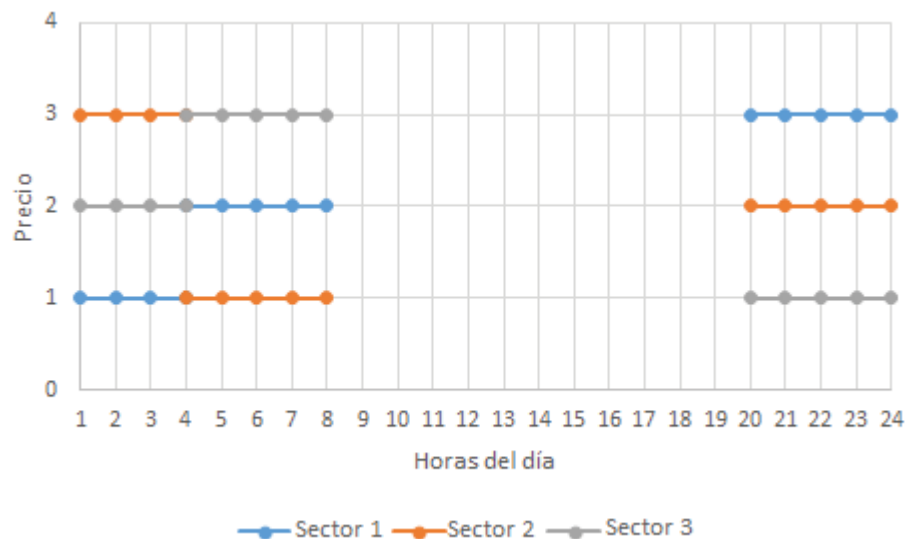


Figura 5-5: Gráfico de curvas de precios para cada sector.

5.2.1 Formulación del problema.

El problema de la recarga de los vehículos eléctricos en la red de distribución es encontrar un horario en el cual se vea menos afectado la red de distribución en el momento de recarga de los vehículos eléctricos, considerando las restricciones del sistema y minimizar las pérdidas del sistema.

Por lo que se buscare minimizar las perdidas, a través de la optimización del programa. En cualquier problema de programación no lineal, el conjunto de restricciones, la función objetivo o ambas no lineales y requiere identificar cuatro componentes básicas:

1. El conjunto de datos
2. El conjunto de variables involucradas en el problema, junto con sus respectivos de definición.
3. El conjunto de restricciones lineales del problema que define el conjunto de soluciones admisibles
4. La función no lineal que debe ser optimizada.

Modelo matemático.

El modelo matemático expuesto representa la operación de un sistema de distribución eléctrico y la forma en que los vehículos eléctricos afectan su funcionamiento. Se identifican las pérdidas de energía asociada a todo el sistema, es decir, también aquellas relacionadas a la carga convencional.

Funcion objetivo

La siguiente ecuación representa la función objetivo asociada a las pérdidas de energía de todo el sistema de distribución eléctrico.

$$Min \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^{nl} (R(l) \cdot I(l, h)^2) \quad (5-1)$$

Donde:

h : hora del día

l : línea de la red.

H : conjunto de hora del día.

nl : conjuntos de líneas del sistema.

$R(l)$: Resistencia de la línea l .

$I(l, h)^2$: cuadrado de la corriente que circula por la línea l en la hora del día h .

Restricciones.

- Balance de potencia activa en cada uno de los nodos.

$$\sum_{l=1}^{nl} (FP(l, h)_{entra}) + P_g(n, h) \quad (5-2)$$

$$= \sum_{l=1}^{nl} (FP(l, h)_{sale} + R(l)_{sale} \cdot I(l, h)^2_{sale}) + P_d(n, h) + P_{ve}(n, h)$$

$$\forall n \in N, h \in H$$

- Balance de potencia reactiva.

$$\sum_{l=1}^{nl} (FQ(l, h)_{entra}) + Q_g(n, h) = \sum_{l=1}^{nl} (FQ(l, h)_{sale} + X(l)_{sale} \cdot I(l, h)^2_{sale}) + Q_d(n, h) \quad (5-3)$$

$$\forall n \in N, h \in H$$

- Límite de tensión.

$$V_{min}^2 \leq V(n, h)^2 \leq V_{máx}^2 \quad \forall n \in N, h \in H \quad (5-4)$$

- Límite de corriente.

$$0 \leq I(l, h)^2 \leq I(l)_{\text{máx}}^2 \quad \forall l \in nl, h \in H \quad (5-5)$$

Donde:

N : Conjunto de nodos.

$FP(l, h)$: Flujo de potencia activa por la línea l durante la hora del día h .

$P_g(n, h)$: Potencia activa generada en el nodo n en la hora del día h .

$P_d(n, h)$: Potencia activa demandada por carga convencional en el nodo n en la hora del día h .

$P_{ve}(n, h)$: Potencia activa demandada por el vehículo eléctrico en el nodo n en la hora del día h .

$FQ(l, h)$: Flujo de potencia reactiva por la línea l durante la hora del día h .

$Q_g(n, h)$: Potencia reactiva generada en el nodo n en la hora del día h .

$X(l)$: Reactancia de la línea l .

$Q_d(n, h)$: Potencia demandada por la carga convencional en el nodo n en la hora del día h .

$V(n, h)^2$: Cuadrado del voltaje en el nodo n en a hora del día h .

5.3 Optimización por Búsqueda Exhaustiva.

La Búsqueda Exhaustiva es un método de optimización exacto, el cual encuentra la mejor solución existente, recorriendo todas las soluciones posibles.

Este método es muy sencillo de implementar y, siempre que exista, encuentra una solución. Sin embargo, su coste de ejecución es proporcional al número de posibles soluciones, el cual es exponencialmente proporcional al tamaño del problema, Por el contrario, la Búsqueda Exhaustiva se usa habitualmente cuando el número de soluciones no es muy grande, o bien cuando éste puede reducirse previamente usando algún otro método heurístico.

Es un método utilizado también cuando es más importante una implementación sencilla que una mayor rapidez. Este puede ser el caso en aplicaciones críticas donde cualquier error en el algoritmo puede acarrear serias consecuencias; también es útil como método “base” cuando se desea comparar el desempeño de otros algoritmos metaheurísticos. La Búsqueda Exhaustiva puede ser vista como el método metaheurístico más simple.

5.4 Datos e información de la red eléctrica.

La optimización se realizará sobre el sistema eléctrico “Colo colo” presentado en la figura 6-4, ubicado en el centro de la comuna de Concepción. Este sistema tiene una característica radial cuenta con 163 barras, siendo una barra de oscilación y las demás barras son de carga, las cuales tienen distintos perfiles de carga asociados, entre ellas carga industrial, comercial, domiciliarias y de alumbrado público.

Además, se cuenta con 174 líneas. En términos generales del sistema. Se tendrá una potencia base de 10 [MVA] y una tensión nominal en las barras de 15 [kV].

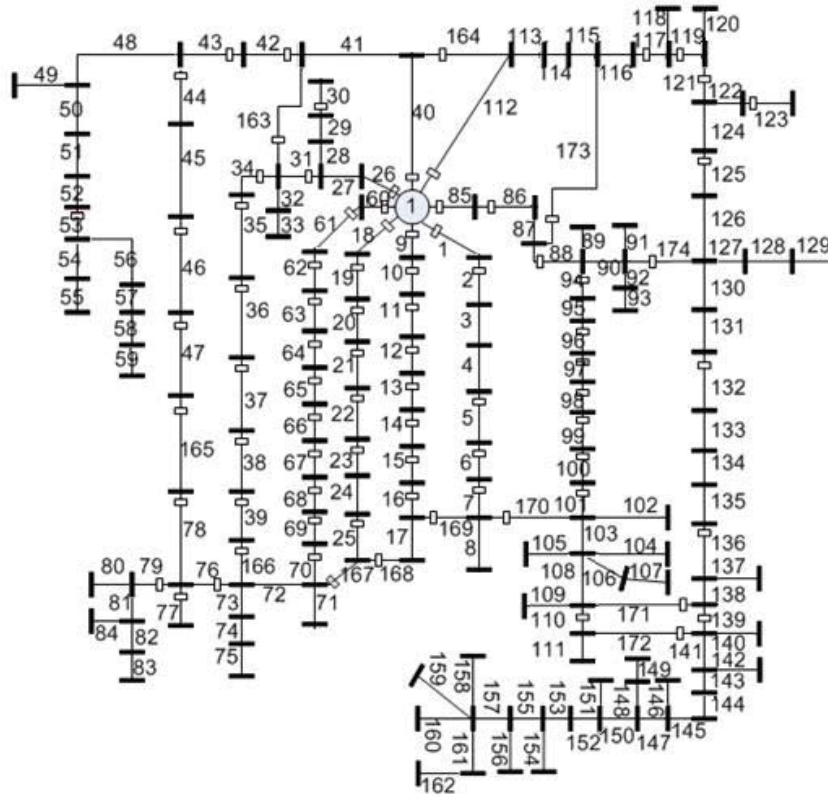


Figura 5-6: Representación de la red eléctrica “Colo Colo”.

5.5 Datos para la simulación.

Para desarrollar la optimización se deben determinar las nuevas variables de decisión que se considerarán para encontrar la mejor estrategia de carga vehicular descentralizada.

5.5.1 Variable de decisión.

Se considera un vector X con las variables de decisión:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

Donde:

x_t : Curva de precio

5.6 Vehículos eléctricos.

Se consideran los siguientes vehículos eléctricos e híbridos, debido al alza de venta en el mercado mundial. Se tiene un total del parque vehicular de 11.100 vehículos.

Tabla 5-1: Vehículos y sus características

Modelo de Vehículo eléctrico	Capacidad (kWh)	Autonomía (km)	Potencia de carga (kW)
Nissan Leaf	24	127	3,7
Tesla modelo S	70	370	3,7
BMW i3	22	130	3,7
Chevrolet Volt (híbrido)	16,5	60	3,7
Mitsubishi Outlander (híbrido)	12	48	3,7
Ford Fusion Energy (híbrido)	7,6	31	3,7

6 Resultados y comparaciones

6.1 Estrategia descentralizada.

Tabla 6-1: Resultados de la estrategia en los tres escenarios.

Porcentaje de Vehículo Eléctrico	Pérdidas [MWh]	Sobrepaso tensión	Máxima Cargabilidad
10%	23,56	0	64,63%
30%	25,99	0	64,63%
50%	29,70	0	64,56%

6.1.1 Escenario con 10% de Vehículos Eléctricos.

1. Mejor resultado.

La mejor solución que se encuentra para este porcentaje de penetración de vehículo eléctrico es $X = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$, lo que se sugiere que el mejor inicio de carga es a las 24 horas, la pérdida obtenida en los 14 días de simulación corresponde a 23,56 [MWh] con una cargabilidad máxima de 64,63%.

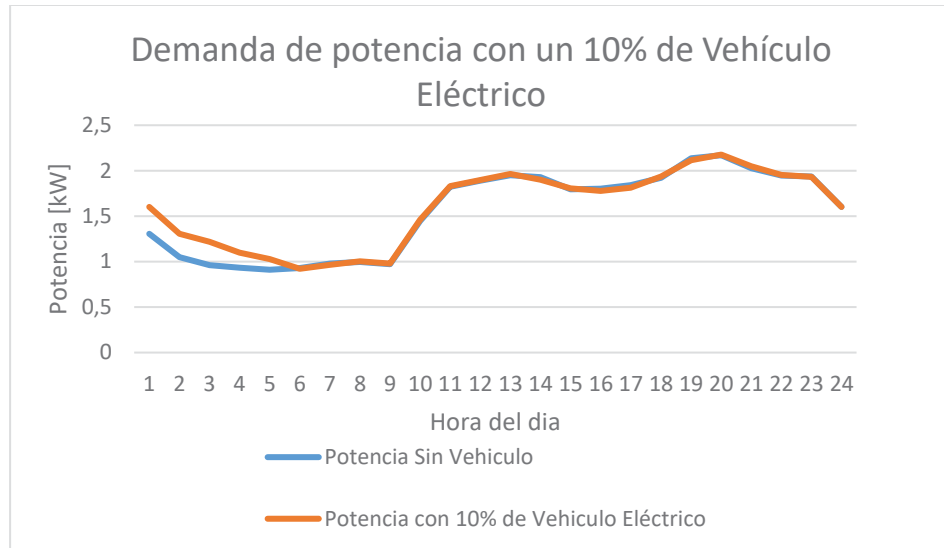


Figura 6-1: Curva de demanda con un 10% de Vehículo Eléctrico.

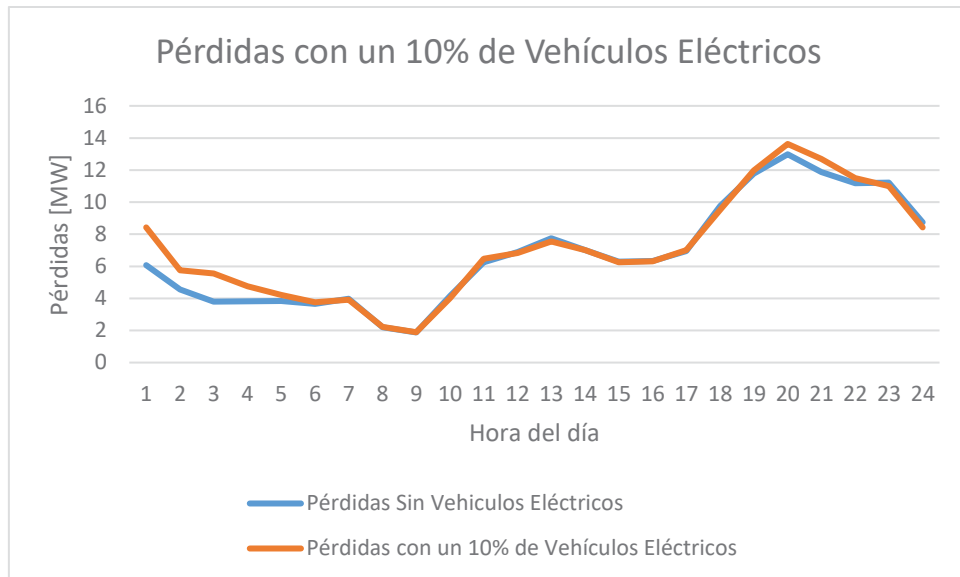


Figura 6-2: Curva de pérdidas con un 10% de Vehículos Eléctricos.

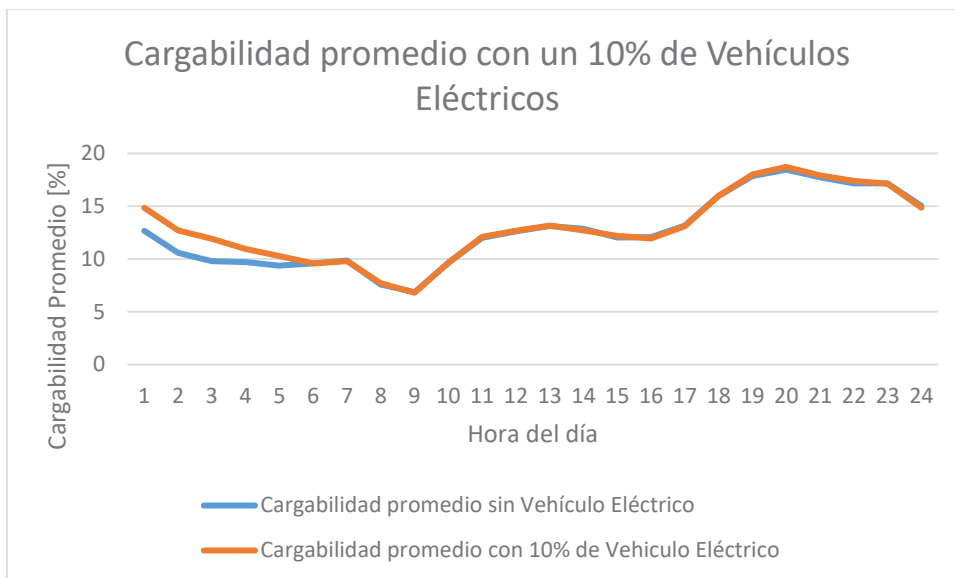


Figura 6-3: Curva Cargabilidad promedio con 10% de Vehículo Eléctrico.

6.1.2 Escenario con un 30% de Vehículos Eléctricos.

1. Mejor resultado.

La mejor solución que se encuentra para este porcentaje de penetración de vehículo eléctrico es $X = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$,

lo que se sugiere que el mejor inicio de carga es a las 24 horas, las pérdidas obtenida en los 14 días de simulación corresponde a 25,99 [MWh] con una cargabilidad máxima de 64,63%.

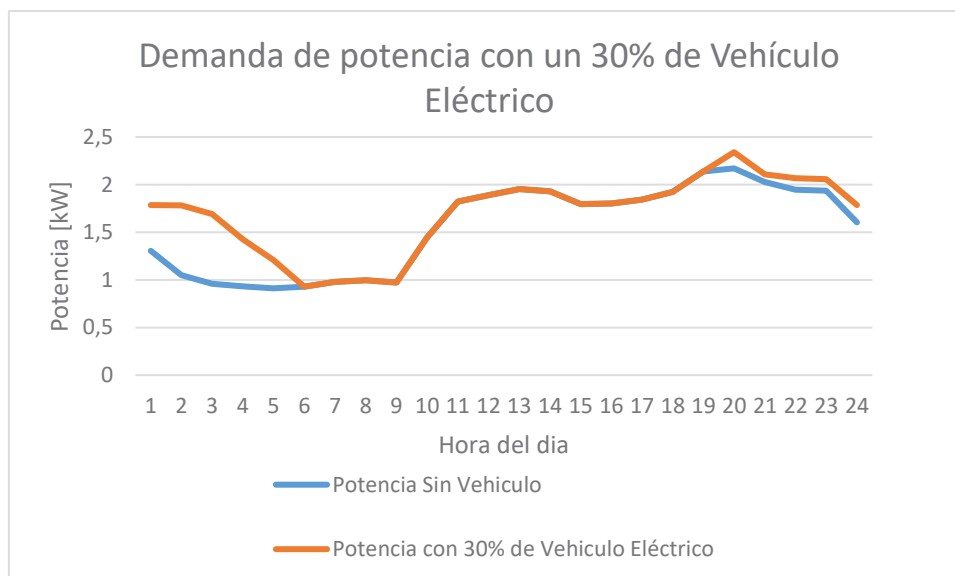


Figura 6-4: Curva de demanda con un 30% de Vehículo Eléctrico.

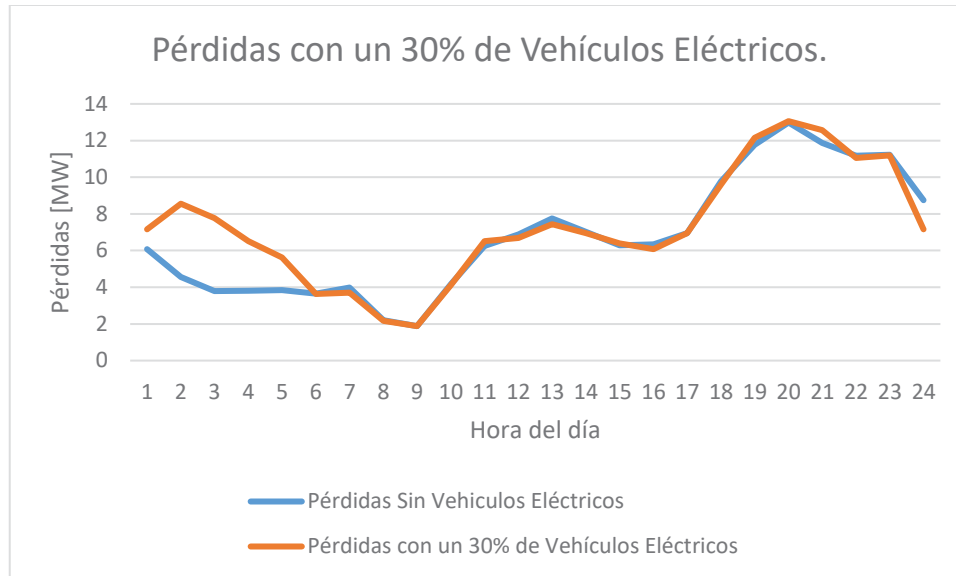


Figura 6-5: Convergencia para 30% de vehículos eléctricos.

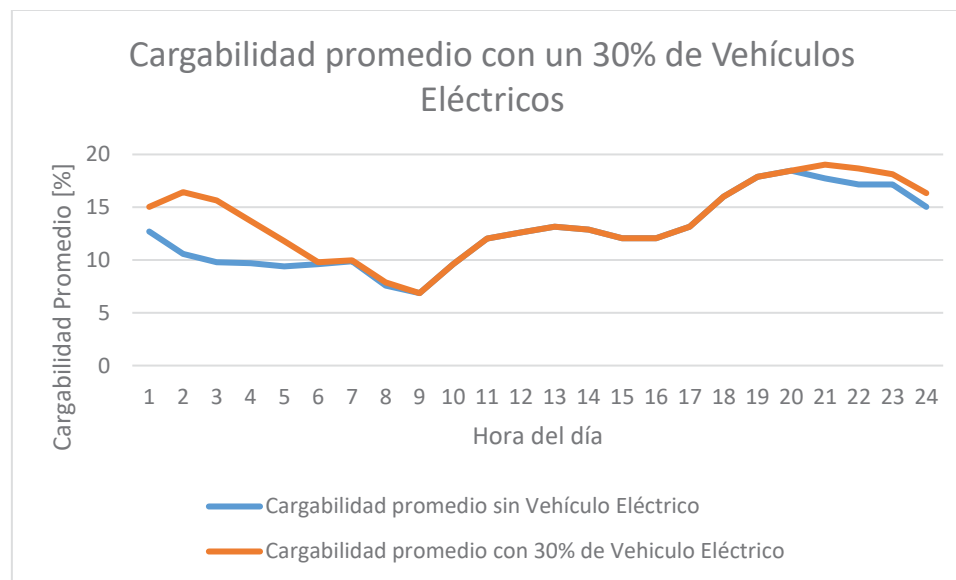


Figura 6-6: Curva Cargabilidad promedio con 30% de Vehículo Eléctrico.

6.1.3 Escenario con un 50% de Vehículos Eléctricos.

1. Mejor resultado.

La mejor solución que se encuentra para este porcentaje de penetración de vehículo eléctrico es $X=$

$$\begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix},$$

lo que se sugiere que el mejor inicio de carga es a las 24 horas, las pérdidas obtenida en los 14 días de simulación corresponde a 29,70 [MWh] con una cargabilidad máxima de 65,56%.

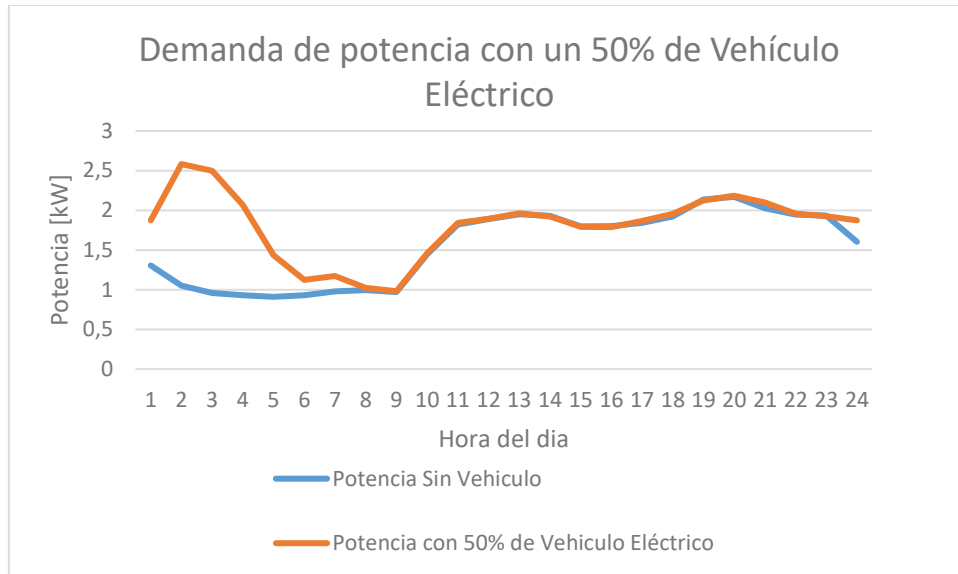


Figura 6-7: Curva de demanda con un 50% de Vehículo Eléctrico.

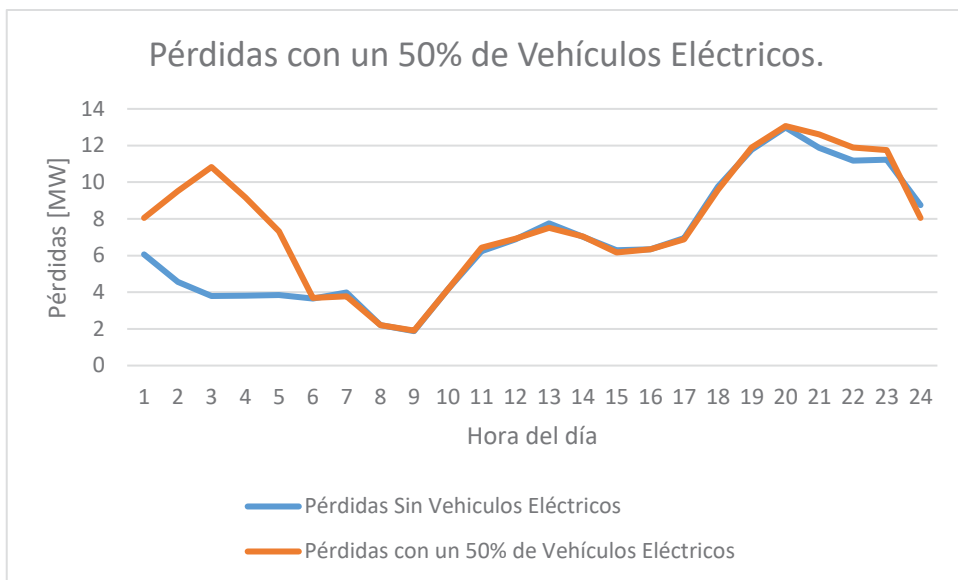


Figura 6-8: Convergencia para 50% de vehículos eléctricos.

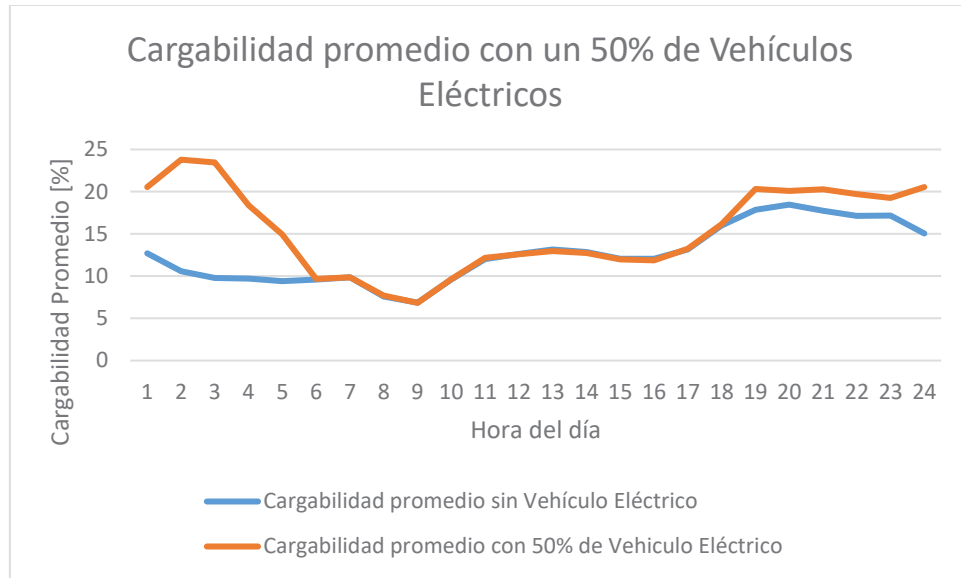


Figura 6-9: Curva Cargabilidad promedio con 50% de Vehículo Eléctrico.

6.2 Comparación de estrategias.

A continuación, se mostrar un cuadro resumen de las estrategias desarrolladas en este y las estrategias desarrolladas en [44], donde se presenta la estrategia de carga libre y estrategia Off-peak que permite horarios fuera de horario punta, y en [45] donde se presentan dos estrategias optimizadas de carga descentralizada.

6.2.1 Pérdidas de energía del sistema.

Tabla 6-2: Comparación de pérdidas de energía para distintas estrategias en [MWh]

Porcentaje de Vehículos Eléctricos	Carga sin Control	Off-Peak	Centralizada n°1	Centralizada n°2	Descentralizada Optimizada
10%	27,15	26,05	25,91	25,91	23,56
30%	31,85	28,61	27,88	27,87	25,99
50%	37,16	31,78	30,28	30,26	29,70

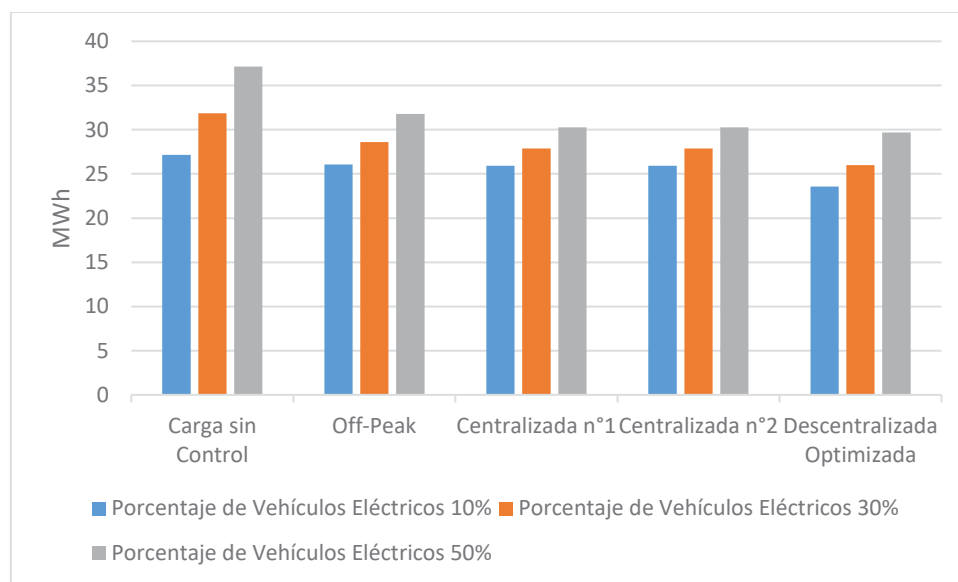


Figura 6-10: Gráfico comparativo de las pérdidas del sistema para las diferentes estrategias.

6.2.2 Pérdidas de energía provocada por los Vehículos Eléctricos.

Tabla 6-3: Comparación de pérdidas de energía provocadas por los Vehículos Eléctricos para distintas estrategias en [MWh]

Porcentaje de Vehículos Eléctricos	Carga sin Control	Off-Peak	Centralizada n°1	Centralizada n°2	Descentralizada	Descentralizada Optimizada
10%	1,98	0,88	0,74	0,741	0,79	0,75
30%	6,68	3,44	2,71	2,71	2,71	2,10
50%	11,99	6,61	5,11	5,09	5,10	4,87

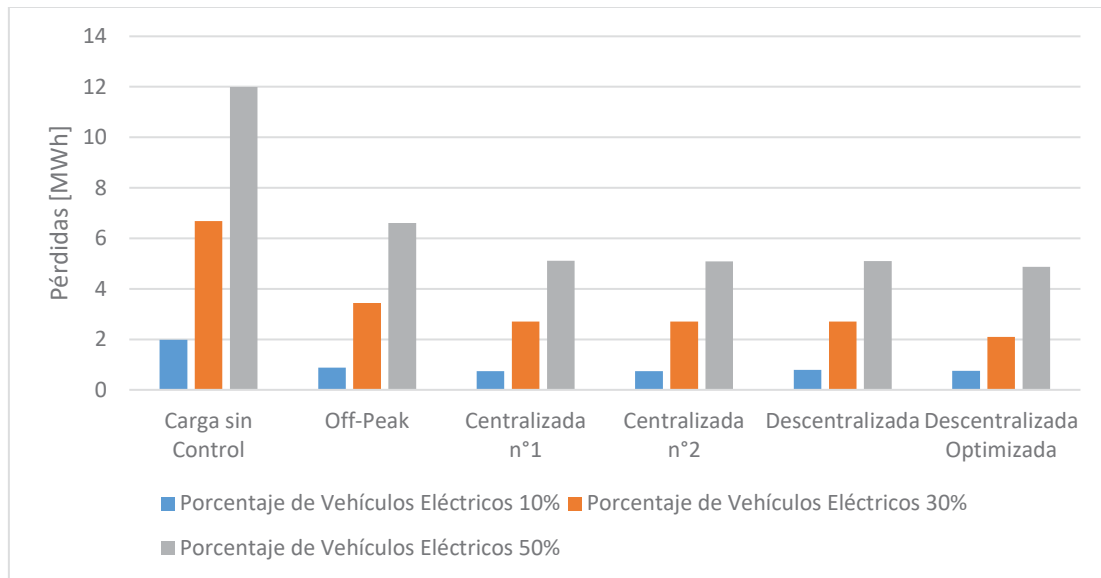


Figura 6-11: Gráfico comparativo de las Pérdidas provocada por los Vehículos Eléctricos.

6.2.3 Cargabilidad máxima de las líneas del sistema.

Tabla 6-4: Comparación de cargabilidad máxima en las líneas para distintas estrategias en [%].

Porcentaje de Vehículos Eléctricos	Carga sin Control	Off-Peak	Centralizada n°1	Centralizada n°2	Descentralizada	Descentralizada Optimizada
10%	67,30	63,89	63,81	64,18	63,89	64,63
30%	79,96	76,24	79,52	77,80	63,89	64,63
50%	94,81	102,11	92,16	90,16	64,15	65,36

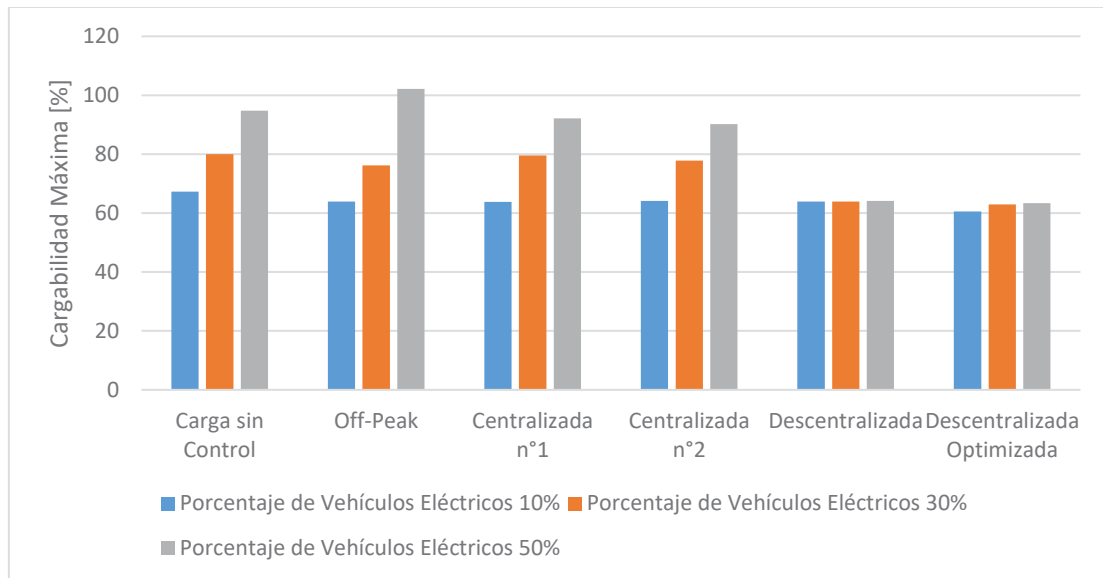


Figura 6-12: Gráfica comparativa de la cargabilidad máxima.

Discusión y conclusiones

Se realiza un estudio de los vehículos eléctricos, donde se da el primer paso comparativo entre los métodos de carga. Se define el concepto de red de distribución, la cual sirve para determinar donde se debe centrar el análisis de este proyecto y así poder llegar a la mejor comparación de desempeño según modelo de carga.

También se entrega una descripción detallada de los vehículos eléctricos, donde se dan a conocer los métodos de carga más factibles a utilizar, así se conoce el tipo de batería de cada vehículo que se conecte a la red. Por lo que se tiene el impacto que provoca este tipo de carga en la red eléctrica, sus efectos perjudiciales sobre transformadores, desequilibrio de fase, las perturbaciones armónicas de la red y la ruptura de interruptores y fusibles. Se mencionan algunas técnicas propuestas por investigadores para disminuir estos impactos

Con las estrategias de carga estudiadas, se definen dos arquitecturas de control, centralizada y descentralizada. De las cuales se puede llegar a la conclusión preliminar, que la mejor forma de cargas de los vehículos eléctricos es mediante control centralizado por alguna entidad, ya que esta se preocuparía de no sobrecargar la red de distribución, por lo que llevarían las recargas a los horarios de menor demanda, así la curva de esta se “aplanaría” y tendría menor impacto en la red de distribución.

Con la realización de la revisión bibliográfica, se puede decir que la mejor opción para no dañar el sistema de distribución es la utilización de un sistema centralizado, por lo que con mayor razón se debe optimizar el proyecto de un sistema descentralizado

Al tener clara la estrategia a aplicar, y conocer sus posibles soluciones, se debe buscar un método heurístico de optimización para aplicar, por la revisión bibliográfica se llega a la conclusión que el mejor método es la Búsqueda Exhaustiva, debido a las pocas soluciones posibles que se pueden obtener.

Con los trabajos previos desarrollados, se puede decir que la estrategia sin control genera el efecto avalancha debido a la carga simultánea de vehículos eléctricos. Sin embargo, la estrategia Off Peak, la cual incentiva al usuario a cargar el vehículo en horarios con menor demanda, disminuye los peak cuando se tiene muy poca penetración de vehículos eléctricos. También se tiene la estrategia descentralizada, la cual incentiva la carga con curva de diferentes precios. Y por último se desarrolló una estrategia centralizada optimizada, la cual tiene el control de todos los usuarios de los vehículos eléctricos de la región, para este caso se plantean dos estrategias para determinar periodos de tiempo a distintos sectores de la red eléctrica asignados por un agregador, con el propósito de minimizar las pérdidas en la red eléctrica.

Ahora, desde la vista del operador de la red, se desarrolla una estrategia descentralizada, la cual tiene el control de establecer diferentes curvas de precio dentro de horarios deseados, para que así se le da un incentivo a los

usuarios para que carguen sus vehículos cuando la energía eléctrica este más barata, para ello se divide la red de distribución en 3 sectores, y cada sector se le asigna un precio diferente.

Con los resultados obtenido y comparando con las otras estrategias, esta tiene valores mejores, ya que la penetración de vehículos se hace en tres sectores diferentes, para así evitar un efecto avalancha, disminuyendo la demanda y las pérdidas del sistema.

Para bajos porcentaje de vehículos eléctrico la mejor opción sigue siendo la estrategia Off Peak, ya que la poca presencia de los vehículos no genera grandes inconvenientes en la operación de la red, por lo que se puede evitar los costos de equipamientos para implementar una estrategia de carga inteligente.

Bibliografía

- [1] K. Clement-NYNS, Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on the Electricity System, Portugal, 2010.
- [2] E. Valseira-Naranjo, A. Sumper, P. Lorret-Gallego, R. Villafafila-Robles y A. Sudria-Andreu, «Deterministic and probabilistic assesment of the impact of the electrical vehicles on the power grid,» de *Iee Transactions on Power Systems*, Detroit Michigan, 2011.
- [3] International Energy Agency, «Sustainable Transport: New Insights from the idea's worldwide study,» 2001, pp. 3-5.
- [4] Estudiantes Anonimos UD, «Redes de Distribución,» webnode, 2014. [En línea]. Available: <https://distribucion.webnode.com.co/que-es-una-red-de-distribucion/>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [5] Gobierno de Chile, «Instituto Nacional de Estadísticas (INE),» [En línea]. Available: <http://www.ine.cl/estadisticas/economicas/electricidad-gas-y-agua>. [Último acceso: 30 Abril 2018].
- [6] S. R. Castaño, Redes de Distribucion de Energía, Colombia, 2004.
- [7] Endesa, «Endesa Educa,» Fundación Endesa, 2014. [En línea]. Available: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/generacion-distribuida. [Último acceso: marzo 2017].
- [8] G. Campusano, «Impacto de la Generación Distruída en la Operación de la Distribución,» UC, Santiago, 2013.
- [9] «Wikipedia, la inciclopedia libre,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Autom%C3%B3vil_el%C3%A9ctrico. [Último acceso: Abril 2017].
- [10] C. Europea, «Transporte 2050,» Bruselas, 2011.

- [11] I. S. Heras, Evaluacion del impacto de la generacion distribuida en sistemas de distribucion primaria de energia electrica, España, 2005.
- [12] E. Naval, «Vaya Invento,» Blog, 2014 Mayo 2014. [En línea]. [Último acceso: Abril 2017].
- [13] Endesa, «Endesa Vehículo Eléctrico,» [En línea]. Available: <https://endesavehiculoelectrico.com/recarga/tipos-de-recarga/>. [Último acceso: Abril 2017].
- [14] M. Estrada, Perspectiva actual de la tecnologia del coche electrico. Analisis de los cambios en los procesos de produccion con la llegada del vehiculo electrico., Pamplona: Universidad Publica de Navarra, 2012.
- [15] Foro Nuclear, «Rincon Educativo, Energia y Medio Ambiente,» Endesa, Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.rinconeducativo.org/eu/node/502>. [Último acceso: Abril 2017].
- [16] J.Staffell, L. Shang y G. Pollet, «Current status hybrid battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemnistry to market projects,» Electrochimica, 2012, pp. 235-249.
- [17] Ehsani, Yimin Gao y Ali Emadi Mehrdad, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Dising, Estados Unidos: CRC Press: Segunda es., 2010.
- [18] Ministerio de Energia , «Top Ten,» 2017. [En línea]. Available: <https://top-ten.cl/vehiculos/electricos>. [Último acceso: 16 mayo 2017].
- [19] Stonton W. Hadley and Alezandra Tsvetkova, Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Tennessee, 2008.
- [20] J. Taylor, A Maitra, M. Alexander, D. Brooks y M. Duval, «Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations,» Calgary, 2009.
- [21] C. Vera, Desarrollo de un modelo de flujo vehicular para evaluar alternativas de carga e inyeccion de energia de autos electricos sobre la red de distribucion, Valparaiso, 2016.
- [22] «RENAULT,» 19 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://corrienteelectronica.renault.es/futuro-impacto-la-red-electrica-coche-electrico/>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [23] J.A. Peças Lopes, J. Soares y P.M. Rocha Almeida, Identifying Management Procedures to Deal with connection of electric Vehicles in the Grid, IEEE Bucharest Power TEch, 2009.
- [24] J. Lopes, F. Soares y P.Almeida, «Integration of electric vehicle in the electric power system,» Proc IEEE, 2011, pp. 99:168-83.
- [25] J. Garcia-Villalobos, I. Zamora, J. San Martin, F. Asensio y V. Aperrribay, «Plug-in electric vehicles in electric distribution network: A review of smart grid charging approaches,» de *Euro Trans Electr Power*, 2012, pp. 22:334-50.

-
- [26] T. Logenthira y D. Srinivasan, «Multi-agent system for managing a power distribution system with plug-in hybrid electric vehicles in smart grid,» 2011, pp. 954:346-51.
- [27] V.Dos Santos Eleuterio, Y.Nesterov y F.A Chudak, «Static Traffic Assignment Proble. A comparison Between Beckmann (1956) and Nesterov & de Palma (1998) models,» de *Swiss Transport Research Conference, Monte Verità*, Ascona, 2007.
- [28] S. Deilami, A. Masoum, P. Moses y M. Masoum, «Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, nº 3, pp. 456-467, Septiembre 2011.
- [29] Kristie Clement-Nyns, Edwin Haesen and Johan Driesen, «The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, nº 1, pp. 371-380, 2010.
- [30] S. Deilami, A. Masoum, P. Moses y M. Masoum, «Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile,"» *IEEE Transactions on*, vol. 2, nº 3, pp. 456-467, 2011.
- [31] Luis Pieltain Fernández, Tomás Gómez San Román, Rafael Cossent, Carlos Mateo Domingo, and Pablo Frías, «Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, nº 1, pp. 206-214, 2011.
- [32] O. Beaude, Y. he y H.Hennebel, «Introducing Decentralized EV Charging Coordination for the Voltage Regulation,» *Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Lyngby, 2013.
- [33] R. Mehta, D. Srinivasan and A. Trivedi, «Optimal charging scheduling of plug-in electric vehicles for maximizing penetration within a workplace car park,» de *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, CEC, 2016, pp. 3646-3653.
- [34] Akiba, Ryohei Yokoyama y Nobuyuki, «Optimization-Based Simulation for Evaluating Electric Optimization-Based Simulation for Evaluating Electric,» *IEEE*, San Diego, California, 2017.
- [35] Nandi, Mousumi Karmaka and Arup Kr., «Trip planning for electric vehicle through optimal driving using genetic algorithm,» de *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy*, Bankura, India, 2017.
- [36] Khalghani, M.R., Khushalani-Solanki, S., Solanki, J., «Optimal integration and location of PHEV aggregators in power distribution systems,» de *NAPS 2016 - 48th North American Power Symposium, Proceedings*, Morgantown, 2016.
- [37] Yang, Zhi Qiao y Jin, «Low-Voltage Distribution Network Reconfiguration Considering High Penetration of Electric Vehicles - a UK Case Study,» de *5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Birmingham, UK, 2016.

-
- [38] Haoming Liu, Man Niu, Weijie Wang, «Reserving Charging Strategy for Electric Vehicles Based on Combined Model of Road-Charging Station-Electric Vehicle,» de *IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference*, Nanjing, China, 2017.
- [39] Bo Zeng, Jiahuan Feng, Jianhua Zhang, Zongqi Liu, «An optimal integrated planning method for supporting growing penetration of electric vehicles in distribution systems,» *Energy*, vol. 1, n° 126, pp. 273-284, 2017.
- [40] Huwi Chen, Zhou Su, Yilong Hui, «Optimal Approach to Provide Electric Vehicles with Charging Service by Using Mobile Charging Stations in Heterogeneous Networks,» IEEE, Shanghai, 2017.
- [41] Wu, F., Sioshansi, R., «A stochastic flow-capturing model to optimize the location of fast-charging stations with uncertain electric vehicle flows,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 1, n° 53, pp. 354-376, 2017.
- [42] R. Cerda, Impacto de la carga de vehículos eléctricos en las redes de distribución, Valparaíso, Chile: Pontificie Universidad Católica de Valparaíso, 2015.
- [43] R. Cerda, Desarrollo de plataforma de simulacion y estrategia de carga de vehículos eléctricos, Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2016.
- [44] C. Vera, Optimización de estrategia centralizada de carga para vehículo eléctricos en una red de distribución eléctrica, Valparaiso, 2017.
- [45] Bint Ingeniería, «GesitránBíoBío,» Universidad de Concepción, 2014. [En línea]. Available: <http://www.gesitrانبiobio.cl/>. [Último acceso: 27 Junio 2017].
- [46] M. R. Rodriguez, Impacto de un parque vehicular electrico en los requerimientos de reconfiguracion de la red de distribucion de la ciudad de Santiago, Santiago, 2013.
- [47] J. Kennedy, R. Eberhart and Y. Shi, «Swarm Intelligence,» Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, 2001.