



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Ignacio Alejandro Cruz Álvarez

Evaluación del impacto de un parque vehicular eléctrico en la red de distribución de Valparaíso

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 01 de abril de 2019



Evaluar el impacto de un parque vehicular eléctrico en la
red de distribución de Valparaíso

Ignacio Alejandro Cruz Álvarez

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

Sr. Jorge Mendoza Baeza

Profesor Guía

Sr. Miguel López González

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth

Secretario Académico

Valparaíso, 01 de abril de 2019

*Para mi madre, por ser las columnas de mi templo,
por enseñarme con su amor y con su ejemplo
qué más da que papá no estuviera
si ella supo ser todo lo que él no era*

Agradecimientos

Agradezco a mi madre por todo su esfuerzo realizado para así poder darme todo lo necesario para desarrollarme tanto personal como profesionalmente. A mi hermano Rodolfo por apoyarme en cada decisión que tomé durante mi vida universitaria, a mis tíos Lorena e Iván que sin su apoyo y consejos no podría haberme decidido por esta carrera. A mi “lela” por su inmenso e incondicional amor de abuela.

A Sergio por ser un excelente amigo y compañero de estudios. A Danitza por haberme apoyado, ayudado y acompañado los últimos tres años, y por sobretodo la paciencia de escucharme. A Francisco Fuica por brindarme su amistad desde hace 13 años, sobre todo por su apoyo y buenos consejos.

Respecto a laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, donde pase gran parte de mi último año, quiero agradecer a Francisco Reyes, quien fue un gran apoyo en esos días cuando ninguna simulación funcionaba.

Agradecer al profesor Jorge Mendoza por todos sus consejos y críticas constructivas para poder realizar este trabajo de título, como también al profesor Miguel López por todos sus comentarios para este proyecto.

Por último agradecer a todas aquellas personas que fueron de alguna forma parte de este proceso.

Valparaíso, 1 de abril de 2019

Ignacio Cruz Álvarez

Resumen

Este proyecto busca estudiar y analizar el impacto de un parque vehicular eléctrico en la red de distribución. Para esto se necesita entender lo que es la curva de demanda, perfiles de carga, alimentadores de SSEE y elementos de la red. Además, es necesario conocer la cantidad de vehículos que forman parte del sector en estudio y de los viajes que realiza la ciudadanía junto con los motivos por lo cual los realizan. Al tener la Encuesta de Origen y Destino (EOD) y al conseguir desde la empresa Chilquinta S.A. la red de distribución de la SSEE Valparaíso se procedió a introducir los datos obtenidos en el programa elaborado en trabajos anteriores, todos estos datos requirieron de una adaptación ya que los dos trabajos anteriores fueron realizados para la red Colo-Colo de la ciudad de Concepción y con los datos de tránsito obtenido desde SEGITRANS.

Se aplicaron tres modos de carga: carga libre, que permite al usuario conectarse cuando lo requiera; la carga tipo off-peak que solo permite la carga en horario fuera de punta; y descentralizada, para esta última se procedió a distribuir sistema en 3 grupos asignándole una curva de precio a cada grupo, con lo cual el usuario se conectará en el horario que más rentable le sea. El modelo diseñado incluye interacción con flujos vehiculares externos y la utilización de una función de costos de viaje dependiente de flujos que varían dependiendo de la hora. Además, se consideraron dos perfiles de viajeros, uno representando a gente que tiende a repetir un patrón de viaje durante los días de semana y otro libre, que toma la decisión de viajar y a qué punto cada día. Ambos tienen cierta variabilidad día a día, y comportamientos distintos para los fines de semana. Se tomó en cuenta seis tipos de vehículos eléctricos con distintas características, los perfiles de consumo y de carga de estos vehículos fueron introducidos en el programa elaborado, incluyendo modelos híbridos y de batería. Las dos últimas estrategias resultan bastantes prácticas, pero al llegar una alta cantidad de vehículos eléctricos la carga descentralizada es la que obtiene el mejor desempeño.

Palabras claves: red de distribución, vehículos eléctricos, estrategia de carga, huella de carbono (GEI), cargabilidad, curva de demanda.

Abstract

This project seeks to study and analyze the impact of an electric vehicle fleet in the distribution network, it is necessary to understand what is the demand curve, load profiles, SSEE feeders and network elements, it is also necessary to know the amount of vehicles that are part of the sector under study and the trips made by the citizens together with the reasons why they do it. Knowing what is the Survey of Origin and Destination (EOD) and when obtained from the company Chilquinta S.A. the distribution network of the SSEE Valparaíso was proceeded to enter the data obtained in the program developed in previous theses, all these data required an adaptation since the two previous theses were made for the Colo-Colo network of the city of Concepción and with the traffic data obtained from SEGITRANS

The environmental issue is important, so based on last year's studies it was possible to corroborate that the carbon footprint of the electric vehicle is much lower than that of the combustion vehicle, therefore, it is a real alternative to curb the greenhouse effect.

Three load modes were applied, free load that allows the user to connect when required, the load type off-peak that only allows charging during off-peak and decentralized time, for the latter the system was divided into 3 groups giving it a curve of price to each group, with which the user will connect in the most profitable time. The designed model includes interaction with external vehicular flows and the use of a travel cost function dependent on flows that vary depending on the time. In addition, two profiles of travelers were considered, one representing people who tend to repeat a pattern of travel during the weekdays and a free one, which makes the decision to travel and at what point each day. Both have some variability day by day, and different behaviors for weekends. Six electric vehicles with different characteristics were modeled, including hybrid and battery models. The last two strategies are quite practical, but when a high number of electric vehicles arrive, the decentralized load obtains the best performance.

Keywords: distribution network, electric vehicles, charging strategy, carbon footprint (GHG), chargeability, demand curve.

Índice general

Introducción	1
Objetivos generales	2
Objetivos específicos.....	2
1 Antecedentes	3
1.1 Aspectos de una red de distribución eléctrica	3
1.1.1 Sistemas de distribución eléctrica.....	3
1.1.2 Clasificación por niveles de tensión.....	4
1.1.3 Clasificación por tipo de alimentación	4
1.1.4 Clasificación de acuerdo a zona geográfica.....	5
1.1.5 Clasificación de acuerdo perfiles de carga.....	6
1.1.6 Características de carga.....	7
1.1.7 Generación Distribuida.....	9
1.1.8 Net metering.....	11
1.1.9 Smart Grid (Red Inteligente)	12
1.2 Vehículos Eléctricos	14
1.2.1 Tipos de vehículos eléctricos	15
1.2.2 Descripción técnica de un vehículo eléctrico	18
1.2.3 Principales componentes de un vehículo eléctrico.	18
1.2.4 Mercado vehículos eléctricos en Chile.....	24
1.3 Impacto de los vehículos eléctricos en la red de distribución.....	27
1.3.1 Carga de los vehículos eléctricos enchufables	27
1.3.2 Estrategias de carga	29
2 Emisión de gases de efecto invernadero.....	35
2.1 Huella de carbono	35
2.2 Fabricación del vehículo eléctrico	36
2.3 Fuente de Generación de Energía.....	37
2.4 Comparación vehículo a combustión y eléctrico	39
3 Asignación de Tráfico	42
3.1 Planificación de modelo de transporte	42

3.2 Definiciones	43
3.3 Métodos de resolución.....	46
3.4 Modelo Multicommodity.....	46
4 Revisión bibliográfica	48
4.1 Consideraciones Generales	48
4.2 Carga del vehículo eléctrico.....	49
4.3 Control sobre la carga	50
4.4 V2G.....	50
4.5 Trabajo previo.....	51
5 Solución propuesta	53
5.1 Propuesta	53
5.2 Vehículos eléctricos.....	54
5.3 Escenario de Estudio	55
5.3.1 Encuesta de Origen y Destino.....	55
5.3.2 Red de distribución eléctrica	60
5.4 Estrategia de carga.....	61
6 Desarrollo del proyecto	63
6.1 Parámetros del sistema.....	63
6.2 Iteración	64
6.2.1 Tipo de días	64
6.3 Batería.....	66
6.3.1 Carga libre.....	66
6.3.2 Carga off-peak.....	66
6.3.3 Carga descentralizada	67
6.4 Obtención de índices	68
7 Resultados y análisis	69
7.1 Pérdidas de energía	69
7.2 Tensión en los nodos.....	69
7.3 Cargabilidad de las líneas	70
7.4 Demanda máxima	71
7.5 Graficas comparativas.....	71
7.5.1 Parque vehicular eléctrico del 10%	72
7.5.2 Parque vehicular eléctrico del 30%	75
7.5.3 Parque vehicular eléctrico del 50%	78
7.5.4 Caso particular del 90 % de VE.....	81
7.6 Análisis de datos	81
7.6.1 Tensión de nodos.....	83
7.6.2 Cargabilidad	84
7.6.3 Pérdidas	84

Discusión y conclusiones	86
Bibliografía.....	89

Introducción

La movilidad ha sido parte clave de nuestra evolución y supervivencia, es la que nos permite desplazarnos y así poder cambiar de lugar para vivir en uno que nos dé mayor comodidad y estabilidad, como también nos sirve para poder transportar materiales y/o personas para las faenas y trabajos en pequeñas y grandes industrias. Es por esto que el estudio para mejorar y potenciar nuestro sistema de transporte es tema de tanta importancia en nuestra sociedad, tratando siempre ya sea buscando una manera de tener máquinas capaces de dar un nuevo uso para nuestra sociedad, potenciar algún servicio de transporte para darle más capacidad o velocidad, y por último introducir nuevas tecnologías para abaratar costos o colaborar a solucionar un problema mediático, que en estos días sería el tema medio ambiental.

Como se menciona en el párrafo anterior el tema ambiental es un tema muy importante para la ciudadanía es por ello, que se están aplicando políticas asociadas para poder revertir efectos como el efecto invernadero. Es por esta razón que los automóviles eléctricos aparecen como una fuerte competencia para el auto a combustión, pues claramente la contaminación del auto eléctrico es muy inferior comparado con el de combustión. Otra de las particularidades que hace al auto eléctrico un mejor competidor es su eficiencia pues, como se verá en este proyecto, tiene características internas que lo hacen aprovechar de mejor manera la energía.

Toda esta integración de los vehículos eléctricos a la matriz vehicular, conlleva a futuras problemáticas, una de ellas es como afecta a la curva de demanda de electricidad que en el caso común del uso de estos autos es que la ciudadanía tendrá la tendencia a cargarlo de noche produciéndose desplazamiento y aumento en el peak de demanda, lo que produce problemas de cargabilidad a la red de distribución. Por otro lado, la ventaja del auto eléctrico es la razón de que además de ser una carga al sistema puede ser utilizado como fuente, esto es conocido como V2G; esto ayudaría en muchos aspectos a mejorar por ejemplo niveles de tensión, y en caso de alguna problemática en la red suministrar en breves periodos energía al sistema para poder resolver el problema en cuestión.

Para poder minimizar problemas en la red de distribución y poder implementar el sistema V2G está la solución de la Smart Grid, esta puede solucionar diversas problemáticas, entre ellas, las referidas a los vehículos eléctricos, pues controlaría de manera eficiente la energía eléctrica permitiendo minimizar pérdidas y mediante del uso de nuevas tecnologías, tener una visión completa de cómo controlar la red en todo momento y tener información valiosa para cada punto

de esta, también puede tener control completo sobre el sistema de carga de los vehículos ya que podría establecer horarios en los cuales puede cargar el usuario, como también poder utilizar la energía almacenada como una fuente y esta utilizarla para motivos que estime necesario.

Los vehículos eléctricos son una alternativa para ayudar a combatir el efecto de los gases invernadero, puesto que al estar en movimiento estos no liberan GEI al medio ambiente con lo cual es de gran ayuda si lo comparamos con lo que bota un vehículo a combustión a través de su tubo de escape. Si consideramos la fabricación del vehículo eléctrico se nos presenta la variable más importante a estudiar dentro de los elementos que lo compone, la batería, la obtención de sus materias primas y elaboración de esta misma genera muchos GEI. Por otro lado, la matriz energética de un país es fundamental a la hora de hablar de producción de CO₂eq, ya que si se tiene un país que gran parte de su matriz energética es gracias a energía de origen fósil, se tendrá por consecuencia una mayor contaminación debido a la mayor demanda energética de un parque vehicular eléctrico. Y por último, tomando en cuenta las variables de fabricación y de la procedencia de la energía de un país, se puede hacer un comparativo total entre lo que contamina un vehículo eléctrico en comparativa con un vehículo a combustión.

El área de estudio será el área metropolitana del Gran Valparaíso, esta consta de 26 Macrozonas que en total se subdividen en 357 zonas, toda esta información es sacada de la Encuesta de Origen y Destino de Viajes 2016. Se tomará en cuenta la Macrozona “Plan de Valparaíso” donde será nuestra zona de estudio, las demás localidades serán nodos donde se simulará viajes entre nodos asociándoles costos de acuerdo al tiempo que demoren entre ellos, además asignando perfiles de usuarios y horarios en que realizan los viajes. Respecto a la red, será utilizada la SSEE Valparaíso la cual tiene una demanda máxima de 43.79 [MW], posee 323 cargas y 5303 líneas.

Objetivos generales

- Estudiar el impacto de un parque vehicular eléctrico en la red de distribución de Valparaíso, considerando variables como cargabilidad de las líneas, demanda de consumo y pérdidas, evaluando mediante el uso de distintas estrategias de cargas.

Objetivos específicos

- Estudiar sobre la red de distribución, y las nuevas tecnologías que se implementarían.
- Revisión bibliográfica sobre el impacto de los vehículos eléctricos sobre las redes eléctricas.
- Adaptar la red de distribución a la plataforma existente.
- Simular en una red de prueba la presencia de los vehículos eléctricos aplicando estrategias de cargas distintas.
- Analizar resultados y concluir como afectaría el impacto de una futura matriz vehicular chilena.

1 Antecedentes

Para cumplir con los objetivos planteados, como también el desarrollo de la plataforma que será parte de este escrito, es necesario estudiar aspectos fundamentales sobre redes de distribución eléctrica, vehículos eléctricos y sobre la “Smart Grid”, así como también una revisión actual a la problemática

1.1 Aspectos de una red de distribución eléctrica

1.1.1 Sistemas de distribución eléctrica

Dentro del sistema eléctrico chileno podemos encontrar que este tiene segmentaciones claramente establecidas, las tres más considerables son generación, transmisión y distribución, en este caso se hablara sobre esta última.

Según la CNE los sistemas de distribución se definen como: “Aquellos sistemas constituidos por las líneas, subestaciones y equipos que permiten prestar el servicio de distribuir la electricidad hasta los consumidores finales, localizado en ciertas zonas de concesión geográfica 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”. Las empresas de distribución operan bajo un régimen de concesión de servicio público de distribución, con obligación de servicio y con tarifas reguladas para el suministro a clientes regulados [1].

Este régimen de concesión se encuentra en el Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos (Decreto Supremo N.º 327) [2] y dicta los estatutos para que las empresas de distribución puedan efectuar el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales ubicados dentro de la zona de concesión y para los que estén ubicados fuera de ella, se conecten a sus instalaciones mediante líneas propias o de terceros.

Antiguamente la red de distribución era alimentada por las líneas de transmisión, a su vez estas provenían de una generadora, dada esta situación las líneas de distribución era unidireccionales, pero hoy en día la red se ha vuelto más dinámica gracias a la generación distribuida, produciendo ventajas ya que en transmisión existían muchas pérdidas por la extensión que existía entre las generadoras y distribuidoras, pero una problemática es que se produce bidireccionalidad en las líneas por lo que es un tema a considerar en las distribuidoras.

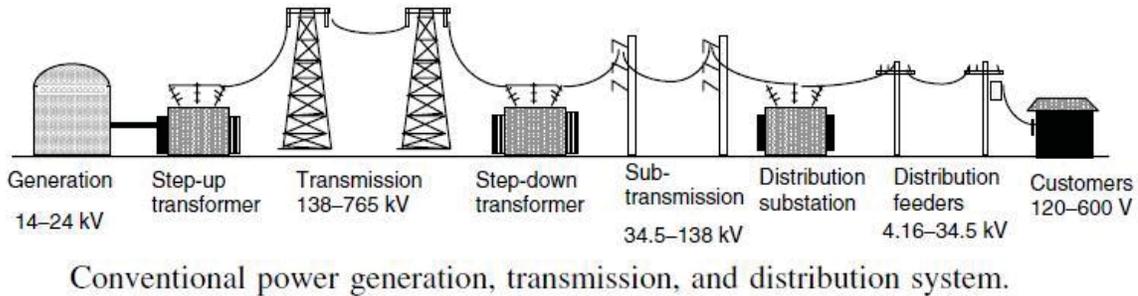


Figura 1-1 Ejemplo de una red eléctrica [3].

1.1.2 Clasificación por niveles de tensión

Los niveles de tensión a los que opera una red de distribución varían dependiendo el país, en Chile se puede dividir en dos:

- Sistema de distribución primaria o Alta tensión: Está 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 típicamente son de 12 kV, 13,2 kV o 15 kV, mientras que en zonas rurales las tensiones suelen ser de 23 kV.
- Sistema de distribución secundaria o Baja tensión: Estas proveen energía en baja tensión, 380 V fase- fase o 220 V fase-neutro, a los usuarios finales.

1.1.3 Clasificación por tipo de alimentación

Esto se puede subdividir de acuerdo a la conexión del sistema 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 como se muestra en la Figura 1-2. Además, presenta un cableado en las partes.

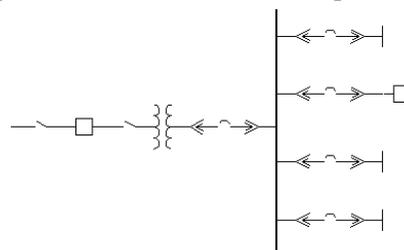


Figura 1-2 Sistema radial [3]

- Sistema en anillado: se caracteriza por tener dos de sus extremos alimentados, quedando estos puntos intercalados en el anillo o bucle. En la siguiente figura se muestra un ejemplo.

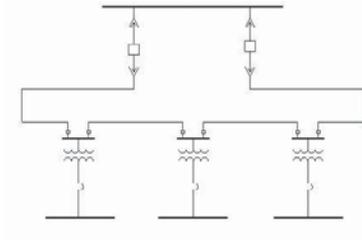


Figura 1-3 Sistema en anillo [3]

1.1.4 Clasificación de acuerdo a zona geográfica

Sistema de distribución urbana

Este tipo de distribución alimenta a poblaciones y centros urbanos de gran consumo, dentro de las cuales podemos encontrar las siguientes características [4]:

- 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.

Sistemas de distribución rural

Estos sistemas son encargados de alimentar zonas de menor densidad de carga, esto último sumado a las grandes distancias que las separan de los puntos de conexión, conlleva a equipos especiales para estas pequeñas cargas, lo que genera un alto costo en el consumo de energía. Estas pueden ser caracterizadas de la siguiente manera [4]:

- 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.

1.1.5 Clasificación de acuerdo perfiles de carga

La finalidad a la cual el usuario destina la energía eléctrica sirve de criterio para clasificar las cargas:

Perfil de carga tipo residencial

Básicamente comprende los edificios de apartamentos, condominios, urbanizaciones, etc. Estas cargas se caracterizan por ser eminentemente resistivas (alumbrado y calefacción) y aparatos electrodomésticos 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 gentes se agrupan en sectores bien definidos, de acuerdo a las clases socioeconómicas. Pueden ser clasificados de la siguiente manera [5]:

- 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.

Perfil de carga tipo comercial

Se caracteriza por ser principalmente resistivo y generalmente se localiza en las áreas céntricas de las ciudades donde se realizan actividades comerciales, centros comerciales y edificios de oficinas. Tienen algún componente inductivo que baja en alguna medida el factor de potencia. Hoy en día predominan cargas muy sensibles que introducen armónicos [5].

Perfil de carga tipo industrial

Que tienen un componente importante de energía reactiva debido a la gran cantidad de motores instalados. 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 tienen doble tarifa (alta y baja) para evitar que su pico máximo coincida con el de la carga residencial [5].

Perfil de carga de tipo alumbrado público

Para contribuir a la seguridad ciudadana en las horas nocturnas se instalan redes que alimentan lámparas de mercurio y sodio de características resistivas [5].

Perfil de carga mixto

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 [5].

1.1.6 Características de carga

Para configurar una red de distribución eléctrica es importante conocer la demanda energética en términos temporales y espaciales. En este punto se mostrará cómo se comportan de manera genérica las cargas dependiendo de su procedencia. En general se pueden distinguir los siguientes tipos de cargas y sus respectivas curvas.

Carga Residencial

Este tipo de cargas tal como se muestra en la Figura 1-4 tendrá el peak de potencia entre las 20 y 23 horas, esto sucede ya que es la hora en que oscurece por lo tanto se requiere luz artificial y calefacción puesto que la población llega a su casa 20 horas y termina por estar durmiendo alrededor de las 23 horas en adelante, el consumo mínimo se efectúa entre las 4 y 6 horas dado que es el momento en que la mayor parte de la población duerme.

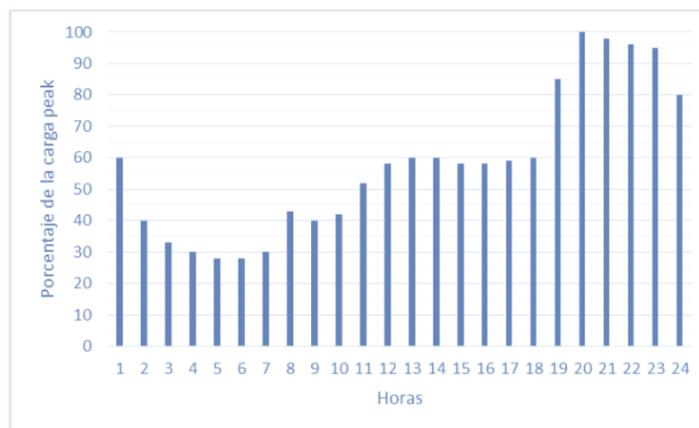


Figura 1-4 Curva de demanda residencial [5]

Carga Comercial

Como se aprecia en la Figura 1-5 la demanda se encuentra concentrada precisamente en el horario que funciona el comercio, que es alrededor de las 9 hasta las 18 horas, luego defiende pues los locales comienzan a cerrar, es por esto que los puntos más bajos son desde las 0 hasta las 7 horas, donde está todo cerrado.

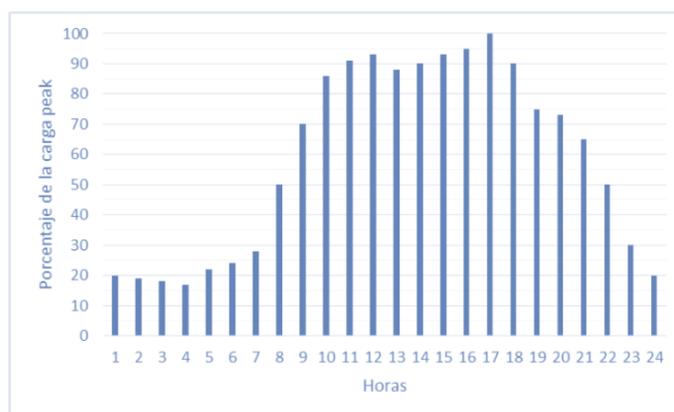


Figura 1-5 Curva de demanda comercial [5]

Carga Industrial

Estas cargas se pueden decir que están todo el tiempo demandando potencia y no tiene bajas muy significativas como se ve en la Figura 1-6 debido a que se trabaja durante todo el día en sistema de turnos, salvo entre las 10 horas en que están todas a tope ya que están todas las industrias funcionando simultáneamente.

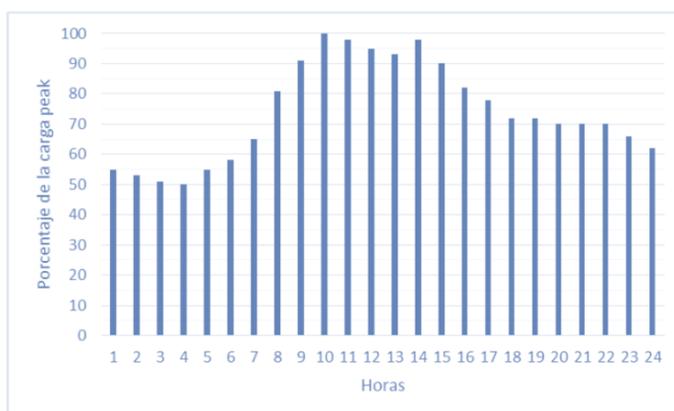


Figura 1-6 Curva de demanda industrial [5]

Carga luminaria

Las luminarias es muy fácil describir su curva de demanda puesto que solo consumen cuando cae la noche en las ciudades por lo tanto tienen un funcionamiento peak entre las 20 y 6 horas. El resto del día están en muy bajo consumo, claramente apreciable en la Figura 1-7.

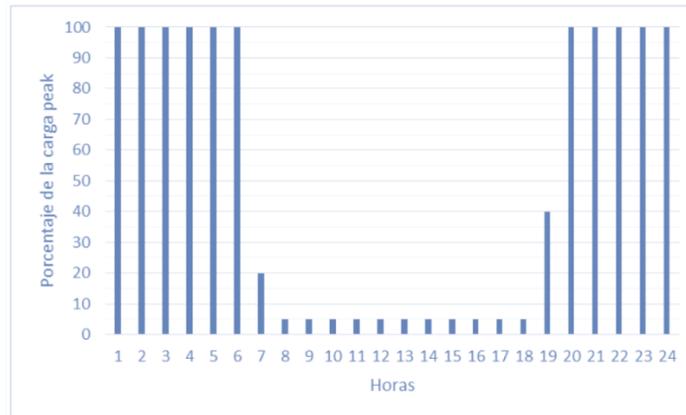


Figura 1-7 Curva de demanda luminaria [5]

1.1.7 Generación distribuida

La generación eléctrica en términos generales se realiza a través de grandes centrales, estas dado su tamaño están construidas distante de los centros urbanos, esto hace que necesitemos de líneas de transmisión para poder abastecer a la ciudadanía, generando pérdidas por el transporte de la energía desde tan largas distancias, gracias a la tecnología actual hoy en día es posible generar energía y conectarse directamente a la red de distribución, creando pequeñas generaciones pudiendo complementar la generación traída desde las grandes centrales.

No existe definición exacta sobre generación distribuida, pero generalmente se entiende como la pequeña producción de energía en pequeños centros de generación estas están ubicadas cerca de los centros de consumo, es decir que también pueden ser generada por los propios clientes de la empresa distribuidora [6].

Una definición cercana podría definirse como “La Generación Distribuida es el proceso de producción (o generación) y distribución de energía eléctrica a pequeña o mediana escala, con una cercanía a los centros finales de consumo y con posibilidad de interactuar con las redes de interconexión eléctrica” [6]. En la Figura 1-8 se aprecia la diferencia entre la generación centralizada y la distribuida.



Figura 1-8 Generación centralizada y distribuida [7]

La generación distribuida ha resurgido a nivel mundial en el último tiempo como una alternativa de respuesta al calentamiento global, el agotamiento de los combustibles fósiles y la congestión de las redes eléctricas, ayudando así al medio ambiente puesto que la mayor parte de la generación es de energía renovable, por lo que reduciría las emisiones de CO_2 .

Este tipo de generación ayuda a la fiabilidad y calidad del sistema eléctrico, ya que son pequeñas fuentes de generación repartidas por el territorio implica que si alguna de estas falla no afecta de gran manera al sistema eléctrico.

Los vehículos eléctricos también son considerados como parte de la generación distribuida puesto que pueden actuar como fuentes, pero esto se verá con detenimiento más adelante en un ítem más detallado.

La generación distribuida en la red de distribución

La introducción de la generación distribuida presenta nuevas condiciones para la red como también problemáticas técnicas que deben ser consideradas las siguientes, son problemáticas más comunes que presenta generación distribuida.

- **Flujo de potencia:** Anteriormente los flujos eran unidireccionales, pero con la introducción de la GD sucede el fenómeno que algunas líneas tendrán que estar aptas para la bidireccionalidad, por lo que el sistema de protecciones debe estar reacondicionado, por otro lado, si de pronto existiera mayor generación que consumo en la red de distribución esta energía extra será transferida a través de las subestaciones a las líneas de AT, estos flujos inversos puede ocasionar problemas en los transformadores

debido al control automático que se hace a estos a través de la relación de transformación (tap) para regular la tensión en el lado de BT [8].

- **Variaciones en los niveles de tensión:** La GD tiende a elevar el nivel de tensión en la red, sobre todo si el generador se conecta a una red regulada, esto generara conflictos pues los niveles se deben mantener en base a la norma dictaminada. Una opción es operar la GD con un factor de potencia inductivo, consumiendo potencia reactiva, esto ayuda a que no se tienda a elevar la tensión, pero aumentaría las perdidas. Por otro lado, para disminuir perdidas se puede operar el generador con un factor de potencia capacitivo, entregando potencia reactiva a la red. El arranque de una GD genera saltos bruscos en los niveles de tensión, los que aparecen por las corrientes de arranques de los generadores cuando son energizados. También si un generador es desconectado bruscamente puede tener saltos abruptos en los niveles de tensión de la red de manera local, pudiendo generar problemas en transformadores [8].

1.1.8 Net billing

Es un esquema de utilidad general para el uso y pago del recurso en el cual un cliente que genera su propia energía eléctrica puede compensar los saldos de energía de manera instantánea o diferida, permitiendo a los consumidores la producción individual de energía para su propio consumo, compatibilizando su curva de producción con su curva de demanda.

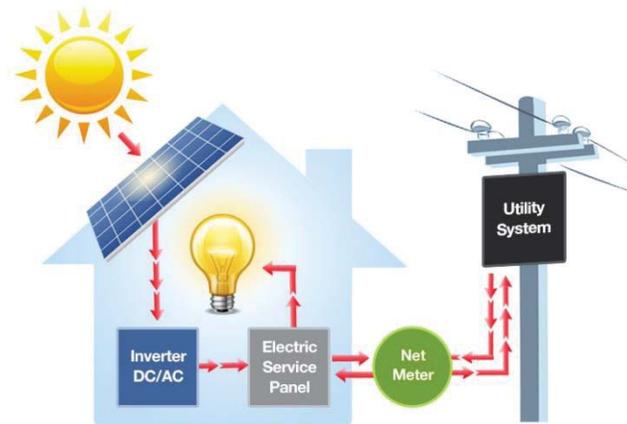


Figura 1-9 Esquema básico de Net billing [9]

Esto es usado por usuarios que tienen una pequeña instalación de generación, generalmente de energía renovable. Cuando la producción de energía supere al consumo del cliente, esta será inyectada al sistema, por lo cual a final de mes se debe hacer una sumatoria entre el consumo y la inyección del cliente, teniendo en cuenta un precio para el consumo y un precio para la inyección de energía, por lo que se requiere un medido bidireccional. Ver Figura 1-10.

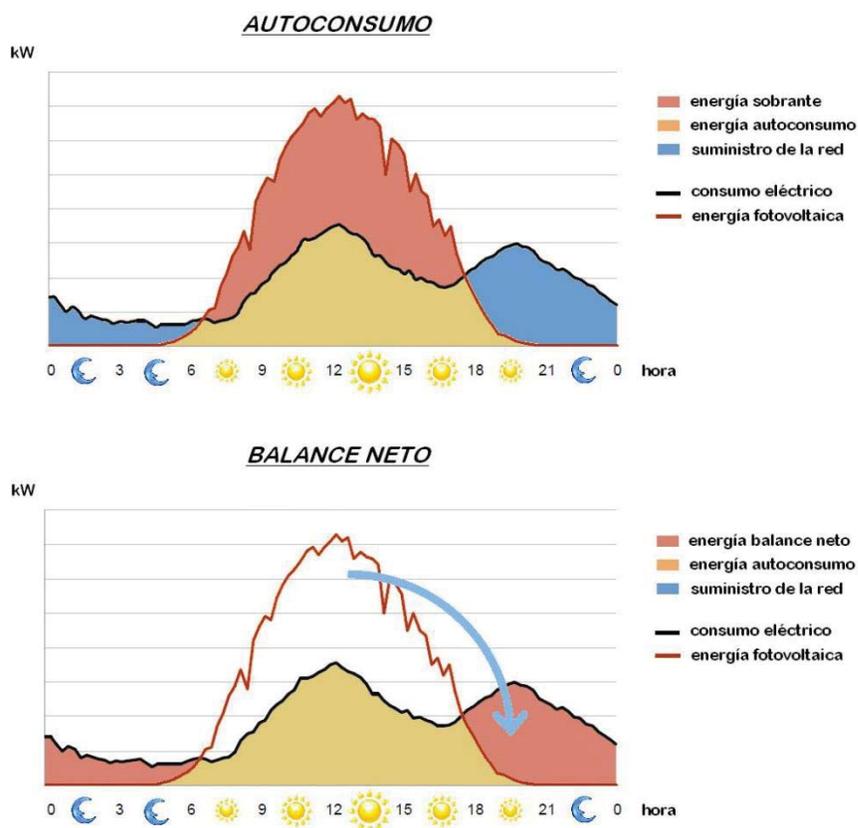


Figura 1-10 Balance neto [10]

En el año 2012 en nuestro país, se aprobó la ley 20.571, que regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales, con el fin de establecer un sistema de incentivo a los pequeños medios de generación distribuida a base de energías renovables no convencionales en un sistema conocido como balance neto (Net Metering), con esto el cliente puede compensar su boleta de energía ya que podría entregar energía excedente al sistemas en momentos en el cual su consumo es menor a lo generado, con esto se obtendrá descuentos en su cuenta [11].

1.1.9 Smart Grid (Red Inteligente)

El concepto de Smart Grid se refiere a una forma de manejo y gestión inteligente de la electricidad utilizando tecnologías de informática y comunicación en las redes para optimizar el uso de la energía. En su totalidad el concepto de Smart Grid engloba una gran cantidad de interconexiones entre los distintos elementos del proceso de generación, transmisión y distribución de la electricidad, así como en Figura 1-11.

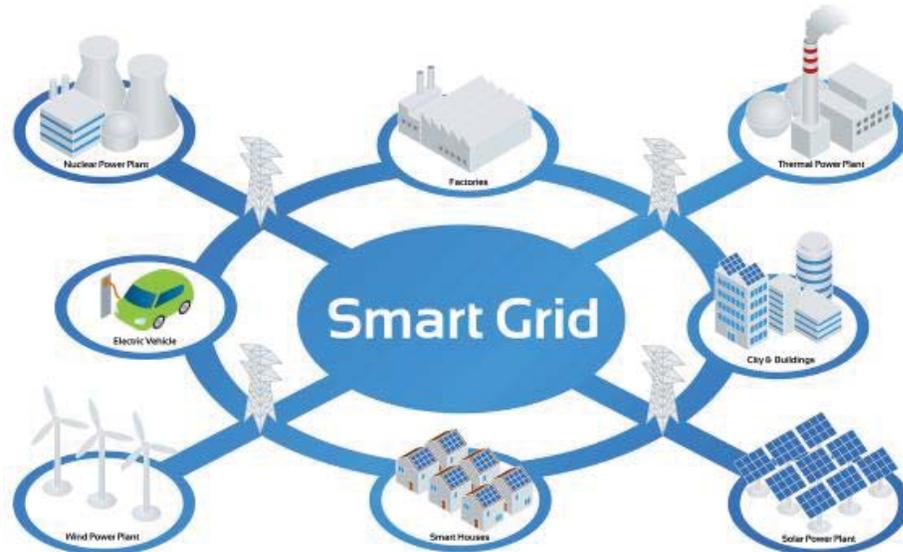


Figura 1-11 Ilustración de una Smart Grid [12]

Está fuertemente ligada con la generación de energías renovables, puesto que estas producen energía no de una manera constante, por lo cual es muy ventajoso tener un control de la energía que está produciendo cada generador y poder manejarla de la mejor manera posible.

Es una red de energía que integra y utiliza los parámetros de todos los participantes de ella, es decir, generación, transmisión, distribución y consumos, y en función de estos, mediante procesos de control avanzado lograr un suministro eficiente, sustentable y altamente seguro.

También es muy importante para el manejo del "Net metering" ya que, con este esquema los clientes que generen su propia energía pueden utilizarla y además inyectarla a la red a un determinado precio, aumentando el dinamismo del sistema y disminuyendo los precios de la electricidad. Este concepto en sí, se basa en la medición inteligente de la energía consumida y la generada en el hogar, y en el manejo de esta última de modo de venderla al sistema en los momentos que se tenga en exceso, para así disminuir los gastos en los periodos del día en que sea necesario comprar energía al sistema, por lo tanto, teniendo un control de la red ayuda a disminuir precios al cliente, y aumenta la confiabilidad del sistema.

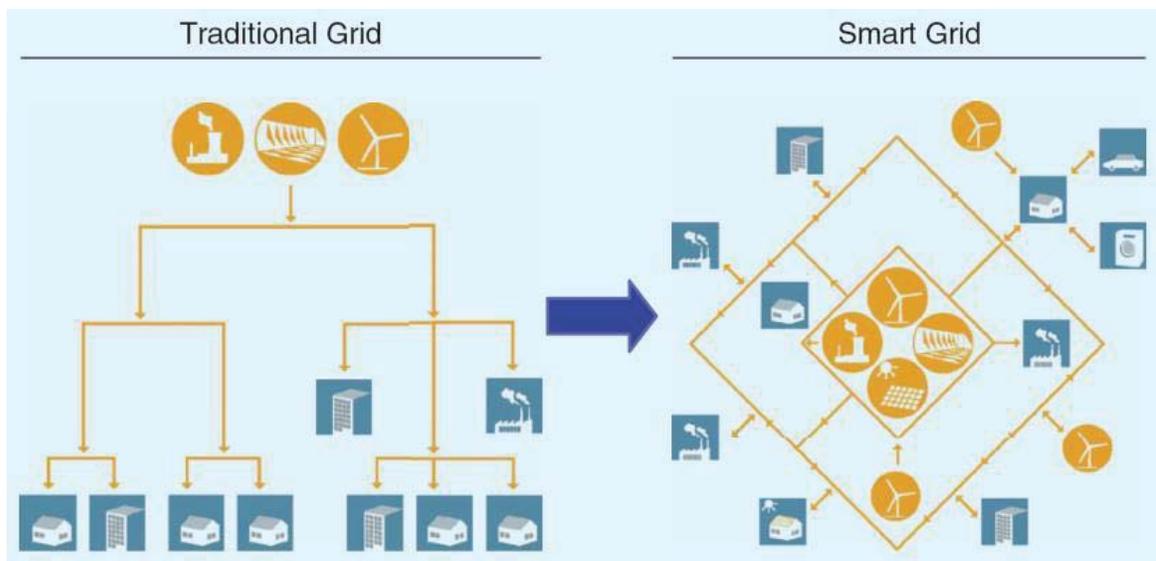


Figura 1-12 Red tradicional y Smart Grid [13]

Aquí también entra lo que se llama V2G, que será tratado más adelante, cuando se detalle sobre los autos eléctricos y su efecto en la red, así entender el concepto de manera más clara.

1.2 Vehículos Eléctricos

Los vehículos eléctricos no son una invención de este siglo, más bien datan del siglo XIX, fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron. Pese a que tuvieron una buena introducción al mercado norteamericano (alrededor del 38-40%), se quedaron en segundo plano y hasta casi en el olvido para la ciudadanía, todo esto por el descubrimiento de la partida eléctrica del motor de combustión, a la baja del combustible por los grandes yacimientos petrolíferos en EEUU, el establecimiento de gasolineras y a la producción masiva de estos automóviles [14].

Una de las grandes desventajas que presentaban los vehículos eléctricos era su batería, que hace años debían ser construidas con plomo, siendo este uno de los metales más pesados de la tabla periódica, por lo que la tarea más sencilla como cambiar la rueda del vehículo no podría realizarse con una gata hidráulica normal, además el gran tamaño no lo hacía práctico para la época. Pero gracias a la tecnología de las baterías de Ion-Litio hicieron posible disminuir el tamaño y peso, como también aumentar su autonomía, llegando a convertirse en un competidor serio para la industria automovilística.

Junto con la problemática de la emanación de CO₂ y los compromisos con el medio ambiente, es que el vehículo eléctrico toma mayor fuerza tanto en la industria [15], como en la ciudadanía (Figura 1-13), todo esto impulsado con las nuevas tecnologías que cada vez logran mayor autonomía y gracias a la economía de escala que ayuda a abaratar costos, volviéndolo más asequible. Por otro lado, algunos países ya están tomando medidas para disminuir el uso de vehículos a combustión (Figura 1-14), lo que lleva a que el automóvil eléctrico se vea como el futuro de la segunda mitad del siglo XIX.

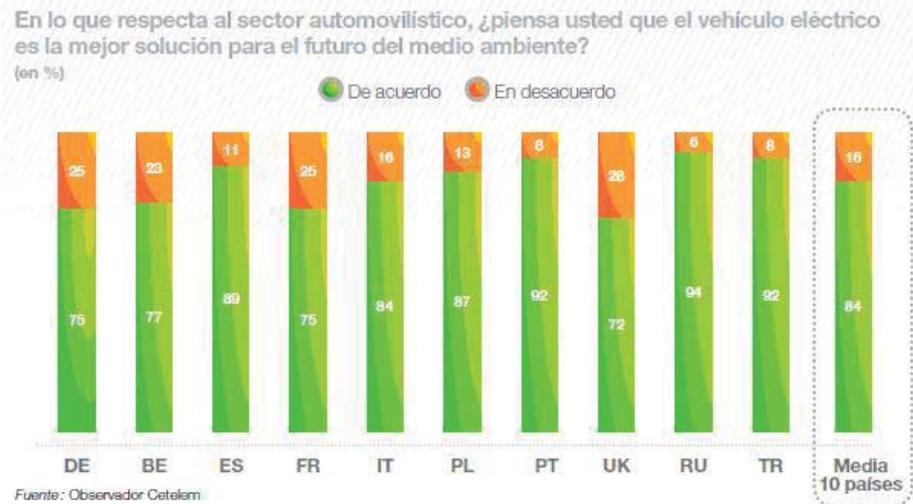


Figura 1-13 Encuesta ciudadana en diversos países [16]

1.2.1 Tipos de vehículos eléctricos

Vehículo eléctrico híbrido (VEH)

Es un vehículo de propulsión alternativa combinando un motor eléctrico y un motor de combustión. El mayor desafío de los diseños de los VEH es administrar dos fuentes de energía, provenientes del combustible o de la electricidad almacenada en sus baterías, dependiendo del ciclo de conducción. En estos vehículos las baterías están en todo momento interviniendo en ciclos de carga y descarga de acuerdo a los requerimientos de conducción [17]. Existen diversas configuraciones del sistema de propulsión como se puede ver a continuación.

- **Paralelo:** En esta configuración el motor eléctrico y el motor de combustión se instalan de manera que puedan impulsar el vehículo ya sea individualmente o en su conjunto. El motor eléctrico ofrece su potencia en la salida y en la aceleración, cuando el motor térmico consume más. El sistema es tan simple que puede ser implementado en vehículos ya existente sin la necesidad de diseños específicos. Uno de los vehículos insignias de este sistema es el Honda Insight.
- **Serie:** El motor de combustión convencional no tiene conexión mecánica con las ruedas, sólo se usa para generar electricidad. Es decir, su cometido es generar electricidad para que el motor eléctrico mueva al vehículo. Cuando la batería se llena, el motor convencional se desconecta temporalmente. El Chevrolet Volt es un claro ejemplo de este tipo de configuración.
- **Combinado:** En este tipo de vehículo 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.

La Figura 1-15 es un esquema de la configuración de cada una de las conexiones.

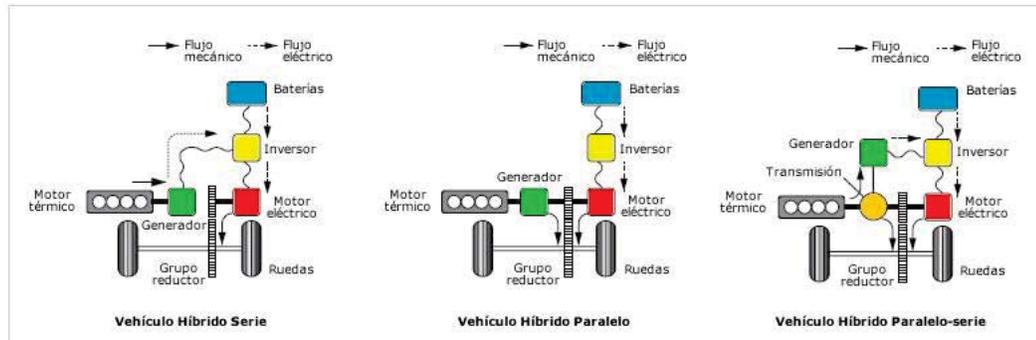


Figura 1-14 Esquema de los tres tipos de vehículos híbridos [18]

Vehículo Eléctrico de Batería (VEB)

Con el desarrollo de la batería recargable Plomo-Acido el mundo vio el nacimiento del vehículo eléctrico como una alternativa posible para el desplazamiento humano, pero lamentablemente la baja capacidad de la batería, llevaba a una limitada autonomía y junto al creciente aumento en la producción y evolución del motor a combustión es que este tipo de vehículo también quedo en el olvido [19].

El funcionamiento del motor es bastante sencillo, la energía almacenada en la batería pasa directamente al motor y este transmite el torque necesario a las ruedas para mover el vehículo [20]. Todo esto esta esquematizado en la Figura 1-16

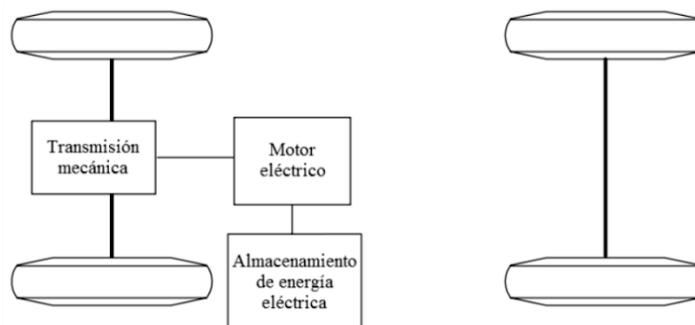


Figura 1-15 Esquema básico de un VEB [21]

Una de las grandes desventajas de este tipo de vehículo, es que, al ser puramente eléctrico, requiere una batería más grande por lo cual el precio se torna mucho más caro, además su autonomía es muy inferior al de un motor de combustión interna, pero si lo suficiente para el uso urbano (City car). Entre los más vendidos los modelos BMW i3, Nissan Leaf, y Tesla Modelo S.

Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV)

Es un tipo de vehículo híbrido eléctrico, con la salvedad que su batería puede ser cargada mediante una fuente externa de energía eléctrica. Este tipo de tecnología reúne las ventajas de los vehículos de combustión interna y de los VE en general. Es esta configuración la más atractiva para el mercado actual al combinar lo mejor de los dos mundos [22], con ventajas claras:

- Obtienen su energía de propulsión de una batería
- Pueden ser recargado de una fuente externa de electricidad
- Es un vehículo liviano
- Al utilizarlo de gran manera como motor eléctrico, el consumo se reduce a un cuarto que el de un motor de combustión interna tradicional.
- Reducción de la emanación de dióxido de carbono
- No hay temor de agotar la batería, puesto que puede funcionar el motor de combustión si la batería se llegase a agotar.

Principales desventajas:

- Al igual que todos los vehículos anteriores existen pocos puntos donde recargar, puesto que en edificios no sería posible que una persona conecte su vehículo en su hogar sin tener que usar la electricidad de la toma de corriente de lugares comunes, que genera cierto tipo de conflicto.
- La batería es muy cara por lo cual su precio también es algo elevado y poco asequible.

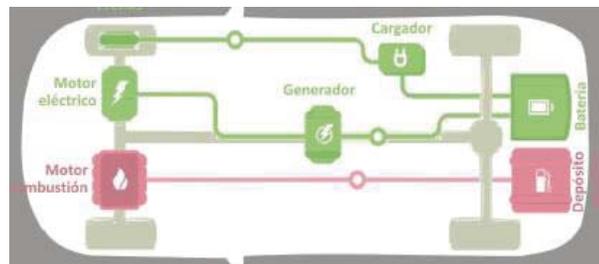


Figura 1-16 Esquema de PHEV [23]

Vehículo eléctrico de combustible

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 [24]. Una de las grandes empresas que desarrolla estos autos es Daimler Chrysler que utiliza un motor basado en hidrogeno líquido.

La gran problemática con estos vehículos es la eficiencia, puesto que requiere consumir energía para lograr la separación del hidrogeno de compuesto que lo posee, como agua, sumado también la compresión y licuefacción, como también la perdida de energía para convertirlo en electricidad nos lleva a tener solo el 25% de uso práctico.

Este vehículo funciona de manera similar a un vehículo eléctrico de batería tradicional, pero la fuente que sería la celda de combustible se compone de un electrolito, un cátodo y un ánodo, por lo que en vez de cargarse conectándose a al corriente, este se alimenta del hidrogeno que pueda tener presente. Figura 1-18 esquematiza mejor dicho vehículo.

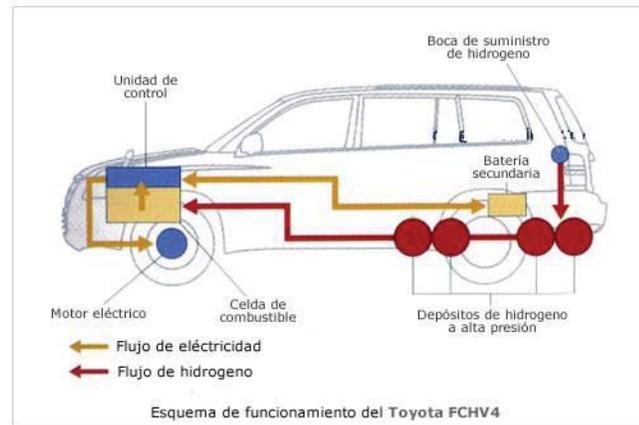


Figura 1-17 Diagrama de VEC [25]

1.2.2 Descripción técnica de un vehículo eléctrico

En comparación con un vehículo tradicional este no dista mucho, lo único que cambia es el sistema de propulsión, mientras que el resto de los componentes mecánicos y demás elementos pertinentes se mantienen intactos.

En [26] se explica el funcionamiento de un vehículo eléctrico a batería, que es un auto eléctrico puro, pudiendo quedar más explícito todo a como utiliza la energía de la batería y se transfiere a través de del sistema mecánico.

1.2.3 Principales componentes de un vehículo eléctrico.

Cargador

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.

Éste está compuesto básicamente por un rectificador encargado de transformar la energía eléctrica proveniente de la fuente de alimentación externa (de forma general, la red eléctrica) y un transformador para terminar de acondicionarla de modo que la batería sea capaz de almacenarla. En resumen, el convertor transforma la tensión de red sinusoidal (AC) en tensión continua (DC), de modo que la batería se cargue correctamente.

Existen diversos modos de recargas, algunas más rápidas que otras, todo depende del tipo de corriente, obteniendo distintos niveles de amperaje y por ende de potencia eléctrica.

Endesa España, en su página web, clasifica los tipos de carga según su nivel de potencia y el tipo de corriente (alterna o continua):

- **Recarga convencional (16 Amperios):** La recarga convencional aplica a niveles de potencia que implican una carga con una duración de unas 8 horas aproximadamente. La carga convencional monofásica emplea la intensidad y voltaje eléctricos del mismo nivel que la propia vivienda. Esto implica que la potencia eléctrica que puede entregar el punto para este tipo de cargas es de aproximadamente 3,7 kW [27].
- **Recarga Semi-Rápida (32 Amperios):** La recarga semi-rápida aplica niveles de potencia que implican una carga con una duración de unas 4 horas y una potencia de 7,3 kW aproximadamente [27].
- **Recarga Rápida:** El tipo de carga más adecuada es la recarga rápida, que 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 del orden 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 [27].

Baterías

Actualmente las baterías más usadas son las de Ion-Litio y las de níquel e hidruro metálico (NiMH) como se puede ver en la Tabla 1-1, lo cual le da la autonomía pertinente a cada vehículo, y este es el factor más importante a la hora de hablar de precios, pues es el elemento más caro del vehículo. Las baterías almacenan la electricidad mediante elementos electroquímicos, un proceso con pérdidas mínimas que permiten un rendimiento próximo al 100%. La vida de una batería es finita, por lo cual está definida por los ciclos de carga y descarga completos, a esto se le llama ciclo de vida [28].

A continuación, en la Tabla 1-1 se muestra el tipo de batería usado en cada modelo de vehículo eléctrico:

Tabla 1-1 Modelos de vehículos eléctricos y sus baterías [27]

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

Compañía	Modelo	Tecnología de Batería
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

Un punto importante a considerar es que las baterías Ion-Litio almacenan mucha más energía que las NiMH, pero terminan siendo más costosas (alrededor de \$1000/kWh) y menos seguras que las segundas.

En la Tabla se resumen las principales especificaciones técnicas de las baterías más utilizadas en los vehículos eléctricos

Tabla 1-2 Baterías eléctricas y características [28]

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%

Conversor

El converso 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 [29].

Inversor

Este se sitúa entre la batería de alto voltaje y el motor eléctrico, y su función es la de adaptar la energía proveniente de la batería a las necesidades del motor eléctrico. Dada las grandes cantidades de energía implicadas en el proceso, normalmente se utilizan motores síncronos de imanes permanentes alimentados por corriente alterna trifásica. Por lo tanto, el inversor es el encargado de convertir la corriente continua en corriente trifásica alterna [29].

Motor

Dentro de los vehículos eléctricos existen dos posibilidades, que sea de corriente continua o de alterna, la diferencia radica en que el primero se alimenta directamente de la batería del vehículo, y el segundo necesita una transformación de la corriente a través de un inversor de potencia.

Los motores pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- **Motor con escobillas:** Básicamente son motores DC, el sistema de control de este motor es uno de los más simples para la industria de los vehículos eléctricos, además uno de los más conocidos en la industria, pero los grandes inconvenientes son que, en primer lugar, para altas velocidades son poco aptos y resultan menos confiables, otro punto importante es que debido a la configuración este requiere mantenimiento más periódica que otros motores. La Figura 1-19 muestra esquema de este tipo de motor [30].

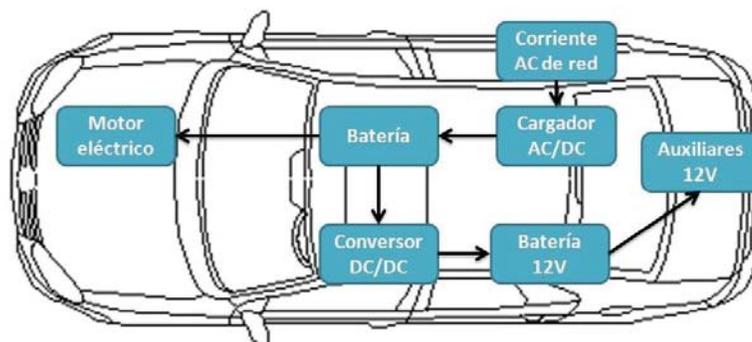


Figura 1-18 Vehículo eléctrico con motor de corriente continua [31]

- **Motor sin escobillas:** En el último tiempo han ganado gran popularidad por sobre los motores DC, puesto que al no tener escobillas mejora el rendimiento y la eficiencia, además de presentar mayor densidad de energía a menor costo operativo. Requiere mucho menos mantenimiento que los que poseen escobillas por lo que últimamente están siendo cada vez más requeridos en la industria automovilística eléctrica. Dentro de los más usados se tiene el motor de inducción, ya que posee un bajo costo, una alta confiabilidad y escasa mantención. Pero lamentablemente el control que requiere este

tipo de motor es muy complejo, además de sufrir bajas en su eficiencia para cargas ligeras y un rango limitado a potencia constante [30].

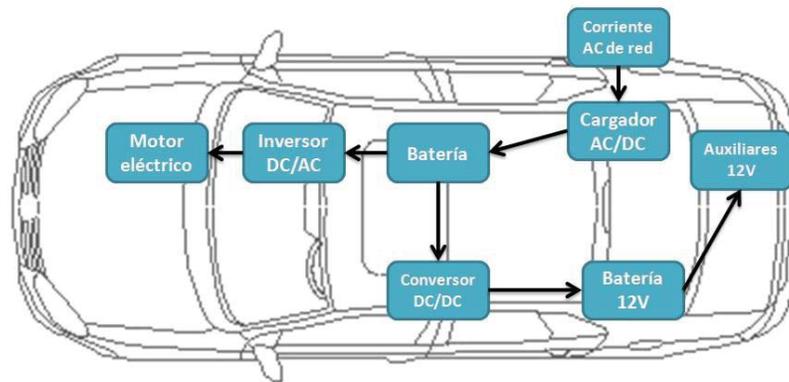


Figura 1-19 Vehículo eléctrico con motor de corriente alterna [31]

Convertidor 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 DC/AC, DC/DC esto implica un cambio en la magnitud, AC/DC o AC/AC esto corresponde un cambio 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 1-21 se muestra un esquema básico de la red interna de un vehículo eléctrico de baterías.

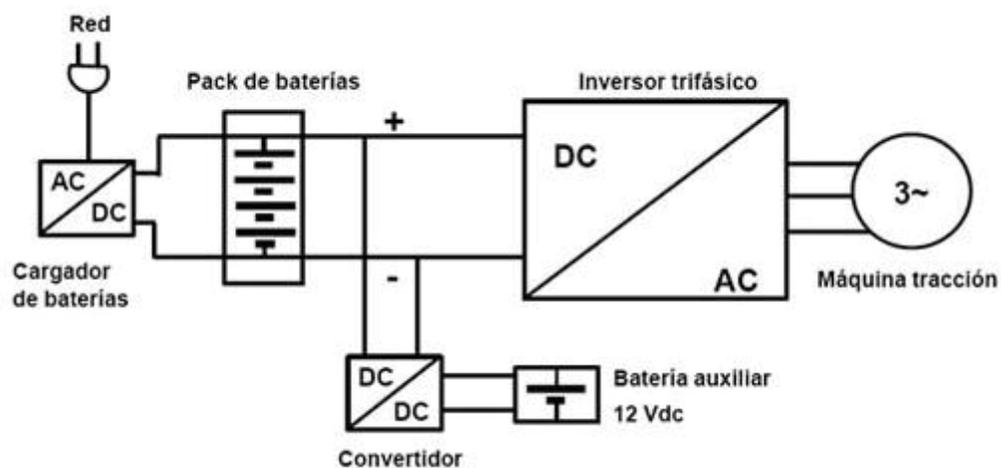


Figura 1-20 Esquema básico de un vehículo eléctrico [32]

En la propulsión de vehículos eléctricos, el motor suele energizarse con fuentes DC con una tensión aproximadamente constante por lo cual es necesario introducir un convertidor DC/AC de frecuencia y tensión variables para alimentar el 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 [32].

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 para el control de torque y como mínimo, se requiere un bus de retroalimentación de corriente DC para proteger la unidad y el motor de sobrecorriente. 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) [32].

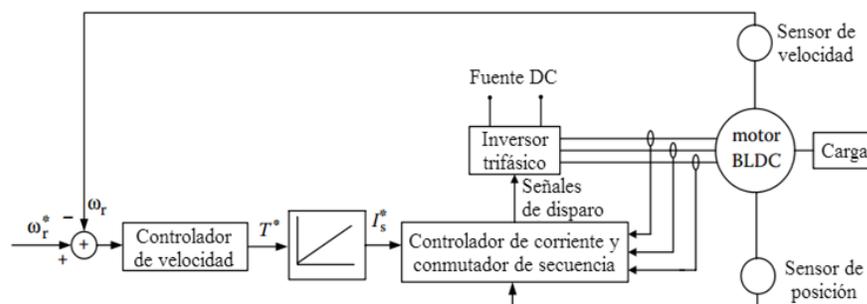


Figura 1-21 Diagrama en bloque de control de velocidad en un motor BLDC [32]

Freno regenerativo

Una de las grandes particularidades del vehículo eléctrico es la capacidad de recuperar energía al frenar, a esto se le llama freno regenerativo. 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.

1.2.4 Mercado vehículos eléctricos en Chile

Con el paso de los últimos años el precio de los vehículos eléctricos es paulatinamente más barato llegando a haber en Chile alrededor de 150 vehículos. Según la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC), las ventas de vehículos sustentables se cuadruplicaron en 2017 (468%). Los vehículos Ioniq de Hyundai, LEAF de Nissan, i3 de BMW, Fluence ZE de Renault y Berlingo Electric de Citroën, fueron los modelos más demandados por los chilenos en el período [33].

Hyundai Ioniq

Se alza como el modelo eléctrico más comercializado durante el año pasado. Este posee un motor de 120 ps, el que le entrega un torque máximo de 295 Nm aplicados a la rueda. Además, el vehículo incluye una batería de polímero de iones de litio de alta capacidad, la que permite una reserva de energía de 28 kWh y una autonomía de 280 kilómetros. Un aspecto que llama la atención del Ioniq, es su coeficiente de resistencia de 0,24. Este le permite un rendimiento suave y eficiente. El modelo se puede cargar por medio de una toma de corriente doméstica. **Precio: \$24.490.000** [33].



Figura 1-22 Hyundai Ioniq [33]

Nissan LEAF

La empresa Nissan comercializó 26 unidades en Chile. En el resto del mundo, el modelo acumula 300 mil facturaciones desde que fue lanzado en 2010. El auto posee un motor de 80 kW, equivalentes a 110 caballos de fuerza. Esto le permite alcanzar un torque de 284 Nm y una autonomía de 250 km. El LEAF alcanza el 0 a 100 Km/h en 10 segundos y una velocidad máxima de 150 Km/h. **Precio: \$24.000.000** [33].



Figura 1-23 Nissan Leaf [33]

BMW i3

El i3 de BMW comercializó 17 unidades en 2017, lo que lo posiciona en el tercer lugar de los más vendidos en Chile. Este modelo está disponible en dos versiones. Por un lado, se encuentra la 60 Ah, que cuenta con una autonomía constante de 130 km. Y, por otro lado, el i3 94 Ah, automóvil que puede desplazarse hasta por 200 km sin necesidad de carga. Ambos tienen un motor de 125 kW, equivalentes a 170 caballos de fuerza. Este le permite al auto cero emisiones de BMW acelerar de 0 a 100 km/h en 7,3 segundos. **Precio: \$ 39.990.000** [33].



Figura 1-24 BMW i3 [33]

Renault Fluence ZE

Este modelo se encuentra en el cuarto lugar con 13 comercializaciones en 2017. El modelo posee un motor eléctrico que entrega una potencia equivalente a 125 caballos de fuerza y un torque aplicado a la rueda de 226 Nm. Además, incluye una transmisión automática, suspensión McPherson y dirección asistida. **Precio: \$13.600.000** [33].



Figura 1-25 Renault Fluence ZE [33]

Citroën E-Berlingo

Con 7 unidades comercializadas durante el año pasado, E-Berlingo se configura como el quinto vehículo eléctrico más vendido en 2017 y el primer comercial de este tipo facturado en Chile. El modelo cuenta con un motor de 49 KW, equivalente a 67 caballos de fuerza. Esto le permite alcanzar una autonomía de 170 km y un torque de 200 Nm aplicados a la rueda. **Precio: \$27.358.100** [33].



Figura 1-26 Citroën E-Berlingo [33]

En la Tabla 1-3 se puede apreciar el valor de mercado de otros vehículos eléctricos que no forman parte de los 5 más vendidos, junto su respectivo rendimiento energético [33].

Tabla 1-3 Precio y rendimiento VE en Chile [33]

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
Mitsubishi Outlander PHEV	Hibrido	4,3 [km/kWh]	\$24.990.000
Renault ZOE ZE HatchBack	Eléctrico	6,8 [km/kWh]	\$24.990.000
Mitsubishi I-MIEV HatchBack	Eléctrico	5,3 [km/kWh]	\$30.500.000

1.3 Impacto de los vehículos eléctricos en la red de distribución

Al conectarse un vehículo eléctrico a la red es otra carga más en el sistema, para el caso de un solo vehículo eléctrico no es mucho el problema que puede generar, pero si de pronto se tuviera una cantidad considerable de vehículos eléctricos puede ocasionar un colapso la red de distribución, además estas cargas son dinámicas puesto que pueden ser cargados en distintos lugares donde exista la posibilidad de conectar el vehículo para cargar. Por todo esto es bueno estudiar el comportamiento de la curva de demanda a medida que va a creciendo el parque vehicular eléctrico.

Estos efectos que tendrían en la red de distribución se agrupan en relación a 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.

1.3.1 Carga de los vehículos eléctricos enchufables

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.

Por esto es importante conocer la capacidad de las baterías de los vehículos en la Tabla 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 1-4 Tiempo de carga por vehículo eléctrico [35]

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

Con estos datos se puede llegar a una carga estándar en los Estados Unidos [35], 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 1-28 un perfil de carga con una tasa constante del vehículo eléctrico, lo que hace que se cargue en menos tiempo.

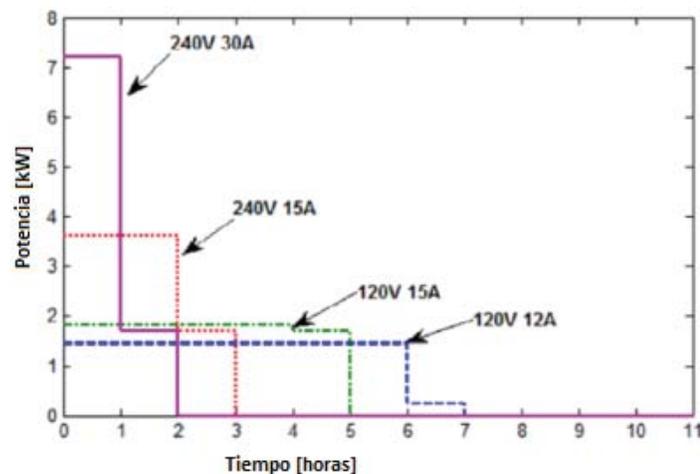


Figura 1-27 Perfil de carga típica de un vehículo eléctrico [35]

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 esté habilitada 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. El problema de aleatoriedad de la carga por parte de los usuarios hace que sea mucho más difícil para la empresa distribuidora diseñar nuevas conexiones o mejorar los sistemas ya existentes

Además de no haber 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 estudiando 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.

1.3.2 Estrategias de carga

Bueno como se viene mencionando con anterioridad, la gran problemática es como la red abordará y controlará el tema de la carga de estos vehículos, con esta nueva carga la demanda será muy variada a lo que la conocemos ahora, y con esta aleatoriedad es necesario ver cómo controlar el consumo de la demanda para que la curva no tenga comportamiento no deseados para la red. Se debe buscar una forma de integración de ésta de manera inteligente, para disminuir problemas a futuros.

En la siguiente Figura 1-29 diagrama se puede observar los posibles casos de carga en la red.

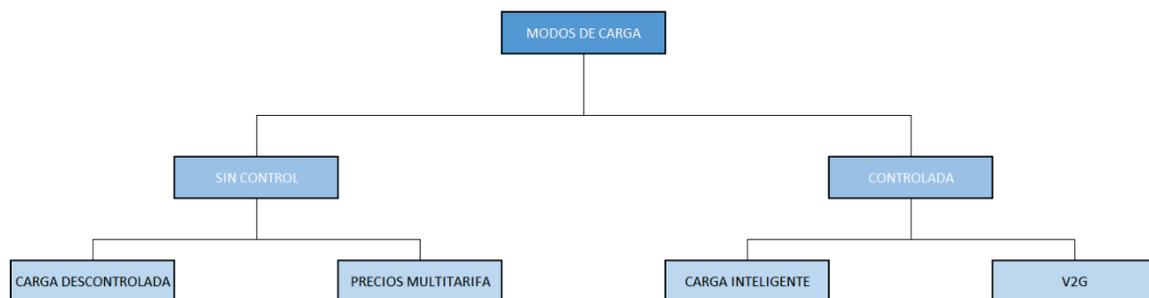


Figura 1-28 Diagrama de tipos de carga [ELABORACION PROPIA]

Cada una de esta será explicada a continuación.

Carga descontrolada

Esto no es considerado una estrategia de carga, más bien es solo dejar al cliente decidir libremente sin ningún tipo de restricción o tarifa diferida el consumo de energía para su vehículo eléctrico. Dentro de los supuesto más considerados es que después que cada persona llegue de su jornada laboral, conecte su vehículo para cargarlo durante toda la noche. Para un considerable número de vehículos como vemos en la Figura 1-30 termina por desplazar la gráfica hacia las 21 horas llegando así a peak muy altos, que pueden dañar elementos del sistema de distribución.

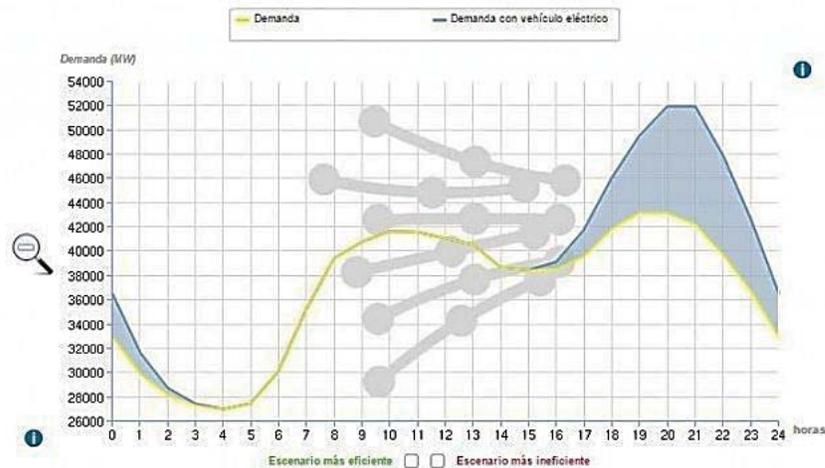


Figura 1-29 Curva de demanda para carga descontrolada [36]

Las desventajas de no tener control sobre la carga son las siguientes [36]:

- Incremento de la demanda pico. Algo que puede llevar a la sobrecarga de líneas y transformadores, al realizarse la recarga en horas punta.
- Incremento de las emisiones de CO₂ asociadas a la generación. Las energías renovables siempre entran al mercado eléctrico en el caso de estar disponibles. Por ese motivo, puede pasar que la potencia extra necesaria sea abastecida principalmente por combustibles fósiles. Esto también podría llevar a un incremento en el coste de la electricidad, ya que son tecnologías que ofertan a precios más caros en el mercado eléctrico.
- Necesidad de reforzar la red. Para evitar la sobrecarga en las líneas y transformadores, lo recomendable sería reforzar la red. De lo contrario, la recarga masiva de vehículos eléctricos será imposible en algunos lugares.

Estrategia de carga multitarifas

Esta carga se basa en los precios tarifarios de la energía, por lo que sigue siendo 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.

Estrategias de carga inteligente

La idea de este tipo de carga es programar para horarios adecuados la carga del vehículo, existen ya sistemas de carga de algunas marcas como RENAULT que posee esta característica, se podría programar para que los vehículos comiencen a cargar entre ciertos horarios donde existe menos

demanda, modificando la curva de manera de no tener grandes peak de potencia, y aplanamiento de la curva de demanda. Este tipo de carga es parte de las consideradas como controladas. En la Figura 1-31 se aprecia el efecto de este tipo de carga.

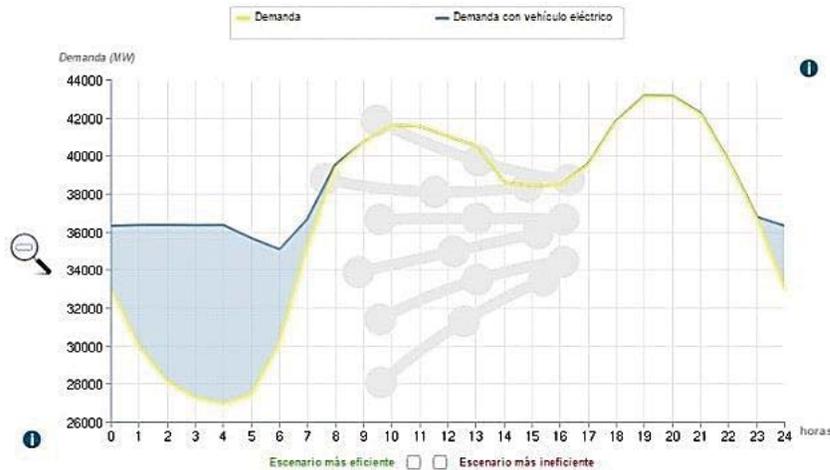


Figura 1-30 Curva de demanda para carga inteligente [36]

Ventajas de este tipo de cargas serían las siguientes [36]:

- 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.

Estrategia V2G

Del inglés vehicle-to-grid, esta estrategia consiste en una carga bidireccional, esto quiere decir que le vehículo puede funcionar tanto como carga y fuente, pudiendo consumir o entregar energía a la red. 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 [36]. 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. Dentro de los cuales se tiene lo siguiente:

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.

El agregador predice la demanda diaria en base a 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, 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. Para efectuar todo eso, todos los puntos establecidos enviaran datos a al agregador.

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.

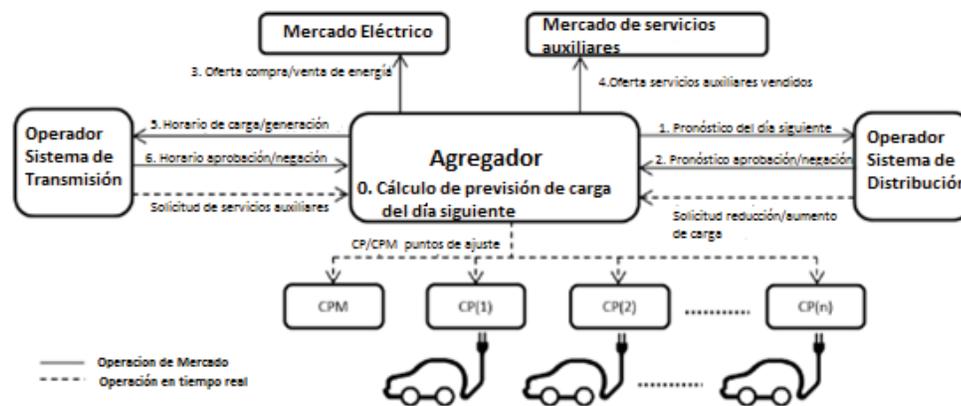


Figura 1-31 Arquitectura de control centralizada [37]

Las principales desventajas de este control son:

- Es necesario disponer de un sistema de copia de seguridad en caso de falla del sistema, por lo que requiere una infraestructura de almacenamiento de datos en caso de emergencia.
- Dado que la cantidad de datos ira aumentando a medida que la ciudadanía compre más vehículos eléctricos lo que producirá dificultades para el manejo de estos, ya que

transferir y procesar datos llevara a tener tecnología de gran capacidad para lograr este cometido, además aumenta el riesgo de falla en el sistema de comunicación.

- El usuario pierde privacidad puesto que el agregador conocería todos los hábitos de transporte por vehículo, por ende, por persona o familia.

Arquitectura de control descentralizado

Este tipo 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.

Para lograr la inteligencia de los vehículos eléctricos, se necesita un hardware dedicado para procesar los datos. Bajo 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.

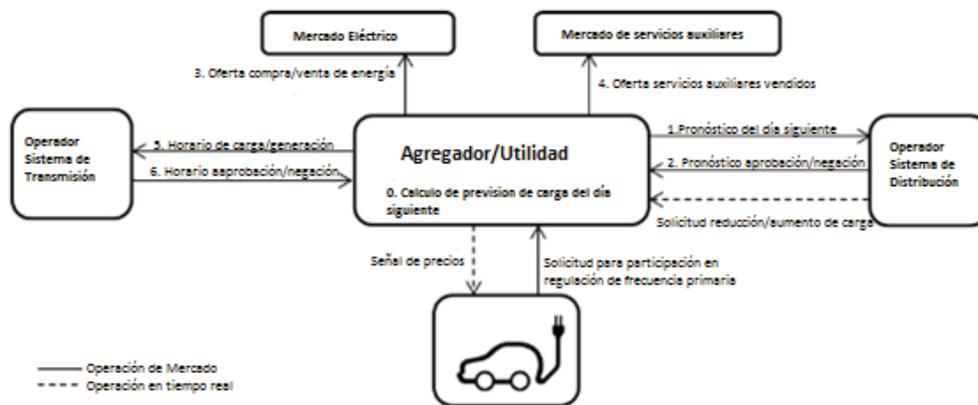


Figura 1-32 Arquitectura de control descentralizada [37]

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 1-34

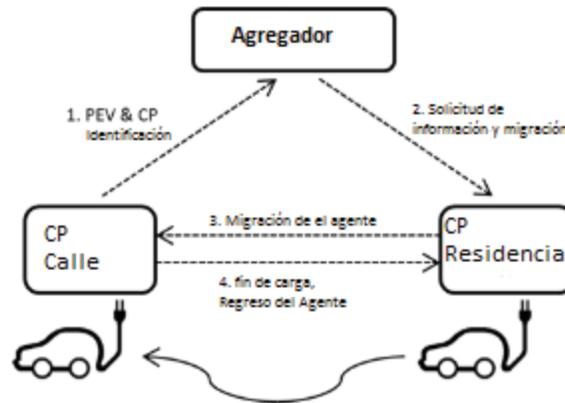


Figura 1-33 Agente móvil [37]

Este puede controlar la carga/descarga de las baterías de los vehículos a nivel local, al estar cargado y salir del punto de carga la batería comenzará a descargarse según la distancia recorrida, el tráfico y comportamiento del conductor, luego al llegar a casa 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.

Desventajas:

- Aumenta el valor de los vehículos eléctricos
- El usuario pierde privacidad al saber el comportamiento del vehículo.
- Se requiere infraestructura extra para ejecutarse

2 Emisión de gases de efecto invernadero

Con la problemática medioambiental actual, se tiene una gran preocupación por evitar las emisiones de CO₂ (Dióxido de Carbono), por lo cual es importante estudiar si emana o no desechos al medio ambiente cualquier proceso de transformación de energía, si no que por ejemplo en el caso del vehículo eléctrico ver no solo si al movilizarse este contamina al medioambiente si no también estudiar el proceso de fabricación del vehículo y también la procedencia de la energía que ocupa este para desplazarse. Teniendo en cuenta lo anterior es posible estudiar el real impacto del vehículo eléctrico en la actualidad.

2.1 Huella de carbono

La huella de carbono es una de las formas más simples que existen de medir el impacto o la marca que deja una persona sobre el planeta en su vida cotidiana. Es un recuento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), que son liberadas a la atmósfera debido a nuestras actividades cotidianas o a la comercialización de un producto. Por lo tanto, la huella de carbono es la medida del impacto que provocan las actividades del ser humano en el medio ambiente y se determina según la cantidad de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) producidos, medidos en unidades de dióxido de carbono equivalente. [39]

Este análisis abarca todas las actividades del ciclo de vida de un producto, desde la obtención de las materias primas y energías, pasando por la fabricación, hasta el uso cotidiano de este.

La huella de carbono se expresa en unidades de carbono equivalente (CO₂eq). Se utiliza esta unidad, pues la Huella de Carbono va más allá de la medición única del CO₂ emitido, ya que tienen en cuenta todos los GEI que contribuyen en el calentamiento global para después convertir los resultados individuales de cada gas a equivalentes de CO₂. Por otro lado, existe una medición especial para vehículos, lo cual considera contaminación a kilómetros recorridos, entendiéndose así la unidad [g/km] donde los gramos son de CO₂ equivalente.

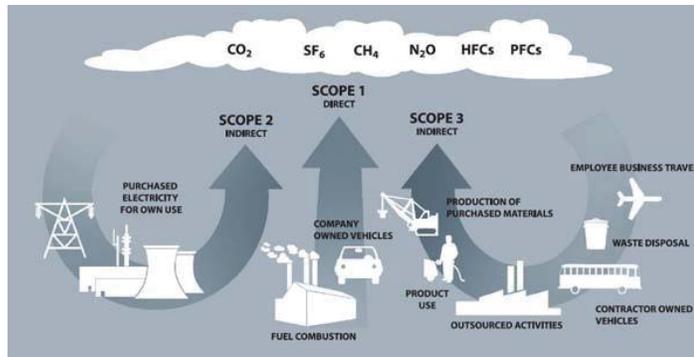


Figura 2-1 Ejemplo de fuentes de emanación de gases invernaderos [40]

2.2 Fabricación del vehículo eléctrico

Uno de los pilares importante de la huella de carbono como se mencionó anteriormente es la fabricación del producto, respecto al vehículo eléctrico tenemos las piezas con las que se compone, por ejemplo, el motor, la batería, la carrocería, entre otras partes. Por lo cual lo importante es ver el impacto de esta y compararlo con el proceso de fabricación de un vehículo a combustión convencional.

Respecto a la fabricación del tema se ha discutido mucho en lo que respecta a los estudios por ejemplo hasta hace un tiempo existió un estudio respecto a que el vehículo eléctrico contamina mucho más que un vehículo al recorrer la ciudad debido a que su peso es 24% mayor que el del vehículo eléctrico, con lo cual implica un desgaste mayor de neumático y de asfalto, produciendo indirectamente la producción de CO₂ equivalente [41]. Este estudio fue desechado por la Universidad de Edimburgo debido al conflicto de intereses que tenía el autor con una empresa dedicada a la fabricación de piezas de vehículos a combustión [42].

El vehículo eléctrico no contamina cuando está en funcionamiento, no emite GEI a la atmosfera cuando está en uso, pero sí durante el proceso de fabricación. Para este tipo de resolución de dudas se necesita tener algún punto de comparación entre uno y otro, según fuentes de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (Anfac), «en principio, a excepción del motor, un coche convencional y su mismo modelo en eléctrico tienen los mismos componentes y el mismo diseño, por lo que su interior y su carrocería es exacta y su producción contamina lo mismo» [43]. Por otro lado, una empresa que puede ayudar un poco con esta duda es Nissan, esta fábrica el modelo de furgoneta eNV200, que es la gemela del modelo NV200, al consultar a la empresa por la diferencia entre ambas y la respuesta es «no hay ningún dato que indique que la producción de un vehículo contamine más que otro, se utilizan los mismos disolventes para la pintura, las mismas materias primas y los mismos textiles». Por lo que asume que para la fabricación de estos la contaminación es la misma [43].

Entonces solo nos queda analizar el punto más importante de un vehículo eléctrico, su batería. Esta es la razón por la cual es contaminante el vehículo eléctrico, puesto que para la obtención de Litio para sus baterías resulta un proceso muy contaminante además si consideramos la energía

que requiere la extracción, si sumamos el gran tamaño de estas baterías en proporción al auto como se muestra en la Figura 2-2, termina siendo un dato no menor.

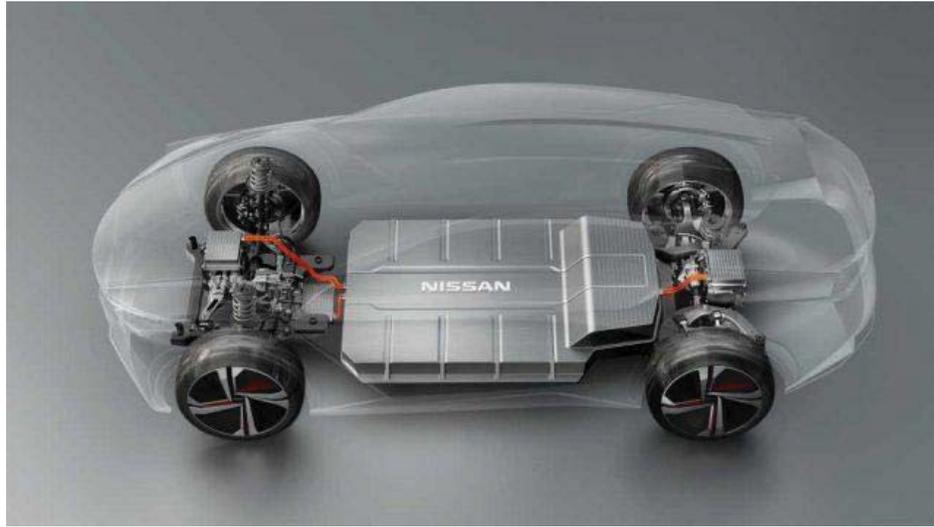


Figura 2-2 Batería de vehículo eléctrico Nissan [44]

Según un estudio del Instituto Medioambiental de Suecia, la elaboración de una batería de 100 [kWh] genera hasta 200 toneladas de CO₂, esto es como se menciona en el párrafo anterior porque el Litio es muy difícil de obtener y requiere mucha energía y procesos químicos para su obtención, según este estudio, esta emisión de CO₂ es equivalente al generado por un vehículo diésel o gasolina durante 8 años aproximadamente [45].

2.3 Fuente de Generación de Energía

Otro pilar importante a considerar de cuanto CO₂ emite indirectamente el vehículo eléctrico es el tipo de fuente de energía de la cual se alimenta, esto debido que, si fuera una matriz energética que dependa 100% de combustible fósil, conlleva a consumir más energía, con lo cual se necesita quemar más combustible con lo cual aumenta las emanaciones de GEI, caso contrario si la matriz estuviera constituida por energía 100% renovable, la emanación de GEI se reduce a un valor cercano a cero. Considerando todo lo anterior es necesario entonces comparar esta directa relación entre la contaminación de un vehículo eléctrico y la matriz energética del país con lo contaminado por un vehículo a combustión regular.

Una forma de relacionar estas variables es calcular cuánto debiese ser el rendimiento de un vehículo a combustión (KM/L, gal/L, entre otras) para contaminar lo mismo que un vehículo eléctrico con cierta matriz energética. En base a esto se llegó a la conclusión que considerando un promedio a nivel mundial un vehículo a gasolina necesita tener un rendimiento de 21,74 [Km/L] para igualar la contaminación que genera un vehículo eléctrico, con lo cual demuestra así que el vehículo eléctrico contamina mucho menos en términos de carga eléctrica que la carga de gasolina de un vehículo convencional [46].

En este estudio, para los vehículos eléctricos, el análisis incluye las emisiones procedentes de la extracción y entrega de materias primas a las plantas de energía eléctrica, las emisiones generadas por el uso de combustible específico en el proceso de producción de electricidad, las pérdidas de electricidad durante la distribución de electricidad y la eficiencia del combustible del vehículo. Para el caso de los vehículos a gasolina el estudio incluye las emisiones procedentes de la extracción de petróleo crudo, transporte del petróleo, refinamiento, entrega del combustible a un punto de venta y la combustión de la gasolina en el vehículo. Todo esto descartando la fabricación de los vehículos, puesto que solo se quiere ver cómo influye la matriz energética en la implementación de vehículos eléctricos [46].

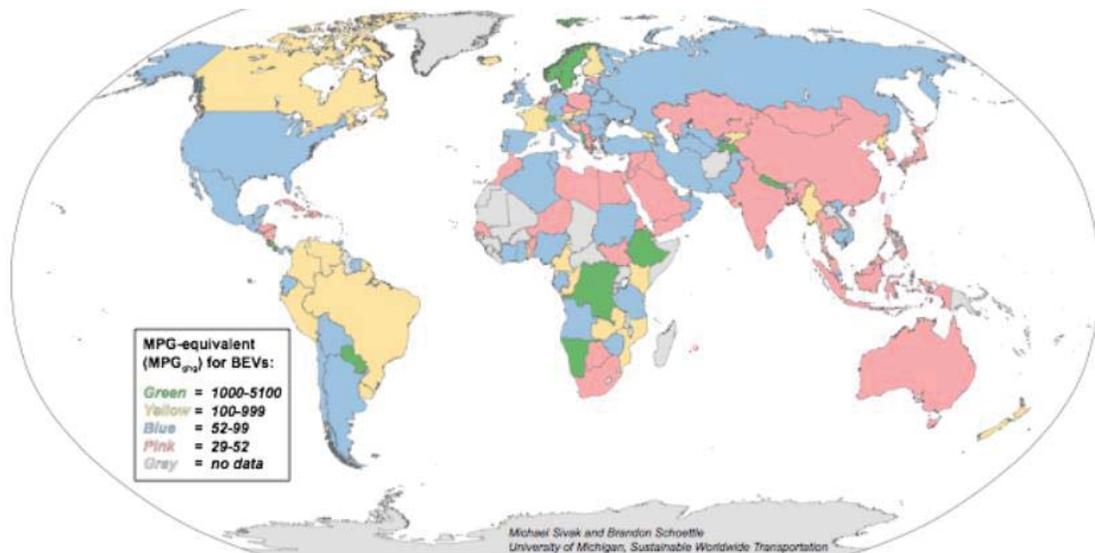


Figura 2-3 Mapa mundial codificado en colores según los valores equivalentes a MPG para vehículos a batería eléctrica [46].

El estudio dividió en cuatro grupos distribuidos de la siguiente manera, incluyendo algunos países de ejemplo [46]:

- Entre 29 [mpg] y 51 [mpg] en 52 países, entre los países africanos en el extremo inferior de la gama, como, así como la India (35,7 [mpg]) y China (40 [mpg]).
- Entre 52 y 99 [mpg] en 54 países, entre ellos Alemania (52,1 mpg), México (56,2 mpg) y Rusia (70,7 mpg).
- Entre 100 y 1.000 [mpg] en 26 países, incluyendo 155,9 [mpg] en Brasil y 990,3 [mpg] en Islandia.
- Más de 1.000 [mpg] en 11 países, entre ellos Albania, Paraguay y Nepal, todo con equivalentes [mpg] superior a 5.000.

Del estudio se desprende que cada país tiene su propia equivalencia, puesto que depende de la procedencia del combustible, como también de la matriz energética, entre otros factores. Con esto se llega a hacer una relación entre las millas por galón [mpg] para cada país, esto se puede apreciar en la Figura 2-3.

Considerando algunos países (continente americano y España) tenemos la siguiente tabla de valores:

Grupo	País	MPG	L/100 km
MUNDO		51.5	4.6
1000 – 5100 MPGghg	Paraguay	5084.1	0.05
	Costa Rica	1044.3	0.2
100 – 999 MPGghg	Uruguay	210.4	1.1
	Brasil	155.9	1.5
	Colombia	125	1.9
	Perú	113.4	2.1
	Venezuela	107.6	2.2
52 – 99MPGghg	Panamá	82.4	2.9
	España	80.5	2.9
	Bolivia	79.6	3
	Ecuador	69.3	3.4
	Argentina	67.6	3.5
	El Salvador	58.7	4
	Guatemala	57.2	4.1
	México	56.2	4.2
	Chile	54.5	4.3
	Estados Unidos	55.4	4.2
29 – 51MPGghg	Nicaragua	50.6	4.6
	Honduras	45.7	5.1
	República Dominicana	37.4	6.3
	Cuba	31.5	7.5

Figura 2-4 Valores equivalentes de rendimiento de combustible en millas por galón para vehículos de batería eléctrica , se adjunta su valor en kilómetros [46].

2.4 Comparación vehículo a combustión y eléctrico

Considerando el tema de la huella de carbono, junto con el de la fabricación de los vehículos y por último la matriz energética de cada país, nos lleva a la pregunta de que si es posible determinar el impacto al medio ambiente que tienen ambos y poder compararlos entre sí.

La respuesta es que sí, es posible, dado que teniendo todos los antecedentes anteriores y sumándole nueva información se pudo determinar que en países con un mix eléctrico de energías renovables los vehículos eléctricos producen menos de un tercio de los vehículos a combustión.

Utilizando los datos de las emisiones de GEI durante la fabricación de las baterías de los vehículos eléctricos, incluyendo su ciclo de vida total y se compara con las emisiones de los vehículos de combustión interna convencionales, todo esto basado en Europa.

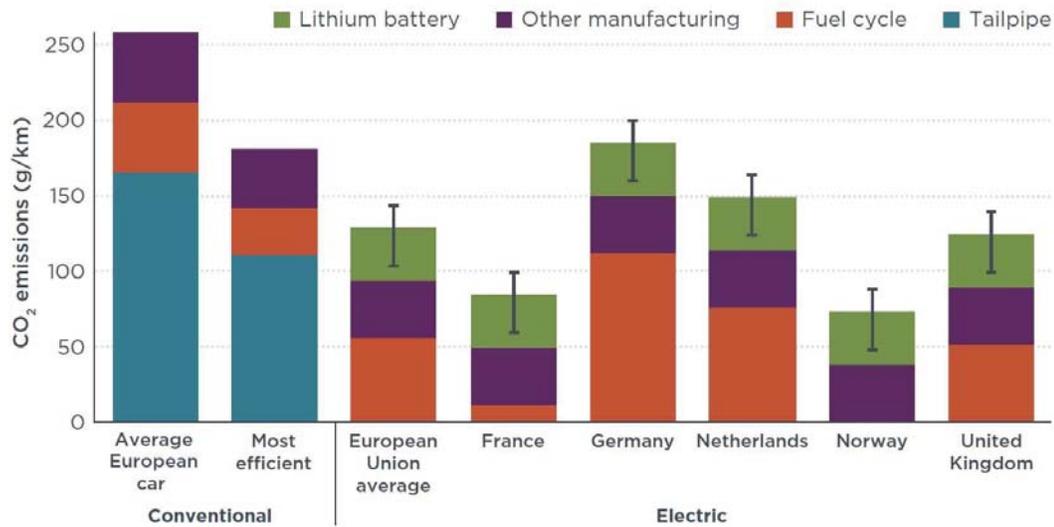


Figura 2-5 Grafica de emisiones de CO2[g/Km] de vehículos eléctricos en Europa [47]

Analizando los datos obtenidos de la Figura 2-5 se puede concluir que los vehículos eléctricos son muchos más limpios durante todo su ciclo de vida incluyendo la fabricación de la batería, dentro del estudio elaborado por la International Council on Clean Transportation (ICCT) se pueden obtener las siguientes conclusiones [47]:

- Un coche eléctrico actual, con características mecánicas medias, produce la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero que un turismo medio de combustión europeo. Además, se puede concluir que un coche eléctrico que utilice el mix energético medio europeo es casi un 30% más limpio que el coche de combustión más eficiente existente hoy en día en el mercado.
- Los híbridos enchufables, si son propulsados en la mayoría de los viajes con energía eléctrica, en sus desplazamientos urbanos diarios, que es la forma ideal de utilizarlos, mantienen unas emisiones, en su ciclo de vida completo, similares a los vehículos eléctricos de batería.
- En los países con un mix eléctrico basado las energías renovables, como son Noruega o Francia, los vehículos eléctricos producen menos de un tercio de las emisiones que un vehículo con motor de combustión promedio, en todo su ciclo de vida. Este hecho debería reforzar la estrategia de los gobiernos para promover el uso de vehículos eléctricos como parte de su estrategia de descarbonización.
- Las emisiones más altas de un vehículo eléctrico se producen durante la etapa de fabricación, ya que aproximadamente la mitad de las emisiones proviene de fabricación

de la batería. Estas se compensan durante los dos primeros años de vida, un año y medio si habitualmente se recarga con energías renovables.

- Las emisiones producidas por la fabricación de baterías son similares a las de la fabricación de un motor de un vehículo de combustión interna promedio y aproximadamente una cuarta parte de las emisiones de la vida completa del coche eléctrico. Sin embargo, las estimaciones dicen que estas emisiones pueden variar hasta en un factor de 10, lo que indica la necesidad de realizar investigaciones adicionales en este campo.

Por lo tanto, si sumamos la tendencia a que los procesos de extracción con el tiempo se volverán menos contaminantes y que la tendencia mundial es que la matriz energética sea gran parte renovable, nos lleva que el vehículo eléctrico con los años contaminara cada vez menos, dejando atrás así al vehículo a combustión.

3 Asignación de Tráfico

Para el tipo de estudio a realizar es necesario conocer cómo se desplaza la población entre las distintas zonas que forman parte de este trabajo, para esto es necesario estudiar los distintos tipos de modelos y estudios necesarios para poder obtener una visión más clara de la realidad.

3.1 Planificación de modelo de transporte

El proceso de planificación del transporte, es importante para mantener un orden y hacer el estudio manteniendo un riguroso esquema, logrando así mayor exactitud para el objetivo de la planificación, este proceso consta de las siguientes fases:

1. 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).
2. 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.

3.2 Definiciones

Una red de tráfico es un conjunto de puntos y rutas representadas por un grafo dirigido $G = (N, A)$ donde N es el conjunto de nodos (los cuales pueden representar intersecciones, barrios, ciudades, etc.) y A es el conjunto de arcos (caminos). Cada arco tiene una capacidad de flujo (máxima cantidad de automóviles que pueden cruzar este arco por unidad de tiempo), así como un tiempo de viaje sin congestión o libre (la mínima cantidad de tiempo requerida para viajar a través del arco a la máxima velocidad permitida).

Los tiempos de viaje de cada arco dependen del flujo en cada uno de éstos. Sin embargo, cabe destacar que el tiempo de viaje en un arco en primera instancia podría no sólo depender del flujo de vehículos en él, sino del conjunto de vectores de flujo en su totalidad.

Además, se cuenta con un conjunto de pares Origen-Destino $OD \subset N \times N$ Para cada par $k = (p, q) \in OD$ conocemos el valor constante $d_k \geq 0$ de conductores que viajan desde el origen p al destino q en un periodo de tiempo dado. A esto se debe agregar que para cada par OD $k = (p, q)$ se denota por R_k el conjunto de rutas que conectan el punto p con el conjunto q esto quiere decir, las secuencias conectadas de arcos que comienzan en p y terminan en q .

La asignación de tráfico puede ser estática o dinámica, siendo la principal diferencia la asunción de una cantidad constante de conductores usando un camino durante el periodo de tiempo de interés. En caso de escoger una asignación de tráfico estática, podría ser recomendable estudiar las cargas de la red en periodos del día cortos y específicos, como por ejemplo las horas punta, en donde los flujos de transporte pueden ser asumidos realísticamente como constantes.

Dada una red G capacidades de flujo \bar{f} , tiempos de tránsito libre \bar{t} y la matriz par OD 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, que 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, alcanzando un equilibrio de Nash. En contraste al equilibrio social, en este caso los conductores no son gestionados por un coordinador central, sino por su propio egoísmo.

Existen 2 formas básicas de modelar el coste 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 esté en función del flujo, de forma estrictamente creciente [48].

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, creados 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 resultará en un incremento en el tiempo de todos los conductores en ese arco, 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 OD son lo suficientemente pequeñas (o en su defecto, la capacidad de los arcos sea lo suficientemente grande), y considerando que la elección de un camino aumentará el costo de todos los viajes realizados en ese marco, el equilibrio social evitará, en la medida de lo posible, la formación de embotellamientos mientras existan rutas alternativas descongestionadas [48].

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

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

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, donde $0 < \alpha < 1$ y $\beta \in \mathbb{N} - \{0\}$

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

$$\text{Min} \sum f^{(a)} \cdot t^{(a)} \quad (3-2)$$

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:

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

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

Teniendo como restricciones lo siguiente:

Restricción de capacidad:

$$f^{(a)} = \sum_{k \in OD} f_k^{(a)} \quad (3-4)$$

Demanda Nodal:

$$E_{ij} \cdot f_k = \delta_k \quad (3-5)$$

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

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

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

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

Restricción de no negatividad:

$$f_k^{(a)} \geq 0, \quad \forall k \in OD \quad (3-6)$$

3.3 Métodos de resolución

En este punto se nombrará los más comunes y utilizados para resolver este tipo de problemas antes señalados.

- **Algoritmo de Frank y Wolfe:** se aplica a problemas de optimización matemática con una función objetivo no lineal convexa y cuyo dominio de soluciones factibles, está compuesto exclusivamente por restricciones lineales, es decir, es un conjunto convexo
- **Métodos heurísticos:** conjunto de métodos y técnicas que permite hallar y resolver un problema de modo práctico no garantizado para ser óptimo o perfecto, pero suficiente y de alta calidad para los objetivos inmediatos en el menor tiempo posible.
- **Programación lineal:** optimización matemática dedicado a maximizar o minimizar (optimizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones expresadas mediante un sistema de ecuaciones o inecuaciones también lineales.

3.4 Modelo 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.

La función objetivo (FO) queda de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{a \in A} \sum_{k \in OD} f_k^{(a)} \cdot t_k^{(a)} \quad (3-7)$$

Donde las restricciones son las siguientes:

Restricción de capacidad mutua (en caso de haber)

$$\sum_{k \in OD} f_k^{(a)} \leq \bar{f}^{(a)} \quad (3-8)$$

Donde:

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

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

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 destino, o 0 si el nodo es un nodo de paso.

$$\sum_{k \in OD} f_k^n - \sum_{k \in OD} f_k^{-n} = \begin{cases} f_k^n, & \text{si } n \text{ es el nodo de llegada} \\ f_k^{-n}, & \text{si } n \text{ es el nodo de salida} \\ 0, & \text{si } n \text{ es nodo de paso} \end{cases} \quad (3-9)$$

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 salen del nodo n .

Restricción de no negatividad

$$f_k^n \geq 0, \quad \forall k \in OD \quad (3-10)$$

4 Revisión bibliográfica

Al realizar una revisión bibliográfica de cómo ha sido enfrentado el problema del análisis del impacto de vehículos eléctricos en sistemas de distribución en otros trabajos, se hallarán dos tipos de análisis principales, aquellos que buscan medir el impacto tomando en cuenta sólo la carga de las baterías de los vehículos, sin tomar en cuenta la tecnología V2G, y aquellos que si toman en cuenta esta posibilidad. Por lo cual es conveniente ir considerando cada una de las variables y estudios que han sido realizados y tomar el o los más convenientes para nuestra problemática.

4.1 Consideraciones Generales

Como consideraciones generales, se asume que los vehículos eléctricos conectables tienen una máxima capacidad de almacenamiento de 10-11 kWh, sin embargo, se recomienda utilizar sólo 70-80% de la capacidad total de la batería para optimizar su expectativa de vida (muy relevante para los dueños de VE), 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 continúa almacenada en la batería, serían requeridos desde el punto de carga 8-10 kWh aproximadamente [49] [50].

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 [49] [50]. 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 las simulaciones.

En general, se le suele dar preferencia a la carga en la vivienda, dejando de lado la carga en electrolinerías, puesto que estas no se podrían controlar por ser esencialmente de carga rápida. Además, en el caso de una 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 [51].

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 Carga del vehículo eléctrico

Dentro de las grandes interrogantes al estudiar el impacto que tendría un aumento considerable de vehículos eléctricos en la red de distribución, es la carga de este, con lo cual es de suma importancia considerar algunos modelos ya utilizados y hechos en algunos estudios, con el fin de poder tener la mayor cantidad de información y tener un modelo más aproximado a la realidad correspondiente al caso.

En un escenario más realista, lo más a priori que se puede predecir es que los dueños de vehículos eléctricos llegarían alrededor de las 20 y 22 horas, conectarían su vehículo con lo cual estando junto en horario punta y con una gran introducción de estos vehículos en el parque vehicular, produciría peak de potencia produciéndose grandes problemas si este tipo de carga no es controlada, pues produce pérdida de eficiencia y disminuiría la confiabilidad del sistema, con lo cual estaría la red propensa a fallas por sobre carga [50] [52] [53] [54]. Todo esto implicaría que la empresa distribuidora debiese gastar más en invertir en equipos capaces de operar en estos peak de potencia altos, llevando a un sobredimensionado de equipos), por lo cual los costos se incrementarían demasiado.

Por otro lado, se tiene lo que es una carga coordinada, lo cual podría variar la potencia de carga en cada momento y el tiempo en que se carga el vehículo, todo esto dependiendo el estado de la red. Todo esto es posible ya que el dueño del vehículo puede controlar la hora en el cual cargarlo, todo esto ayuda a evitar la carga en periodos en que la curva de demanda este en periodo peak y desplazar este consumo a horarios donde la curva de demanda sea más baja, logrando así un aplanamiento de la curva de demanda. En [53] relación a esto, se ha determinado una correlación directa entre la minimización de pérdidas, la minimización de la variación de la carga y la maximización del factor de carga. Cuando se ha escogido una carga coordinada que minimiza la variación de la carga o maximiza el factor de carga en un sistema de pruebas, se han obtenido prácticamente los mismos resultados que si esta carga coordinada buscara minimizar las pérdidas, siendo estos 3 valores notablemente mejores que al utilizarse una carga sin coordinación.

En [55] se expone que las redes de distribución están pasando por cambios radicales debido al alto nivel de penetración de generación distribuida y sistemas de almacenamiento, lo que podría modificar fuertemente la estructura y la administración de éstas, que se acercan progresivamente al nuevo concepto de microrredes (MG). Además, el nivel de penetración de sistemas de almacenamiento para vehículos eléctricos conectables está aumentando significativamente, debido al significativo potencial de estos vehículos de reducir emisiones y costos en el transporte, por lo que en esta publicación se crea un modelo de optimización que obtiene el punto óptimo de operación de las microrredes, con flotas de VE y plantas de generación de ERNC.

4.3 Control sobre la carga

Con el fin de definir posibles líneas de investigación que aún están sin cubrir, los autores de [56] presentan una revisión de diferentes estrategias, algoritmos y métodos para implementar un sistema de control de carga inteligente. Señalan que dos grandes arquitecturas de carga inteligente pueden encontrarse en la literatura: control centralizado y descentralizado. Ambos pueden dar soluciones válidas, pero a tasas bajas de penetración de VEC, un esquema de control descentralizado puede ser una buena solución debido a sus bajos requerimientos de comunicación. Los investigadores de este tópico cubren un ancho espectro de objetivos para implementar una solución de carga inteligente. Algunos de ellos utilizan métodos optimizados para lograr los objetivos propuestos, mientras que otros utilizan métodos heurísticos. Por una parte, los métodos optimizados son usados para maximizar/minimizar ganancias/costos, logrando mejores soluciones. Por otra parte, los métodos heurísticos son más adecuados para mantener la red de distribución dentro de sus límites operacionales, además de ser más rápidos. Por esto, una mezcla de ambos enfoques puede ser una buena solución donde el algoritmo óptimo (determinístico) sólo es calculado cuando ocurren ciertos eventos específicos.

4.4 V2G

El impacto de la vida de la batería V2G se evalúa en [57], en este trabajo se cuantifica el impacto en diversas características de las baterías mientras proporcionan dichos servicios, para distintas capacidades de batería, regímenes de carga, y energía mínima en la descarga. La degradación de las baterías resultó ser más dependiente del flujo de energía para ambos tipos de vehículos, pero fue más susceptible al régimen de carga (para los VE) y a la capacidad de la batería (para los VEHC). Cuando se brindaban servicios auxiliares a la red, la degradación fue más sensible a la profundidad de descarga para VE y VEHC. Se concluye por lo tanto en este trabajo, que proveer servicios de suministro de energía con VE lleva a un cambio anual de baterías, para todos los regímenes de carga estudiados. En el mejor caso, la batería de un VEHC con un rango eléctrico de 10 km requeriría un reemplazo de baterías cada 5 años (dos veces en su vida útil). De la misma forma, para los VE se requeriría un cambio cada 3 años entregando servicios auxiliares con un 20% de profundidad de descarga, por lo que incluso en el mejor caso, la participación en servicios V2G aceleran la degradación de la batería mucho más que al conducir.

En términos generales, la característica V2G potencia las cualidades de los vehículos eléctricos como servicio auxiliar a la red. Un aspecto de la administración de la red es el de contar con reservas de potencia para mantener la frecuencia y la tensión y facilitar así el manejo eficiente de desbalances o congestión. Es esencial mantener la frecuencia a niveles apropiados, lo más próximo posible al valor nominal. Por lo tanto, si la frecuencia es más baja que este valor, las baterías podrían descargarse (regulación hacia arriba) y en caso contrario, si la frecuencia se encontrase sobre este valor, las baterías podrían cargarse (regulación hacia abajo) [58] [59].

Otro aspecto importante es la posibilidad de nivelar la carga y la potencia punta que nos ofrece la carga/descarga de las baterías de un vehículo eléctrico. Para nivelación de carga, la demanda es trasladada desde horas punta a horas valle. Los vehículos eléctricos enchufables se pueden

descargar durante las horas de carga punta diaria, reemplazando al menos en parte a los generadores que sólo se utilizan para estas horas. Si los vehículos se descargan en este tramo del día, deberán cargarse en horas de baja demanda. El consumo total de energía no se disminuirá, sino que se redistribuirá a horas de menor consumo, minimizando así las pérdidas de potencia y aumentando la eficiencia de la red [58].

En algunos artículos se sugiere que el V2G podría acoplarse bien con la utilización de energías renovables (paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas), debido a la intermitencia de las últimas. Si de repente la potencia obtenida a través de generadores distribuidos que funcionan con ERNC es muy alta, las plantas de potencia centralizada deberán disminuir su producción energética para mantener el balance en la red, y disminuir la producción puede ser poco eficiente. Por lo tanto, una mejor manera de enfrentar esto es utilizar ese exceso de potencia para cargar baterías de vehículos eléctricos, funcionando como respaldo de carga. La energía almacenada puede luego ser devuelta a la red en momentos en que los generadores distribuidos tengan una baja producción [58].

4.5 Trabajo previo

Todo este proyecto viene de una seguidilla de estudios realizados con anterioridad, en el caso de [60] se logró desarrollar un modelo que permite cuantificar la energía adicional solicitada al sistema eléctrico causada por la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos, importante para poder cuantificar el impacto que tendrá las redes de distribución a medida que aumenta el porcentaje de vehículos eléctricos en la ciudad.

Se desarrolla una plataforma de simulación en Matlab en los trabajos [61] y [62], los cuales se integra el 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 dependiente de flujos que varían con respecto a la hora. Además, entrega una variabilidad en los escenarios de estudios, dependiendo de las características sociales, económicas y eléctricas. Todo esto es desarrollado en el Gran Concepción, con la red eléctrica Colo-Colo y junto al estudio de viajes desarrollado en la plataforma GESITRANBIOBIO.

Bajo los resultados obtenidos para distintas estrategias de cargas, ambos autores proponen estrategias de carga con el objetivo de suavizar la curva de demanda, trasladando la recarga de los vehículos en horarios de menor demanda. En [62] se propone un comienzo de carga para diferentes sectores de la red con un desfase de una hora con el propósito de evitar el efecto avalancha provocado por la conexión simultánea de los VE en toda la red. De igual manera, el autor en [61] diseñó una nueva estrategia descentralizada en donde busca evitar la comunicación entre vehículos o de los usuarios de VE con terceros, como podría ser la empresa distribuidora de energía, logrando así evitar el efecto avalancha mediante la implementación de tres curvas de precio diferentes para un mismo alimentador.

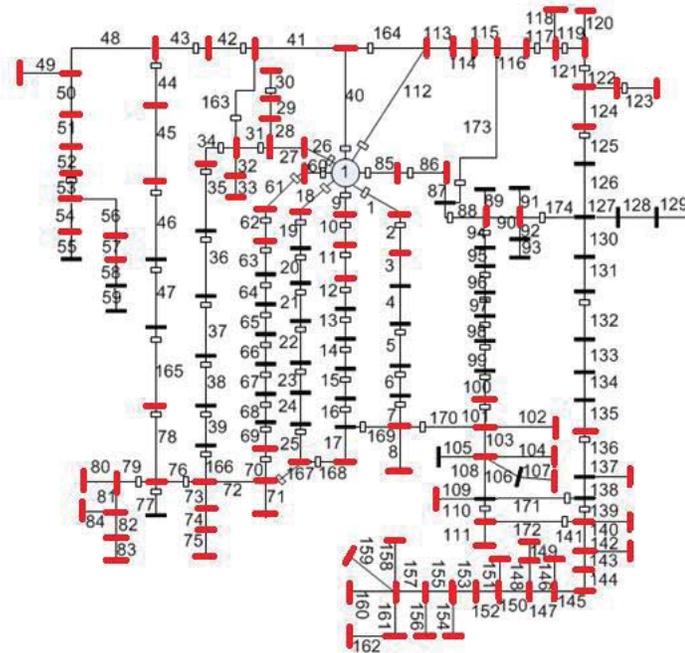


Figura 4-1 Red Eléctrica Colo-Colo utilizada en [61] y [62]

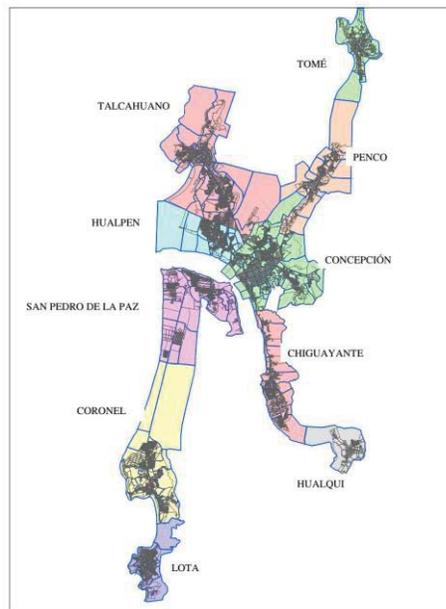


Figura 4-2 Sectorización para el análisis de viajes dentro del Gran Concepción [61] [62]

En general, la tendencia es la asignación de prioridades a los diferentes usuarios categorizándolos, asignando diferentes niveles de potencia a los grupos de VE y controlando distintos periodos de recargas. Por otro lado, agrupar los vehículos de acuerdo a su capacidad de recarga es otra alternativa presentada. Por lo tanto, la tendencia es relacionar los diferentes participantes de acuerdo a características comunes y determinar el intervalo de recarga óptimo para cada uno de ellos.

5 Solución propuesta

Teniendo todos los antecedentes anteriormente mencionado es que se procede a explicar de qué trata el estudio en cuestión, para luego proceder a definir el área de estudio junto a los datos a considerar para este proyecto.

La importancia de este proyecto es entender como puede ser modificada la curva de demanda, tanto en potencia activa como cargabilidad del sistema a medida que existe un mayor parque vehicular eléctrico, esto para distintos niveles de porcentuales (10%, 20%, 30%, 50%, 90%). Es necesario considerar la red a utilizar, un estudio respecto al desplazamiento de los vehículos dentro y fuera del área urbana a estudiar, con estos datos también se debe definir perfiles de usuario ya que durante la semana el comportamiento es distinto al de un fin de semana, y dentro de este último el día sábado termina siendo muy diferente al domingo. Ya definido todo lo anterior sería posible simular este estudio en alguna plataforma adecuada para simular dicha realidad.

5.1 Propuesta

En el presente trabajo se propone utilizar un nuevo modelo, basado en trabajos anteriores, que incorpora algunas mejoras, existirá una mejora sustancial al dividir el fin de semana en sábado y domingo, todo esto con tal de que sea más fidedigno a la realidad. Se tomará la zona del plan de Valparaíso, considerando un costo por arco (función de flujo) para cada viaje fuera de la zona antes mencionada. El modelo será fácilmente editable para por introducir un porcentaje determinado de vehículos eléctricos en el programa y obtener las curvas de demanda y cargabilidad rápidamente.

Se optará por un control descentralizado ya que requiere menos recursos en su implementación y tendría mayor aceptación por parte de los usuarios, y sus resultados podrían no diferir mucho del control centralizado, al menos en las primeras fases de penetración de los VE en el mercado automotriz. El control de la carga se realizaría de forma indirecta, a través de tarifas para cada nodo. Las dificultades de este problema son principalmente: el efecto avalancha, que consiste en que todos o un gran número de VE se conecten al empezar el periodo en el que la energía es más barata, resultando en una carga del tipo “off-peak” en lugar de un “valley-filling”, siendo la segunda modalidad de carga la más deseable, debido a que ocasiona menores pérdidas; y respetar las necesidades de carga de cada vehículo, que son distintas y pueden cambiar de un día a otro.

Preliminarmente, la tarifa tendría un componente global (transformador AT/MT), aumentando el precio de la energía a medida que aumenta la cargabilidad del transformador. Además, tendría una componente por alimentador, en donde los vehículos conectados a cada alimentador se dividirían en fracciones para diferir su carga y evitar sobrecarga en las líneas y el efecto avalancha. Se quiere evitar que el vehículo comunique su estado de carga al agente del transformador (representante de la empresa de distribución) o a otros vehículos.

5.2 Vehículos eléctricos

Los modelos a utilizar para este trabajo serán Nissan Leaf, Tesla S, BMW i3 como BEV y como PHEV se utilizará Chevrolet Volt, Mitsubishi Outlander y Ford Fusion Energi, en base a las ventas a nivel mundial de vehículos eléctricos.

La descarga de las baterías se realizó de forma lineal, proporcional a la distancia, lo cual es una aproximación del verdadero comportamiento de descarga, que sigue una curva dependiendo del tipo de batería y de su estado. La capacidad de energía de las baterías para todos los VE se considera como el correspondiente a baterías nuevas, según el modelo correspondiente de los mencionados anteriormente. Los PHEV pueden realizar viajes a pesar de no tener energía suficiente en la batería, pero privilegian siempre el uso del motor eléctrico por sobre el de combustión interna, dada la diferencia de costos del uso de cada motor.

En cuanto a la carga, se decidió utilizar una carga de potencia constante común para todos los VE, según el modo 1 señalado en el estándar IEC 61851 (16 A, 230 V, 3,7 kW), el cual no requeriría de cableado adicional. Además, la utilización de una baja potencia de carga permite distribuir la carga en una mayor ventana de tiempo. Se muestra en Tabla 5-1 el resumen de lo mencionado.

Tabla 5-1 Resumen de los modelos a utilizar y sus características.

Modelo de VE	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

5.3 Escenario de Estudio

El Gran Valparaíso es un área metropolitana en la zona central de Chile, compuesta por las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa alemana y Con-Con. Tiene una población estimada de acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas es de 951.311 habitantes, representando el 5,4% del país [63]. Es parte importante del país, además de tener una de las mayores cantidades de habitantes, tener al Congreso Nacional ubicado en la ciudad de Valparaíso.

Gran parte de los empleos están centrados entre las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, debido a la gran cantidad de comercio, industrias, puerto (caso de Valparaíso) entre otros, generalmente las comunas como Quilpué y Villa Alemana hacen de ciudad dormitorio en su gran parte, por lo cual existe mucho flujo vehicular entre ciudades.

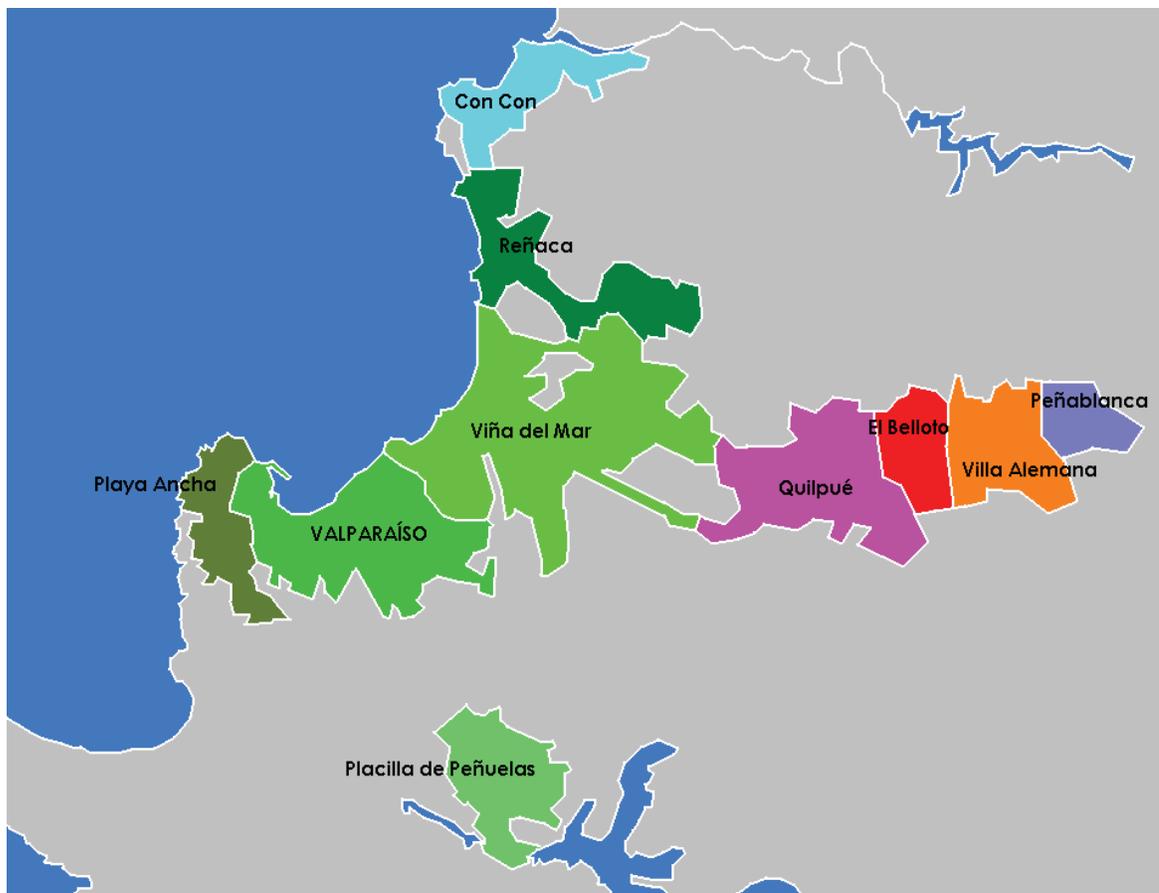


Figura 5-1 Sectores del Gran Valparaíso [55]

5.3.1 Encuesta de Origen y Destino

La información de este tipo de estudios es fundamental para desarrollar estrategias de movilidad intermodal, ya sea desde sistemas de transporte público, transporte vial o ciclista. Estos estudios son esenciales para generar planes integrales de movilidad de una ciudad. La encuesta es un

método que sirve para obtener información de indicadores de movilidad, principalmente demanda de viajes generados y atraídos en una zona específica. En este seminario en línea se presentará a los participantes la importancia de generar encuestas Origen - Destino, los elementos que la componen y los pasos a seguir en la elaboración de estrategias para desarrollarlas. Además, se presentarán ejemplos de desarrollo de otros países [64].

Encuesta de Origen y Destino de Viajes del Gran Valparaíso

La encuesta de origen y destino de viajes en hogares del Gran Valparaíso, consistió en encuestar a todos los residentes de 8.600 hogares del Gran Valparaíso, seleccionados aleatoriamente, en el periodo comprendido entre agosto de 2014 y junio de 2015. Esta base de datos contiene el patrón de viajes de los habitantes del Gran Valparaíso [65].

De esta encuesta es posible obtener como se movilizan los habitantes de acuerdo a:

- 1) Razón de viaje (trabajo, estudios, entre otros)
- 2) Tipo de transporte a usar (locomoción colectiva, vehículo particular, moto, entre otras)
- 3) Origen y destino de viajes (movilidad entre sectores)
- 4) Tiempo de viaje
- 5) Horario

Para el caso de este proyecto lo que nos interesa es la cantidad de vehículos que posee la ciudadanía, el tiempo de viaje y el horario en que lo realiza, entre que zonas frecuenta la ciudadanía, la razón del viaje y perfiles de día de semana y fin de semana.

A continuación, se muestra que para el estudio el área es dividida por macrozonas y no por comunas como se hace a menudo (Tabla 5-2).

Tabla 5-2 Macrozonas del Gran Valparaíso [66]

N°	Macrozona	N°	Macrozona	N°	Macrozona	N°	Macrozona
1	Playa Ancha	8	Forestal	15	Santa Julia	22	Quilpué Norte
2	Plan Valparaíso	9	Marga-Marga	16	Las Palmas	23	El Belloto Norte
3	Valparaíso Alto	10	Industrial	17	Concón Poniente	24	Villa Alemana Poniente
4	Barón-Placeres	11	Plan Viña	18	Concón Oriente	25	Peñablanca
5	Rodelillo	12	Miraflores	19	Quilpué Poniente	26	Villa Alemana Norte
6	Placilla-Curauma	13	Viña del Mar Oriente	20	Quilpué Sur		
7	Recreo	14	Reñaca	21	El Belloto		

Esta distribución del área metropolitana puede ser asociado al mapa de la Figura 5-2 donde se marcan las zonas mencionadas anteriormente.

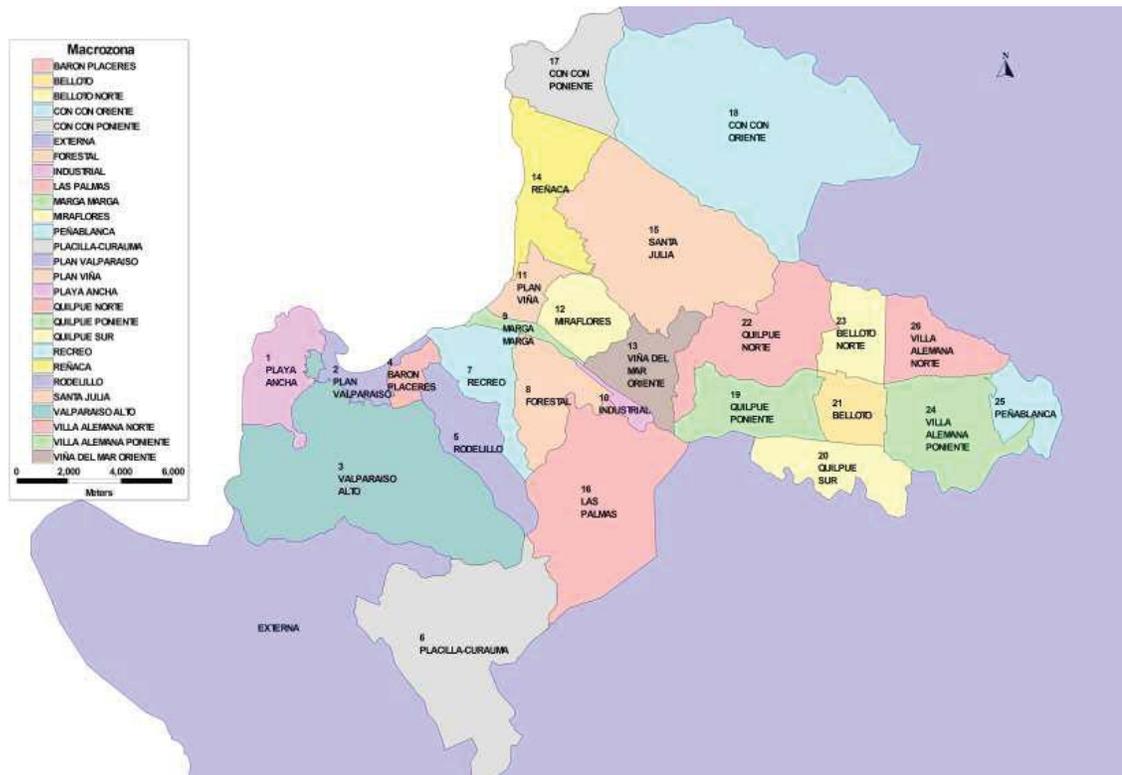


Figura 5-2 Mapa del Gran Valparaíso por Macrozonas [66]

Para un trabajo más minucioso cada macrozona contiene zonas de modelación que estas a su vez contienen manzanas asociadas pudiendo ser un estudio más pulcro al respecto, pero para motivos prácticos de este trabajo solo se trabajara con macrozonas y zonas.

N°	Macrozonas	Zonas Modelación
1	Playa Ancha	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
2	Plan Valparaíso	13, 15, 16, 17, 18, 27, 28, 33, 34, 39, 40, 63, 311, 358, 359, 360
3	Valparaíso Alto	12, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 44, 45, 46, 47, 57, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 312, 316, 317, 318
4	Barón-Placeres	41, 42, 43, 59, 60, 61, 62, 64
5	Rodelillo	55, 56, 58, 65, 67, 68, 69, 70, 295, 296, 297, 298, 299, 66
6	Placilla - Curauma	48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 138, 307, 308, 315, 323, 324, 325
7	Recreo	71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 91, 292, 294
8	Forestal	85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 290, 291, 293, 309
9	Marga-Marga	81, 104, 105, 106, 107, 108
10	Industrial	96, 98
11	Plan Viña	109, 110, 111, 112, 121, 122, 123, 125, 126, 127, 128, 258
12	Miraflores	102, 103, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 129
13	Viña del Mar Oriente	97, 99, 100, 101, 133, 262, 286
14	Reñaca	124, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 253, 255, 256, 257, 259, 310, 326
15	Santa Julia	130, 131, 132, 134, 135, 136, 137, 139, 140, 141, 152, 181, 182, 183, 260, 261, 313, 314, 327, 328
16	Las Palmas	319, 320
17	Concón Poniente	153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 249, 250, 251, 252, 254, 329, 330, 347
18	Concón Oriente	174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 321, 322, 355
19	Quilpué Poniente	186, 187, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 200, 201, 202, 203, 204, 282, 283, 284, 285, 332, 334, 335, 336, 348, 356
20	Quilpué Sur	188, 205, 206, 207, 208, 217, 218, 288, 289, 337, 339, 340, 341, 352, 353,
21	El Belloto	209, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 219, 274, 276, 277, 281, 338, 357
22	Quilpué Norte	184, 185, 195, 196, 197, 263, 264, 265, 333, 349
23	El Belloto Norte	198, 199, 214, 266, 267, 273, 275, 350, 351
24	Villa Alemana Poniente	220, 221, 222, 223, 224, 230, 231, 232, 233, 234, 236, 239, 240, 241, 242, 243, 271, 272, 278, 279, 280, 342, 343, 344
25	Peñablanca	238, 244, 245, 246, 247, 248, 287, 346
26	Villa Alemana Norte	225, 226, 227, 228, 229, 235, 237, 268, 269, 270, 345, 354

Figura 5-3 Macrozonas y sus respectivas zonas, en gris la zona de interés [66]

Para efectos de modelación, la zona 17 fue subdividida, para reflejar el puerto de mejor forma, quedando en un total de 4 zonas (17,358,359,360).

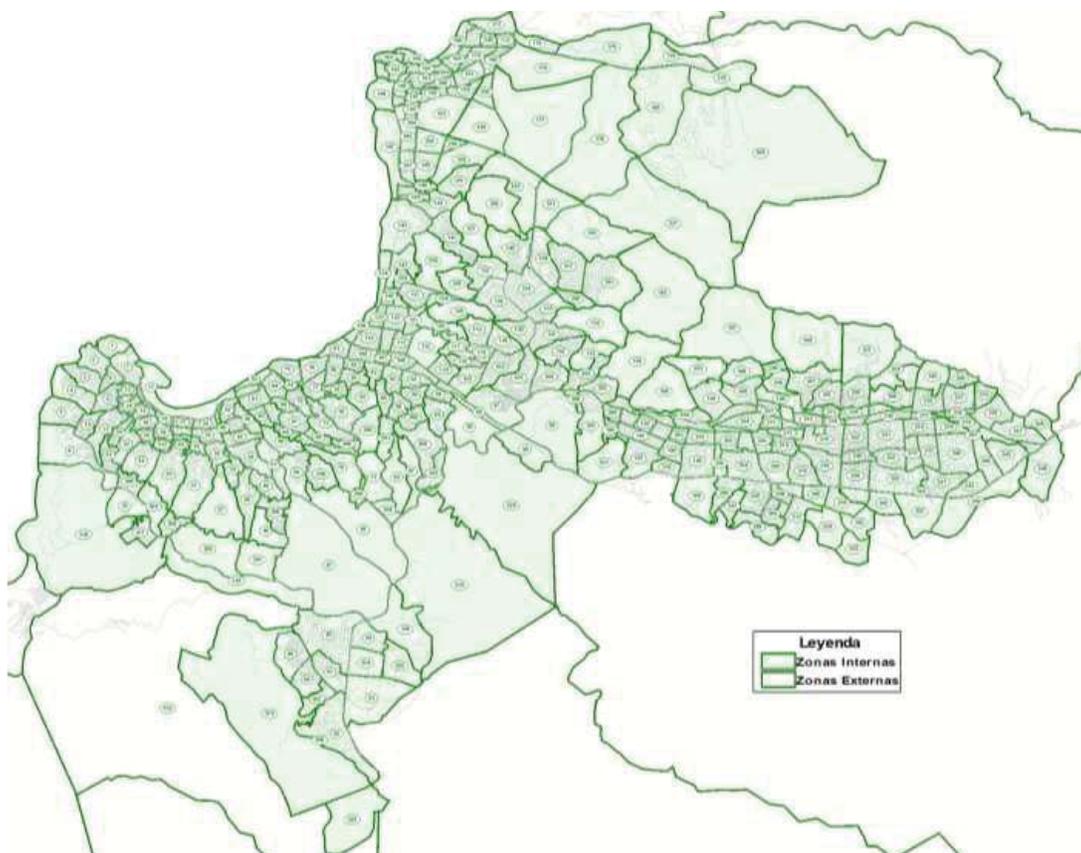


Figura 5-4 Sectorización por zonas del Gran Valparaíso[35]

Se aprecia en la Figura 5-4 que se define Zonas Externas, estas son comunas o sectores colindantes que no formaran parte de este estudio directamente, pero es un destino posible para los habitantes de la región. Estas son las siguientes:

Tabla 5-3 Zonas Externas

N°	Zona	N°	Zona	N°	Zona	N°	Zona
900	Laguna Verde	905	Sur de Quilpué y Villa Alemana	910	La Calera	915	Puchuncaví
901	Quintero	906	Norte del País	911	La Cruz	916	Costa Sur V Región
902	Ventanas	907	Sur del País	912	Olmué	917	Restante Costa Norte V Región
903	Quillota	908	Región Metropolitana	913	Casablanca y Peñuelas	918	Hijuelas, Llay Llay, Rinconada, Calle Larga, Panquehue, Catemu
904	Limache	909	Los Andes y San Felipe	914	Resto Valparaíso		

5.3.2 Red de distribución eléctrica

El sistema eléctrico sobre el cual se trabajará es la red proveniente de la SSEE de Valparaíso, cubre la zona del plan de Valparaíso.

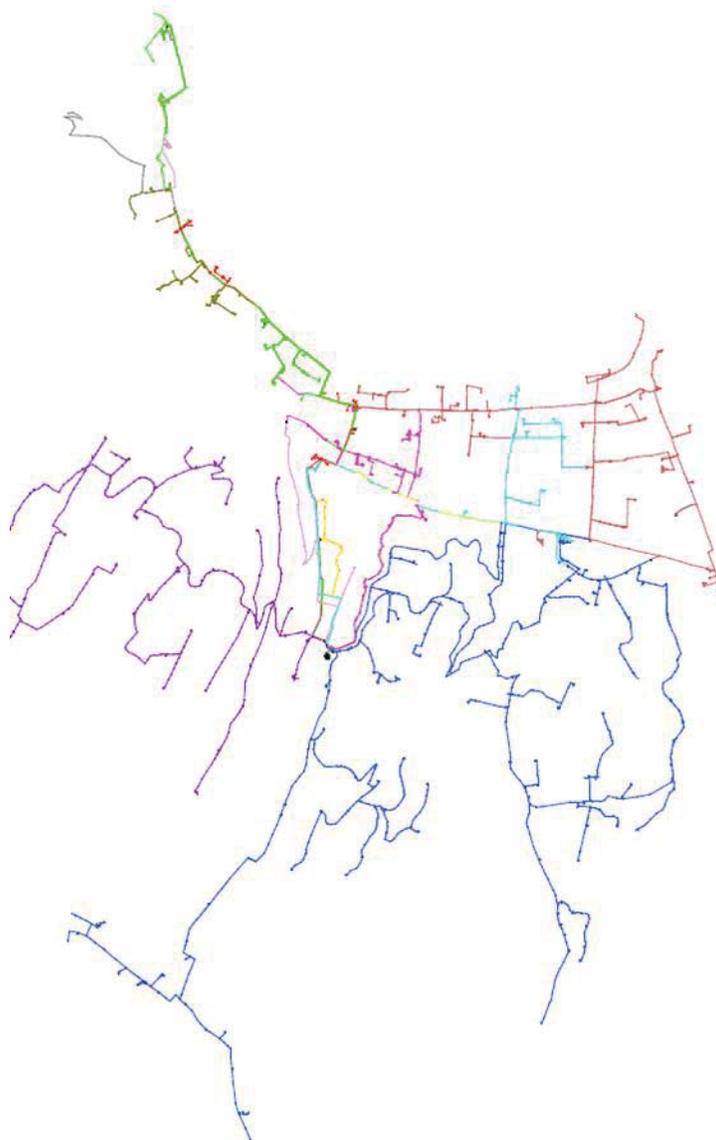


Figura 5-5 Red de SSEE Valparaíso [ELABORACION PROPIA]

Cuenta con 323 carga y 3493 líneas, dando lugar a 11 alimentadores con estructura radial definidos por zonas:

Tabla 5-4 Alimentadores de SSEE Valparaíso

Nº	Alimentador	Nº	Alimentador	Nº	Alimentador
1	Brasil	5	Francia	9	Sauce
2	Colon	6	Independencia	10	TPS
3	Errazuriz	7	Puerto 1	11	Uruguay
4	Expreso Baquedano	8	Puerto 2		

La demanda máxima total del sistema es de 43,79 [KW], pero al tener cada nodo un perfil asignado, la demanda varía a medida que transcurre las horas del día. En la Figura se muestra la curva de demanda total del sistema por horas, sin considerar las pérdidas. El valor nominal de los nodos de tensión es de 12 [KV].

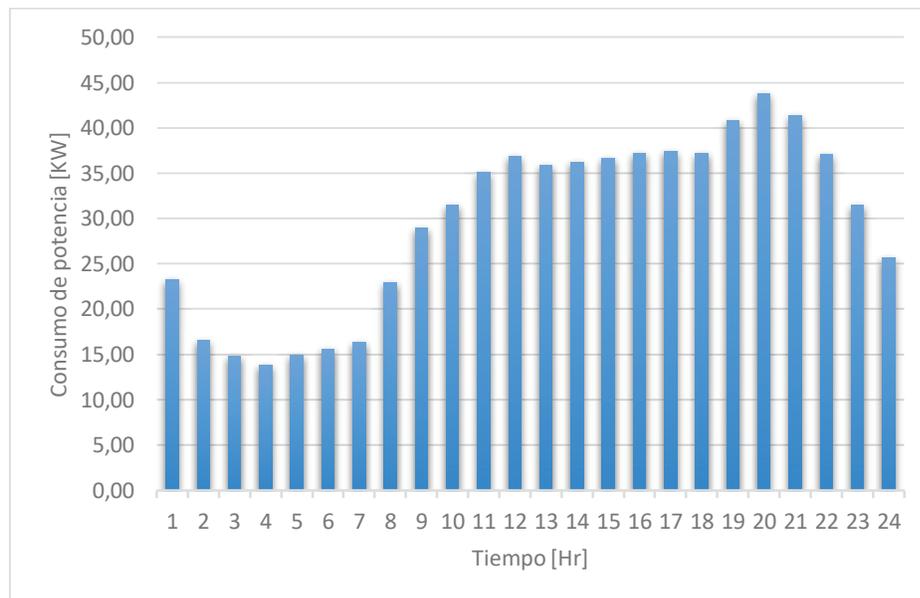


Figura 5-6 Potencia activa total demandada por el sistema para cada hora del día, en MW

5.4 Estrategia de carga

Las estrategias de carga de VE tienen principalmente dos problemas que deben enfrentar. El primero es evitar el “efecto avalancha” característico de la carga tipo offpeak, que representa la carga masiva de todos los que requieren energía en el mismo periodo de tiempo, lo cual podría ocasionar la aparición de nuevos peaks de demanda en horas que anteriormente eran de baja demanda. Además, existe alguna relación entre la variación de carga y las pérdidas, dadas ciertas condiciones [32], por lo que sería más recomendable repartir la demanda en las horas valle de forma tal que la curva resultante sea lo más suave posible. El segundo problema consiste en respetar la cantidad de energía demandada por cada usuario, y las horas de salida y llegada.

Conjuntamente, se quiere que la estrategia utilice la menor cantidad de comunicación posible, evitando incluso la formación de grupos locales de VE, para que el usuario no se vea en la necesidad de compartir información personal que podría considerar crítica para poder participar en la estrategia de carga. En consecuencia, se ha optado por una estrategia descentralizada de carga, en desmedro de una centralizada, que, si bien puede ser óptima, se vuelve poco práctica debido a la gran cantidad de equipos para poder manejar toda la información necesaria de la red y de los vehículos eléctricos. En esta carga descentralizada la coordinación se realizó de forma indirecta, a través de curvas de precio diferidas, enviadas a los transformadores y posteriormente a los VE que se conectan a cada alimentador. El usuario recibe esta información y decide el periodo durante el cual carga su vehículo, tomando en cuenta el periodo de tiempo durante el cual estará en casa, y buscando siempre minimizar el costo de la carga según la curva que le corresponda.

6 Desarrollo del proyecto

Para este capítulo se explicará las variables y consideraciones finales para la simulación del proyecto, con lo cual se explica la iteración, el modo de operación del sistema, y como funciona todo en conjunto.

6.1 Parámetros del sistema

En la Tabla 6-1 se pueden apreciar los datos más importantes para la simulación y consideraciones apropiadas a cada caso.

Tabla 6-1 Parámetros del sistema

Parámetro	Valor	Acotaciones
Días Simulados	14	Lunes es considerado el primer día
Vehículos Eléctricos	Nissan Leaf	Capacidad 24 kWh
	Tesla modelo S	Capacidad 70 kWh
	BMW i3	Capacidad 22 kWh
	Chevrolet Volt (Híbrido)	Capacidad 16,5 kWh
	Mitsubishi Outlander (Híbrido)	Capacidad 12 kWh
	Ford Fusion Energy (Híbrido)	Capacidad 7,6 kWh
% Vehículos Eléctricos	10%, 30% y 50%	
Potencia de Carga	3,7 kW	Para todos los modelos
Eficiencia de carga	88%	Para todos los modelos

Para el caso de la asignación de vehículos eléctricos al programa creado se utiliza un modo probabilístico con lo cual se tendrá un 20% de vehículos Nissan Leaf, 5% de ser Tesla S, 15 % de ser BMW i3, 25% de ser Chevrolet volt, 15 % Mitsubishi Outlander 20% de ser Ford Fusion.

El tema de la carga inicial se utilizará un porcentaje de carga inicial, esto se hará con una función probabilística de distribución normal centrada en 85 y con una desviación estándar de 5, además de una restricción de mayor al 60% y menor a 100%.

Tal como se mencionó anteriormente se definen solo dos perfiles uno de trabajador y otro de libre. El perfil trabajador tiene una rutina de viaje todos los días de lunes a viernes, se le asigna un horario y destino fijo siempre en estos días, en cambio al perfil libre no se le asigna ninguna de las dos y sus viajes serán determinados probabilísticamente.

6.2 Iteración

Las iteraciones se realizan cada una hora, por lo cual el número de iteraciones dependerá exclusivamente del número de días de simulación realizadas. Con un contador se puede diferenciar si es un día de semana o fin de semana, además se agrega una variación de carga del $\pm 10\%$ para cada hora así tener variabilidad del sistema, pero conservando su curva característica.

6.2.1 Tipo de días

Cuando la simulación está en la primera hora de un día de semana, obtienen las horas de salida y llegada de todos los conductores que tienen un perfil de tipo trabajador, de forma probabilística, con una probabilidad de un 15% de salir o llegar una hora más tarde, y un 15% de salir o llegar más temprano. A continuación, y para el mismo perfil, se obtiene la posibilidad de realizar un viaje corto al final del día, con una probabilidad de 6%. Este viaje corto tiene una distancia en kilómetros dada por una función de probabilidad de distribución normal centrada en 4 con una desviación estándar de 1. En caso de realizar el viaje corto, se le agrega una hora a la hora de llegada que tenga el conductor.

También en la primera hora del día, se obtienen los viajes que realizarán los conductores de perfil libre. Se tiene un 10% de probabilidad de realizar un viaje largo, un 50% de probabilidad de realizar un viaje corto, y un 20% de probabilidad de realizar dos viajes cortos, por lo que existe un 20% de probabilidad para cada conductor con este perfil de que no realice un viaje ese día. En caso de realizar un viaje largo, se obtiene probabilísticamente el destino entre Viña del Mar, Quilpué y Reñaca, y la hora en la cual se realiza el viaje. La hora de regreso es 3 horas después de la de salida. Si el conductor va a realizar un viaje corto, se obtiene la distancia del viaje en kilómetros por medio de una función probabilística de distribución normal centrada en 6 con desviación estándar de 1,5 y la hora de regreso es dos horas después de la hora de salida. Por último, si el conductor de perfil libre va a realizar dos viajes, uno de ellos es igual al caso anterior, el segundo ocupa la misma función descrita pero centrada en 4 con una desviación estándar de 1. Para ambos viajes, la hora de regreso es dos horas después de la hora de salida, y esta última se obtiene probabilísticamente. Cabe señalar que estos dos viajes deben tener al menos 2 horas de diferencia.

Finalmente, se detecta cada vez que llega la hora de salida o llegada de cada conductor, luego se cambia el estado "En Casa" al valor que corresponda (0 si está saliendo, 1 si está regresando) y se realiza el descuento de la energía correspondiente a la distancia recorrida (tanto en la ida como

en la vuelta), de forma lineal, considerando la capacidad total de la batería y el rango eléctrico del modelo que corresponda.

Para los días de fin de semana sólo se realiza un pequeño cambio, el cual consiste en que los viajeros que tienen un perfil tipo trabajador, se comportan igual que los de perfil libre, considerando que estos últimos mantienen las mismas probabilidades de viaje de los días de semana.

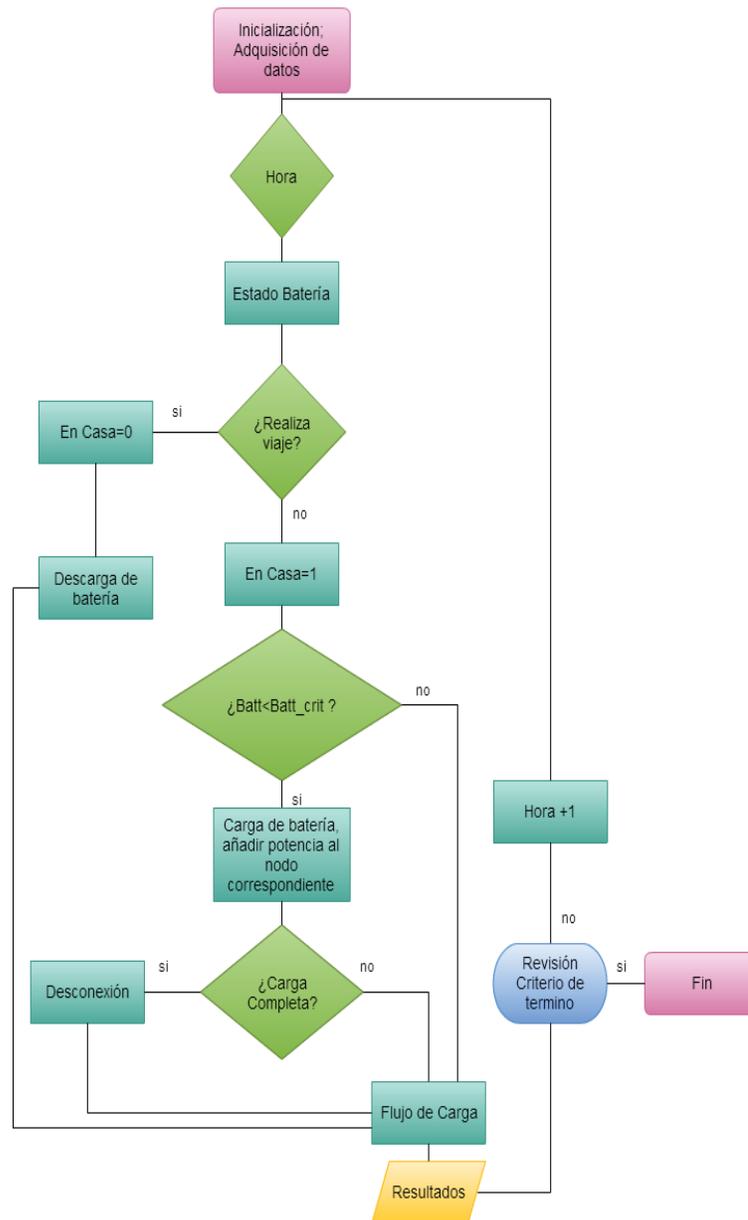


Figura 6-1 Diagrama de flujo de la simulación [61]

6.3 Batería

Antes de comenzar la carga de baterías, se revisan los niveles de batería de los vehículos híbridos, y si son menores al 15% de su capacidad total, la carga se fija en 15%. Esto representa que, al llegar a ese porcentaje, se comienza a utilizar el motor de combustión interna. Luego, la simulación continúa dependiendo del tipo de carga que se realice, las cuales se describen a continuación.

6.3.1 Carga libre

En caso de que la modalidad de carga sea libre o sin control, cada vez que los conductores lleguen a sus respectivos domicilios revisarán un criterio personal basado en un estudio de psicología al respecto, y conjuntamente, estimarán energía necesaria para el próximo viaje. Si la energía de la batería es menor a su criterio personal o si la carga no es suficiente para cubrir el próximo viaje, los usuarios cargarán sus vehículos, sumando energía a la batería según la potencia y eficiencia de carga, añadiéndose también como carga en el nodo correspondiente. La carga dura hasta que la batería esté llena o hasta que el vehículo tenga que salir nuevamente.

6.3.2 Carga off-peak

Para una carga tipo off-peak, los usuarios revisan los mismos criterios que en la carga libre, pero lo hacen a las 01:00 am, cuando ya ha terminado el periodo de mayor demanda del sistema. Por lo tanto, para la obtención del periodo de carga de la Figura 3-1, se considera el requerimiento de energía del usuario, comenzando siempre la carga a las 01:00 am y finalizando cuando la batería esté completamente cargada, o cuando el vehículo vuelva a realizar un viaje. Esto provoca que la carga de todos los vehículos se concentre en las primeras horas de la madrugada, y decrezca gradualmente a medida que los vehículos con menor capacidad energética van llenando sus baterías. La carga de cada VE, al igual que en el caso anterior, dura hasta que la batería esté completamente cargada o hasta que el conductor tenga que salir de su domicilio.

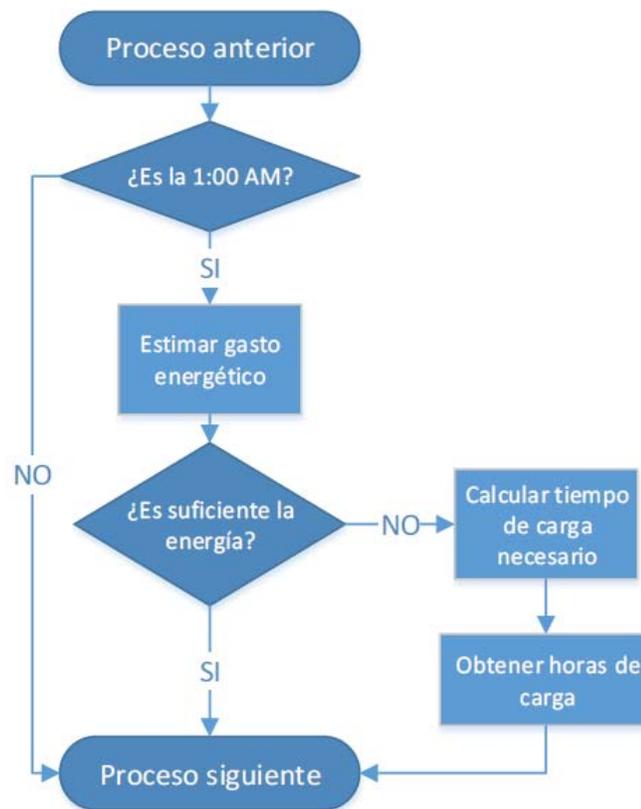


Figura 6-2 Diagrama flujo de carga para off-peak [61]

6.3.3 Carga descentralizada

Si para la carga se decide utilizar la estrategia descentralizada, cada vehículo recibirá una de las tres curvas de precio graficadas en la Figura 3-2. Al no ser parte del presente proyecto el estudio de las tarifas más idóneas para la aplicación de esta estrategia, el precio específico no es tema, sino la relación entre ellos (cual es menor, y cual es mayor). Cada curva es asignada a un tercio de los transformadores o nodos de cada alimentador, para así repartir la demanda. Es importante señalar que en un mismo nodo puede haber varios vehículos conectados, ya que éstos representan a los transformadores de media tensión.

Las curvas cubren desde las 01:00 am a las 09:00 am. Considerando que lo más temprano que puede salir un conductor en un día de semana es a las 05:00 am (lo cual tiene una baja probabilidad de ocurrencia), el conductor tiene una ventana de tiempo de 4 horas en las que puede cargar el vehículo, con una cantidad de energía de 13 kWh aproximadamente, cantidad suficiente para cubrir hasta los viajes más largos posibles dentro de la simulación.

A las 01:00 am de cada día, pero después de haber obtenido los viajes que realizará ese día, cada usuario estima la cantidad de energía que va a necesitar para cubrir sus viajes, y si la batería no tiene suficiente energía, calcula el tiempo de carga necesario y a este se le suma una hora más. La

primera hora de carga será la que tenga el mínimo costo, luego para la segunda hora, comparará las horas inmediatamente anterior e inmediatamente posteriores, y seleccionará la que tenga el menor precio. El proceso se repite hasta completar el tiempo de carga necesario. En caso de encontrarse con un límite, como la hora de inicio de la curva, la hora final o la hora de salida del vehículo, las horas de carga posteriores son automáticamente asignadas en las horas disponibles contiguas al periodo ya obtenido, hasta completar el tiempo de carga total necesario. Si la batería cuenta con suficiente energía para cubrir los viajes, la batería no se carga hasta el otro día.

Obtenido el periodo de carga de cada vehículo, cada vez que la simulación llegue a una hora de carga de alguno de ellos, se le añadirá la energía correspondiente a la potencia durante una hora (considerando la eficiencia del proceso), a la vez que se suma la potencia a la demanda en el nodo correspondiente. La carga se realizará hasta la hora final del periodo previamente calculado.

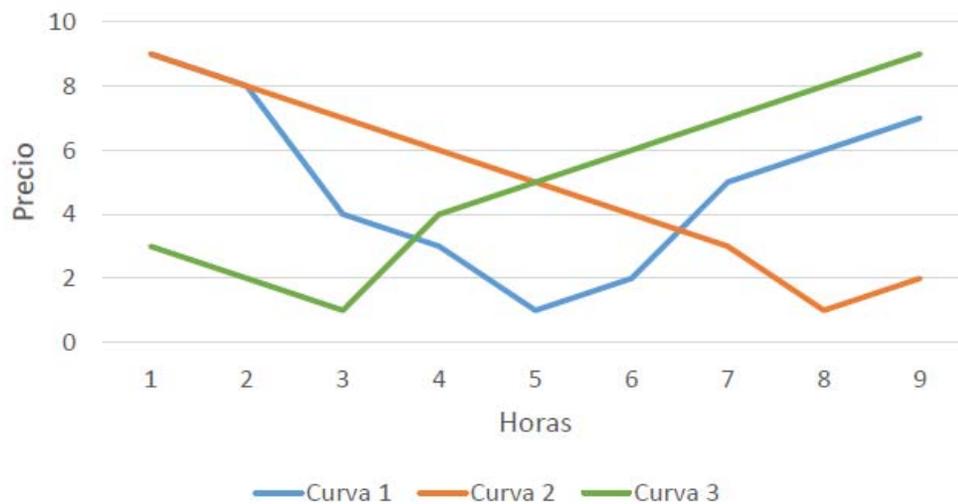


Figura 6-3 Gráfico curva de precios [61]

6.4 Obtención de índices

Finalmente, y ya con las demandas de cada nodo ajustadas según la carga de vehículos eléctricos, se realiza un flujo de carga radial, basado en el método de suma de potencia.

Posteriormente, se guardan los datos obtenidos del flujo de carga en cada iteración. Al finalizar todo el proceso iterativo se calculan los índices establecidos en el capítulo anterior para el posterior análisis, relacionados a la tensión de los nodos, la cargabilidad de las líneas y a las pérdidas del sistema. Además, se grafican las variables de interés, como por ejemplo las curvas de demanda de potencia activa.

7 Resultados y análisis

Debido a la gran cantidad de variables aleatorias existente en la simulación, es necesario repetir las simulaciones utilizando el método de Montecarlo, para así obtener un promedio para cada índice y gráfico. Se decidió ejecutar 20 veces la simulación para cada combinación de porcentaje de penetración y estrategia de carga utilizada, obteniéndose los siguientes resultados.

7.1 Pérdidas de energía

Dentro de las variables más importantes a considerar al implementar vehículos eléctricos en una red de distribución son las pérdidas, ya que con esto se puede obtener la eficiencia de la red. Estas pérdidas son mostradas en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Perdidas de energía de la red

Porcentaje de VE	Carga Libre	Off-peak	Estrategia descentralizada
0%	39,7 MWh	39,7 MWh	39,7 MWh
10%	43,9 MWh	41,2 MWh	41,1 MWh
30%	54,1 MWh	46,2 MWh	44,8 MWh
50%	66,4 MWh	54,0 MWh	50,2 MWh

Como se aprecia en la tabla anterior al 10% de porcentaje de vehículos eléctricos las pérdidas entre métodos de cargas no son tan diferentes, pero al llegar al 30% la diferencia entre la carga libre y las dos estrategias de carga son notorias desde un 17% hasta un 20%. Ya llegando a un valor del 50% de vehículos ya la carga libre es mayor a 23% respecto a las estrategias de carga. Comparando las dos propuestas se puede notar que la estrategia de descentralización tiene un mejor rendimiento que la de Off-peak llegando a ser un 7% más eficiente.

7.2 Tensión en los nodos

En este punto más que nada es mostrar la tensión más baja registrada durante la simulación para cada estrategia de carga, mostradas a continuación en la Tabla 7-2

Tabla 7-2 Tensión mínima registrada para cada estrategia

Porcentaje de VE	Carga Libre	Off-peak	Estrategia descentralizada
0%	0,9743	0,9743	0,9743
10%	0,9742	0,9743	0,9743
30%	0,9741	0,9743	0,9743
50%	0,9730	0,9742	0,9743

La caída de tensión en la carga libre es notoria pero no tan importante como para considerarse fuera de norma (0,95), por otro lado, las dos estrategias mantienen la tensión mínima puesto que donde hay mayor caída de tensión es fuera del horario donde estas estrategias actúan, alrededor de las 20 horas es que se produce esta caída.

7.3 Cargabilidad de las líneas

En tema de cargabilidad, se procede a evaluar dos puntos, el primero es el elemento más sobrecargado del sistema y el promedio de cargabilidad de las líneas. Para el primero como se puede observar en la Tabla 7-3 hasta el 10% de vehículos eléctricos mantiene el mismo valor de cargabilidad máxima, pero para casos de 30% la carga libre sube en 7%, las otras dos estrategias se mantienen igual, ya llegando al 50% de VE la estrategia off-peak se dispara llegando a un a cargabilidad máxima de 93.4% , si lo comparamos con la estrategia descentralizada que mantiene su cargabilidad máxima, se puede asegurar que en este sentido la carga off-peak es válida para una bajo porcentaje de vehículos eléctricos.

Tabla 7-3 Cargabilidades máximas del sistema

Porcentaje de VE	Carga Libre	Off-peak	Estrategia descentralizada
0%	81,62%	81,62%	81,62%
10%	81,92%	81,62%	81,62%
30%	87,75%	81,62%	81,62%
50%	99,67%	93,40%	81,62%

En el caso de la cargabilidad promedio para los tres casos va aumentando casi linealmente como se aprecia en la Tabla 7-4 y la estrategia de off-peak con la descentralizada se mantienen en valores iguales a medida que aumentan los VE. En comparación entre las estrategias y la carga libre, se puede notar que existe una variación del 1%, lo cual no es significativo.

Tabla 7-4 Cargabilidad promedio del sistema

Porcentaje de VE	Carga Libre	Off-peak	Estrategia descentralizada
0%	11,97%	11,97%	11,97%
10%	12,78%	12,43%	12,43%
30%	14,49%	13,34%	13,35%
50%	16,18%	14,26%	14,27%

7.4 Demanda máxima

Un punto importante a analizar es la demanda máxima del sistema puesto que se puede observar de manera más clara posible que tan buena es una estrategia, y al comparar los métodos se puede observar que la carga libre no es la mejor opción, luego al llegar a 50% de VE la estrategia descentralizada sigue manteniendo la demanda peak inicialmente, cuando se simula para un 90% de VE la carga descentralizada supera la demanda máxima inicial del sistema, con lo cual se hace necesario un arreglo a la red para soportar esta nueva demanda.

Tabla 7-5 Demanda máxima del sistema en MWh

Porcentaje de VE	Carga Libre	Off-peak	Estrategia descentralizada
0%	27,81	27,81	27,81
10%	30,15	27,81	27,81
30%	35,35	27,81	27,81
50%	40,16	36,41	27,81
90%	50,61	53,95	34,96

7.5 Gráficas comparativas

En este apartado se procede a mostrar las gráficas de la simulación, en el cual se mantiene una curva base sin vehículos eléctricos en color azul y otra en color rojo representara la curva modificada por los vehículos eléctricos, con el fin de poder comparar de forma visual las diferencias entre cada estrategia y sus curvas características. Para cada caso y para cada estrategia se explicará y comparará entre ellas a continuación.

7.5.1 Parque vehicular eléctrico del 10%

Carga libre

En carga libre se aprecia en la Figura 7-1 que la curva aumenta un poco respecto a la base, la cargabilidad aumenta un poco también, superponiéndose a la curva azul, por lo cual grandes cambios en general no existen, pero se tiende a entender que crecerá de forma similar a su condición inicial y con una leve tendencia a tener un peak más grande a las 20:00 horas. Respecto a la cargabilidad se aprecia que en horario diurno este aumenta, pero manteniendo un valor muy cercano de cargabilidad máxima.

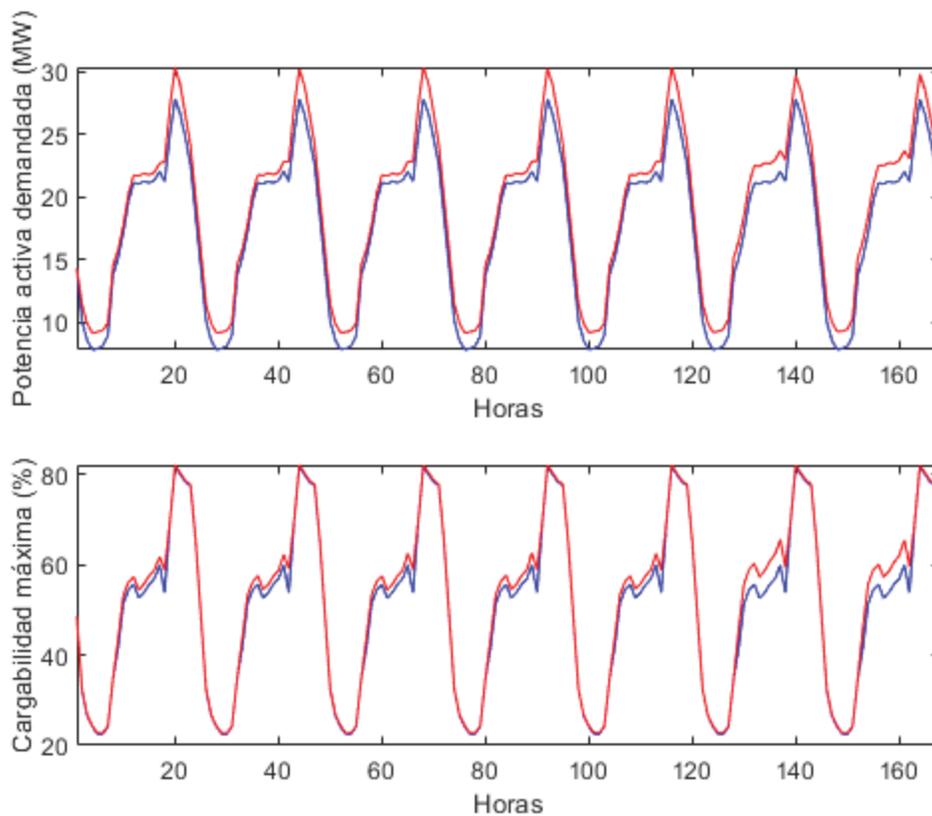


Figura 7-1 Carga libre para el 10%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

Carga Off-Peak

La carga off-peak tal como se explicó con anterioridad, es llevar todo el consumo de carga de vehículos eléctricos al horario donde existe menor demanda, esto es entre las 01:00 y las 05:00 am, por lo cual se observa en la Figura 7-2 que existe un leve crecimiento de la gráfica en este horario, pero queda en evidencia que para este porcentaje de vehículos eléctricos la carga se reparte de buena manera, la cargabilidad no tiene cambios notorios con este porcentaje.

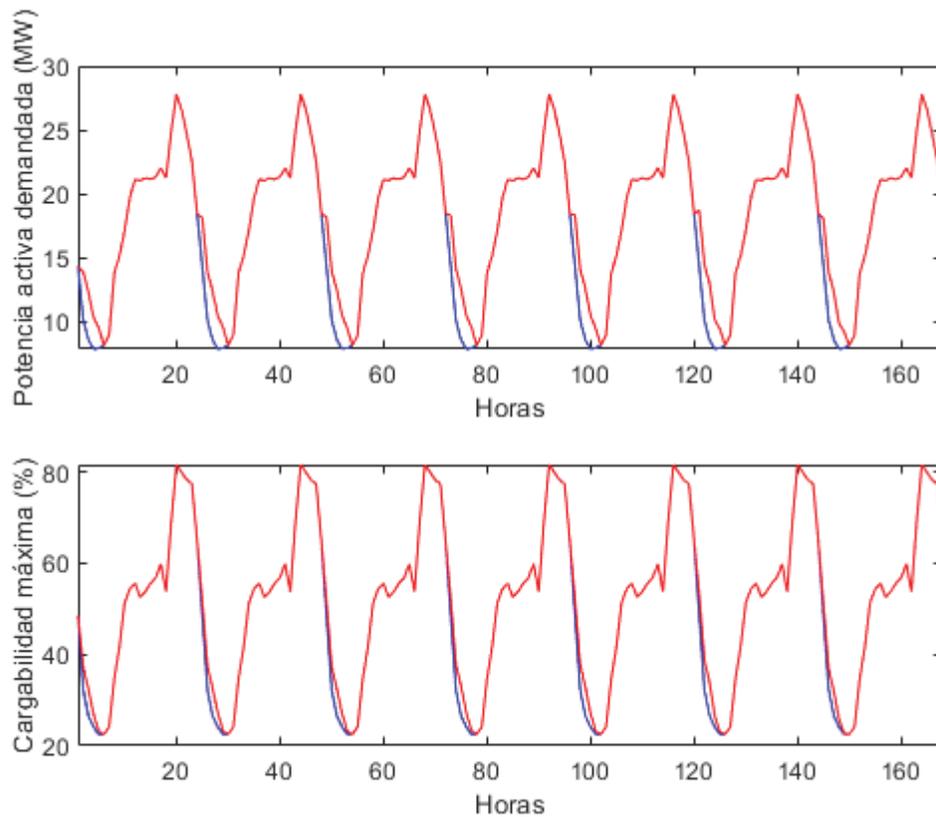


Figura 7-2 Carga Off-peak para el 10%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

Carga descentralizada

Con las tres curvas de precios ingresadas se aprecia en la Figura 7-3 que se distribuye la carga de buena manera en los horarios estipulados, aumentado la demanda en horario donde esta era más baja, la cargabilidad aumenta muy poco casi no es perceptible por lo cual se puede entender que este método funciona de buena manera para este porcentaje de vehículos eléctricos.

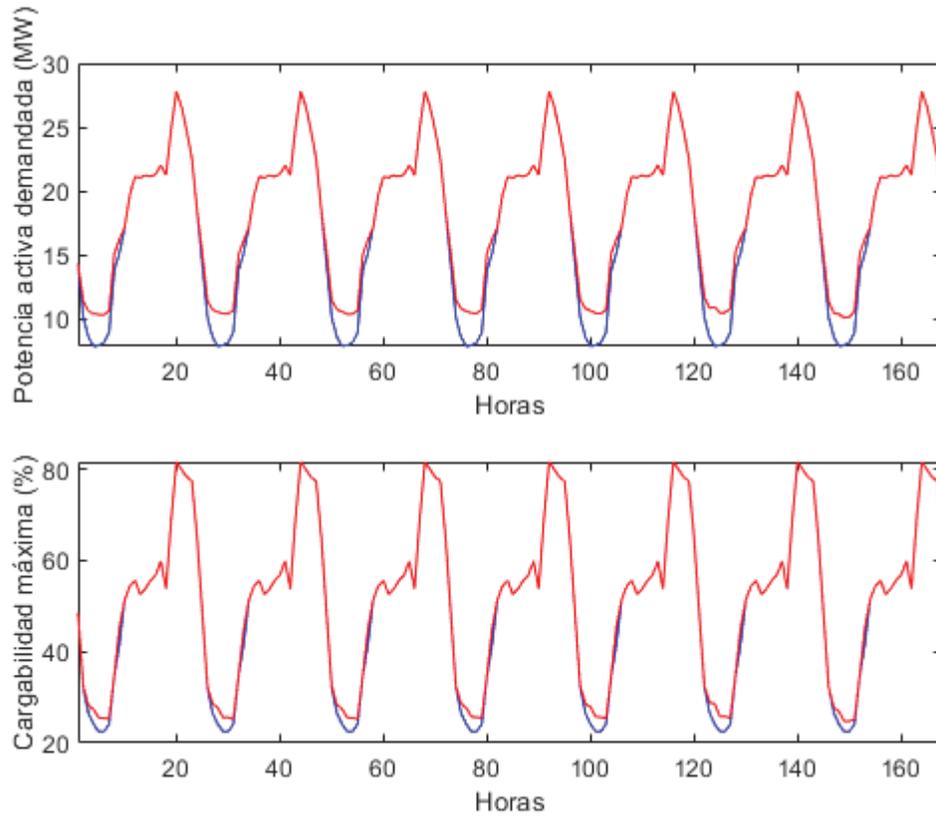


Figura 7-3 Carga descentralizada para el 10%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

7.5.2 Parque vehicular eléctrico del 30%

Carga libre

Con un 30% las cosas cambian, se aprecia en Figura 7-4 como el peak anterior aumenta notoriamente y además el resto de la curva tienen a aumentar también, por lo cual se podría decir que ya a este porcentaje los vehículos eléctricos afectan de gran manera a la red ya que además la cargabilidad también aumento notoriamente.

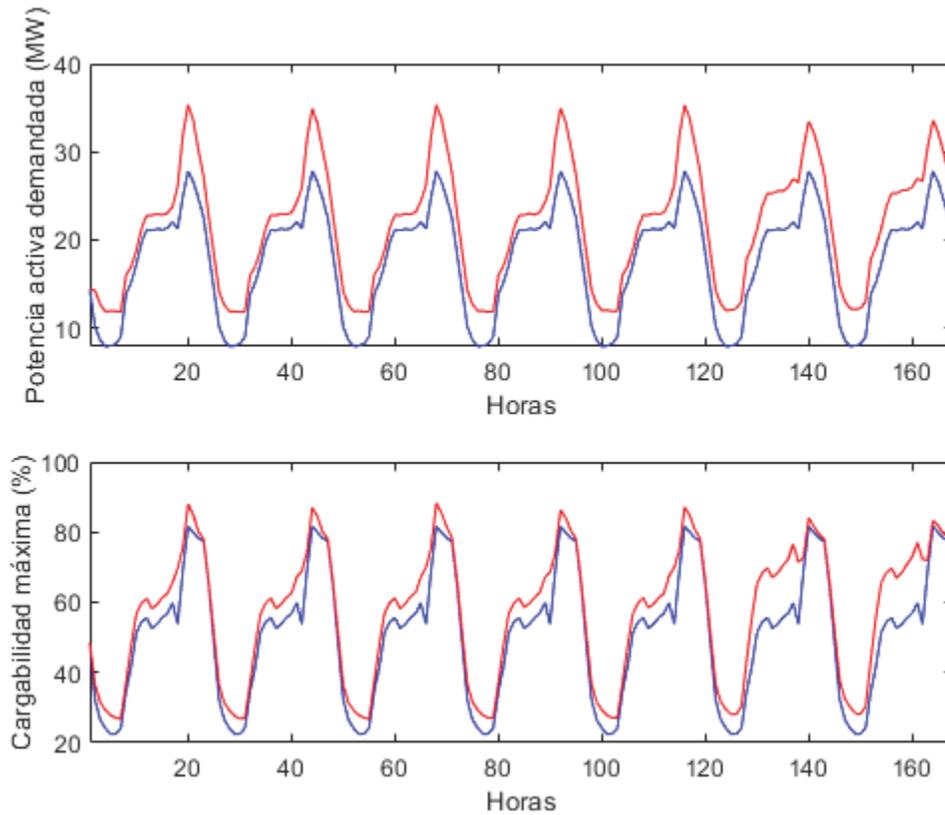


Figura 7-4 Carga libre para un 30%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

Carga Off-peak

Al llegar al 30% se ve claramente en la Figura 7-5 que se está formando un nuevo peak durante la madrugada con lo cual también empieza a aumentar la cargabilidad en este horario, hasta el momento esta estrategia aun funciona y cumple el objetivo de mantener el sistema sin aumentar su peak demanda y la cargabilidad aún mantiene valores máximos anteriores y el sistema aguanta bien la nueva carga.

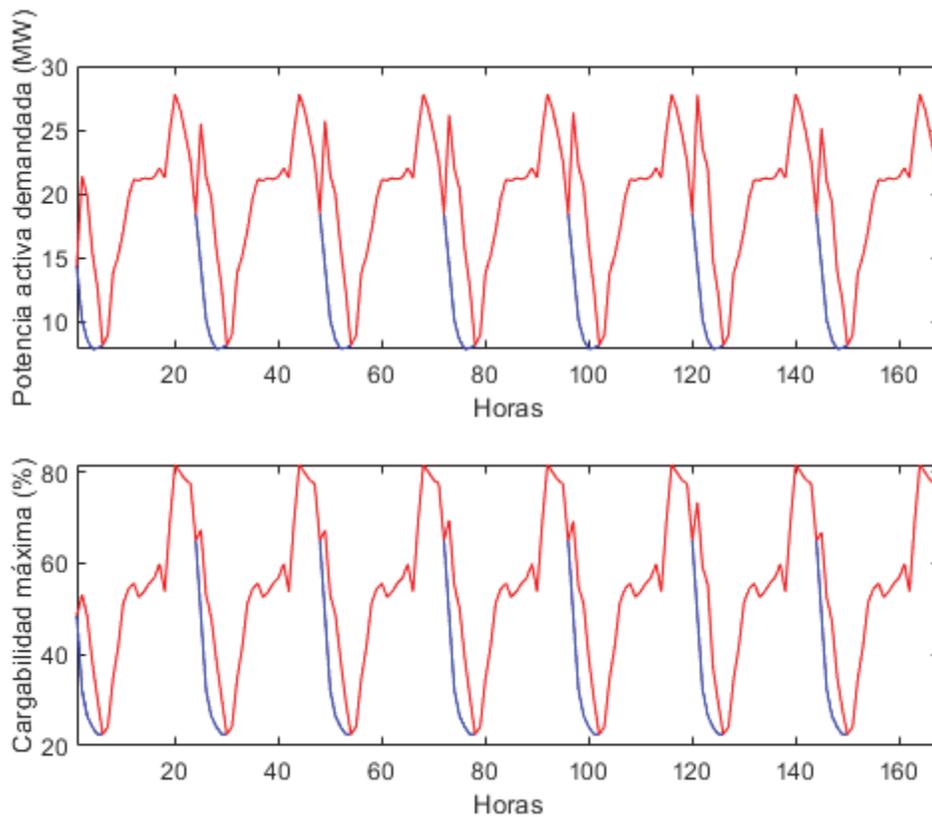


Figura 7-5 Carga Off-peak para 30%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

Carga descentralizada

Este tipo de estrategia responde de buena manera como se aprecia en Figura 7-6 ya que aumenta de buena manera el consumo durante los horarios de baja demanda, no existen nuevos peak de demanda y esta curva tiende a aplanarse, además la cargabilidad máxima al igual que en el caso de off-peak se mantiene igual.

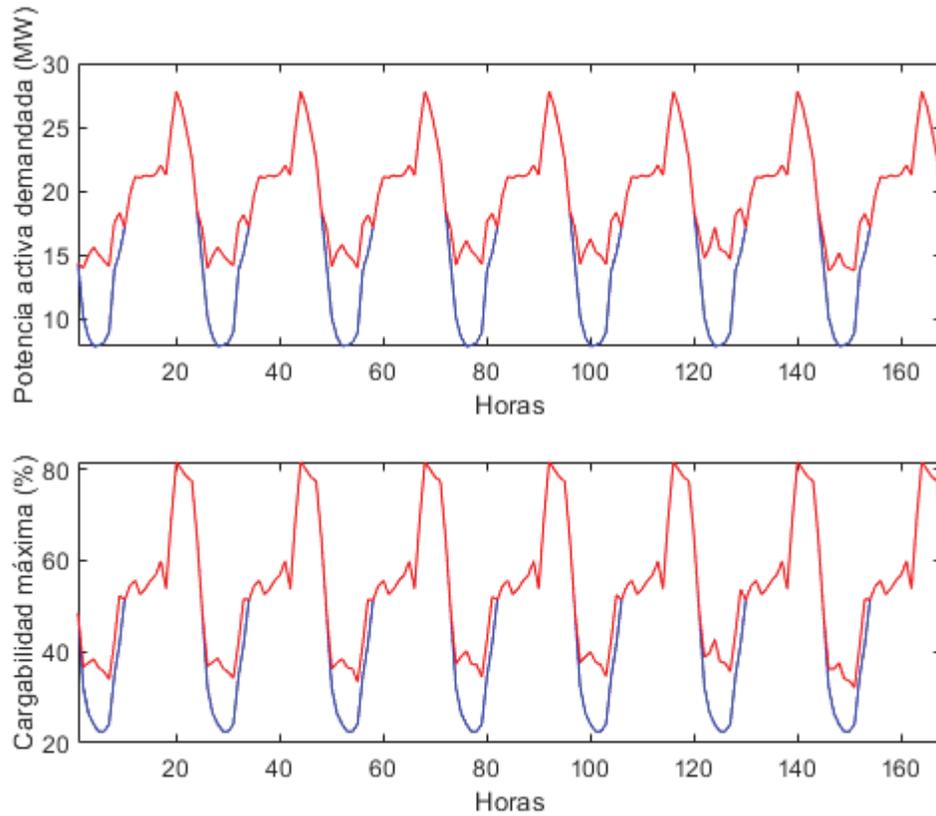


Figura 7-6 Carga descentralizada para 30%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

7.5.3 Parque vehicular eléctrico del 50%

Carga libre

Ya para el caso del 50% este sistema tiene un peak de demanda muy grande a las 20:0 horas como se ve en Figura 7-7 por lo cual la cargabilidad máxima bordea el 100% por lo cual ya este sistema se vuelve descartable totalmente, se recomienda tener un sistema de control de carga.

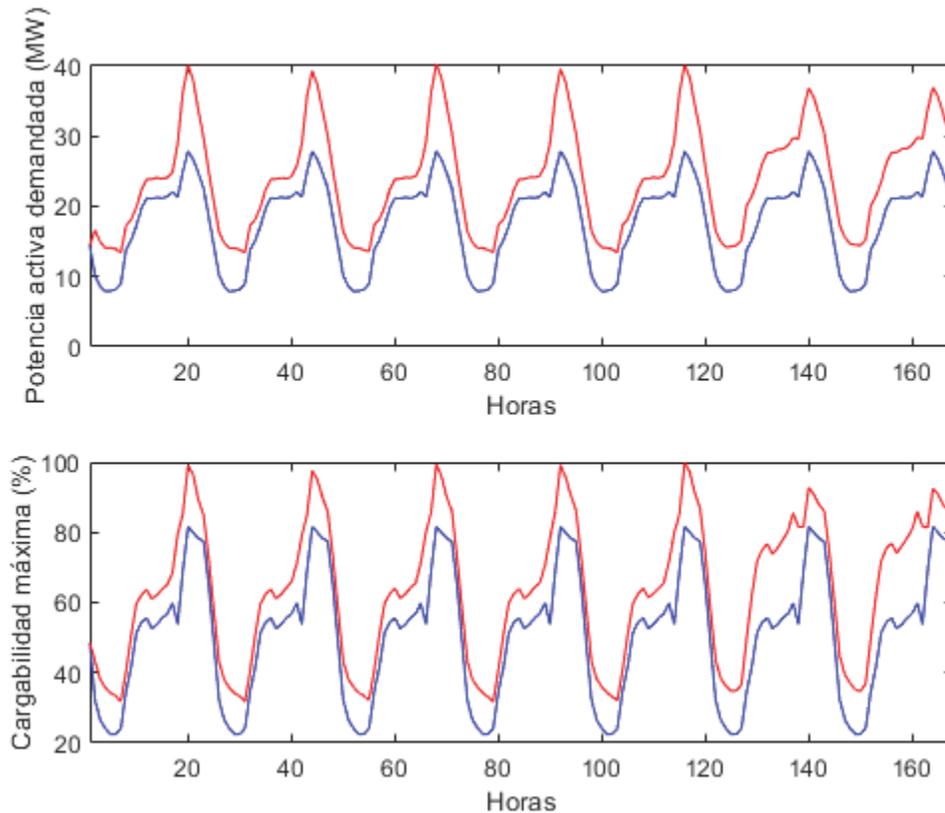


Figura 7-7 Carga libre para 50, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

Carga Off-peak

Al llegar al 50% esta forma de control tiene el problema que el peak de demanda (ver Figura 7-8) se traslada a la madrugada y la cargabilidad está en un 93,4% por lo cual está llegando a su límite y este tipo de estrategia no sería válido, entonces para un porcentaje mayor sería necesario utilizar otra forma de control o estrategia de carga.

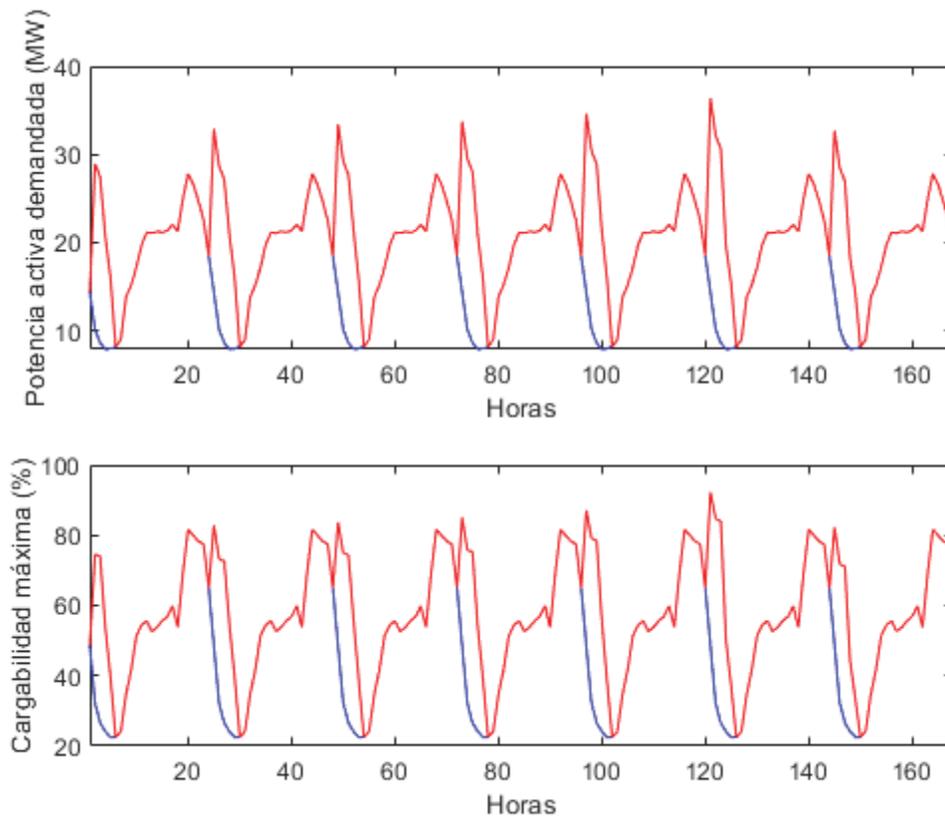


Figura 7-8 Carga Off-peak para 50%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

Carga descentralizada

En este caso es el que mejor responde puesto que el peak de demanda se mantiene y además la curva se aplanana como se ve en la Tabla 7-9. Aunque la cargabilidad máxima aumente en horario de madrugada, este no supera los 81,62% máximos que se tenía a las 20:00 horas, con todo esto se puede decir que el sistema responde de excelente manera con este tipo de control.

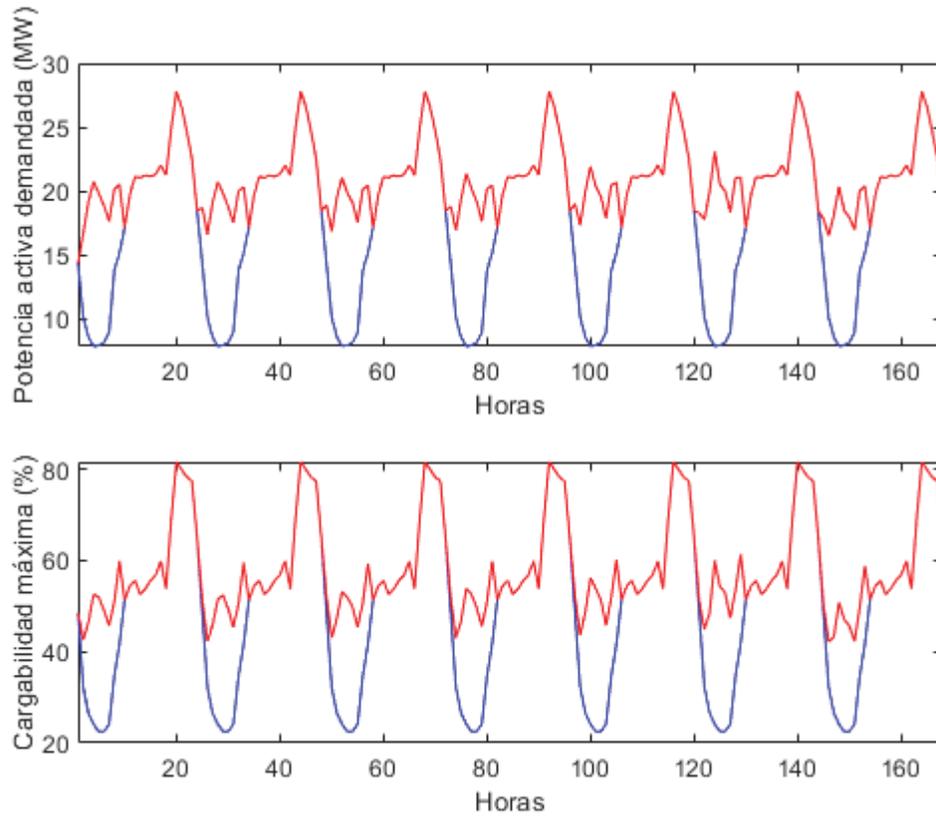


Figura 7-9 Carga descentralizada para 50%, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

7.5.4 Caso particular del 90 % de VE

Solo a modo de prueba se intenta para ver qué tan eficiente es la estrategia descentralizada, pero al mirar la Figura 7-10 se aprecia que se forma un nuevo peak de demanda al igual que en el off-peak y la cargabilidad llega al 100% por lo cual se hace pertinente redimensionar la red para un parque vehicular eléctrico que ronde entre el 85 y 90%.

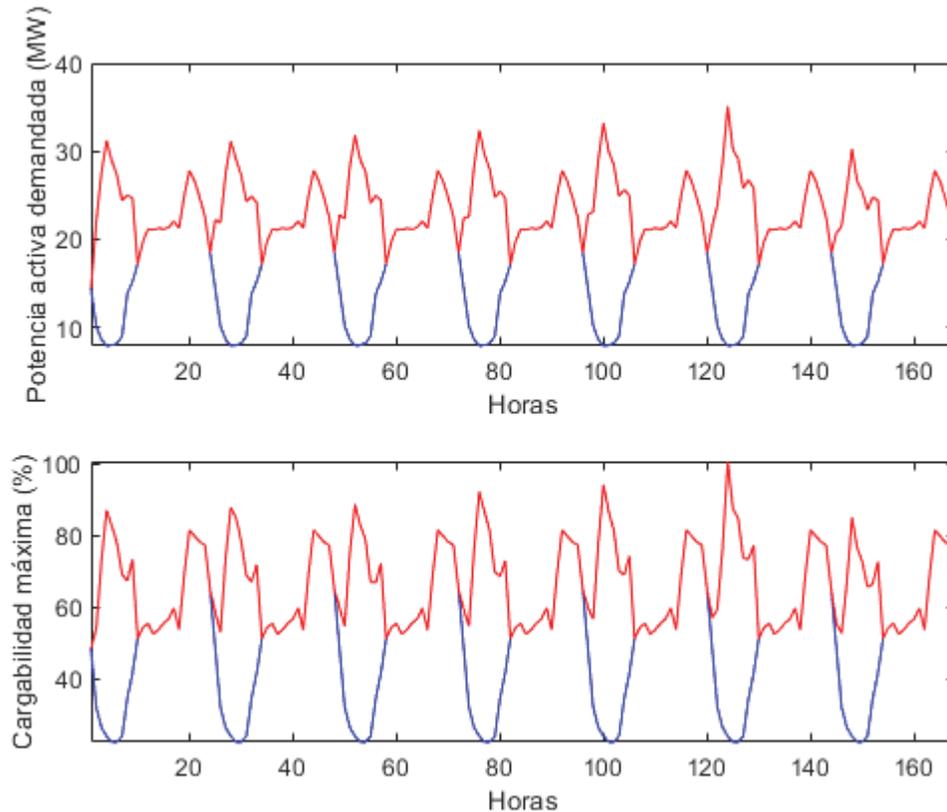


Figura 7-10 Estrategia descentralizada para 90% de VE, en azul demanda normal, en rojo nueva demanda

7.6 Análisis de datos

Se hace indispensable poder llevar nuestro sistema a problema real, con lo cual se hace necesario sobreponer la red sobre el plan de Valparaíso, para así poder ubicar mejor cualquier tipo de problemática de la red, por lo cual queda como se muestra en la Figura 7-11.

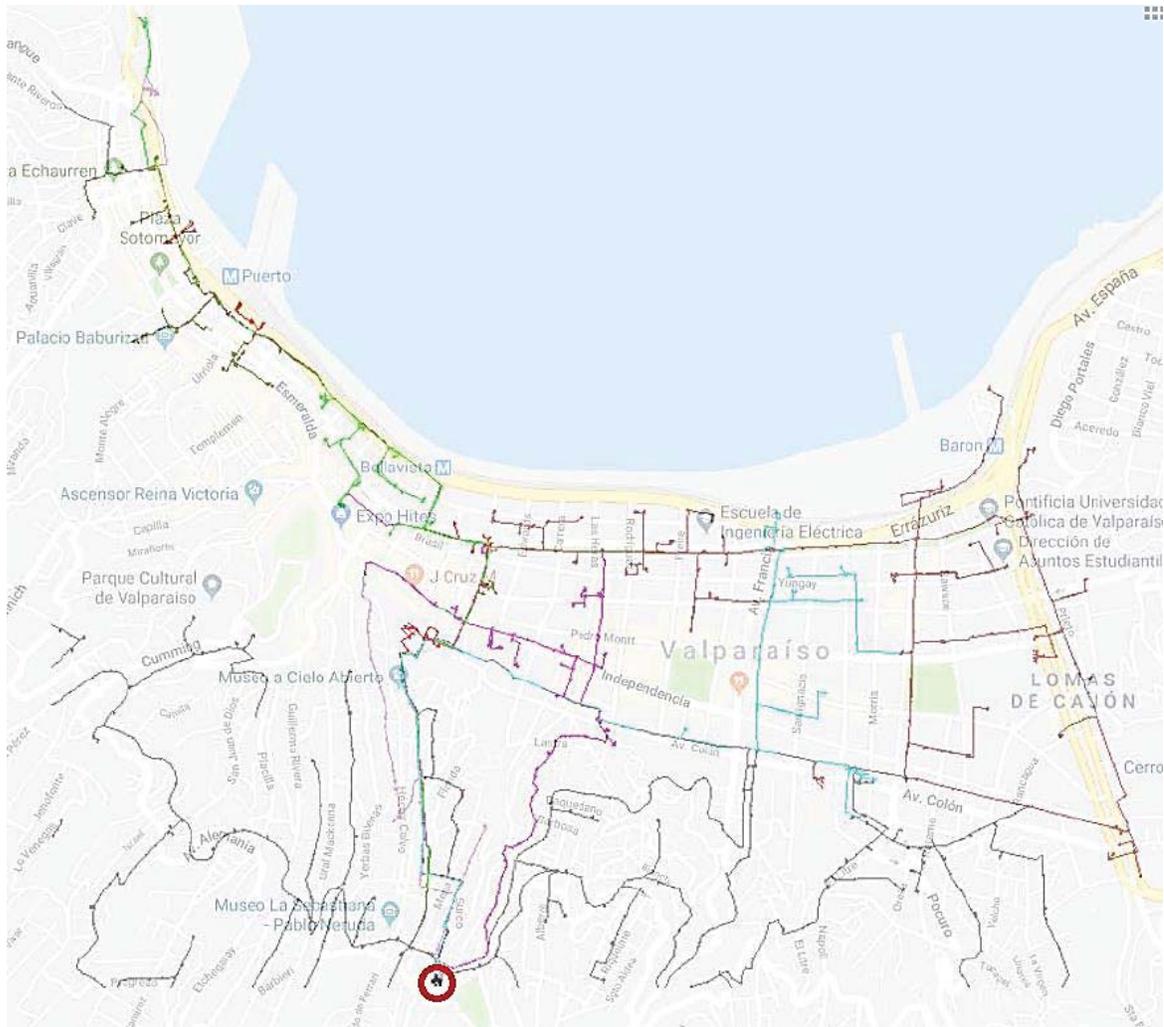


Figura 7-11 Red de SSEE Valparaíso georreferenciada [ELABORACION PROPIA]

En el círculo rojo se enmarca la subestación Valparaíso, para temas de intercepción de la Encuesta de Origen y Destino (EOD) con la información de la red, es que solo se dejó los siguientes alimentadores.

- Brasil (café)
- Errazuriz (rojo)
- Francia (cian)
- Independencia (magenta)
- Puerto 1 (verde limón)
- Puerto 2 (verde oscuro)
- TPS (rosa)

En gris se aprecia a mano derecha el alimentador Uruguay, pese a que tiene una pequeña parte en el plan de Valparaíso la gran cantidad de cargas están ubicadas en el cerro. También en la misma temática está el alimentador el Sauce, en gris al lado izquierdo de la SSEE. Los dos

alimentadores restantes son Colon y Expreso Baquedano, estos no son considerados por el bajo impacto que tendría sobre el estudio.

Con los alimentadores considerados se asumió que Brasil, Puerto 1 y Puerto 2 serían asociados a carga comercial, TPS sería asociado a carga de tipo industrial y el resto sería considerado como carga tipo residencial, todo esto para facilitar el cálculo, ya que no se tiene información empírica de la curva de demanda de cada TTDD.

7.6.1 Tensión de nodos

La tensión más baja registrada fue en el alimentador Puerto 1, el nodo en cuestión está ubicado en el sector de avenida Altamirano a la altura del Molo (ver Figura 7-12), se asocia a una empresa portuaria por lo cual se entiende que tenga una carga de consumo alto, alrededor de los 5[MW] por lo cual la caída de tensión es mayor, independiente de la estrategia a usar.



Figura 7-12 Ubicación de las cargas más altas del sistema.

7.6.2 Cargabilidad

En este punto se tienen varias líneas con sobrecarga para lo que sería la estrategia Off-peak los puntos de mayor cargabilidad son:

- Sector Ripley: En el sector existe una alta cantidad de edificios por lo cual existe alta concentración de habitantes con esto es posible decir que es muy probable que exista una sobrecarga de las líneas en este sector, pero para que este valor pudiera ser cierto debiese existir algún tipo de centro de carga para cada edificio del sector lo cual a corto plazo no sea posible por los precios actuales.
- Sector Condell: Ubicado en la calle Condell, este sector tiene una alta población ya que existen edificios, muy parecido al caso anterior.
- Sector Colón: Existe una alta concentración de viviendas por lo cual si existiera una alta cantidad de vehículos eléctricos las líneas estarían sobrecargadas.
- En general si se toma en cuenta los sectores anteriormente nombrado podemos apreciar que el problema principal es la zona residencial (Ver Figura 7-13), esto sería todo lo que es el alimentador Independencia (en color magenta en la Figura 7-11), se hace necesario ya al llegar al 50% de vehículos eléctricos que exista alguna modificación en este sector si es que no existiera un tipo de control descentralizado como el propuesto anteriormente.

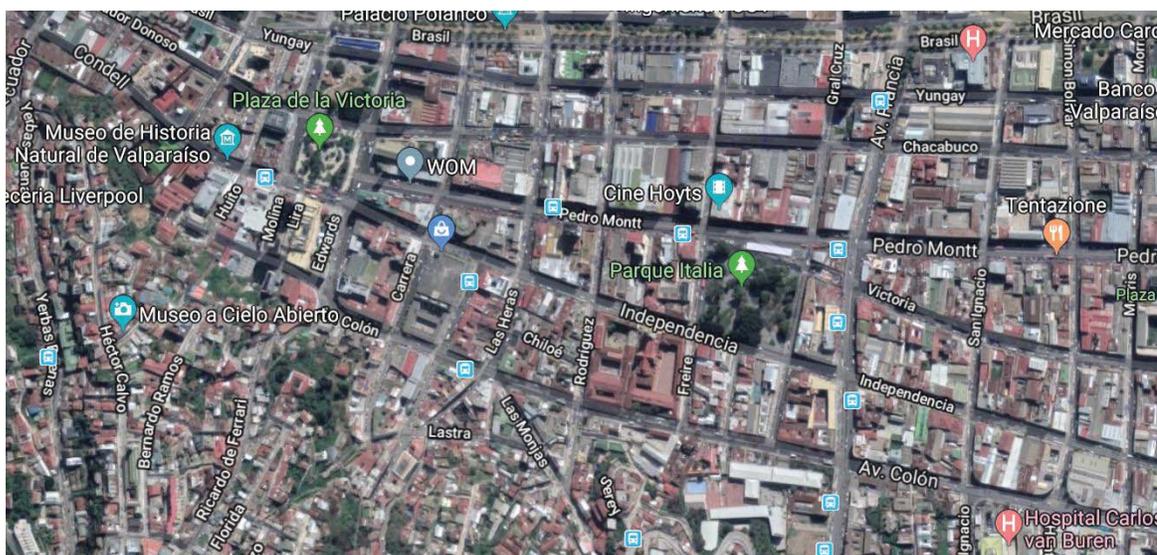


Figura 7-13 Vista satelital de Valparaíso centro

7.6.3 Pérdidas

En general para un 30% de penetración de vehículos eléctricos en la matriz vehicular no es tan problemático como se esperaría, independiente del método a utilizar, lo que si se hace hincapié en que si se piensa de aquí a unos 25 años es necesario cambiar o robustecer la red eléctrica existente para poder aguantar las nuevas cargas. En el gráfico de la Figura 7-13 que se muestra a continuación se ve la diferencia entre los métodos.

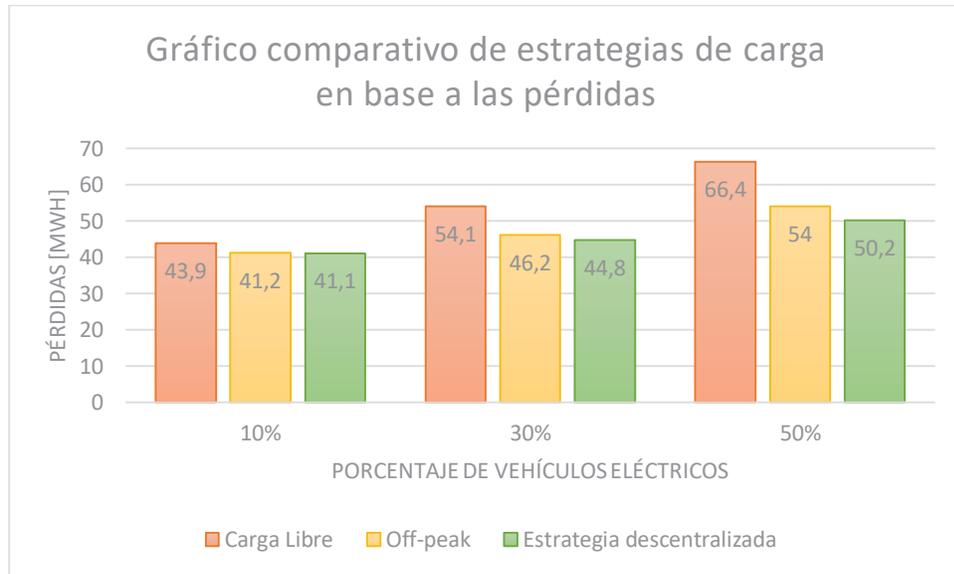


Figura 7-14 Gráfico comparativo entre estrategias

Comparando los métodos para una cantidad igual al 50% de vehículos eléctricos podemos ver que utilizando una estrategia off-peak se ahorra un 19% en pérdidas y con la estrategia descentralizada se ahorra un 24,3% con lo cual si hablamos de MWh un 5% de ahorro es bastante considerable si comparamos las dos estrategias.

Discusión y conclusiones

Dentro de lo más destacable en lo que se refiere a la lectura de los antecedentes, es tener una idea clara de cuáles son los vehículos más vendidos en el país, puesto que lo importante para analizar la carga y descarga de un automóvil eléctrico es la capacidad de su batería, y el tipo de carga, teniendo estos dos datos se puede saber cuánto tiempo demorara en cargarse, esto es fundamental para tener el valor de lo que consume ya que se puede saber cuánto es lo que demandara a la red y en su defecto como se comportara la curva de demanda.

Analizada la información y antecedentes de las redes de distribución y los vehículos eléctricos, se puede hacer una idea de que es necesario que exista algún tipo de control en la carga de los vehículos eléctricos, ya que al dejar que la ciudadanía decida cuando cargar su vehículo sin ningún tipo de restricción, conlleva a que se dispare el peak de demanda produciendo posibles daños a la red, quedando claro que las dos opciones más viables son aplicar un régimen de multitarifas, dando precios muy alto en horas punta típicas (entre las 20 y las 23 horas), y precios muy reducidos en horarios donde la demanda baja (entre las 00 y las 07 horas).

Respecto a emisión de gases de efecto invernadero, la batería del vehículo eléctrico es el elemento que más emite este tipo de gases durante su producción, respecto a la fuente de energía que tiene un país se puede concluir que entre más energía limpias posea una matriz energética, menor será el impacto en la emisión de GEI. Considerando las variables como fabricación de vehículo y matriz energética se puede comparar con la fabricación de un vehículo a combustión, su emisión en CO₂eq a través de su tubo de escape, considerando también la obtención del combustible, se puede concluir que de todos modos el vehículo eléctrico contamina considerablemente menos que un vehículo a combustión, con lo cual si sumamos que en los próximos años la obtención de las baterías ira siendo cada vez menos contaminante, que su eficiencia y duración será más prolongada, y por ultimo apostando que todos los países están en pro de energías renovables, no cabera dudas de que la huella de carbono de un vehículo eléctrico será muy pequeña en comparación a la del vehículo a combustión.

Al utilizar el programa elaborado anteriormente se modificaron algunas variables y se tuvo que adaptar la red de Valparaíso para poder lograr las simulaciones, esto llevó a hacer algunos recortes a la red dejando fuera a dos grandes alimentadores como lo son el Sauce y el Uruguay por motivos de no coincidir con el área de la macrozona “Plan Valparaíso” y generaba un problema de inconsistencia del sistema.

Trabajar esta red primeramente con DigSilent fue de gran ayuda para comparar parámetros con los simulados y obtener valores similares, estas variaciones pueden ser debido a que existían fusibles, reconectores, interruptores y presencia de líneas que terminaban en nodos sin carga, estos elementos para el programa simulado no pueden existir, debido a que originalmente en primera instancia es una red enmallada y en segundo crea una cantidad muy superior de nodos respecto a las líneas, por lo cual en el caso del programa creado se necesita una red radial con “n” líneas y “n+1” nodos.

Respecto a los datos obtenidos se puede ver que, si la carga de vehículos eléctricos se deja sin ningún tipo de control o restricción, sucede que al llegar al 30% de vehículos eléctricos, el sistema se satura provocando pérdidas considerables y cargabilidades altas, ya al llegar al 50% no es posible continuar con esta red salvo que exista una modificación al sistema.

Al analizar la carga de tipo off-peak se ajusta de buena manera hasta para cargas de 30% ayudando a evitar pérdidas considerables que se obtienen al utilizar una carga libre, pero llegando al 50% esta no es una opción viable puesto que se genera un nuevo peak de demanda en la madrugada y llevando la cargabilidad del sistema a niveles peligrosos, pero es una buena estrategia como medida inicial, podría ser una forma de transición hasta obtener un método óptimo para un gran porcentaje de vehículos eléctricos.

Se ha implementado una estrategia descentralizada sencilla, para así enfrentar las limitaciones de la estrategia de tipo off-peak, especialmente el efecto avalancha. Para esto, se recurrió a 3 curvas de precio distintas repartidas en los distintos nodos (o transformadores) de cada alimentador, con el fin de que cada conductor tome la decisión de cuando cargar su vehículo, sin tener que comunicar a terceros información que podría ser sensible. Es importante considerar que se asumió que cada conductor desea minimizar el costo de la recarga de la batería. Con esta estrategia se logró minimizar las pérdidas, la cargabilidad no llegó a niveles peligrosos al 50% de vehículos eléctricos, pero tal como se hizo el estudio del 90% este sistema fracasa, por lo cual se requiere hacer un cambio total a la red, que sea más robusta para este tipo de vehículos pueda funcionar de buena manera, ayudar al medioambiente y por último disminuir los costos de traslados ya que Chile al ir utilizando cada vez más ERNC ayuda a minimizar el costo del kWh lo que conlleva a que sea más barato trasladarse con vehículos eléctricos.

Dado que ya se tiene el estudio desarrollado en el Gran Concepción elaborado en trabajos anteriores y el realizado en el Gran Valparaíso que fue desarrollado en este trabajo, se plantea la propuesta de cómo abordar la implementación de los vehículos. A grandes rasgos se debe recurrir en establecer el tipo de carga libre, todo esto en base a los resultados obtenidos en este trabajo, ya que funciona de buena manera hasta un 10% del parque vehicular. Al tener un del 5 a 8% de VE se debe implementar de manera paulatina el método de off-peak, con el fin de que la red no se sature y que la población esté preparada para la implementación. Ya cuando se implemente totalmente esta estrategia podría funcionar perfectamente hasta el 30%. A modo de prevenir, al tener un 25% se hace necesario que se implemente un sistema de carga por curva de precios ya que resulta ser un método efectivo hasta los 50%, luego esta empieza a decaer su eficiencia lentamente. Lo ideal sería que simultáneamente cuando entre en vigencia el método de carga

descentralizada, reforzar la red para no tener problemas en un futuro, cosa que cuando ya se tenga un 50% la curva esté funcionando bien y además ya esté en construcción los elementos necesarios para tener la red en un perfecto estado. Al estar elaborando estrategia de precios y paralelamente proyectos de construcción junto con refuerzos de la red, se puede llegar a una implementación total de los vehículos eléctricos en la ciudad de Valparaíso, de todos modos, esta estrategia de implementación queda como propuestas para siguientes trabajos y con más detalle que el de este estudio.

Como propuesta para futuros estudio se puede ver dos casos inmediatos a mediano plazo, que sería la implementación de buses eléctricos tal como se ha implementado en Santiago de Chile, ya que se requerirá de alguna estrategia y lugares de carga específico para suplir a los buses actuales, como también un futuro negocio de electrolinerías con carga rápida, esta última podría ser viable a modo de estacionamientos, por ejemplo un edificio o una plaza de estacionamiento donde además de estacionar se pueda cargar el vehículo. Otro estudio interesante sería ver el efecto de las PMGD sobre una red con vehículos eléctricos, lo cual resulta atractivo dada la ley implementada hace algunos años, esto podría tener flujos inversos y cargas dinámicas, con lo que la empresa distribuidora tendría problemas futuros.

Bibliografía

- [1] CNE, «Comision Nacional de Energia,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.cne.cl>.
- [2] Comision Nacional de Energia, «Decreto Supremo N° 327,» de *Reglamento de la ley general de servicios eléctricos*, Santiago, Chile, 1998.
- [3] Patricio Concha, «Patricio Concha UBB,» [En línea]. Available: http://patricioconcha.ubb.cl/eleduc/public_www/capitulo1/clasificacion_redes.html.
- [4] I. E. Agency, «Sustainable Transport: New Insights from the idea's worldwide study,» 2001.
- [5] Turan Gönen, *Electric Power Distribution System Engineering*, CRC, 2008.
- [6] J. Duque Daza, C. Galeano Ureña y C. Mantilla González, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía*, n° 44, pp. 97-110, 2008.
- [7] Bosch, Juan, «SUSTENTATOR,» 2 Junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.sustentator.com/blog-es/2017/06/generacion-distribuida-hacia-el-sistema-electrico-del-futuro/>.
- [8] Castaño, S. R., *Redes de Distribucion de Energía*, Colombia, 2004.
- [9] Mitechnews, «Mitechnews,» Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://mitechnews.com/update/renewable-energy-policy-americans-support-net-energy-metering/>.
- [10] Hanjin, Artist, *Descripción del sistema de autoconsumo y balance neto*. [Art]. 2013.
- [11] G. Campusano Godoy, «Impacto de la generación distribuida en la operación de la distribución,» Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2013.

- [12] Apiema, «Apiema,» 4 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://apiema.org/conoce-las-redes-distribucion-electrica-inteligentes-smart-grids/>.
- [13] C. Scotland, «www.computescotland.com,» 26 Junio 2013. [En línea]. Available: <https://www.computescotland.com/finland-simulates-grid-events-6345.php>.
- [14] D. Santini, Electric Vehicle Waves of History: Lessons Learned about Market Deployment of Electric Vehicles, EEUU: Argonne National Laboratory, 2011.
- [15] Publispain, 20 Octubre 2015. [En línea]. Available: http://www.publispain.com/coches_electricos/.
- [16] K. Van Dijk,, Guía del vehículo eléctrico, Madrid, España: Fundación de la Comunidad de Madrid, 2009.
- [17] Aficionados a la mecanica, «Aficionados a la mecanica,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos.htm>.
- [18] E. Wakefield, History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles, Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, 1998.
- [19] J. Murray, B. Lane, K. Lillie y J. McCallum, «An assessment of the Emissions Performance of Alternative and Conventional Fuels,» de *Report of the Alternative Fuels Group of the Cleaner Vehicles Task Force*, EEUU, 2000, pp. 5-6,60-70.
- [20] Yimin Gao, Ali Emadi Mehrdad Ehsani, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Desing, Estados Unidos, 2010.
- [21] A. Mateo Rosso, Evaluación del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución, Madrid: Universidad Pontifica Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2010.
- [22] R. C. Electricos, «Recarga Coches Electricos,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.recargacocheselectricos.com/que-es-un-vehiculo-electrico/vehiculo-hibrido/>.
- [23] U.S. Department of Energy, 2008. [En línea]. Available: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/basics.html>.
- [24] Aficionados a la Mecanica, «Aficionados a la Mecanica,» [En línea]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/motores-hidrogeno.htm>.
- [25] I. S. Heras, Evaluacion del impacto de la generacion distribuida en sistemas de distribucion primaria de energia electrica, España: 2005, 2005.

- [26] J. Lopes y R. García-Valle, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, Springer: Power Electronics and Power Systems, 2013.
- [27] J. Staffell, L. Shang B. y G. Pollet, «Current status hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemnistry to market propects,» de *Electrochimica Acta*, EEUU, 2012, pp. 235-249.
- [28] M. Roig Estrada, *Perspectiva actual de la tecnología del coche eléctrico. Análisis de los cambios en los procesos de producción con la llegada del vehículo eléctrico*, Navarra: Universidad Pública de Navarra, 2012.
- [29] M. Ehsani, Y. Gao y A. Emadi,, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design*, EEUU, 2010.
- [30] ENDESA, «Endesa Educa,» [En línea]. Available: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/.
- [31] ENDESA, «Endesa: Vehiculo Electrico,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.endsavehiculoelectrico.com/vehiculo-electrico/el-vehiculo/tipos>.
- [32] E. Moraga, «Pulso,» La tercera, 25 Enero 2018. [En línea]. Available: <http://www.pulso.cl/empresas-mercados/rxm/los-cinco-autos-electricos-mas-vendidos-2017/>.
- [33] J. A. Aunión, «El Pais,» 23 Marzo 2017. [En línea]. Available: https://elpais.com/ccaa/2017/03/14/madrid/1489516445_282623.html.
- [34] RENAULT, «RENAULT,» 19 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://corrienteelectronica.renault.es/futuro-impacto-la-red-electrica-coche-electrico/>.
- [35] Sergio Fernandez, «Corriente Electronica,» 2016 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://corrienteelectronica.renault.es/futuro-impacto-la-red-electrica-coche-electrico/>.
- [36] J. S. y. P. R. A. J. Peças Lopes, *Identifying Management Procedures to Deal with connection of electric Vehicles in the Grid*, Bucarest, Rumania: IEEE Bucharest Power Tech, 2009.
- [37] R. Matos y M.Matos,, «Economic and technical mangement of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey,» *Euro Trans Electr Power*, 2012, pp. 334-350.
- [38] Carbono, Huella de, «www.huelladecarbono.es,» [En línea]. Available: <http://www.huellacarbono.es/apartado/general/huella-de-carbono.html>.

- [39] Green Circle Certified, «Green Circle Certified,» [En línea]. Available: <http://www.greencirclecertified.com/carbon-footprint.html>.
- [40] Achten, Victor R.J.H. Timmers y Peter A.J., “Non-exhaust PM emissions from electric vehicles, 2015.
- [41] Atmospheric Environment, Corrigendum to “Non-exhaust PM emissions from electric vehicles”, 2016.
- [42] National Geographic, «National Geographic,» 4 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.nationalgeographic.es/coche-electrico-contaminacion>.
- [43] Brand Content, «Foro Coches Electricos,» 23 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://forococheselectricos.com/2017/12/cuidados-basicos-para-la-bateria-de-un-coche-electrico.html>.
- [44] Mia Romare, Lisbeth Dahllöf, IVL Swedish Environmental Research Institute, «IVL Svenska Miljöinstitutet,» Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243%20The%20life%20cycle%20energy%20consumption%20and%20CO2%20emissions%20from%20lithium%20ion%20batteries%20.pdf>.
- [45] Michael Sivak, Brandon Schoettle, Fuel Sources for electricity in the individual countries of the world and consequent emissions from drives electric vehicles, Michigan: Universidad de Michigan, 2017.
- [46] Dale Hall, Nic Lutsey, Effects of battery manufacturing, ICCT, 2018.
- [47] Vania Dos Santos Eleuterio, Yurii Nesterov Fabian A. Chudak, «Static Traffic Assignment Problem. A comparison Between Beckmann (1956) and Nesterov & de Palma (1998) models,» de *7th Swiss Transport Research Conference*, Monte Verità, 2007.
- [48] K. Clement-Nyns, E. Haesen y J. Driesen, «The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid,» de *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, n° 1, 2010, pp. 371-380.
- [49] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses y M. A. S. Masoum, «Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile,» de *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, n° 3, 2011, pp. 456-467.
- [50] L. Pieltain Fernández, T. Gómez San Román, R. Cossent, C. Mateo Domingo y P. Frías, «Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks,» de *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, n° 1, 2011, pp. 206-214.

-
- [51] K. Clement-Nyns, E. Haesen y J. Driesen, «The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid,» *Electric Power Systems Research*, n° 81,» 2011, pp. 185-192.
- [52] E. Sortomme, M. M. Hindi, J. S. MacPherson y S. S. Venkata, «Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses,» de *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, n° 1, 2011, pp. 198-205.
- [53] L. Dow, M. Marshall, L. Xu, J. Romero Agüero y H. Lee Willis, «A Novel Approach for Evaluating the Impact of Electric Vehicles on the Power Distribution System,» de *Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, IEEE, 2010, pp. 1-6.
- [54] G. Carpinelli, P. Caramia, F. Mottola y D. Proto, «Exponential weighted method and a compromise programming method for multi-objective operation of plug-in vehicle aggregators in microgrids,» de *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, pp. 374-384.
- [55] J. García-Villalobos, I. Zamora, J. San Martín, F. Asensio y V. Aperribay, «Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart grid charging approaches,» de *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, 2014, pp. 717-731.
- [56] J. Bishop, C. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister y M. McCulloch, «Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV,» de *Applied Energy*, vol. 111, 2013, p. 206–218.
- [57] K. Clement-Nyns, E. Haesen y J. Driesen, «The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid,» de *Electric Power Systems Research*, n° 81, 2011, pp. 185-192.
- [58] G. Xiao, C. Li, Z. Yu, Y. Cao y B. Fang, «Review of the Impact of Electric Vehicles Participating in Frequency Regulation on Power Grid,» de *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2013, pp. 75-80.
- [59] Rodrigo Cerda, Impacto de la carga de vehículos eléctricos en las redes de distribución, Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2015.
- [60] Rodrigo Cerda, Desarrollo de plataforma de simulación y estrategia de carga de vehículos eléctricos, Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2016.
- [61] C. Vera, Desarrollo de plataforma de simulación y estrategia de carga de vehículos eléctricos, Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2016.
- [62] Instituto Nacional de Estadística (INE), «Censo 2017,» Chile, 2007.

- [63] ConnectCities, «Movilidad Amable,» 9 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://movilidadamable.org/recursos/item/encuestas-origen-destino>. [Último acceso: 8 Agosto 2018].
- [64] S. d. Transportes, «datos.gob.cl,» 2016. [En línea]. Available: <http://datos.gob.cl/dataset/eod-valpo-2014>. [Último acceso: 8 Agosto 2018].
- [65] Secretaria de Transportes, «Encuesta de Origen y Destino de Viajes del Gran Valparaiso,» Valparaiso, 2016.
- [66] Teletrece, «t13,» 26 Julio 2017. [En línea]. Available: <http://www.t13.cl/noticia/negocios/bbc/cuales-son-los-dos-paises-que-están-poniendo-fecha-de-caducidad-a-los-automoviles-que-funcionan-con-gasolina-y-diesel>.