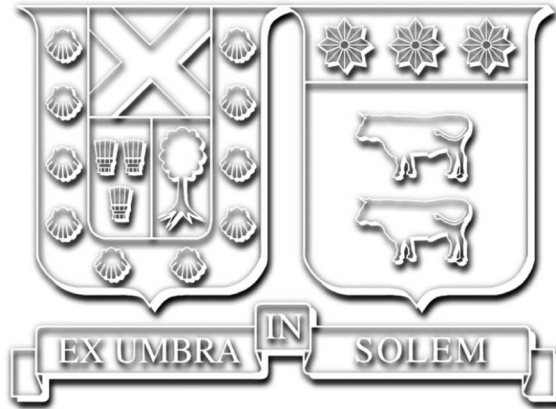




Algoritmo de respuesta de demanda para optimización de redes de distribución frente a carga masiva de vehículos eléctricos

Markos Andrés Orellana Donoso

2024

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Dr. Patricio Valdivia (UTFSM)
Dr. Esteban Gil (UTFSM)

El Quisco, V Región, 2024.

Agradecimientos

Musashi... te has vuelto amable. Y puedo ver que te has vuelto muy fuerte. Todas las personas verdaderamente fuertes son amables.....La fuerza se rinde ante la amabilidad

Takuan Sōhō

A todos los profesores de mi casa de estudios, por su enorme entrega a la labor de educación y formación de nuevos ingenieros. A pesar de todos los ramos echados y malos ratos, les tengo un respeto y cariño profundo y han sido clave en mi proceso formativo. Mención especial a mis profesores guías Dr. Patricio Valdivia y Dr. Esteban Gil por su asistencia en este proceso de memoria de título.

A mis amistades de la UTFSM, por su ayuda, por las tardes interminables de estudio que culminaban en entretenimiento en el cerrito y su bajón donde el Master o el Hot Panchos.

A la vida, por sus altos y bajos, oportunidades y desafíos, tempestades y primaveras, amores y desamores.

A mis padres, que dieron todo para que pudiera optar a un mejor pasar que ellos. Gracias por su esfuerzo

A mi padre, por querernos, regalarnos, inculcarnos las artes marciales y llevarnos de aventuras.

A mi madre, por su espontaneidad, habilidad para resolver y perseverancia, por siempre alimentarnos con comida hecha con amor y por enseñarme sus recetas.

A mi hermano, por ser un ejemplo, por su compañía durante nuestra infancia. Gracias por tu apoyo y motivación.

A mi abuelo Renán, ex-alumno de esta casa de estudios, titulado de la misma carrera a la que hoy doy término con esta memoria de título. Gracias por intrigarme en el mundo de la física y la matemática.

A mi abuela Nelda, gracias por tu cariño y amor. Hasta en los últimos días fue un gusto poder compartir contigo. Me enseñaste lo poco que se necesita para ser feliz y fuiste un ejemplo de que en la vida uno puede buscar nuevas pasiones, que nunca se está demasiado viejo para nada.

Al Tomi, mi mejor amigo de la Universidad, colega, camarada. Juntos atravesamos el ciclo universitario, lloramos, triunfamos y crecimos. Gracias por tu amistad, cariño y lealtad.

A la mar, con su furia, su ira, su melancolía, tristeza y serenidad.

Al pueblo de Las Cruces, donde tuve el comienzo de mi encrucijada espiritual que me llevó a encontrar propósito y significado en mi existencia.

A mi mejor amiga Maritza, por tu radiante energía que me inspira, por escucharme y por hacerme reír.

A mis nuevas amistades que me han acogido y recibido con cariño en esta nueva etapa de mi vida, en especial a mi grupo de Capoeira y mi grupo de Surf, templos de aprendizaje y nutrición tanto corporal como espiritual.

Al Rafa, quién fue crucial para poder realizar este trabajo, ya que de buen corazón me ayudó en la parte de programación del código e implementación de las clases y funciones, generando un

código limpio y ordenado.

A mi perro Samuel, por su leal compañía y amor incondicional.

A todas las personas que se han cruzado en mi vida y han dejado alguna lección: amistades, rivalidades, amores, guías, discípulos y guerreros.

Finalmente, a mí mismo... por creer en mí mismo, por no rendirme, por tomar riesgos, por salir de la zona de confort, por los sacrificios que realicé, por mi perseverancia, disciplina y dedicación. Por tener el coraje de seguir mi propia senda y la resiliencia para mantenerme en mi camino sin importar las dificultades, manteniendo la llama de mi corazón ardiendo y alimentando mis sueños.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	1
1 Introducción	5
1.1 Introducción	7
1.1.1 Solución propuesta	8
1.1.2 Beneficios esperados	8
1.2 Objetivos	8
2 Estado del Arte: Energía y Electromovilidad	9
2.1 Alcance del Capítulo	9
2.2 Escenario de la Electromovilidad	9
2.2.1 Impulsos a la Electromovilidad	10
2.2.2 Obstáculos	12
2.2.3 Políticas Nacionales	12
2.2.4 Planificación Energética a Largo Plazo	15
2.2.5 Otros incentivos	15
2.3 Matriz de Energía Nacional	16
2.3.1 Flexibilidad	16
2.4 Impacto de la carga de vehículos eléctricos en Redes de Distribución	18
2.5 Estructuras de control actuales	19
3 Metodología y Suposiciones	21
3.1 Suposiciones y Consideraciones	21
3.2 Agregador de demanda	24
3.2.1 Definición	24
3.2.2 Estrategias de Respuesta de Demanda (DR)	24
3.3 Bases de Datos	25
3.4 Algoritmo de Ordenamiento de Carga	25
3.4.1 FIFO	25
3.4.2 Round Robin	26
3.4.3 Algoritmo Inteligente	26
3.4.4 Modelamiento de fallas	27
3.4.5 Modelamiento de Desprendimiento de carga	28
3.4.6 Modelamiento de Desplazamiento de carga	28
3.5 Herramienta Digital	29

4	Análisis y Resultados	31
4.1	Simulaciones	31
4.1.1	Caso base 1	31
4.1.2	Caso base 2	38
5	Conclusiones	45
5.1	Conclusiones	45
6	Anexo	49
6.1	Bases de Datos	49
6.1.1	Mercado EVs Chile	49
6.2	BBDD Demanda Residencial	50
6.2.1	Demanda Neta Nacional	50
6.2.2	Singapur - EMA	51
6.3	Código de la Herramienta Digital	52
6.3.1	Clases de Datos Abstractos	52

Capítulo 1

Introducción

All human things are subject to decay, and when fate summons, Monarchs must obey

Mac Flecknoe
John Dryden

Resumen

La rápida transformación de la matriz energética nacional, impulsada por políticas que buscan reducir la dependencia del carbón para minimizar la contaminación, ha generado un aumento significativo en los proyectos de generación solar. Sin embargo, esta transición introduce desafíos relacionados con la intermitencia de las fuentes renovables, donde los niveles de generación dependen en gran medida de las condiciones climáticas y la hora del día. Esto ha disminuido la flexibilidad de la matriz energética, agravando las dificultades para equilibrar la generación y la demanda. Paralelamente, el crecimiento constante de la electromovilidad añade una capa adicional de complejidad, ya que la demanda adicional de los vehículos eléctricos (EVs) impacta la capacidad de los sistemas de distribución para suministrar energía eficientemente, especialmente en horas punta. Estos desafíos subrayan la necesidad urgente de optimizar la infraestructura de recarga residencial sin recurrir a inversiones costosas en nuevas conexiones o infraestructura adicional.

Este trabajo se centra en el diseño de un algoritmo inteligente de ordenamiento de carga para un portafolio de consumidores en un edificio residencial, compuesto por EVs con diversos requerimientos de carga y tiempos de descanso disponibles. La solución propuesta es un algoritmo de respuesta de demanda, gestionado por un agregador de demanda, capaz de redistribuir las cargas de EVs y otros consumos flexibles hacia horarios fuera de punta, además este algoritmo prioriza los EVs según sus necesidades de carga, aplanando la curva de demanda, reduce los picos de consumo y optimiza el uso de la infraestructura existente. El algoritmo desarrollado integra estrategias de Desprendimiento de Carga y Desplazamiento de Carga para mejorar la asignación de recursos de potencia en tiempo y locación.

Los beneficios clave de este enfoque incluyen la reducción de costos para los residentes mediante tarifas más bajas en horarios de menor demanda, una mejor integración de las fuentes renovables y una mayor resiliencia de la red gracias al almacenamiento distribuido. También permite retrasar inversiones en infraestructura de transmisión y garantizar una carga óptima de los EVs, cumpliendo con los requerimientos individuales de energía.

Para validar la solución propuesta, se analizará el desempeño del sistema utilizando escenarios de simulación generados a partir de la variación de variables de control clave. Estos escenarios permitirán evaluar cómo cada variable influye en la operación y realizar una evaluación integral

de la efectividad del algoritmo en diferentes condiciones de operación y niveles de penetración de electromovilidad.

Abstract

The rapid transformation of the national energy matrix, driven by policies aimed at reducing coal dependency to minimize pollution, has led to a significant increase in solar generation projects. However, this transition introduces challenges associated with the intermittency of renewable energy sources, where generation levels are highly dependent on weather conditions and time of day. Consequently, the flexibility of the energy matrix has diminished, exacerbating difficulties in balancing generation and demand. In parallel, the consistent growth of electromobility has introduced a new layer of complexity, as the additional demand from electric vehicles (EVs) impacts the ability of distribution systems to supply energy efficiently, particularly during peak hours. These challenges underscore the urgent need to optimize residential charging infrastructure without resorting to costly investments in new connections or additional infrastructure.

This work focuses on the design and comparison of an intelligent load-sorting algorithm for a portfolio of consumers in a residential building, consisting of EVs with diverse charging requirements and varying available rest times. The proposed solution is a demand response algorithm managed by a demand aggregator, capable of redistributing EV and other flexible loads to off-peak hours. This algorithm prioritizes EVs based on their charging needs, flattens the demand curve, reduces peak demand, and optimizes the use of existing infrastructure. The algorithm also incorporates strategies such as Load Shedding and Load Shifting to enhance power resource allocation (time and location).

Key benefits of this approach include reduced costs for residents through lower off-peak charging rates, improved integration of renewable energy sources, and enhanced grid resilience through distributed energy storage. It also delays the need for costly transmission infrastructure investments, and ensures optimal EV charging that meets individual energy requirements daily.

To validate the proposed solution, the system's performance will be analyzed using simulation scenarios generated by varying key control variables. These scenarios aim to assess how each variable influences the operation, allowing for a comprehensive evaluation of the algorithm's effectiveness across different operating conditions and levels of electromobility penetration.

1.1 Introducción

En este trabajo se diseñarán y compararán diferentes algoritmos de ordenamiento de carga para un portafolio de consumidores que consta de un conjunto de vehículos eléctricos asociado a un edificio, los cuales tienen diferentes requerimientos de carga y tiempos de descanso disponible en el edificio.

La matriz energética del sistema eléctrico nacional está experimentando un rápido cambio asociado a las políticas energéticas del país, que busca reducir la dependencia del carbón en un esfuerzo para reducir los niveles de contaminación. Debido a lo anterior es que en los años recientes la cantidad de proyectos de generación solar ha aumentado considerablemente. Esto trae consigo un efecto adverso asociado a la incertidumbre de las fuentes renovables de energía, en donde los niveles de generación dependerán fuertemente de condiciones climáticas y de la hora del día, lo que trae como consecuencia una disminución en la flexibilidad de la matriz energética, con lo que habrán horas en donde será más difícil suplir la demanda del sistema. Adicionalmente, si un sector del mercado eléctrico presenta problemas, estos afectarán a aquellas estructuras del

mercado que interactúan con ella, como lo es el caso del sector de la distribución eléctrica, quienes poseen contratos con las generadoras. Finalmente, las distribuidoras también se verán afectadas por el impacto técnico asociado a la instalación de cargadores en todo el espectro de las redes de distribución (comercial, residencial, industrial) en donde se posicionará la nueva demanda en forma de infraestructura de recarga para vehículos eléctricos. Si a lo anterior añadimos el constante y firme crecimiento de la electromovilidad se tiene una red poco flexible a la cual se la añade cada vez mayor demanda (asociada al consumo de los EV's), agravando el problema de equilibrio entre generación y demanda. Lo anterior significa un requerimiento en mejorar la infraestructura de recarga en edificios y residencias domiciliarias. Esto se traduce en un problema para las distribuidoras en su función para satisfacer la demanda requerida por clientes residenciales a lo largo del día.

1.1.1 Solución propuesta

Para solucionar este problema se propone utilizar un algoritmo de respuesta de demanda, del cual estará a cargo la figura del agregador de demanda. Este algoritmo será capaz de acomodar la demanda de la carga de EV's y otros consumos aptos para respuesta de demanda (DR) hacia horarios fuera de punta, ignorar aquellos EV's que no requieran mayor carga y priorizar la carga de un conjunto de EV's según requerimiento de carga, aplanando la curva de demanda y disminuyendo la demanda peak, otorgando mayor control sobre la demanda y preservando la seguridad de la red, además de utilizar la infraestructura actual de forma más óptima.

1.1.2 Beneficios esperados

- Tarifas más bajas: Los operadores de redes poseen tarifas reducidas para la carga de VE en horas de baja demanda, reduciendo costos para los residentes y nivelando la demanda de energía.
- Flexibilidad: Los vehículos eléctricos actúan como fuentes de energía distribuida y almacenamiento, facilitando la integración de energías renovables y mejorando la resiliencia de la red.
- Aplazamiento de inversión: Al optimizar el uso de los recursos de potencia se logrará satisfacer la necesidad de los usuarios finales sin tener que invertir en empalmes nuevos, ni mano de obra e instalación de arranques adicionales. La carga y almacenamiento local de VE's disminuyen la necesidad de costosas inversiones en infraestructura de transmisión a largo plazo.
- Regulación de Tensión (V2G): Adicionalmente, se puede ofrecer regulación de tensión inyectando o absorbiendo energía según sea necesario, mejorando la calidad de la tensión y estabilidad de la red.
- Asegurar la carga de los usuarios de manera óptima, cumpliendo con los requerimientos de energía individuales en el día a día.

1.2 Objetivos

- Identificar impacto técnico en las redes de distribución que produciría una alta penetración de EV's en el sistema eléctrico.
- Estudiar estructuras de control actuales sobre la demanda a nivel de distribución considerando electromovilidad.
- Diseñar algoritmo de control de demanda asociado al comportamiento de carga de los EV's en instalaciones residenciales para optimizar redes de distribución.
- Generar simulaciones que permitan corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto.

Capítulo 2

Estado del Arte: Energía y Electromovilidad

Preoccupied with a single leaf, you won't see the tree. Preoccupied with a single tree, you'll miss the entire forest

Takuan Sōhō

2.1 Alcance del Capítulo

Para dar contexto al problema en cuestión, se abordarán los antecedentes que justifican el desarrollo de la solución. Desarrollaremos el estado actual de la matriz energética nacional, el status quo de la electromovilidad en Chile y qué incentivos hay para impulsar dicha tecnología. También interesa saber qué proyecciones de penetración se esperan a futuro. Finalmente, se ahondará en los impactos técnicos en las redes de distribución como consecuencia de la adopción (sin preparación) de la electromovilidad en el país.

2.2 Escenario de la Electromovilidad

La electromovilidad se define sencillamente como la adopción del uso de vehículos eléctricos. A nivel nacional, ya existen varios modelos circulando tanto en transporte público como privado. Actualmente, existen más de 20 marcas de automóviles que ofrecen modelos eléctricos incluyendo opciones de fabricantes globales y marcas especializadas en vehículos eléctricos. Algunas de las marcas más populares incluyen Tesla, BYD, Kia, Hyundai, MG, Volvo, y Mercedes-Benz (*Modelos y precios EV's en Chile 2024*, y a agosto de 2021, se registraron 2,246 vehículos eléctricos, de los cuales 1,394 corresponden a vehículos livianos y medianos (BEV y PHEV), 840 buses eléctricos, que operan en el sistema de transporte público RED, y 12 camiones eléctricos para labores de distribución [10], podemos ver estadísticas más actuales del mercado a continuación:

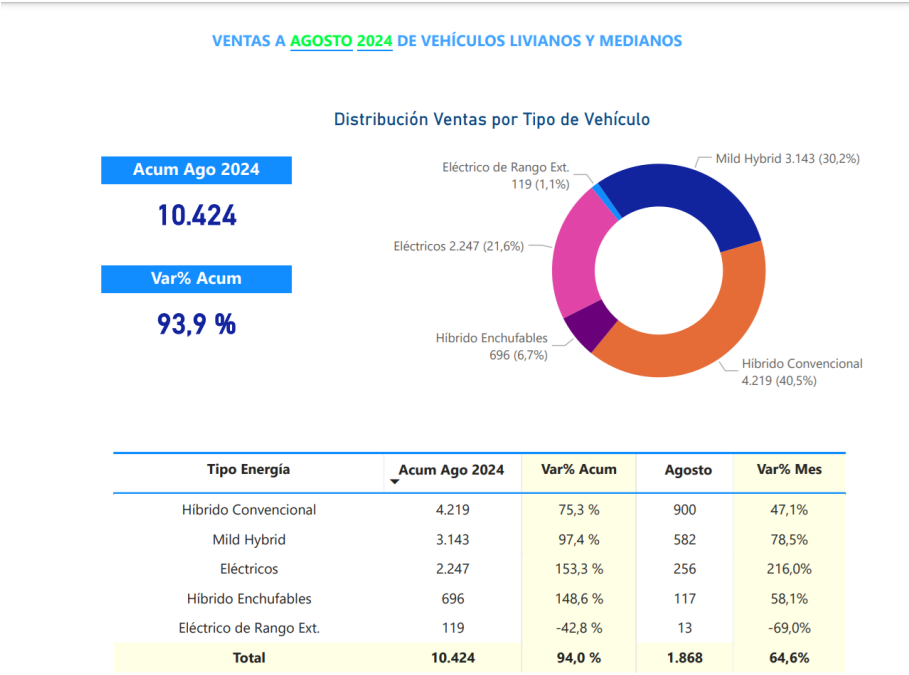


Figura 2.1: Ventas de vehículos eléctricos livianos y medianos a Agosto 2024. Informe de ventas vehículos cero y bajas emisiones Agosto 2024, ANAC

Dentro de las ventajas de los EV´s se destaca que son entre 5-7 veces más eficientes que un vehículo convencional, reducen hasta un 75 % los costos de mantención, el costo de operación (electricidad) es alrededor de 8 veces menor que el combustible, no emiten ruido y no aportan GEI.[12] [1] [9]

2.2.1 Impulsos a la Electromovilidad

A nivel nacional existen varias políticas y planes estratégicos que buscan impulsar la electromovilidad, con el fin de reducir la generación de GEI, mudar hacia una matriz energética más limpia y un transporte sustentable.

Consumo de energía sector transporte

Observando la situación energética del país en [4] para el año 2020, se observa en 2.2 que un 33 % del consumo energético final corresponde al sector transporte, siendo el sector con mayor consumo a nivel nacional y, de esta fracción, más del 99 % corresponde a derivados del petróleo. La proyección realizada al 2050 para el sector transporte indica que, sin medidas de eficiencia energética, su consumo final alcanzaría las 167,500 Tcal. Esta preocupante situación lleva al país a desarrollar políticas de uso eficiente de energía en el sector transporte. A su vez, esto es parte de una estrategia mundial en donde más de 20 países se han suscrito a metas de electrificación (Noruega, Alemania, España, entre otros).

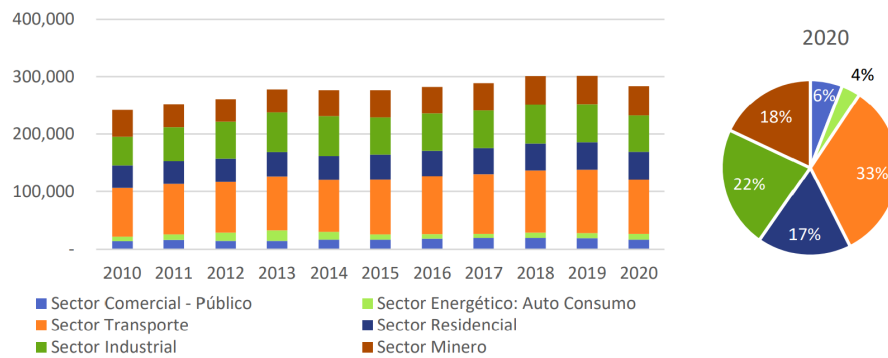


Figura 2.2: Evolución del consumo nacional para el sector de transporte - Balance Energético Nacional 2020, Ministerio de Energía.

El sector transporte también es uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial y uno de los mayores contribuyentes a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico. Los escenarios de proyección de la Agencia Internacional de Energía (IEA) predicen que las emisiones y el uso de la energía en el transporte mundial del sector aumentarán significativamente. Luego de una importante caída de emisiones de CO₂ registrada en 2020, producto de la pandemia, en 2021 las emisiones mundiales de CO₂ del sector del transporte repuntaron, creciendo un 8 % hasta casi 7,7 Gt de CO₂. Más aún, se prevé que, dado el aumento de la población y su capacidad adquisitiva, este porcentaje de participación de emisiones de GEI aumentará en caso de no tomar ninguna acción correctiva.

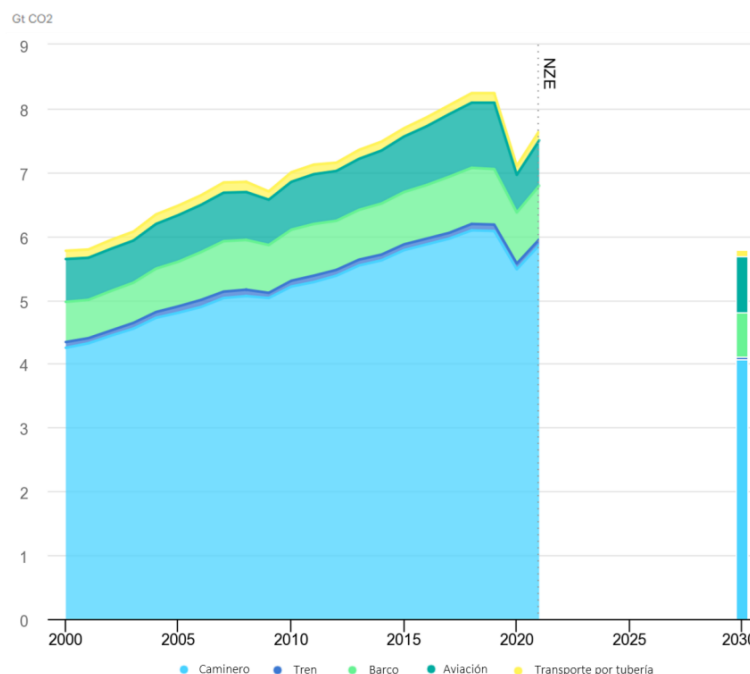


Figura 1 Proyección de emisiones mundiales del sector transporte (2000 - 2030).
Fuente: IEA (2022).

Figura 2.3: Evolución consumo del sector transporte a nivel mundial. IEA 2022.

2.2.2 Obstáculos

Uno de los principales obstáculos para integrar la electromovilidad corresponde a la escasa red de infraestructura de carga actual, lo que limita el incentivo para que los usuarios de vehículos tradicionales opten por cambiar su medio de transporte a uno eléctrico.

A agosto de 2021, se cuenta con un total de 818 cargadores, tanto de acceso público como privado, electroterminales y centros de carga de transporte público, sumando una potencia instalada de 45.7 MW. Específicamente, existen 297 cargadores de acceso público, predominando en las Regiones Metropolitana, de Valparaíso y del Biobío. Chile cuenta con cobertura de cargadores de acceso público en 92 comunas, destacando que hay al menos un cargador público en cada región del país [10].

Se obtienen datos más recientes a través de la nueva herramienta digital de la SEC, que sigue la evolución de la infraestructura de recarga instalada según tipo de conector y nivel de potencia a lo largo del país.



Figura 2.4: Infraestructura instalada a nivel nacional, Herramienta digital de la SEC.

2.2.3 Políticas Nacionales

Actualmente existen varias iniciativas y planes estratégicos a largo plazo para descarbonizar nuestra matriz energética e impulsar un desarrollo sostenible de transporte.

Estrategia nacional de Electromovilidad

Primero, se identifica la Estrategia Nacional de Electromovilidad, cuyas principales metas corresponden a:

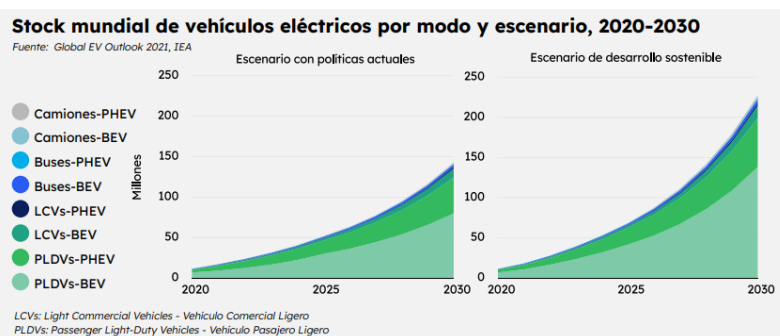


Figura 2.5: Proyección de ventas de EV a nivel mundial en 2030 - Global EV Outlook 2021, IEA.

- Reducir el 30 % de las emisiones del país a 2030 y alcanzar la carbono neutralidad a 2050.
- Cierre del 65 % de las centrales a carbón al 2025 (lo que presenta un enorme desafío en cuanto a flexibilidad).
- A partir del año 2035, que las nuevas incorporaciones en transporte público urbano sean 100 % eléctricas.
- 100 % de las ventas de vehículos sean cero emisiones al año 2035.
- 100 % de las ventas de transporte terrestre de carga y buses interurbanos al año 2040 sean cero emisiones.
- Aumento de la cobertura de la red de carga.
- Fomento de las energías renovables, estimando un 80 % de generación renovable al 2030.
- Tarifas e integración con la red eléctrica.
- Regulación y estándares: Generar las condiciones habilitantes en el marco de la regulación y estándares de forma transversal al ecosistema de la electromovilidad.
- Instrumentos de fomento al transporte cero emisiones:
 - Habilitar regulatoriamente la participación de los vehículos eléctricos en el esquema de Netbilling.
 - Rebaja del arancel aduanero para vehículos eléctricos.
 - Zonas exclusivas de circulación.
 - Ajuste al permiso de circulación.
 - Actualización del programa “Renueva Tu Colectivo” e incorporación del programa “Mi Taxi Eléctrico” en regiones.

Energía 2050

Dentro del catálogo de estrategias y políticas que impulsan hacia un desarrollo energético sostenible, se destaca la Política Energética Energía 2050, cuyos principales ejes estratégicos corresponden a:

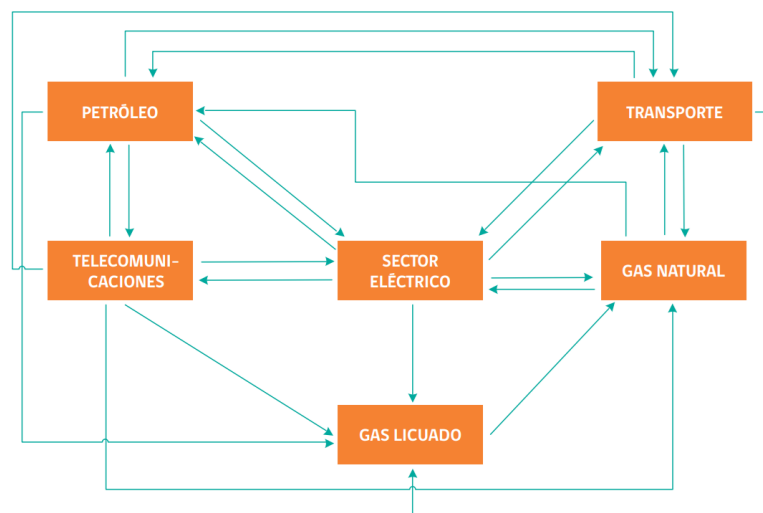
Uno de los pilares mencionados de la estrategia Energía 2050 corresponde a la seguridad y calidad de suministro, en donde la seguridad de suministro en el largo plazo se relaciona con un sistema energético resiliente que pueda disponer oportunamente de las inversiones necesarias en infraestructura, para así entregar la energía de acuerdo a los requerimientos de desarrollo económico, ambiental y social. Por otra parte, en el corto plazo, la seguridad de suministro se relaciona más con la capacidad del sistema energético de anticiparse, reaccionar y adaptarse ante cambios no esperados en el balance oferta-demanda de energía.

Existe una interdependencia en el sector eléctrico entre combustibles líquidos y gas como se aprecia en la siguiente figura:

En el marco de estas interdependencias, el rol de las integraciones energéticas es fundamental para proveer mayor flexibilidad y seguridad a los sistemas energéticos. La electromovilidad es una forma de desacoplar al transporte de su relación con los combustibles tradicionales, mientras que la



Figura 2.6: Pilares estratégicos Energía 2050, Ministerio de Energía.



Fuente: Ministerio de Energía

Figura 2.7: Interdependencia del sector eléctrico y transporte, Política Energética 2050, Ministerio de Energía

generación de energías renovables intenta lograr lo mismo para la energía eléctrica, quedando una nueva matriz en donde la energía eléctrica producida dependerá en su mayor parte de ERNC y el transporte (en su mayor parte eléctrico) utilizará energía de estas fuentes para su operación.

Otro pilar fundamental corresponde a la producción descentralizada y gestión activa de la demanda, lo que conlleva una mejora de la flexibilidad y elasticidad de la demanda y entrega un rol más activo a la misma en cuanto a su influencia en la provisión de energía. Aquí los vehículos eléctricos tendrán un rol clave en cuanto a su capacidad de regular su consumo mediante programas de respuesta de demanda y en su función para entregar energía a la red a través de V2G.

2.2.4 Planificación Energética a Largo Plazo

- Proyectar la demanda y oferta energética del país en un horizonte de 30 años.
- Definir escenarios energéticos de largo plazo para orientar políticas públicas y decisiones de inversión.
- Promover la electrificación y transición energética con énfasis en energías renovables y sostenibles.
- Fortalecer la red eléctrica mediante tecnologías avanzadas (baterías, dispositivos FACTS, etc.).
- Fomentar la participación ciudadana y científica en la planificación energética.
- Incorporar almacenamiento de energía y tecnologías habilitadoras para un sistema confiable.
- Desarrollar polos de generación eléctrica renovable como estrategia territorial clave.

Resumen del informe PELP a 2024

El informe final de la *Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) 2023-2027* destaca el avance en la construcción de escenarios energéticos que guiarán la expansión de la red eléctrica chilena. Estos incluyen metas para alcanzar la carbono neutralidad antes de 2050 y la transición hacia energías renovables.

Se identificaron desafíos prioritarios como:

- Incorporar tecnologías avanzadas para la red eléctrica.
- Impulsar políticas de eficiencia energética y electrificación, incluyendo climatización y electromovilidad.
- Establecer polos de desarrollo en zonas como Antofagasta y Tocopilla para aprovechar recursos renovables.

Además, se integraron perspectivas ciudadanas, académicas y gubernamentales, fortaleciendo la legitimidad del proceso. El informe subraya la necesidad de adaptarse a los efectos del cambio climático mediante planificación sostenible.

2.2.5 Otros incentivos

Otras políticas nacionales que impulsan hacia un desarrollo sostenible de la matriz energética (ergo, de la electromovilidad) corresponden a:

- Plan Nacional de Eficiencia Energética: Estrategia desarrollada por el gobierno para promover el uso eficiente de la energía en todos los sectores, con el objetivo de reducir el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos asociados.
 - Mejora en el consumo energético del sector industrial y de transporte, promoviendo la modernización de equipos y la digitalización y control de procesos. Fomentando renovación de flotas de transporte hacia modelos con mayor eficiencia energética (híbridos o eléctricos).

- Promoción de la eficiencia en edificios implementando criterios de eficiencia energética a través de regulaciones y estándares de consumo.
- Ley de Eficiencia Energética
 - Gestión de energía obligatoria para grandes consumidores: Las empresas con un alto consumo energético deben implementar sistemas de gestión de la energía, con informes y auditorías periódicas para asegurar el cumplimiento.
 - Eficiencia en la edificación: Se establecen requisitos de eficiencia para las nuevas construcciones y se implementan certificaciones energéticas obligatorias para mejorar el rendimiento de las edificaciones.
 - Regulación del transporte: Se promueve el uso de vehículos más eficientes mediante estándares de consumo y emisiones, incluyendo incentivos para la adopción de tecnologías limpias (EMV).
- Programa Mi taxi eléctrico: Para facilitar la llegada de la electromovilidad al segmento de locomoción colectiva pequeña es que nace el programa "Mi Taxi Eléctrico" de la Agencia de Sostenibilidad Energética (ASE), el cual ya va por su 3era versión y se desarrolla en varias regiones del país.

2.3 Matriz de Energía Nacional

2.3.1 Flexibilidad

Dentro de la estrategia nacional de electromovilidad y políticas nacionales energéticas está considerado paulatinamente ir desconectando las centrales a carbón del país. El cambio de la matriz energética nacional hacia fuentes de energía no dependientes del carbón se sostiene en el desarrollo de nuevos parques de generación renovable, principalmente solar y en menor proporción energía eólica. Esto aumenta la dependencia de la matriz energética de las fuentes de energía renovable, lo que hace menos confiable al sistema en cuanto a su capacidad de abastecer una alta demanda en cualquier momento, con lo que el sistema tendrá mayor sensibilidad a la variabilidad de la demanda o, dicho de otra forma, tendrá menor flexibilidad, dejando vulnerable al sistema frente a un aumento imprevisto de carga. Si a lo anterior sumamos la llegada de la electromovilidad, tendríamos un sistema que carece de la flexibilidad necesaria para enfrentar la creciente demanda eléctrica venidera.

A continuación, se presenta un gráfico que modela la intensidad de retiro de las centrales de carbón. La figura muestra las curvas de retiro de centrales a carbón consideradas en esta actualización, dos de ellas al 2040 y una al 2033:

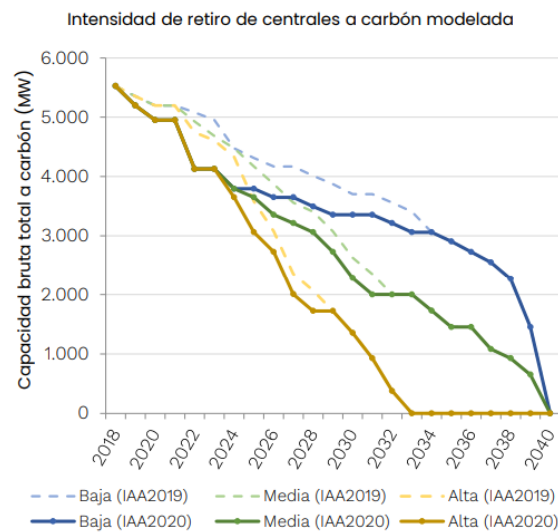


Figura 2.8: Intensidad de retiro de centrales a carbón modelada - Plan de retiro de unidades a carbón, Ministerio de Energía

Respecto a la situación actual de la matriz eléctrica, podemos visualizar la capacidad instalada de generación actual, que cuenta con aportes de energía eólica del 13.61 % y solar 27.4 %, considerando los tres sistemas eléctricos en el país (SEN, SEA, SEM), un crecimiento del 1.65 % y 9 % respectivamente, desde el 2022 según el visualizador de Capacidad Instalada de la Herramienta Digital de Energía Abierta [5].

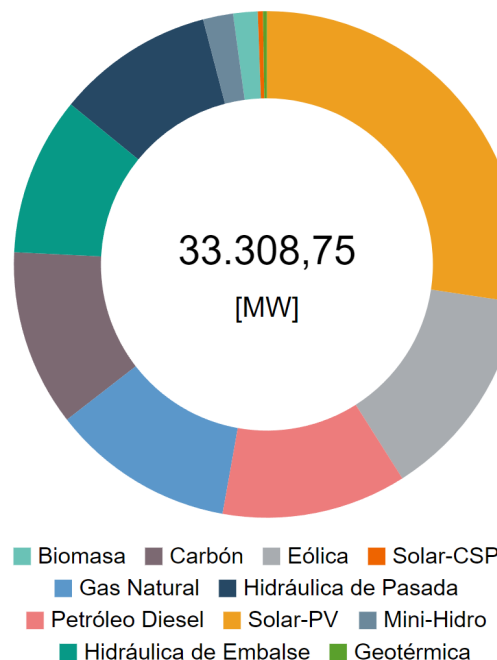


Figura 2.9: Capacidad instalada 2024 - Herramienta Digital Energía Abierta de la CNE.

Adicionalmente, se presenta la evolución proyectada de la matriz eléctrica nacional, donde se puede apreciar el fuerte crecimiento que se espera de las energías renovables en la matriz:

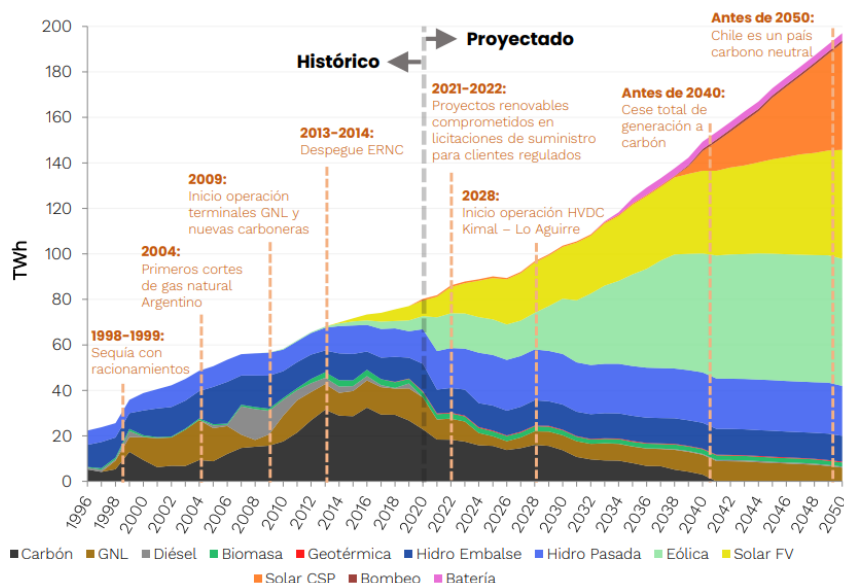


Figura 2.10: Proyección de la matriz eléctrica nacional al 2050 - Balance Energético Nacional 2020 [4], Ministerio de Energía

En el contexto de la adopción de la electromovilidad y el cambio de la matriz energética, se hace necesario implementar mecanismos de flexibilidad y eficiencia en la gestión de la demanda para asegurar la estabilidad del sistema eléctrico y satisfacer la creciente demanda energética de manera sostenible.

2.4 Impacto de la carga de vehículos eléctricos en Redes de Distribución

Finalmente, es importante conocer los efectos adversos de la demanda pronosticada producto de la penetración de los EV's en el mercado.

Para esto nos ayudaremos de la referencia [11], donde se analiza el impacto técnico de la adopción de vehículos eléctricos (VE) en las redes de distribución de Chile, simulando diferentes escenarios de penetración de VE para evaluar cómo afectan variables como la demanda eléctrica, la regulación de tensión y la distorsión armónica. Mediante una metodología estocástica basada en cadenas de Markov y simulaciones de flujo de potencia en OpenDSS, se estudian patrones de carga domiciliaria, en lugares de trabajo, comerciales y en estaciones de carga rápida.

El aumento en la penetración de vehículos eléctricos (VE) en el mercado chileno representa un desafío técnico significativo para las redes de distribución. La simulación de diferentes niveles de adopción de electromovilidad ha permitido identificar cómo se agravan los impactos a medida que crece la penetración de VE y se intensifica su uso en diversas ubicaciones. Según el estudio [11], los principales aspectos a considerar incluyen:

1. **Impacto en la Demanda:** A medida que la penetración de VE aumenta, la demanda eléctrica presenta un crecimiento exponencial durante las horas de carga, especialmente en escenarios descontrolados. En el caso de estrategias descontroladas, los picos de demanda pueden exceder las capacidades térmicas y normativas de los alimentadores. Este efecto se intensifica en redes con mayor proporción de carga domiciliaria, dado que los patrones de uso tienden a concentrarse en horarios de alta demanda.
2. **Regulación de Tensión:** Con niveles elevados de penetración, las caídas de tensión se vuelven más frecuentes y pronunciadas, especialmente en nodos alejados de la subestación principal. Los resultados destacan que, para penetraciones superiores al 50 %, los niveles de

tensión en algunos nodos pueden caer por debajo del límite normativo, generando problemas de calidad de suministro y desbalances trifásicos.

3. **Inyección de Armónicos:** Los cargadores de VE actúan como cargas no lineales que introducen armónicos en la red, afectando la calidad de potencia. Para niveles altos de penetración, la distorsión armónica total (THD) supera los límites normativos, especialmente cuando se utilizan cargadores rápidos. Esto incrementa las pérdidas en transformadores y líneas, además de acelerar el desgaste de equipos sensibles.
4. **Sobrecarga de Elementos de la Red:** El uso intensivo de estaciones de carga rápida y la concentración de eventos de carga en ciertos nodos resultan en sobrecarga de transformadores y líneas, reduciendo su vida útil. Por ejemplo, en escenarios con más del 50 % de penetración, se observa que las líneas principales operan al 120 % de su capacidad térmica nominal en periodos pico.
5. **Distribución de la Carga:** Los escenarios de diversificación geográfica y temporal muestran una disminución significativa en los impactos negativos. La carga en estaciones comerciales y laborales, junto con la implementación de estrategias de carga fuera de punta (*off-peak*), contribuye a aplanar la curva de demanda y reducir las sobrecargas.
6. **Estrategias de Mitigación:** La integración de medidas como la instalación de transformadores reguladores, bancos de condensadores y sistemas de control de carga unidireccional son esenciales para mitigar estos efectos. Además, la promoción de tarifas diferenciadas para incentivar la carga en horarios fuera de punta es clave para equilibrar la demanda.

Estos hallazgos resaltan la necesidad de adoptar estrategias de planificación y regulación técnica para garantizar una transición sostenible hacia la electromovilidad. La implementación de sistemas de gestión inteligente de carga y la promoción de infraestructura de carga diversificada emergen como soluciones críticas para reducir los impactos adversos y garantizar el cumplimiento normativo.

2.5 Estructuras de control actuales

Hoy en día ya existen varios servicios de gestión de demanda y eficiencia energética, ofrecidos al consumidor residencial final, algunos constan de tarifas preferenciales según en una banda horaria de baja demanda del recurso eléctrico mientras que otras estrategias buscan desconectar carga en ciertos horarios.

Describimos brevemente algunas de las estrategias ya disponibles en el mercado nacional:

- Cargadores inteligentes con modulación de potencia: Actualmente ya existen cargadores que logran regular su consumo de potencia según disponibilidad de la red a la que se conectan.
- Tarifas diferenciadas (TOU): Establecen precios variables según el momento del día, incentivando el consumo en horarios de menor demanda.
- Control centralizado de carga (CCC): Sistema central que monitorea y controla el consumo de energía de una red de dispositivos conectados. Ejemplo: BMS: Building Management System o un Controlador AC CHARX para recarga de EV's
- Programas de Respuesta de Demanda:
 - Acuerdos con grandes consumidores industriales para reducir su demanda en momentos de alta carga en la red.
 - Programas que ofrecen tarifas reducidas o pagos por parte de empresas distribuidoras a usuarios que puedan reducir temporalmente su consumo. i.e: Programa de Gestión de Demanda de ENEL.
- V2G: Ya existen plataformas de gestión de carga con V2G incluido, pudiendo entregar energía a la red y actuando como un grado adicional de flexibilidad.

Capítulo 3

Metodología y Suposiciones

I must not fear. Fear is the mind-killer. Fear is the little-death that brings total obliteration. I will face my fear. I will permit it to pass over me and through me. And when it has gone past I will turn the inner eye to see its path. Where the fear has gone there will be nothing. Only I will remain

Lady Jessica Atreides, Dune

3.1 Suposiciones y Consideraciones

A continuación se presentan los supuestos y consideraciones en las que se desarrolla el trabajo:

- Se asume que existe comunicación entre el vehículo y el agregador de demanda, permitiendo acceder a los datos de consumo, historial de ruta y comportamiento de cada usuario.
- Esquema de comunicación rápido y accesible para poder utilizar dichos datos y tomar decisiones (DR).
- En general la mayoría de las personas en ciudad utilizan su vehículo particular para movilizarse al trabajo, y según la encuesta CASEN 2015 el tiempo promedio ronda los 37 minutos. Ajustando a un caso más cercano a la realidad con el boom de ventas de vehículos tras los retiros del %10 es que se fija un rango de máximo 3 horas de conducción al día, limitando así el consumo de energía máximo del vehículo. Por otra parte, cualquier desplazamiento que tome más de 3 horas se podría considerar como un viaje largo interciudad, por lo que en este caso el usuario podría utilizar una electrolinera en su ruta.
- Se utilizará la infraestructura disponible de potencia, conectando toda la carga de los EV's al empalme del edificio a través de un tablero eléctrico dedicado a infraestructura de recarga de vehículos eléctricos, en ordenanza con lo dispuesto en el pliego técnico RICN°15. (Ver figura 3.4)
- En general los cargadores estarán instalados en los estacionamientos de visita de los edificios, con esto más de un vehículo puede utilizar el mismo cargador. En el caso de que sólo existan cargadores asignados a un EV en específico, entonces podría suceder que se libere un cargador pero ningún otro usuario pueda usarlo. Para evitar esto es que se asume que en las simulaciones se tienen cargadores que son utilizables por todo el conjunto de vehículos eléctricos asociados al edificio. Colocar cargadores en estacionamientos de visita también ha sido la tendencia de integración de electromovilidad por parte de las inmobiliarias (experiencia propia trabajando en el sector).
- El perfil de consumo residencial se obtiene a través de medidores de energía y potencia en el tablero de SSCC del edificio, además de tener información eléctrica del proyecto en su respectivo TE1, documento previo al inicio de obras del edificio, en donde se declara la

potencia contratada con la compañía distribuidora.

- Se recopiló una pequeña lista de documentos TE1, que informan la potencia declarada del edificio y otras consideraciones inherentes al proyecto, como por ejemplo la cantidad de departamentos de cada torre. Con esto se puede obtener un valor para la potencia asignada por cada departamento, lo que nos ayuda a establecer los rangos de potencia contratada, cantidad de EVs y porcentaje de penetración de electromovilidad a la hora de generar las simulaciones.
- Se asume que la velocidad promedio de los usuarios corresponde a la máxima velocidad permitida en zonas urbanas, valor de 50 km/h.
- La potencia disponible en los tableros de SSCC de los edificios oscila entre un 60-80 % según estudios realizados por la consultora Enérgica City 3.5 en el año 2023, pero se simularán escenarios más realistas (30-40 %).
- Se logró recopilar información del consumo del sector residencial de distintos países, en el caso Chileno no fue posible encontrar datos específicos del sector residencial, pero se modelará el caso utilizando la curva de demanda total y neta del sistema eléctrico nacional (SEN) completo, posteriormente se podrá escalar en caso de ser necesario. Con esto se obtienen los siguientes perfiles para elegir durante la simulación:
 - Demanda total del SEN
 - Demanda Neta del SEN
 - Demanda sector residencial EMA Singapur
 - Demanda sector residencial ISO NE, USA.

Considerar que el perfil de consumo residencial de un proyecto depende de la cantidad de residentes habitando, potencia asignada a cada departamento, potencia contratada, servicios adicionales en el edificio que requieran suministro eléctrico y hábitos de consumo de los residentes.

De la experiencia propia en el rubro, se obtiene la siguiente información (ver figuras 3.1 3.2 3.3. Donde encontramos valores de proyectos reales para potencia contratada y número de departamentos, y se observa que los cocientes están dentro del rango 10-15kW por departamento.

Instalación para suministro provisorio:	No	Tiempo de suministro (días):		Rol Propiedad:	
Proyecto de vivienda social:	No			Instalación:	nueva
Tipo de Instalación (según D.S. N° 9283):	A			Declara Instalaciones Exteriores:	NO
Destino de la Propiedad:	HABITACIONAL				
Tipo de Construcción:	EDIFICIO				
Potencia Total Declarada:	4.330,18	(kW)			
Potencia Total Instalada:	4.330,18	(kW)			
Cantidad de Instalaciones (**):	301				
(**) Detalle de Instalaciones en reverso de este formulario					

Detalle de Instalación Declarada	
Potencia de Fuerza	260,01 kW
Potencia de Alumbrado	4.070,17 kW
Potencia de Climatización	0 kW
Potencia de Computación	0 kW
Capacidad de Subestación	0 kVA
Potencia de Sistema de Generación	0 kW
Respaldo energético (grupo electrógeno, UPS u otros)	250 kW
Longitud de Alimentador	8 m
Giro	Habitacional

Figura 3.1: TE1 edificio 1, resultando en cerca de 15kW/departamento.

Instalación para suministro provisorio:	No	Tiempo de suministro (días):		Rol Propiedad:	
Proyecto de vivienda social:	No			Instalación:	nueva
Tipo de Instalación (según D.S. N° 9283):	A			Declara Instalaciones Exteriores:	NO
Destino de la Propiedad:	HABITACIONAL				
Tipo de Construcción:	EDIFICIO				
Potencia Total Declarada:	4.647,65	(kW)			
Potencia Total Instalada:	4.647,65	(kW)			
Cantidad de Instalaciones (**):	381				
(**) Detalle de Instalaciones en reverso de este formulario					

Detalle de Instalación Declarada	
Potencia de Fuerza	450,5 kW
Potencia de Alumbrado	4.197,15 kW
Potencia de Climatización	0 kW
Potencia de Computación	0 kW
Capacidad de Subestación	0 kVA
Potencia de Sistema de Generación	0 kW
Respaldo energético (grupo electrógeno, UPS u otros)	160 kW
Longitud de Alimentador	10 m
Giro	Habitacional

Figura 3.2: TE1 edificio 2, resultando en cerca de 12kW/departamento.

Instalación para suministro provisorio:	No	Tiempo de suministro (días):		Rol Propiedad:	
Proyecto de vivienda social:	No			Instalación:	nueva
Tipo de Instalación (según D.S. N° 9283):	B			Declara Instalaciones Exteriores:	NO
Destino de la Propiedad:	HABITACIONAL				
Tipo de Construcción:	EDIFICIO				
Potencia Total Declarada:	2.972,93	(kW)			
Potencia Total Instalada:	2.972,93	(kW)			
Cantidad de Instalaciones (**):	267				
(**) Detalle de Instalaciones en reverso de este formulario					

Detalle de Instalación Declarada	
Potencia de Fuerza	207,93 kW
Potencia de Alumbrado	1.458,06 kW
Potencia de Climatización	0 kW
Potencia de Computación	0 kW
Capacidad de Subestación	0 KVA
Potencia de Sistema de Generación	0 kW
Respaldo energético (grupo electrógeno, UPS u otros)	0 kW
Longitud de Alimentador	20 m

Giro	Habitacional
------	--------------

Figura 3.3: TE1 edificio 3, resultando en cerca de 11kW/departamento.

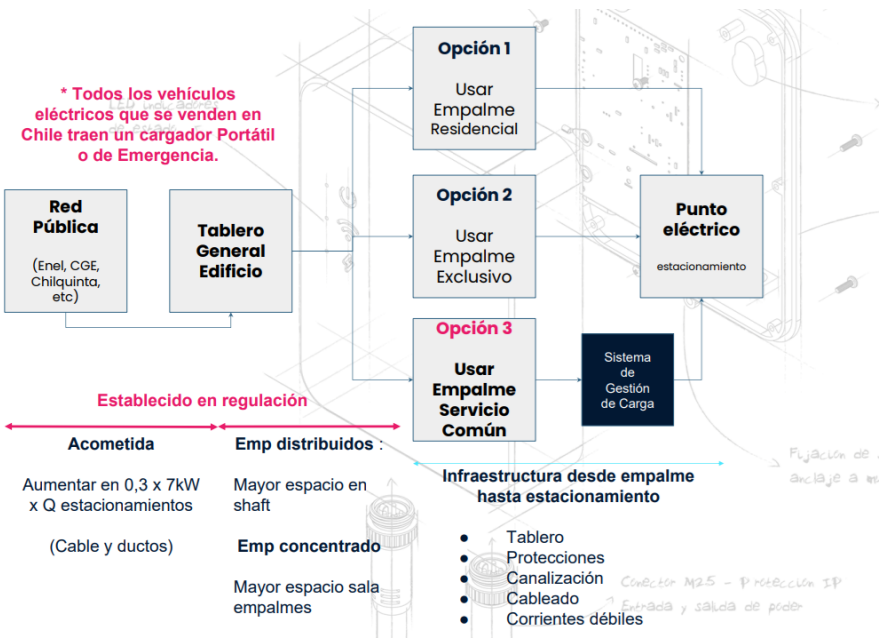


Figura 3.4: Métodos de conexión a la red eléctrica para IRVE según RICN°15 - Infografía facilitada por Enérgica City.

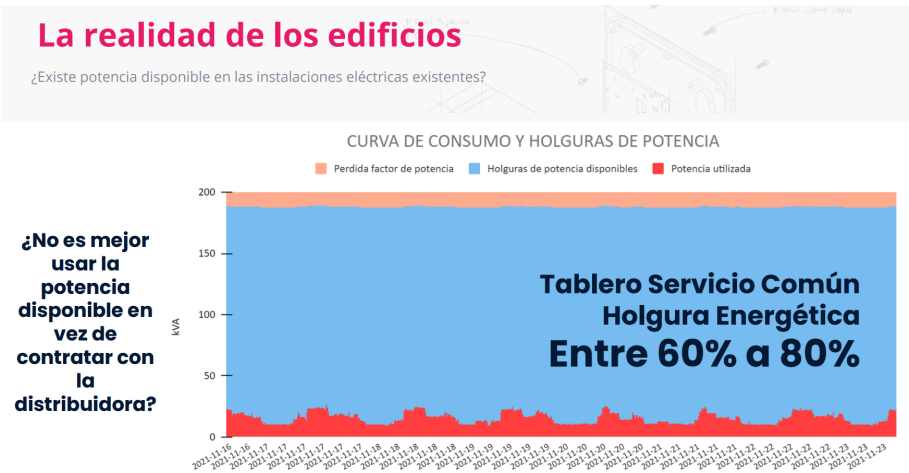


Figura 3.5: Holgura promedio en tableros de SSCC de edificios - Enérgica City 2023.

3.2 Agregador de demanda

3.2.1 Definición

En el contexto del mercado eléctrico, un agregador de demanda se refiere a una entidad que reúne y gestiona la demanda eléctrica de múltiples consumidores, como hogares, empresas u otras organizaciones, para participar en operaciones de mercado, como la compra y venta de energía o la prestación de servicios de respuesta a la demanda.

Los agregadores de demanda en el mercado eléctrico pueden desempeñar un papel importante en la gestión de la oferta y la demanda de electricidad de manera más eficiente y flexible. Algunas de las funciones y beneficios clave de los agregadores de demanda en este contexto incluyen:

- Reducción de costos: Al combinar la demanda de varios consumidores, los agregadores pueden negociar contratos más favorables con los proveedores de energía y obtener tarifas más competitivas.
- Participación en mercados de energía: Los agregadores pueden comprar y vender energía en mercados mayoristas, aprovechando las fluctuaciones de precios y ofreciendo flexibilidad para equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real.
- Respuesta a la demanda: Pueden coordinar la reducción o el aumento de la demanda de electricidad de sus clientes en momentos de alta demanda o problemas en la red eléctrica, contribuyendo a la estabilidad del sistema.
- Integración de energías renovables: Los agregadores pueden gestionar la demanda de electricidad para aprovechar al máximo la energía de fuentes renovables, como la solar y la eólica, cuando esté disponible y a precios más bajos.
- Promoción de la eficiencia energética: Fomentan la gestión más eficiente de la energía entre sus clientes, lo que puede resultar en ahorros significativos y reducciones en el consumo de electricidad.
- Participación activa de los consumidores: Permiten a los consumidores individuales o empresas tomar un papel más activo en la gestión de su consumo de electricidad y en la participación en mercados energéticos.

En muchos países, la regulación y la tecnología están evolucionando para permitir y fomentar la participación de agregadores de demanda en el mercado eléctrico. Esto se alinea con los esfuerzos para modernizar y descentralizar la infraestructura eléctrica, promoviendo la transición hacia un sistema energético más eficiente y sostenible.

Para lograr un efecto considerable sobre la red (liberar capacidad) será necesario manejar un portafolio de cargas que en conjunto permitan tal objetivo al regular su consumo, este portafolio de consumidores es administrado por un agregador de demanda que corresponde a una empresa que administra equipos que ofrecen servicio de carga para vehículos eléctricos en establecimientos residenciales, y el algoritmo a desarrollar estaría supervisado por tal entidad.

Así mismo, se busca implementar 2 estrategias de respuesta de demanda en el algoritmo:

3.2.2 Estrategias de Respuesta de Demanda (DR)

- Desprendimiento de carga: Se refiere a la acción de reducir o cortar la electricidad suministrada a ciertos consumidores o cargas para evitar que el sistema eléctrico se sobrecargue o colapse. En situaciones de alta demanda o cuando la capacidad de generación es insuficiente, se puede implementar desprendimiento de carga para preservar la integridad del sistema.
- Desplazamiento de carga: Se refiere a la práctica de reprogramar o cambiar la carga eléctrica de ciertos dispositivos, procesos o sistemas para que ocurran en momentos en que la demanda de electricidad sea más baja o los precios sean más económicos. En el caso de los EV se prefiere priorizar su carga durante la noche.

3.3 Bases de Datos

Se construye una base de datos con información técnica relevante de los EVs en el mercado nacional, tanto de los vehículos como los cargadores.

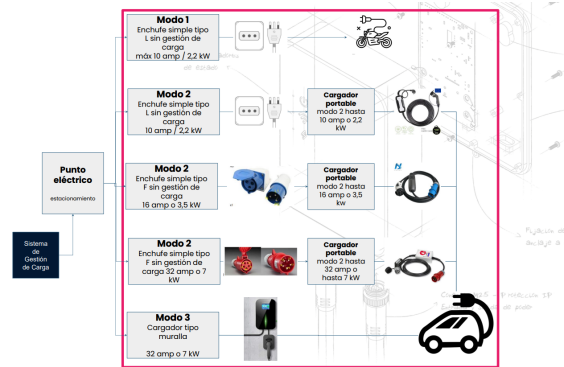


Figura 3.6: Modos de carga disponible para VE según pliego técnico RICN°15 - Enérgica City 2023

Edificio:

- Potencia promedio por departamentos: 5-15 kW
- Rangos de número de departamentos. por proyecto: 100-200-500 departamentos según tamaño del proyecto.
- Perfil de carga del consumo de cada edificio
- Total de EV que posee el edificio
- Número de cargadores habilitados en el edificio
- Potencia de los cargadores (2.2, 2.5, 7.4 kW)

Punto de carga EV:

- Estado en tiempo real:
 - Potencia
 - Encendido/apagado
 - Vehículos en cola (plataforma de gestión de carga)

Vehículos Eléctricos:

- Capacidad total de la Batería [kWh]
- Capacidad actual de la batería [kWh]
- Consumo del vehículo [kWh/km]
- Horas de salida/llegada al recinto residencial [–:–]
- Promedio de capacidad de batería: 82.3kWh
- Promedio rendimiento: 5.97 km/kwh

3.4 Algoritmo de Ordenamiento de Carga

3.4.1 FIFO

El algoritmo FIFO (First In, First Out) es un método basado en el orden de llegada, en el que el primer vehículo en la cola recibe la potencia primero. Este es su funcionamiento en el contexto de la asignación de potencia a vehículos eléctricos:

- **Principio Básico del FIFO:** El primer vehículo en llegar es el primero en recibir potencia. Una vez que llega al 100 o si tiene un evento de viaje programado, se desconecta la carga, el siguiente vehículo en la cola recibe su asignación.

- Este proceso se repite hasta que todos los vehículos hayan recibido potencia o se haya agotado el recurso.
- **Ventajas del FIFO:**
 - *Simplicidad:* Es fácil de implementar y entender.
 - *Previsibilidad:* Los vehículos pueden anticipar cuándo recibirán potencia, ya que el orden es fijo.
- **Limitaciones:**
 - *Distribución no equitativa:* Los vehículos que lleguen más tarde pueden tener que esperar mucho si los primeros vehículos tienen grandes necesidades de carga.
 - *Subutilización:* Un vehículo podría estar recibiendo potencia mientras otros con menos necesidades tienen que esperar, si a esto le agregamos que cada EV tiene diferentes salidas asignadas durante el día, entonces puede darse el caso de que un vehículo requiera poca carga pero deba atrasar su salida ya que no hay potencia de carga (o cargadores) disponibles.

3.4.2 Round Robin

El algoritmo Round Robin (RR) es un método de asignación y programación de recursos que se usa comúnmente para distribuir equitativamente un recurso limitado entre múltiples solicitudes en un sistema de manera equitativa en el tiempo.

En el caso de la asignación de potencia a un portafolio de vehículos eléctricos, su funcionamiento es el siguiente:

- **Principio Básico del Round Robin:** El algoritmo asigna potencia a cada vehículo eléctrico en turnos cíclicos, asegurando que cada uno reciba una parte del recurso disponible.
- **Asignación de Potencia en el Portafolio:**
 - Se crea una cola de vehículos eléctricos que necesitan cargar.
 - La potencia disponible se asigna al primer vehículo de la cola por un **cuanto** de tiempo definido, en este caso corresponden a intervalos de 15 minutos.
 - Una vez que se ha cumplido el turno, la potencia se pasa al siguiente vehículo en la cola.
 - El proceso se repite de forma cíclica hasta que todos los vehículos hayan recibido potencia.
- **Ventajas del Round Robin:**
 - *Equidad:* Cada vehículo tiene la oportunidad de recibir potencia de manera "justa".
 - *Simplicidad:* Es fácil de implementar y comprender.
 - *Previsibilidad:* Los tiempos de asignación son predecibles.
- **Limitaciones:**
 - *Ineficiencia:* Los vehículos con grandes necesidades de carga pueden tener que esperar más.
 - *Carga Parcial:* Si un vehículo necesita solo una pequeña cantidad de carga, el algoritmo puede no ser el más eficiente.

3.4.3 Algoritmo Inteligente

Ninguno de los 2 algoritmos vistos anteriormente utiliza variables inherentes al EV en su proceso de asignación de recursos. Para este algoritmo inteligente se decide asignar una prioridad de carga a cada elemento de la cola de espera, según las siguientes variables:

- Nivel de batería actual en base propia, es decir, como un porcentaje de su capacidad máxima de energía
- Consumo de energía diario según pronóstico de eventos de salida basados en datos históricos.

Con esto se logra ordenar los EVs que se encuentran en la cola de carga, priorizando a aquellos que tienen mayor consumo de energía diario.

Se presenta a continuación un diagrama de flujo del funcionamiento de los algoritmos de asignación de recursos implementados en la herramienta digital:

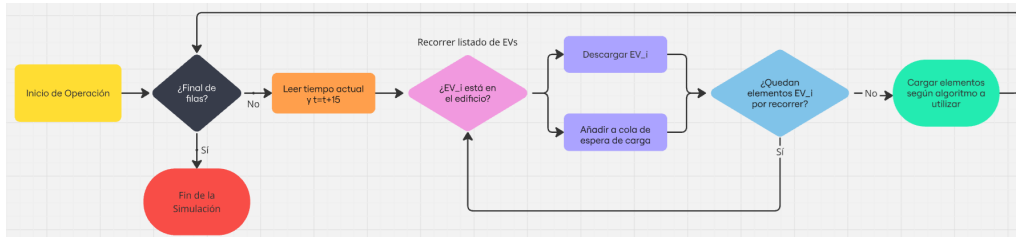


Figura 3.7: Diagrama de flujo general para los algoritmos de ordenamiento de carga implementados.

3.4.4 Modelamiento de fallas

En redes de distribución domiciliarias, las fallas eléctricas pueden variar en duración dependiendo del tipo de falla y de las condiciones del sistema [3] [6].

Cortes Momentáneos (Instantáneos): ■ **Duración:** Menos de 1 segundo (generalmente entre 0.1 a 0.5 segundos).

- **Causa:** Suelen ser causados por eventos como la activación de un relé de protección o reconectores automáticos que actúan para eliminar una falla transitoria (por ejemplo, un cortocircuito momentáneo debido a un árbol tocando una línea).

Cortes de Corto Plazo: ■ **Duración:** De 1 segundo a 2 minutos.

- **Causa:** Ocurren debido a eventos que no pueden ser despejados inmediatamente por los sistemas automáticos y requieren una breve intervención manual o un reinicio del sistema.

Cortes de Mediano Plazo: ■ **Duración:** Entre 2 minutos y 2 horas.

- **Causa:** Se deben a fallas más serias que requieren intervención técnica, como la reparación de componentes de la red o la restauración de un alimentador.

Cortes de Largo Plazo: ■ **Duración:** Más de 2 horas, pudiendo llegar a varias horas o incluso días en casos extremos.

- **Causa:** Fallas graves en la infraestructura de la red, como fallas en transformadores, líneas de alta tensión, o daños significativos debido a desastres naturales (por ejemplo, tormentas o terremotos).

Existen diferentes fenómenos que pueden causar dichas fallas, como por ejemplo flicker de tensión, armónicos, problemas de regulación de tensión, Fallas en transformadores, sobrecargas en la red, fallas en líneas de Dx, fallas en S/E o una combinación entre estos.

El peor caso entonces corresponde a una falla de largo plazo, y se procede a modelar dicha situación modificando la potencia disponible en el edificio, disminuyéndola a una fracción del total durante una cierta cantidad de horas. En la mayoría de los casos los edificios cuentan con grupos generadores que deben asegurar el funcionamiento de los sistemas críticos por al menos 2 horas.

Aunque no existe una regla específica que defina un porcentaje exacto de la potencia requerida en generadores de respaldo en relación con la potencia declarada del edificio, las normas sugieren que los generadores deben ser capaces de soportar la carga crítica del edificio durante un apagón y asegurar el funcionamiento de los sistemas esenciales como iluminación de emergencia, sistemas de seguridad, ascensores, sistemas de seguridad, bombas de agua y otros equipos considerados críticos, entendiendo que bajo este contexto la carga de los

vehículos eléctricos no corresponde a servicio esencial [2] [8] [7] [minEnergia2022].

El sistema de respaldo más común que encontramos en los edificios corresponden a generadores diésel, por su rápido encendido y capacidad para generar grandes niveles de energía. Sin embargo, si ocurre un corte este encendido no es automático y pueden caerse servicios de TI. Ante esto, se ha comenzado a incorporar UPS (Uninterrupted Power Supply), proporcionando energía de respaldo de forma inmediata y sin interrupciones ante un corte de suministro, aunque estos no tienen gran capacidad de suministro de energía. Otra opción son los BESS (Batería Energy Storage System), que pueden almacenar grandes cantidades de energía, pudiendo durar varias horas o incluso días. Además los BESS pueden integrar energías renovables como paneles solares instalados en el edificio.

Debido a que no existe un valor exacto para la potencia de respaldo, es que se decide implementar esta variable como un parámetro ajustable, pudiendo modificar la potencia disponible tras ocurrida la falla, lo que en términos prácticos dependerá del tipo de falla, nivel de selectividad del sistema de protección, nivel y alcance del potencia del sistema de respaldo y su capacidad (Diésel, UPS o BESS).

3.4.5 Modelamiento de Desprendimiento de carga

Interesa entonces desarrollar algún mecanismo de flexibilidad ante señales de falla o falla virtual, donde se tendrá una reducción importante de la potencia disponible.

Dicho esto es que se implementa desprendimiento de carga frente a eventos de falla al limitar la potencia disponible de carga, desconectando los cargadores necesarios hasta cumplir con el nuevo máximo disponible. Esto se logra con la simulación de una falla que limita la potencia al valor nominal del sistema de respaldo, la cual será una variable ajustable en el panel de control como un porcentaje de la potencia contratada por el edificio.

Para simular se generará un evento de falla en cierta banda horaria (ajustable en el panel de control), y al estar operando dentro de esa banda horaria el sistema disminuye la potencia de carga de los cargadores al mínimo (2.2 kW), esta estrategia se conoce como modulación de potencia. La capacidad de carga de EVs del edificio disminuye en este intervalo debido a la menor potencia disponible durante la falla, pero se logra aumentar el número de EVs cargando en paralelo, priorizando siempre aquel que tenga el siguiente viaje más largo (mayor requerimiento de energía) según la función de prioridad diseñada.

3.4.6 Modelamiento de Desplazamiento de carga

Dentro del código se ha implementado un bloque que verifica si es posible aplazar la carga de un vehículo eléctrico dentro de un cierto bloque de tiempo. Este bloque de tiempo es configurable y extensible, actualmente está fijado en el bloque de horario punta, que corresponde entre las 18:00 y las 22:00 hrs. El objetivo de esto es no aumentar la potencia máxima consumida en punta, y así evitar cobros adicionales de tarifa por concepto de consumo en horario punta. Más aún, si pensamos en que a futuro habrá un empalme eléctrico dedicado exclusivamente a electromovilidad, entonces se desea tener control sobre la demanda máxima, pudiendo ajustar el consumo sobre cierta banda horaria para así aplanar la curva de consumo y evitar que se formen peaks de demanda. Para implementar la estrategia de desplazamiento de carga se genera una banda horaria en donde aplicar la función. El enfoque utilizado consiste en calcular la energía total diaria requerida para cada EV según su pronóstico de salidas. Se ajusta además el valor de % de potencia mínimo que puede alcanzar (default 20 %) al llegar al edificio (última salida), y la estrategia de carga cambia, en donde el nuevo objetivo ya no es cargar hasta el 100 % cada EV, sino cargar hasta alcanzar el valor de $E = energia_{diaria} + \%seguridad$.

3.5 Herramienta Digital

Para lograr una mejor visualización y ampliar el alcance de uso, es que se decidió desarrollar una herramienta digital de fácil uso, para poder ajustar variables de simulación y generar gráficos que entregan mayor información acerca de la evolución de la carga de los EVs así como del desempeño de los algoritmos utilizados. La herramienta también permite activar señal de falla, ajustando el ancho de banda horaria, análogamente para el horario de alta demanda.

A continuación se presenta el panel de control de la herramienta digital:

The screenshot shows the 'Params Simulacion' panel with the following settings:

- Formato de outputs: tsv (selected), csv, xlsx
- Log Level: DEBUG, INFO, WARNING (WARNING is selected)
- Simulation Algorithms: ☒ Simulación FIFO, ☒ Simulación Round Robin, ☒ Simulación con Prioridad
- Random Seed: A slider set to 9

Figura 3.8: Parámetros ajustables de la simulación.

The screenshot shows the 'Params Edificio' panel with the following settings:

- Vehiculos en el Edificio: A slider set to 100
- Max Potencia de Edificio: 2500
- Reducción a escala (%): A slider set to 90
- ☒ Limitar Cargadores
- Cargadores disponible en el edificio: A slider set to 25
- Potencia Cargadores: 2.2, 3.5, 7.4 (7.4 is selected)
- Tope de tiempo de manejo (mins): A slider set to 180
- ☐ Incluir falla en la red
- Inicio Horario Falla (HH:MM): 02:00
- Fin Horario Falla (HH:MM): 05:00
- Potencia durante falla (%): A slider set to 10
- ☐ Incluir alta demanda
- Inicio Alta Demanda (HH:MM): 00:00
- Fin Alta Demanda (HH:MM): 23:59
- Bateria Minima (%): A slider set to 20

Figura 3.9: Parámetros ajustables de las variables del edificio.

Params Simulación	Params Edificio	Params Vehiculos
Velocidad Promedio (km/h) <input type="range" value="50"/>		
Primera Salida (HH:MM) 07:30		
Ultima Llegada (HH:MM) 21:00		
Salidas al día <input type="range" value="1 - 3"/>		
Promedio en batería maxima (kWh) 82.3		
Varianza en batería maxima (kWh) 28.67		
Promedio en batería inicial (kWh) 41.15		
Varianza en batería inicial (kWh) 14.335		
Promedio de rendimiento (km/KWh) 5.97		
Varianza de rendimiento (km/KWh) 1.16		

Figura 3.10: Parámetros ajustables de las variables de los EVs.

Asímismo, se presenta un esquema general de funcionamiento de la herramienta:

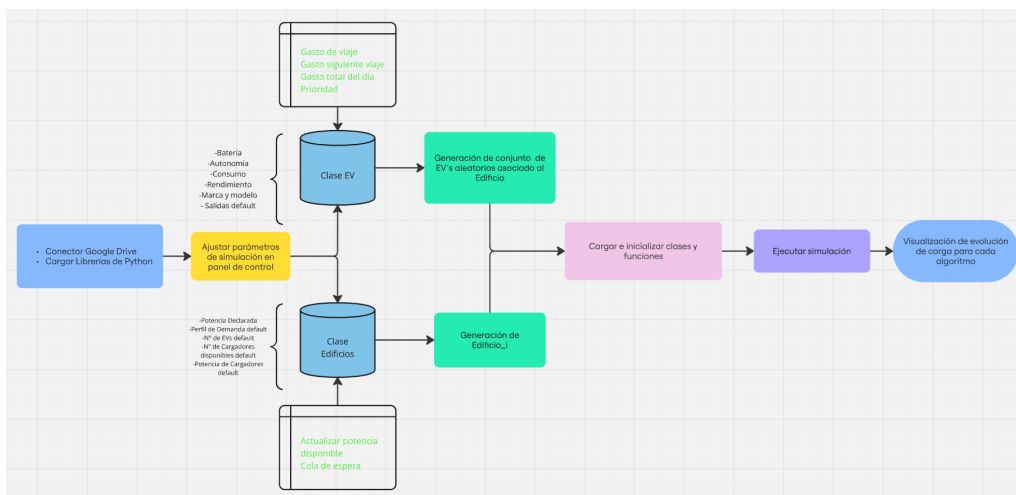


Figura 3.11: Estructura del funcionamiento del código implementado.

Con lo anterior se logra implementar el código de los diferentes algoritmos de ordenamiento de carga y se crea una herramienta digital capaz de ajustar diferentes parámetros de la simulación, además ofrece visualización de los datos resultantes. Para mayor detalles acerca del código implementado y su funcionamiento, favor de revisar el Anexo, sección 6.3, donde podrá encontrar las clases y funciones implementadas.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

Lucifer: "Tell us, why should we let you leave? Helmet or no, you have no power here. After all, what power have dreams in Hell?"

Dream: "You say I have no power here. Perhaps you speak truly. But to say dreams have no power in Hell... Tell me, Lucifer Morningstar, what power would Hell have if those here imprisoned were not able to dream... of Heaven?"

Dream of the Endless, Sandman

4.1 Simulaciones

En el contexto de las simulaciones y para obtener mejor visualización, se optará por reducir el número de elementos manteniendo cierto factor de proporcionalidad, es decir, asumiendo un valor de potencia asignada por depto. dentro del rango de 5-15 kW podemos simular con 250kW de potencia contratada para una cantidad total de 15-50 deptos., y luego seleccionamos un valor dependiendo del porcentaje de penetración de electromovilidad a considerar, por ejemplo si se quiere considerar que cada depto tiene 15kW entonces se toma como 15 el número total de deptos.(asumiendo 1 estacionamiento por cada depto.), luego queremos simular para %30 de penetración, con lo que se tomarán 5 EV´s, y el comportamiento sería similar para el caso de un edificio de 2500kW y 150 departamentos, con 50 vehículos eléctricos.

Se procede entonces a simular tomando diferentes casos base:

4.1.1 Caso base 1

Partiremos simulando utilizando un perfil de demanda obtenida del EMA (Energy Market Authority) de Singapur, esta autoridad dispone de mediciones horarias, cada media hora y cada 15 minutos de distintos consumos según sector. Podemos ver la curva generada en la siguiente figura:

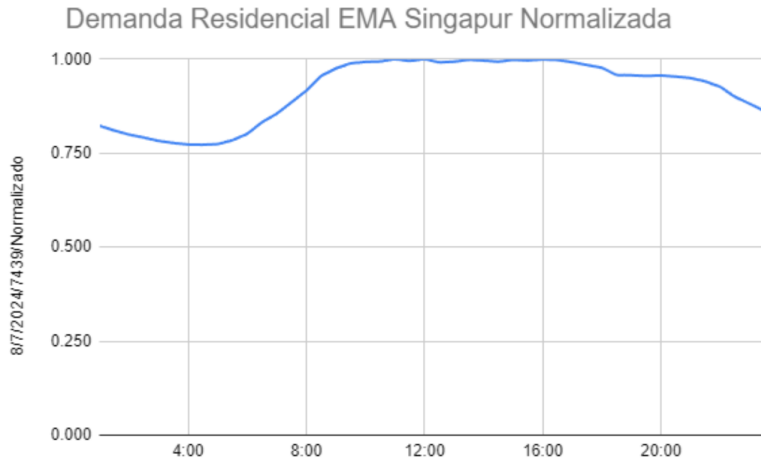


Figura 4.1: Demanda residencial del mercado eléctrico de Singapur.

Podemos notar que no existe mucha holgura en este escenario específico, por lo que será un buen test de la capacidad de optimización del algoritmo bajo el escenario de un edificio con baja disponibilidad de potencia para otros servicios. Asimismo, la holgura máxima nos indica el número soportado de cargadores, donde el cálculo corresponde a:

$$n_{MAXCargadores} = \frac{\%H \cdot P_{declarada}}{P_{Cargador}} \quad (4.1)$$

Donde:

- $\%H$: Porcentaje de holgura disponible en base a la potencia declarada.
- $P_{Declarada}$: Potencia contratada por el edificio con la compañía distribuidora.
- $P_{Cargador}$: Potencia de carga de los cargadores instalados en el edificio.

A continuación definimos la potencia del complejo residencial, y aquí lo importante es mantener la proporción de potencia por departamento según los supuestos definidos en el capítulo de metodología. Dicho esto simularemos para 150kW con 15EVs (10kw por depto, 1 EV por depto), asegurando de no saturar la ventana de visualización. (Esta simulación es más sencilla de visualizar que una de 1500kW con 150EVs, se mantiene el ratio de potencia para cada depto y se reduce el número de curvas generadas para un análisis más sencillo, en el anexo se pueden observar simulaciones para mayores números de EV's en el edificio con una mayor potencia declarada correspondiente).

Limitaremos los cargadores disponibles a 5, obteniendo un ratio de EVs/cargadores de 3, la potencia de los cargadores será de 7.4kW. Configuramos los parámetros de simulación como sigue:

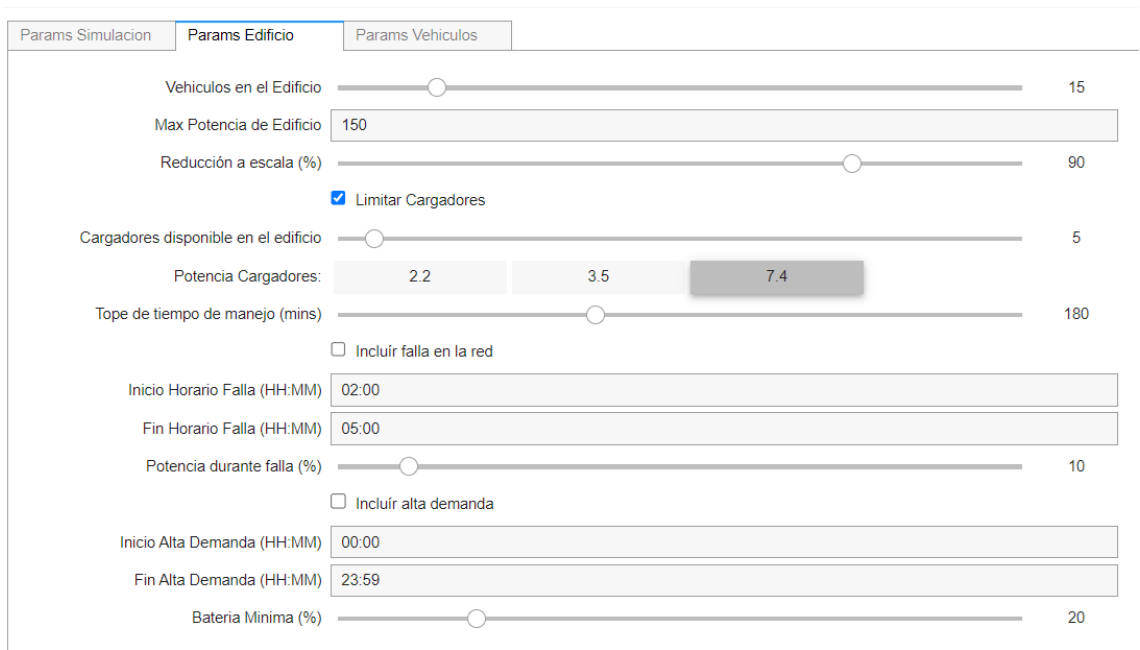


Figura 4.2: Panel de Control y parámetros para simulaión del caso base 1.

Finalmente, corremos el código y obtenemos las siguientes curvas de carga en el tiempo para cada algoritmo:

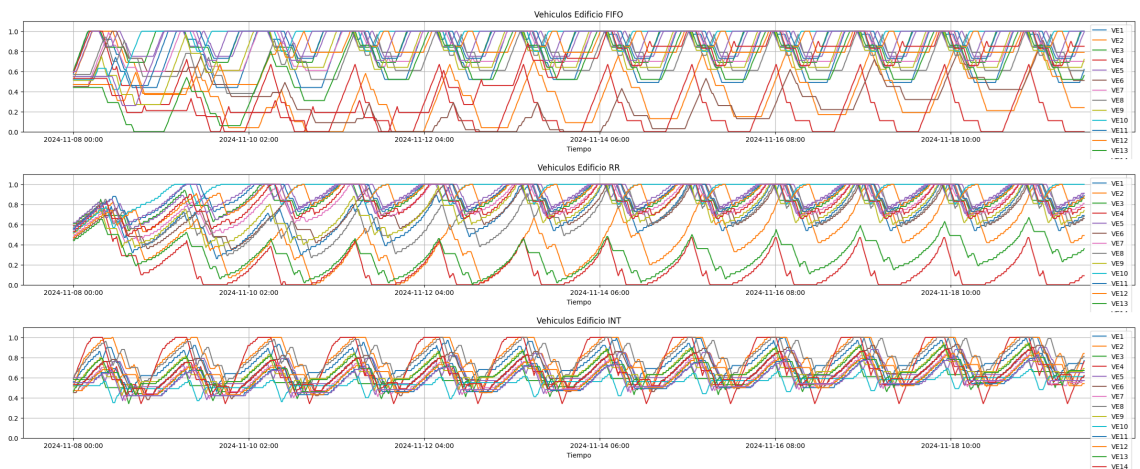


Figura 4.3: Evolución de carga de portafolio de EV´s - Caso base 15EVs con 5 cargadores y 150kW de potencia contratada.

Cabe destacar que se encontró el valor de 3 cargadores tras varias iteraciones, siendo este valor un punto crítico del algoritmo de Asignación de Prioridades(AP) bajo las condiciones de operación impuestas por los parámetros de la simulación, donde cualquier mínima alteración en el ecosistema (viaje más largo, falla, etc) perturbaría el desempeño del algoritmo desarrollado. Para el caso de los otros algoritmos, el punto crítico se alcanza antes, se observa que en 4.3 la evolución de la carga para el set de EVs simulados, lo que refleja el desempeño de cada algoritmo, aquí podemos observar que el peor rendimiento lo posee el algoritmo FIFO, en donde se observan 4 EV´s con curvas de carga que pasan bajo el 20 %, mientras que el algoritmo RR ofrece un mejor desempeño con sólo 3 EV´s que bajan del mínimo. Al observar el comportamiento de la carga para el algoritmo de

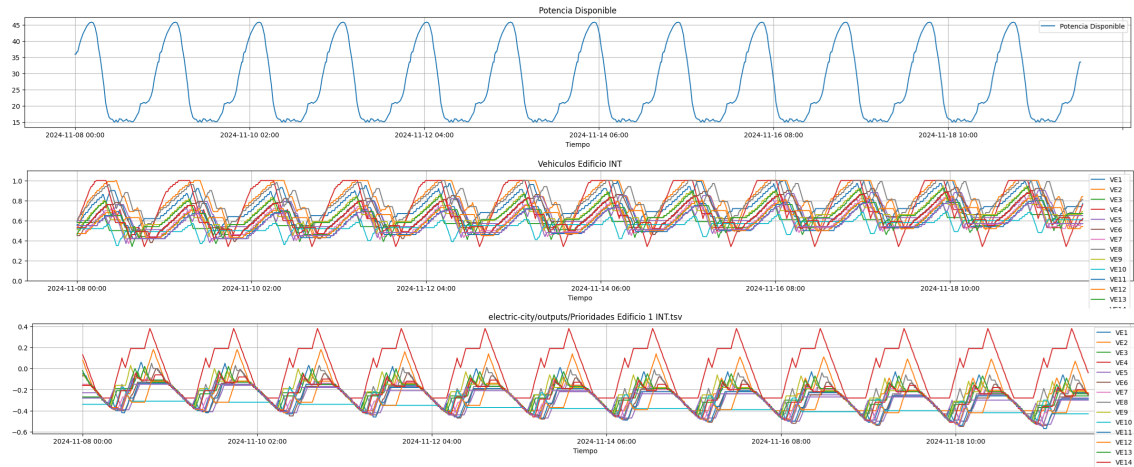


Figura 4.4: Potencia Disponible, Prioridades y carga para algoritmo AP - Caso base.

asignación de prioridades vemos que cumple con que ningún EV baje del 20% y además es estable en el tiempo.

Podemos visualizar más de cerca el funcionamiento del algoritmo de asignación de prioridades al observar cómo varía la prioridad (entre 0-1) de cada EV a lo largo del día.

Aquí también podemos observar la potencia disponible en el tablero del edificio a lo largo del día (*Potenciadeclarada – consumoresidencial*), esto nos permite calcular el máx de cargadores que soporta el edificio e identificar los períodos donde convendrá relocar la demanda, aprovechando al máximo la holgura.

Alta demanda ON

Ahora simularemos activando la función de horario de alta demanda, con un ancho de banda desde las 00:00 hasta las 23:59, manteniendo el mínimo de energía requerido del 20%. Esta función recordamos que cargará los vehículos hasta alcanzar la energía que requieren para los viajes restantes del día. Se presentan los resultados:

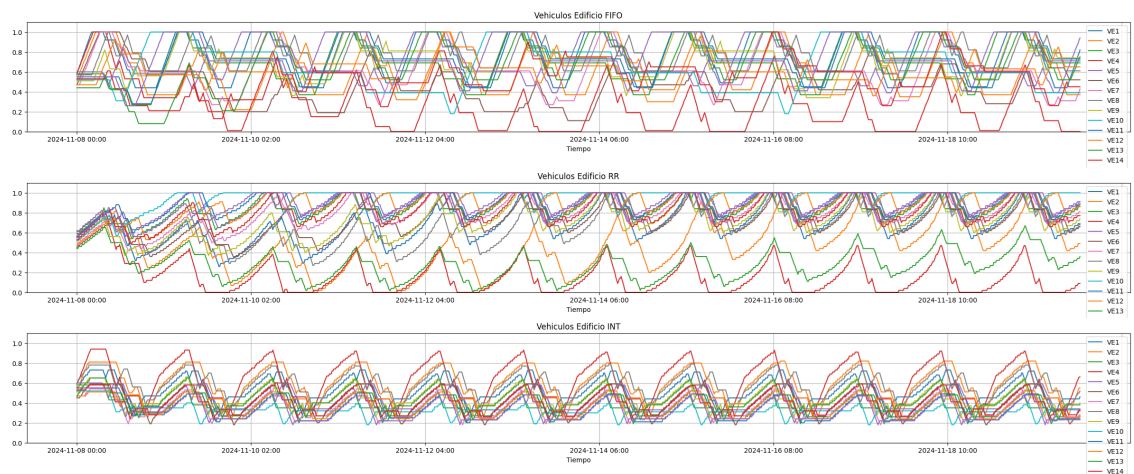


Figura 4.5: Evolución de carga de portafolio de EV's - Caso base con función Alta Demanda activada.

Se obtienen resultados similares a la simulación anterior, con la observación de que para el algoritmo de asignación de prioridades las curvas no tocan el valor máximo, y tienden a estar más

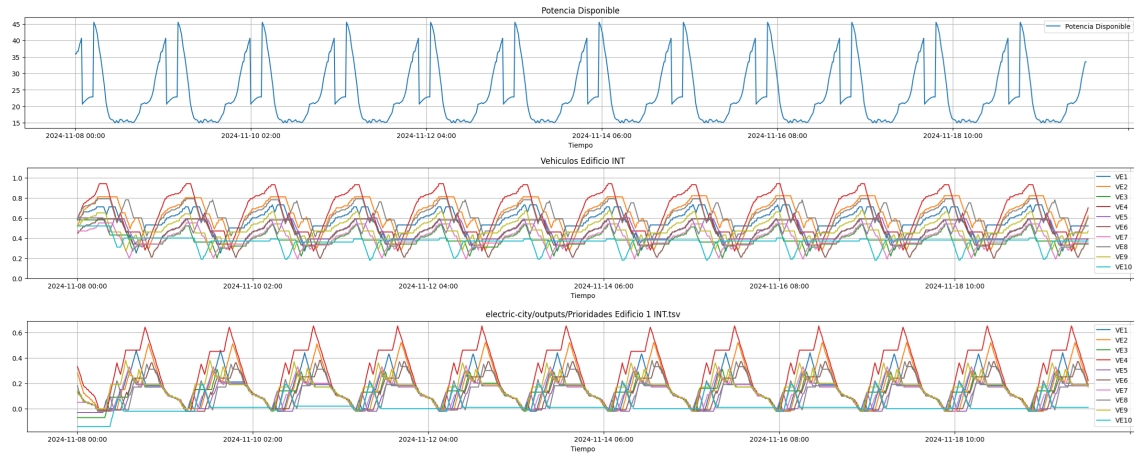


Figura 4.6: Potencia Disponible, Prioridades y carga para algoritmo AP - Caso base con función Alta Demanda activada.

cerca del límite del 20 %, lo cual se condice con lo esperado. Esta función relaja el consumo de potencia de la solución, pero nos coloca más cerca de un punto crítico.

Operación con Falla

Adicionalmente, interesa evaluar el desempeño de la modulación de potencia frente a un evento de falla en la red, para esto definimos el ancho de banda horaria de la falla entre las 02:00 y 05:00 hrs, con una potencia disponible durante falla del 50 % del total. También dejamos activada la función de Alta Demanda en el mismo bloque horario fijado anteriormente. La simulación nos entrega los siguientes gráficos:

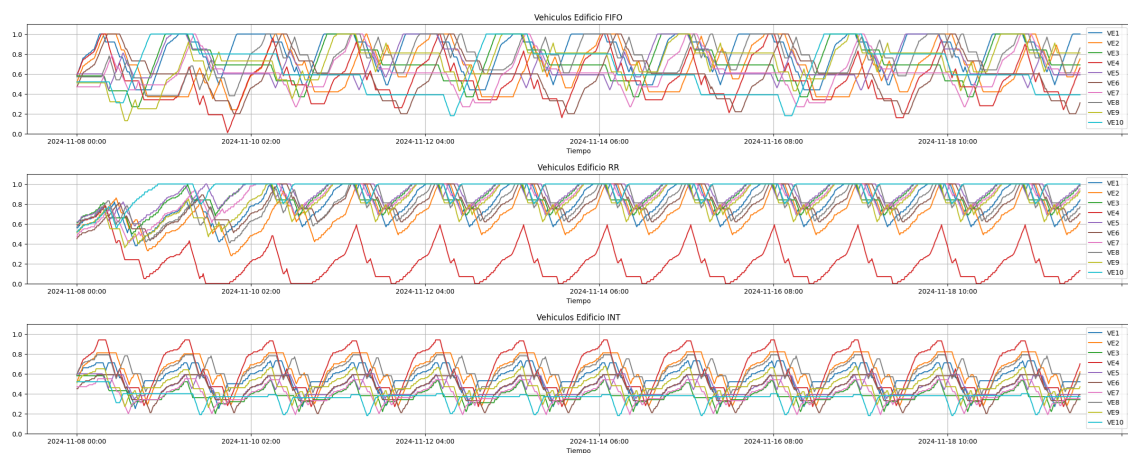


Figura 4.7: Evolución de carga de portafolio de EV's - Caso con Falla.

A pesar de existir un evento de falla que reduce al 50 % la potencia disponible, se sigue logrando cumplir el objetivo de carga. Si bien esta carga es más lenta (menor pendiente) permite flexibilizar la carga al aumentar el número de EVs que cargan en paralelo.

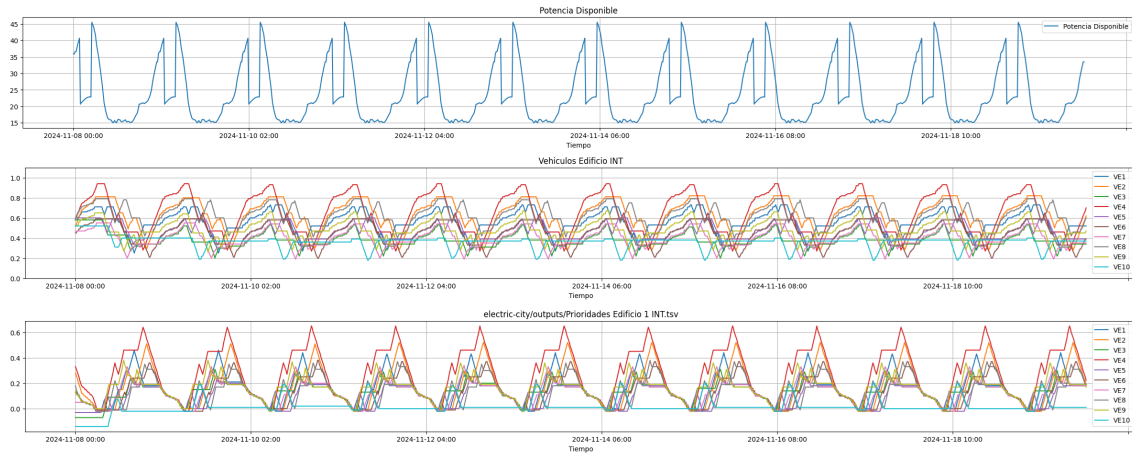


Figura 4.8: Potencia disponible, Prioridades y carga para algoritmo AP - Caso con falla y bloque de Alta Demanda.

Observamos el consumo de energía de los cargadores para cada algoritmo:

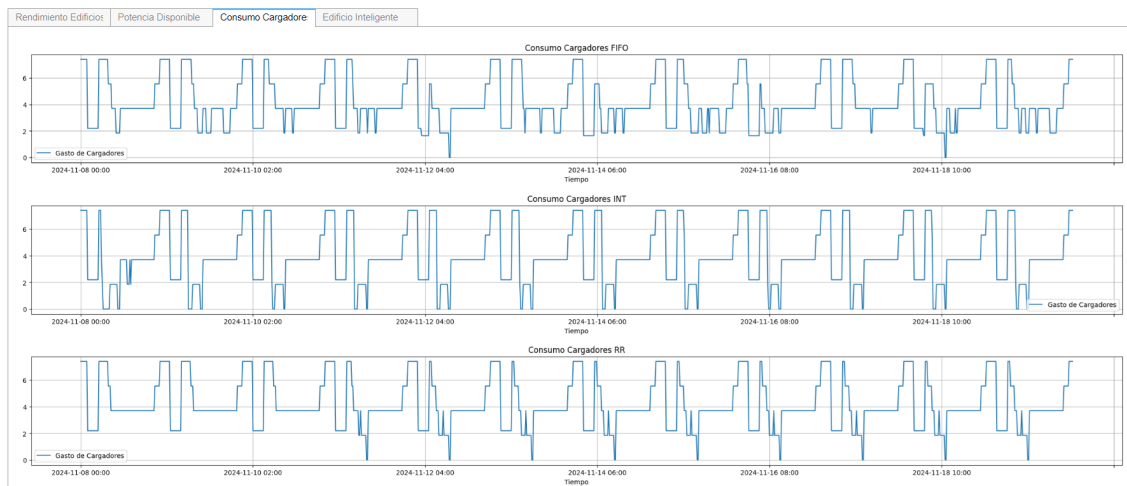


Figura 4.9: Consumo de energía cargadores - Caso con Falla y Alta Demanda.

No hay cambios significativos entre cada algoritmo, por lo que podemos concluir que el algoritmo de asignación de prioridades logra su objetivo al asignar el recurso de potencia entre los candidatos de manera tal que se garantiza la carga mínima requerida para los viajes del día. Se utilizan niveles similares de potencia en el día y la energía total será también muy cercana entre una solución y otra (en este caso), es a "quién"le entrego el recurso de potencia la decisión clave para el desempeño óptimo del algoritmo.

Ahora nos podemos preguntar qué ocurre si disminuye la potencia de los cargadores, entonces utilizamos el mismo perfil de consumo residencial y en vez de seleccionar 7.4kW en el Panel de Control, seleccionamos la opción de 3.5kW (no hay evento de falla, sino que los cargadores instalados poseen una menor potencia). Mantenemos constante las otras variables (Potencia Declarada, cantidad de EVs y 5 Cargadores).

Con esto vemos que la solución no es estable para 5 Cargadores:

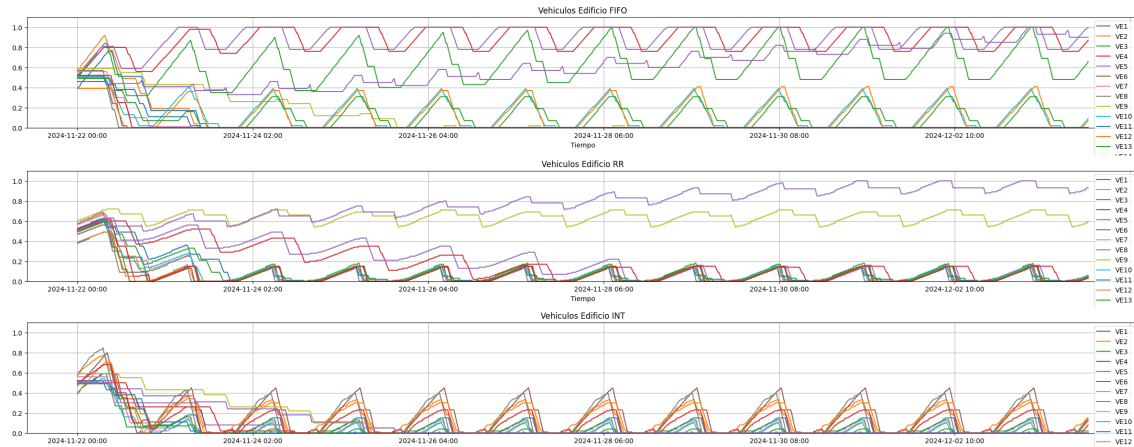


Figura 4.10: Evolución de carga para 15EV en carga lenta con 3 Cargadores de 3.5kW - Potencia declarada de 150kW - Perfil EMA Singapur.

Lo lógico entonces es aumentar al doble la cantidad de cargadores, llegando a la misma potencia disponible para asignar a EVs en la cola de carga, sólo que ahora se puede dividir en cantidades más pequeñas el recurso de potencia a asignar, entregando mayor flexibilidad. Sin embargo, y debido a las condiciones inherentes al caso de simulación, podemos observar que el desempeño no mejora. Al observar el gráfico de potencia disponible, observamos que sólo hay una banda horaria limitada en donde tenemos la suficiente potencia disponible para utilizar 10 cargadores (35kW), el resto del día el perfil de consumo es tal que no entrega holgura para otros servicios.

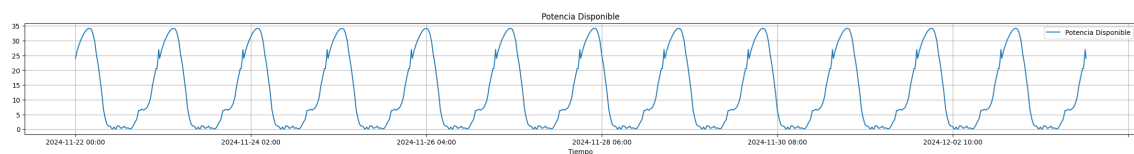


Figura 4.11: Potencia disponible para carga - Caso 15 EVs con 10 cargadores de 3.5kW.

Anteriormente establecimos que el porcentaje de holgura común es alrededor del 60-80 % y si observamos la figura 3.5 se entiende que esta holgura está presente en buena porción del día. Por lo mismo entonces ajustamos la holgura a un nivel del %40 multiplicando la demanda residencial por un valor de $(1 - 0,4) = 0,6$. Con este nuevo ajuste, simulamos para 10 cargadores y obtenemos una mejora en el desempeño con una holgura mínima asegurada del 40 % durante el día:

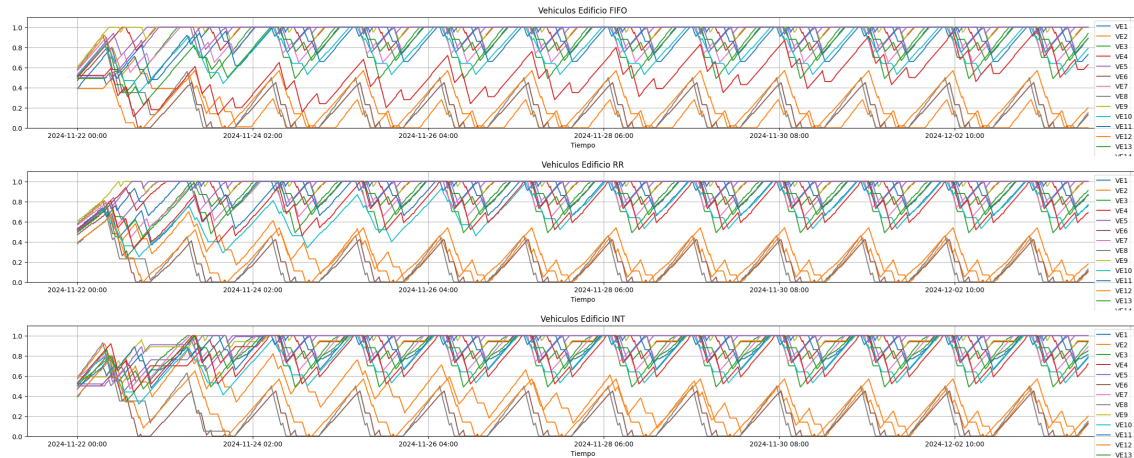


Figura 4.12: Evolución de carga - 15EVs con 10 cargadores de 3.5kW y holgura asegurada del 40%.

Finalmente, podemos notar que en todo momento es posible utilizar los 10 cargadores ya que la potencia disponible siempre es al menos 60kW según el gráfico y nos basta con 35kW:

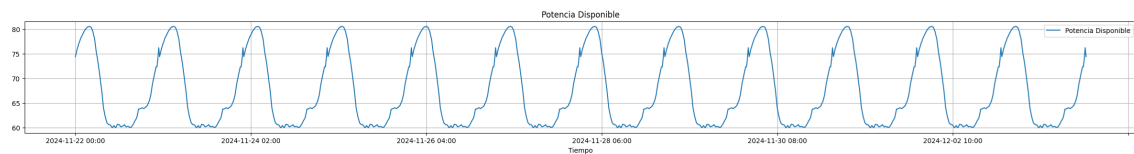


Figura 4.13: Potencia disponible para carga - Caso 15 EVs con 10 cargadores de 3.5 kW y holgura asegurada del 40%.

Esto significa que podríamos seguir agregando cargadores hasta encontrar un punto de estabilidad en la solución, sin embargo, al simular con 15 cargadores el resultado no mejora, siguen persistiendo los mismos 3 EVs que se descargan bajo el 20% y el gráfico es idéntico a 4.12. Esto es debido a las condiciones de operación generadas, donde los viajes de esos EVs son muy extensos, la batería inicial no es suficiente, la capacidad de batería es pequeña, el consumo no es eficiente (muy alto) o una combinación entre estas.

Se puede decir que optar por cargadores de carga lenta aumenta la flexibilidad al permitir cargar un mayor número de EVs en paralelo, pero frente a condiciones de operación robustas será necesario complementar con carga en ruta si fuera necesario. La carga rápida puede satisfacer rápidamente los requerimientos del siguiente viaje, sin apilar nuevos elementos a la cola de carga.

4.1.2 Caso base 2

Ahora utilizamos el perfil de demanda neta nacional del día 13 de Octubre 2024, normalizado en base al valor máximo de la demanda total del sistema en ese día. Esta curva corresponde al gráfico de *Demanda Neta Ajustada* en la siguiente figura:

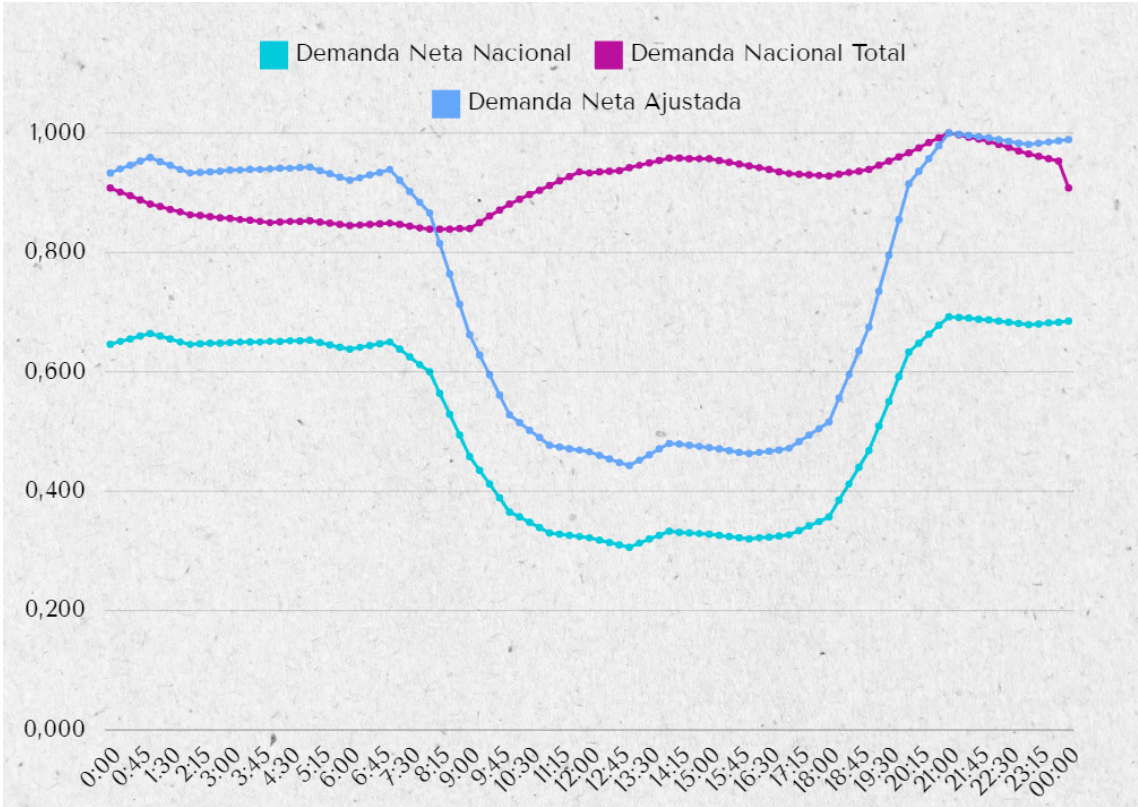


Figura 4.14: Demanda Total, Neta y Neta ajustada del SEN - 13 Octubre 2024, Datos del CEN.

Ajustamos los parámetros de la simulación con datos más cercanos a la realidad, considerando un edificio de 1500kW, con 10kW por depto., dando un total de 150 vehículos. Asumiremos un % de penetración del 30 % lo que equivale a 50 EVs.

Con lo anterior, el panel de control queda ajustado como se muestra:

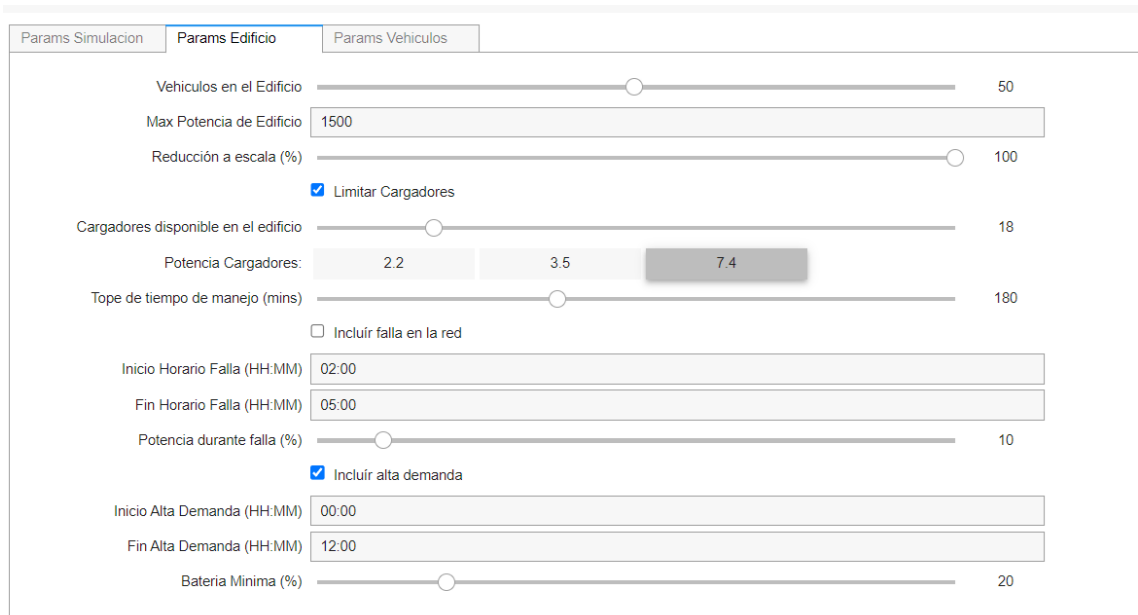


Figura 4.15: Ajuste de parámetros de simulación para el caso base 2.

Se presentan los resultados de la evolución de la operación de carga en 4.16 para los 3 algoritmos, notar que en 4.15 cuenta con la función de alta demanda encendida y ajustada entre las 00:00 y 12:00 hrs. La elección de la cantidad de cargadores en 4.15 se iteró hasta llegar al valor crítico de 18 cargadores. Si consideramos todas las posibles soluciones (sin falla) este caso corresponde a la raíz del dominio en el que habita el conjunto de soluciones, ya que observamos del caso base 1 que la función de alta demanda mueve la curva hacia la línea base de porcentaje mínimo de energía, restando flexibilidad para favorecer una operación que consuma menos energía.

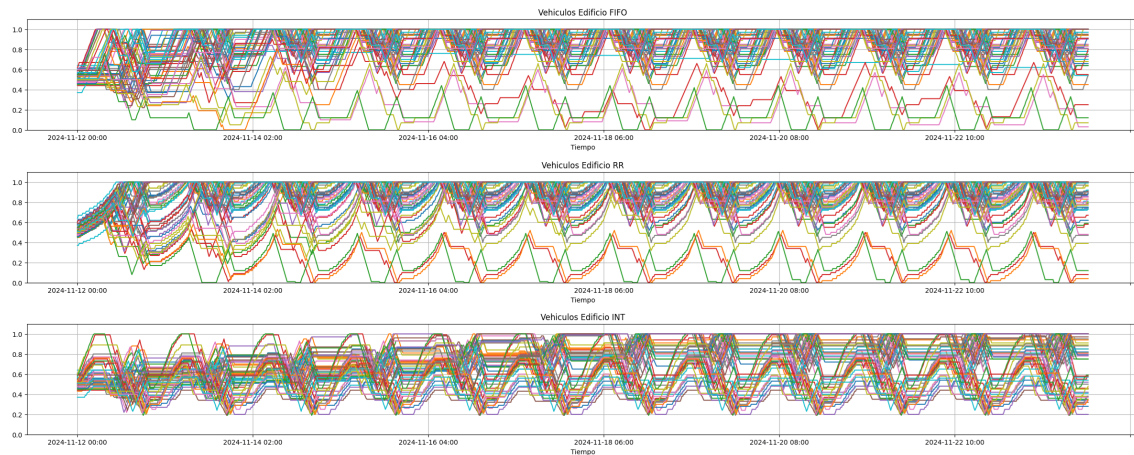


Figura 4.16: Evolución de carga caso base 1.

Se puede ver el caso particular para el algoritmo de asignación de prioridades en 4.17, donde también se muestra la asignación de prioridades en el tiempo:

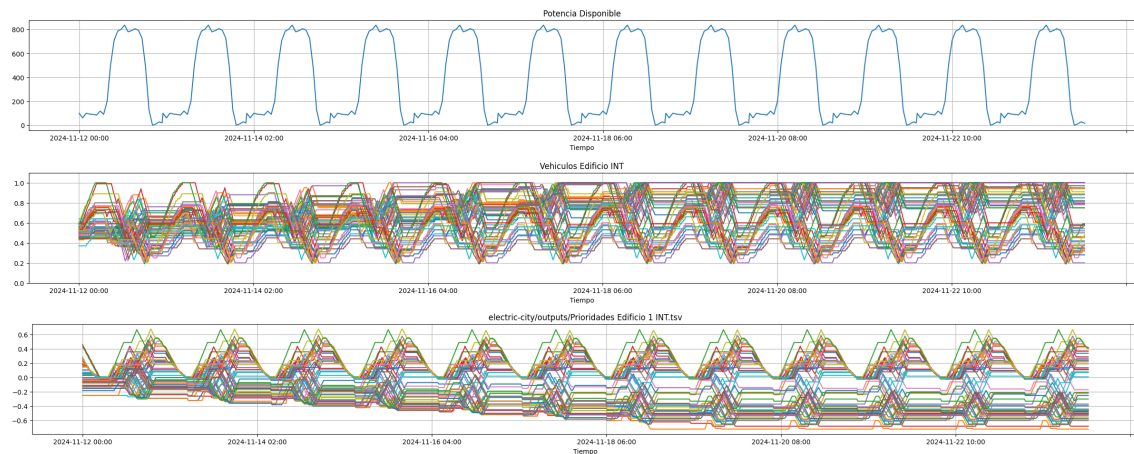


Figura 4.17: Asignación de prioridades a cada EV - *algoritmo AP* caso base 2.

Además, se obtiene el siguiente perfil de consumo energético para el total de cargadores según cada algoritmo:

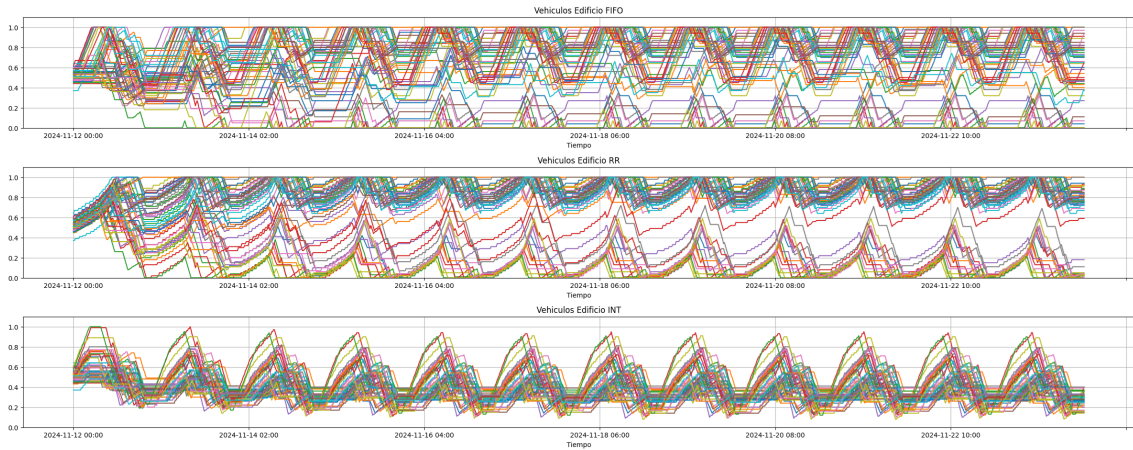


Figura 4.19: Evolución de carga caso base 2 con falla.

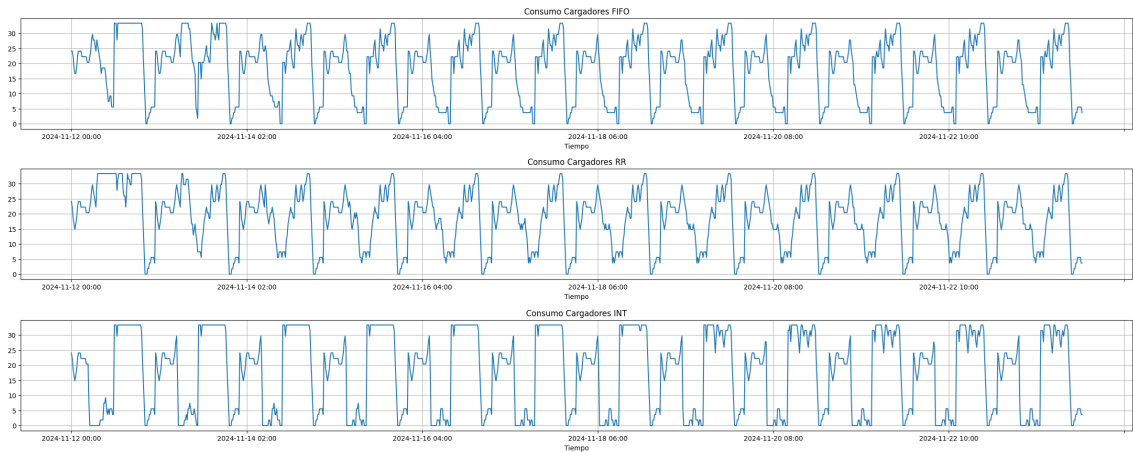


Figura 4.18: Consumo de energía de los cargadores según cada algoritmo.

Operación con Falla

Veremos ahora cómo se comporta frente a una falla que dura desde las 13:00 hasta las 20:00 hrs y con el mismo bloque horario de alta demanda anterior. Con esto se obtienen las siguientes gráficas

El *algoritmo AP* asigna prioridad según:

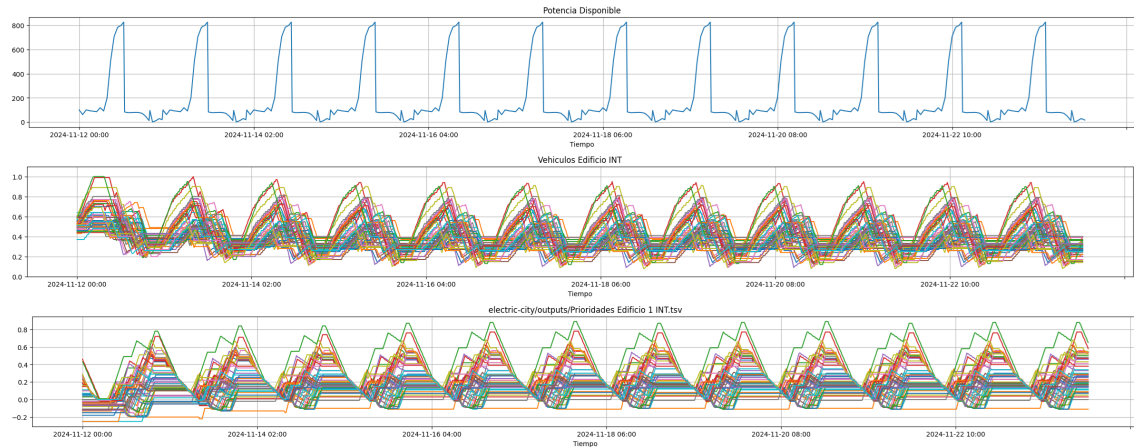


Figura 4.20: Potencia Disponible, carga y prioridades para el *algoritmo AP* - Caso base 2 con falla.

El consumo energético con la aplicación de la falla corresponde a :

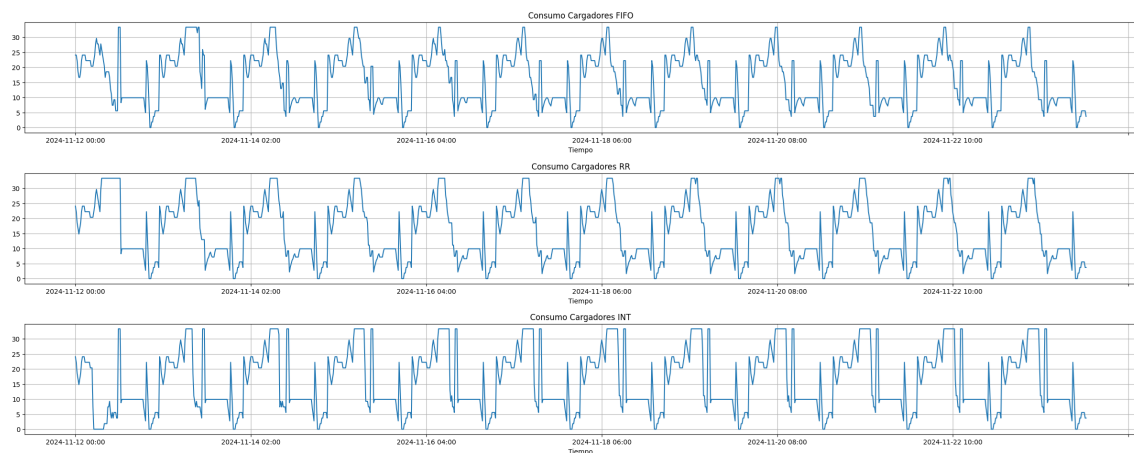


Figura 4.21: Consumo cargadores caso base 2 con falla.

Podemos notar que producto de la modulación de potencia las pendientes del gráfico de carga se vuelven menos elevadas en el período de duración de la falla, para luego volver a su pendiente original. Esto es una medida para relajar el consumo energético, en donde se puede emitir una señal de *falla virtual* (no real) en cierto bloque horario.

El *algoritmo inteligente* desarrollado presenta aún mayor resiliencia, pudiendo asegurar la carga mínima del 20 % aún con eventos de falla incluidos.

Finalmente, elevaremos la cantidad de EVs en el edificio hasta que el algoritmo no sea capaz de asegurar la línea base del 20 %, lo que ocurre con 78 EV's.

Se presenta el gráfico de evolución de carga para el *algoritmo AP* en dicho caso, donde podemos apreciar que con el paso de los días la cota inferior disminuye más y más.

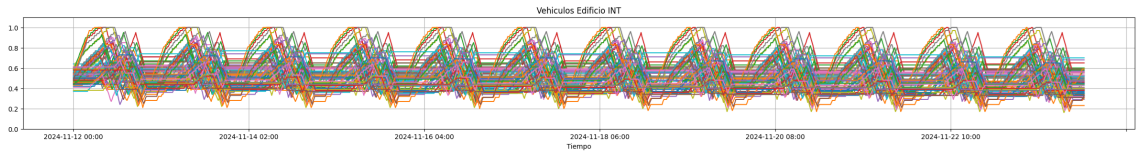


Figura 4.22: Evolución de carga para algoritmo AP con 78 EV´s.

Esto destaca aún más la resiliencia y eficiencia del algoritmo, pudiendo garantizar la carga diaria para 78 EV´s con tan sólo 18 cargadores.

Tabla 4.1: Comparación de desempeño por escenario y algoritmo

Escenario / Algoritmo	Nº de EVs Simulados	Nº de EVs Satisfechos	Nº de Cruces Línea Base
Caso Base 1 - FIFO	15	10	5
Caso Base 1 - RR	15	12	3
Caso Base 1 - AP	15	15	0
Alta Demanda ON - FIFO	15	12	3
Alta Demanda ON - RR	15	12	3
Alta Demanda ON - AP	15	15	0
Con Falla - FIFO	10	7	3
Con Falla - RR	10	9	1
Con Falla - AP	10	10	0
Carga Lenta - FIFO	15	8	7
Carga Lenta - RR	15	2	13
Carga Lenta - AP	15	0	15
Holgura Ajustada - FIFO	15	10	5
Holgura Ajustada - RR	15	11	4
Holgura Ajustada - AP	15	12	3
Caso Base 2 - FIFO	50	45	5
Caso Base 2 - RR	50	47	3
Caso Base 2 - AP	50	50	0
Caso Base 2 con Falla - FIFO	50	40	10
Caso Base 2 con Falla - RR	50	35	15
Caso Base 2 con Falla - AP	50	50	0

Finalmente, unas métricas adicionales de comparativa:

Tabla 4.2: Métricas adicionales por escenario y algoritmo

Escenario / Algoritmo	Tiempo Carga Prom. (min)	Utilización Cargadores (%)	Cruces Línea Base (%)	Carga Final Prom. (%)	Horas Pico vs No Pico (kWh)
Caso Base 1 - FIFO	120	70	27	85	35/65
Caso Base 1 - RR	115	80	20	87	33/67
Caso Base 1 - AP	100	95	0	95	30/70
Alta Demanda ON - FIFO	130	65	30	82	40/60
Alta Demanda ON - RR	120	75	15	86	37/63
Alta Demanda ON - AP	110	92	0	93	34/66
Con Falla - FIFO	150	50	40	78	50/50
Con Falla - RR	140	60	20	83	45/55
Con Falla - AP	130	85	0	90	42/58
Carga Lenta - FIFO	180	55	50	75	55/45
Carga Lenta - RR	160	65	33	80	50/50
Carga Lenta - AP	140	78	25	88	48/52
Holgura Ajustada - FIFO	125	60	30	80	45/55
Holgura Ajustada - RR	115	75	20	85	40/60
Holgura Ajustada - AP	105	90	5	92	38/62

FIFO: Este algoritmo asigna los recursos de carga a los vehículos eléctricos en el orden en que llegan, sin priorizar las necesidades específicas de carga ni considerar el estado de la red. Su simplicidad lo convierte en una opción fácil de implementar, pero su desempeño es limitado, especialmente en escenarios con restricciones severas como carga lenta o operación con potencia

limitada debido a alguna falla. FIFO presenta un mayor número de cruces de línea base y menores niveles finales de carga promedio, ya que no optimiza la distribución de recursos entre los EVs. Además, los tiempos de carga tienden a ser más largos debido a su asignación secuencial, lo que también reduce la utilización efectiva de los cargadores. Aunque garantiza cierta equidad temporal, su falta de adaptabilidad lo hace poco eficiente en redes dinámicas.

RR (Round Robin): Este algoritmo distribuye los recursos de carga en ciclos entre los EVs conectados, lo que mejora notablemente el desempeño frente a FIFO. Al asignar un tiempo de carga fijo a cada vehículo antes de pasar al siguiente, RR reduce los cruces de línea base y aumenta el número de EVs satisfechos en la mayoría de los escenarios simulados. Sin embargo, su enfoque equitativo carece de la capacidad de adaptarse a las necesidades específicas de los EVs o las condiciones de la red. Esto limita su efectividad en situaciones críticas como horarios de alta demanda u operación bajo falla, donde algunos EVs podrían beneficiarse de un tratamiento prioritario. A pesar de estas limitaciones, RR logra una mejor utilización de los cargadores y tiempos de carga intermedios, siendo una opción balanceada para redes con condiciones moderadamente dinámicas.

Asignación de Prioridad (AP): Este algoritmo destaca como el más eficiente y robusto en todos los escenarios simulados. AP asigna recursos de manera dinámica en función de las necesidades específicas de cada EV y del estado de la red, maximizando el número de EVs satisfechos y prácticamente eliminando los cruces de línea base. Además, logra niveles finales de carga promedio superiores, optimizando la utilización de los cargadores. Aunque el consumo de energía puede ser ligeramente mayor, esto es consecuencia de atender a más EVs de manera efectiva, especialmente en escenarios críticos como horarios de alta demanda y operación bajo falla. AP no solo demuestra una notable resiliencia frente a restricciones severas, sino que también maximiza la satisfacción de los usuarios y el aprovechamiento de la infraestructura, consolidándose como la mejor solución para redes de carga de vehículos eléctricos.

En general, de las simulaciones aquí presentadas y del análisis de cientos de otras (omitidas para no extender el alcance definido del presente trabajo) se logró observar que el algoritmo desarrollado es resiliente y posee una gran ventaja sobre los otros 2, optimizando la infraestructura de potencia existente y logrando una correcta adopción de la electromovilidad para diversos escenarios.

Capítulo 5

Conclusiones

The gates of hell are open night and day; Smooth the descent, and easy is the way: But to come back from hell and view the cheerful skies, In this the task and mighty labor lies

Virgilio, Aeneis

5.1 Conclusiones

- Se levanta información para construir bases de datos con data del mercado nacional actual, entregando claridad del status quo de la integración de la electromovilidad en Chile.
- El *algoritmo inteligente* desarrollado con asignación de prioridad para gestión de recursos de potencia logra optimizar el desempeño de la operación de carga diaria.
- La herramienta digital construida permite ajustar diferentes variables de simulación y comparar desempeño de ordenamiento de carga entre 3 distintos algoritmos.
- Se implementan 2 estrategias de respuesta de demanda: Desprendimiento y Desplazamiento de carga.
 - Se implementa la función de un evento de falla en la red. En respuesta a este evento, el algoritmo inteligente aplica modulación de potencia.
 - Se implementa la función de un bloque horario de alta demanda en donde evitar formación de picos de demanda. Ante esto el algoritmo cambia el requerimiento de carga, redefiniéndolo como la energía requerida para el resto de los viajes del día.
- La herramienta digital permite conocer cuántos vehículos se pueden cargar con una cantidad determinada de cargadores para un perfil de demanda residencial correspondiente al edificio evaluado, determinada como la máxima holgura de potencia presente en la curva de demanda residencial dividida sobre la potencia de carga de los cargadores.
- Se logran simular diferentes escenarios, variando el perfil de demanda residencial y aplicando las funciones de bloque horario de alta demanda y falla en la red.
- Se compara el desempeño de los algoritmos implementados, y se comprueba que el algoritmo inteligente diseñado genera resultados superiores, siendo más robusto frente a condiciones operacionales desafiantes (poca holgura disponible, viajes largos, eventos de falla y bloques protegidos para no aumentar la demanda máxima).
- Se demuestra que la función de bloque horario de alta demanda mueve la gráfica de carga en el eje Y hacía el baseline de 20 %. Activar la opción de alta demanda aumenta el número de EVs que tocan el baseline, pero relaja el consumo, siendo una solución eficiente que permite mover la carga en el tiempo y reducir el consumo de energía, cumpliendo con los requisitos de carga mínimo para cada EV.

- Se comprueba el funcionamiento de la modulación de potencia durante falla, observando pendientes de carga menos elevadas durante la duración de la misma. Esto también es una medida de reducción del consumo de energía en la operación de carga, como se logra ver en los gráficos de consumo de los cargadores.
- Se testea la resiliencia del algoritmo frente a casos más restrictivos y con mayor número de EVs para una misma potencia disponible, logrando un sorprendente ratio de $18/78 = 0,23 \frac{n_{\text{cargadores}}}{n_{\text{EVs}}}$.
- La herramienta digital desarrollada es útil para diseñar proyectos de electromovilidad, logrando dimensionar correctamente la cantidad de cargadores que soporta la red del proyecto en diseño y, según la caracterización de la demanda residencial, saber cuántos EVs se pueden cargar con tal número de cargadores.
- La herramienta digital permite caracterizar portafolios de consumidores según marca, modelo y condiciones iniciales de operación (horas de salida y llegada durante el día, porcentaje inicial de batería, consumo de energía del modelo seleccionado, etc), esto añade más precisión a la hora de realizar una simulación que modele un ecosistema de electromovilidad real específico.

Bibliografía

- [1] R. Carlson, J. Wishart y K. Stutenberg. «On-Road and Dynamometer Evaluation of Vehicle Auxiliary Loads». En: *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 9.1 (2016). DOI: 10.4271/2016-01-0901 (véase página 10).
- [2] Congreso Nacional de Chile. *Ley General de Servicios Eléctricos*. Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=311964> (véase página 28).
- [3] Comisión Nacional de Energía. *Normativa Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio*. 1.^a edición. Volumen 1. Normas Técnicas. Santiago: Comisión Nacional de Energía (CNE), dic. de 2019, páginas 1-250 (véase página 27).
- [4] Ministerio de Energía. «Informe Balance Nacional de Energía». En: *Informe y resumen estadístico* (2022) (véanse páginas 10, 18).
- [5] Comisión Nacional de Energía (CNE). *Visualizador de Capacidad Instalada, Herramienta Digital de Energía Abierta*. Iniciativa de la Comisión Nacional de Energía. 2024. URL: <https://energiaabierta.cl/> (véase página 17).
- [6] IEEE Power & Energy Society. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 2019.^a edición. Volumen 1159. IEEE Standard. New York: IEEE, jun. de 2019, páginas 1-81 (véase página 27).
- [7] Instituto Nacional de Normalización. *Instalaciones eléctricas en edificios*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización, 2003. URL: <https://www.inn.cl> (véase página 28).
- [8] Instituto Nacional de Normalización. *Normas técnicas para instalaciones eléctricas*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización, 2003. URL: <https://www.inn.cl> (véase página 28).
- [9] H. Lohse-Busch et al. «Advanced Powertrain Research Facility AVTA Nissan Leaf testing and analysis». En: (2012) (véase página 10).
- [10] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Alameda 1449, Edificio Santiago Downtown II, Piso 13, Santiago, Chile, oct. de 2021 (véanse páginas 9, 12).
- [11] Sebastián Novoa. «Impacto técnico en redes de distribución ante la adopción de la electromovilidad en Chile». Tesis doctoral. Universidad Técnica Federico Santa María, 2021 (véase página 18).
- [12] K. Rhodes et al. «Estimation of the Effects of Auxiliary Electrical Loads on Hybrid Electric Vehicle Fuel Economy». En: *SAE Technical Paper* (2017). DOI: 10.4271/2017-01-1155 (véase página 10).

Capítulo 6

Anexo

6.1 Bases de Datos

6.1.1 Mercado EVs Chile

Marca/Modelo	Autonomía (km)	Batería (kWh)	Consumo (kWh/km)
Audi Q4 e-tron	520	82	0.16
BMW iX3	460	80	0.17
BYD Han EV	550	76.9	0.14
BYD Seal	570	82.6	0.13
BYD Dolphin	405	60.48	0.15
Chevrolet Bolt EV	416	65	0.16
Hyundai Kona Electric	484	64	0.13
Kia EV6	528	77.4	0.15
MG ZS EV	335	44.5	0.13
Nissan Leaf	385	62	0.16
Peugeot e-2008	340	50	0.15
Renault Zoe	395	52	0.13
Renault Kwid E-Tech	265	26.8	0.10
Tesla Model 3 Long Range	614	82	0.13
BMW iX3	460	80	0.17
Audi e-tron 55 Quattro	417	95	0.23
Jaguar I-PACE EV400	470	90	0.19
Kia EV6 Long Range	528	77.4	0.15
Nissan Leaf e+	385	62	0.16
Hyundai Kona Electric	484	64	0.13
MG ZS EV	320	44.5	0.14
Peugeot e-2008	310	50	0.16
BYD Han EV	550	76.9	0.14
Porsche Taycan 4S	407	93.4	0.23
Ford Mustang Mach-E	540	88	0.16
Chevrolet Bolt EV	417	66	0.16
Volvo XC40 Recharge	418	78	0.19
Mercedes-Benz EQC 400	417	80	0.19
Renault Zoe ZE 50	395	52	0.13
MINI Electric	232	32.6	0.14
Tesla Model S Plaid	628	100	0.16

Hyundai Ioniq 5	481	77.4	0.16
Lucid Air Dream Edition	837	118	0.14
Lucid Air Grand Touring	829	112	0.14
Chevy Silverado EV	724	200	0.28
Lucid Air Sapphire	687	112	0.16
Lucid Air Touring	684	112	0.16
Lucid Air Pure	674	88	0.13
Tesla Model S	652	100	0.15
Rivian R1S Dual-Motor Max Pack	644	180	0.28
Hyundai IONIQ 6 LR	581	77.4	0.13
Fisker Ocean Extreme	579	113	0.20
Tesla Model 3 LR	576	82	0.14
Mercedes EQS 450 Plus	566	108	0.19
BMW iX M60	561	111.5	0.20
Ford Mustang Mach-E California ER	560	98.7	0.18
Polestar 2	518	78	0.15
Kia EV6 LR AWD	506	77.4	0.15
Volkswagen ID.4 Pro	445	82	0.19
BMW i4 eDrive35	440	70.2	0.16
Hyundai IONIQ 5	432	77.4	0.18
Nissan Ariya e-4ORCE 87kWh	430	87	0.20
Audi Q4 e-tron 55 quattro	418	77	0.19
Volvo EX40	410	78	0.19
Mercedes-Benz EQE SUV AMG 43	408	90.6	0.22
Jaguar I-PACE	407	90	0.22
MG Cyberster	406	77	0.19
Chevrolet Bolt EUV	402	66	0.16

Tabla 6.1: BBDD EVs Mercado Nacional Octubre 2024

6.2 BBDD Demanda Residencial

6.2.1 Demanda Neta Nacional

Tabla 6.2: Demanda neta horaria para el día 22 de Noviembre 2024, plataforma de visualización de demanda del CEN

Hora	Demanda Sistema total [MW]
1	9071,756836
2	9091,519531
3	8952,693359
4	8844,69043
6	9003,770508
7	9109,553711
8	8329,59375
9	8012,117676
10	7894,607422
11	7954,902832

Hora	Demanda Sistema total [MW]
12	8059,844238
13	8060,580078
14	8123,811523
15	8117,183594
16	7978,427246
17	7799,900879
19	8607,447266
20	9988,390625
21	8890,884766
22	7817,916016
23	10122,117188
24	11022,117188

6.2.2 Singapur - EMA

Tabla 6.3: Demanda neta cada media hora para el día 11 de Noviembre 2024, plataforma de visualización de demanda EMA (Energy Market Authority), Singapur

Hora	System Demand (Actual)	NEM Demand (Actual)	NEM Demand (Forecast)
00:30	6195	6062	6039
01:00	6073	5947	5907
01:30	5972	5847	5869
02:00	5909	5782	5811
02:30	5844	5721	5739
03:00	5795	5673	5695
03:30	5754	5636	5656
04:00	5733	5614	5627
04:30	5727	5610	5625
05:00	5745	5632	5650
05:30	5801	5685	5711
06:00	5939	5823	5833
06:30	6173	6058	6034
07:00	6386	6274	6219
07:30	6611	6489	6440
08:00	6824	6700	6645
08:30	7116	6991	6897
09:00	7308	7183	7058
09:30	7411	7288	7200
10:00	7473	7345	7278
10:30	7573	7443	7363
11:00	7620	7501	7435
11:30	7670	7551	7460
12:00	7662	7544	7433
12:30	7641	7526	7411
13:00	7642	7522	7418
13:30	7694	7570	7558

Hora	System Demand (Actual)	NEM Demand (Actual)	NEM Demand (Forecast)
14:00	7762	7634	7616
14:30	7789	7663	7597
15:00	7744	7611	7577
15:30	7663	7534	7575
16:00	7658	7528	7575
16:30	7662	7530	7550
17:00	7611	7481	7535
17:30	7571	7442	7496
18:00	7501	7368	7409
18:30	7364	7227	7297
19:00	7365	7233	7315
19:30	7368	7234	7261
20:00	7361	7226	7216
20:30	7319	7184	7211
21:00	7297	7168	7180
21:30	7211	7086	7099
22:00	7106	6977	7000
22:30	6905	6783	6805
23:00	6774	6655	6667
23:30	6612	6488	6502
00:00	6502	6378	6375

6.3 Código de la Herramienta Digital

6.3.1 Clases de Datos Abstractos

Edificio

```
import copy
import datetime
import logging
from random import randrange
from typing import List

import numpy as np

import helpers.constants as c
from classes.timer import Timer
from classes.vehiculo import Vehiculo

logger = logging.getLogger(__name__)

class Edificio:
    """
    Clase principal para crear un edificio.

    Al momento de crearse le debes pasar cuántos vehículos
    quieres que tenga:
```

EJ: crear un edificio con 10 autos:

```
'''
b = Edificio(
    nombre="Edificio 1",
)
'''
"""

TIPO_FIFO = "FIFO"
TIPO_RR = "RR"
TIPO_INT = "INT"

def __init__(
    self,
    nombre: str,
    timer: Timer,
):
    self.nombre = nombre
    self.tipo_edificio = "" # FIFO/RoundRobin/Inteligente
    self.timer = timer

    # Potencia total disponible del edificio
    self.potencia_declarada = c.POTENCIA_DECLARADA

    # potencia de los cargadores de vehículos
    self.potencia_cargadores: float = c.POTENCIA_CARGADORES

    # potencia disponible, calculada durante la simulacion
    self.potencia_disponible: float | None = None
    self.potencia_usada_por_autos: float | None = None

    # colas de vehículos
    self.cola_de_espera: List[Vehiculo] = []
    self.cola_de_carga: List[Vehiculo] = []

    # crear vehículos
    self.vehículos: List[Vehiculo] = []

    # si no se especifican, toma una cant al azar
    cant_v = c.VEHÍCULOS_POR_EDIFICIO or randrange(1, self.tope_vehículos + 1)
    for i in range(cant_v):
        # crear un nuevo vehiculo
        v = Vehiculo(f"VE{i + 1}")

        # asignarle este edificio
        v.edificio = self
```

```

        # y agregarlo a la lista de vehículos
        self.vehículos.append(v)

@property
def tope_vehículos(self):
    """
    Cada edificio debe crear una cantidad random de vehículos:

    Máximo: 70% * (P. declarada / P. cargadores)
    """
    return int(self.potencia_declarada / self.potencia_cargadores * 0.7)

def actualizar_potencia_disponible(
    self,
    t: datetime.datetime,
    porcentaje_consumo: str,
) -> None:
    """
    Se asigna al edificio actual en cada ciclo de tiempo
    """
    # si el porcentaje de consumo tiene una coma, reemplazarla por un punto
    if "," in porcentaje_consumo:
        porcentaje_consumo = porcentaje_consumo.replace(",", ".")

    porcentaje_disponible = 1 - (float(porcentaje_consumo) / 100 * c.FACTOR_DE_ESCALA /

    # si es un periodo de falla, reducir la potencia total
    if c.HAY_FALLA and Timer().time_in_range(
        t, c.INICIO_HORARIO_FALLA, c.FINAL_HORARIO_FALLA
    ):
        logger.warning(
            f"%s: Reducción por falla [t=%s, potencia_declarada=%.2f * %d%% -> %.2f, ca
            self,
            t.strftime("%H:%M"),
            self.potencia_declarada,
            c.REDUCCION_EN_FALLA,
            self.potencia_declarada * c.REDUCCION_EN_FALLA / 100,
            c.POTENCIA_MIN_CARGADORES,
        )
        self.potencia_declarada = c.POTENCIA_DECLARADA * c.REDUCCION_EN_FALLA / 100
        self.potencia_cargadores = c.POTENCIA_MIN_CARGADORES

    elif self.potencia_declarada != c.POTENCIA_DECLARADA:
        self.potencia_declarada = c.POTENCIA_DECLARADA
        self.potencia_cargadores = c.POTENCIA_CARGADORES

    self.potencia_disponible = self.potencia_declarada * porcentaje_disponible
    logger.info(
        f"{self}: actualizando potencia "

```

```

        f"[declarada={self.potencia_declarada}, "
        f"{porcentaje_disponible:.3f}, "
        f"disponible={self.potencia_disponible:.3f}]"
    )

#####
# Transformaciones
# Estos metodos retornan una copia del edificio transformado
# a un FIFO/RoundRobin/Inteligente
#####
def copia_FIFO(self):
    e = copy.deepcopy(self)
    e.__class__ = EdificioFIFO
    e.tipo_edificio = self.TIPO_FIFO
    return e

def copia_RoundRobin(self):
    e = copy.deepcopy(self)
    e.__class__ = EdificioRoundRobin
    e.tipo_edificio = self.TIPO_RR
    e.ultimo_v_cargado = 0
    return e

def copia_Inteligente(self):
    e = copy.deepcopy(self)
    e.__class__ = EdificioInteligente
    e.tipo_edificio = self.TIPO_INT
    return e

#####
# Cola de espera
#####
def _agregar_aCola_de_espera(self, v: Vehiculo):
    """
    Esto se debe aplicar segun la logica de cada edificio
    """
    raise NotImplementedError

def agregar_aCola_de_espera(
    self, t: datetime.datetime, autos_a_cargar: List[Vehiculo]
):
    # ordenar los autos a cargar, poniendo primero los que necesitan carga
    autos_a_cargar.sort(key=lambda v: v.necesita_carga, reverse=True)

    for v in autos_a_cargar:
        bateria_actual = v.bateria / v.max_bateria
        message = ""

        # si estamos en horario de alta demanda y el auto tiene suficiente para el rest

```

```

        if (
            c.HAY_ALTA_DEMANDA
            and self.timer.time_in_range(
                t, c.INICIO_HORARIO_ALTA_DEMANDA, c.FINAL_HORARIO_ALTA_DEMANDA
            )
        ):
            if bateria_actual >= v.gasto_total_del_dia:
                logger.info(
                    f"%s: %s - Saltando por horario de alta demanda [t=(%s<%s<%s), bate
                    self,
                    v,
                    c.INICIO_HORARIO_ALTA_DEMANDA,
                    t.strftime("%H:%M"),
                    c.FINAL_HORARIO_ALTA_DEMANDA,
                    bateria_actual,
                    v.gasto_total_del_dia,
                    v.necesita_carga,
                )
                continue
            else:
                message = " en alta demanda"

        logger.info(
            f"%s: %s - Agregando a espera%s [t=(%s<%s<%s), bateria=%.2f%%, necesita=%.2
            self,
            v,
            message,
            c.INICIO_HORARIO_ALTA_DEMANDA,
            t.strftime("%H:%M"),
            c.FINAL_HORARIO_ALTA_DEMANDA,
            bateria_actual,
            v.gasto_total_del_dia,
            v.necesita_carga,
        )
        self._agregar_aCola_de_espera(v)

def sacar_deCola_de_espera(self, v: Vehiculo):
    if v in self.cola_de_espera:
        logger.debug(f"{v}: sacando de cola de espera")
        self.cola_de_espera.remove(v)
        logger.debug(f"{v}: {self.cola_de_espera=}")

def siguiente_enCola_de_espera(self) -> Vehiculo:
    return self.cola_de_espera.pop(0)

#####
# Lista de carga
#####
def agregar_aCola_de_carga(self, v: Vehiculo):

```

```

        if v not in self.cola_de_carga and not self.cola_de_carga_llena:
            logger.debug(f"{v}: agregando a cola de carga")
            self.cola_de_carga.append(v)

    def actualizar_cola_de_carga(self):
        while self.cola_de_espera and not self.cola_de_carga_llena:
            self.agregar_a_cola_de_carga(
                self.siguiente_en_cola_de_espera(),
            )
        logger.debug(f"%s: actualizada {self.cola_de_carga=}", self)

    def limpiar_cola_de_carga(self):
        """
        Esto se debe aplicar segun la logica de cada edificio
        """
        raise NotImplementedError

    @property
    def cola_de_carga_llena(self):
        max_capacidad = int(self.potencia_disponible / self.potencia_cargadores)

        if c.LIMITAR_CARGADORES and c.TOPE_DE_CARGADORES < max_capacidad:
            max_capacidad = c.TOPE_DE_CARGADORES

        logger.debug(
            f"cola_de_carga_llena? en_carga={len(self.cola_de_carga)} >= {max_capacidad=}"
        )
        return len(self.cola_de_carga) >= max_capacidad

    @property
    def energia_a_cargar(self) -> float:
        return self.potencia_cargadores * c.MINS_POR_CICLO / 60 # KWmin

    def cargar_vehículos(self):
        """
        A cada vehiculo le suma:
        E = E + (Potencia_cargador * paso_tiempo)
        """
        carga = self.energia_a_cargar
        for vehiculo in self.cola_de_carga:
            logger.debug(f"{vehiculo}: cargando con {carga}")
            vehiculo.cargar(carga)

    def sacar_de_cola_de_carga(self, v: Vehiculo):
        if v in self.cola_de_carga:
            logger.debug(f"{v}: sacando de cola de carga")
            self.cola_de_carga.remove(v)

    @property

```

```

def bateria_de_vehículos(self):
    return [float(np.round(v.bateria / v.max_bateria, 2)) for v in self.vehículos]

@property
def prioridad_de_vehículos(self):
    return [float(np.round(v.prioridad, 2)) for v in self.vehículos]

#####
# Simular paso del tiempo
#####
def simular_ciclo(
    self,
    t: datetime.datetime,
    porcentaje_consumo: str,
):
    logger.debug(f"{self}: t={t.strftime('%H:%M')} {porcentaje_consumo}")

    self.actualizar_potencia_disponible(t, porcentaje_consumo)
    self.potencia_usada_por_autos = 0

    # los esto es para separar aquellos que necesitan carga para
    # su siguiente viaje y aquellos que solo no están a 100%
    autos_a_cargar: List[Vehiculo] = []

    for v in self.vehículos:
        logger.debug("%s: revisando %s", self, v)
        v.actualizar_status(t)

        # si esta fuera, descontarle bateria segun corresponda
        if not v.en_el_edificio:
            # sacarlo de las colas
            self.sacar_de_cola_de_espera(v)
            self.sacar_de_cola_de_carga(v)

            if v.esta_manejando(t):
                v.viajar()

        # si esta en el edificio, cargarlo si es necesario
        else:
            # agregar los vehículos que no estan a full
            if not v.cargado_full:
                autos_a_cargar.append(v)

    # pasar a cola de espera los autos que necesiten carga
    logger.debug(f"%s: {autos_a_cargar=}", self)
    self.agregar_a_cola_de_espera(t, autos_a_cargar)

    logger.debug(f"%s: {self.cola_de_espera=}", self)

```

```

        # agregar vehículos a cola de carga si se puede
        self.actualizar_cola_de_carga()

        # cargar vehículos en cola de carga
        self.cargar_vehículos()

        # sacar los que quedaron ok
        self.limpiar_cola_de_carga()

        logger.debug(f"{self}: finalmente {self.cola_de_carga}")

#####
# Helper tools
#####
def __repr__(self) -> str:
    return f"{self.nombre} {self.tipo_edificio}"

class EdificioFIFO(Edificio):
    """
    Apenas los vehículos estan en cola de espera
    se agregan a la cola de carga en orden de llegada
    pero solo los saca cuando estan a full o salen del edificio
    """

    def _agregar_a_cola_de_espera(self, v: Vehiculo):
        if v not in self.cola_de_carga and v not in self.cola_de_espera:
            logger.debug(f"{v}: agregando a cola de espera")
            self.cola_de_espera.append(v)
            logger.debug(f"{v}: {self.cola_de_espera}")

    def limpiar_cola_de_carga(self):
        """
        No saca los vehículos a menos que no esten a full carga o
        deban viajar (mientras la potencia disponible lo permita)
        """
        # saca los que estan a full
        for v in self.cola_de_carga:
            if v.cargado_full:
                self.sacar_de_cola_de_carga(v)

        # revisar limite segun potencia
        if self.cola_de_carga_llena:
            max_capacidad = int(self.potencia_disponible / self.potencia_cargadores)

            if c.LIMITAR_CARGADORES and c.TOPE_DE_CARGADORES < max_capacidad:
                max_capacidad = c.TOPE_DE_CARGADORES

            self.cola_de_carga = self.cola_de_carga[:max_capacidad]

```

```

class EdificioRoundRobin(Edificio):
    """
    Apenas los vehículos estan en cola de espera
    se agregan a la cola de carga en orden de llegada
    """

    def _agregar_a_cola_de_espera(self, v: Vehiculo):
        """
        RoundRobin no usa lista de espera
        """
        pass

    def actualizar_cola_de_carga(self):
        """
        En vez de la cola de espera, RoundRobin recorre la lista
        de vehículos desde el último que cargó hasta que llena la
        cola de carga o los recorre todos
        """
        v_inicial = int(self.ultimo_v_cargado)
        total_vehículos = len(self.vehículos)

        for i in range(1, total_vehículos + 1):
            # si la cola está llena terminar el ciclo
            if self.cola_de_carga_llena:
                break

            # obtener sgte vehículos en la lista
            num_vehiculo = (i + v_inicial) % total_vehículos
            v = self.vehículos[num_vehiculo]

            if v.en_el_edificio and not v.cargado_full:
                self.agregar_a_cola_de_carga(v)

            self.ultimo_v_cargado = num_vehiculo

        logger.debug(f"%s: actualizada {self.cola_de_carga=}", self)

    def limpiar_cola_de_carga(self):
        """
        Borra todos los vehículos, ya que
        se rotan al actualizar la cola de carga
        """
        self.cola_de_carga = []

class EdificioInteligente(Edificio):
    """

```

```

Cuando los vehículos estan en cola de espera
los ordena según:
- su % de energía en la batería
- cuánto tiempo lleva en espera
"""

def _agregar_a_cola_de_espera(self, v: Vehiculo):
    """
    Agrega el vehículo y luego reordena
    la cola de carga segun prioridad
    """
    if v not in self.cola_de_espera and v not in self.cola_de_carga:
        logger.debug(f"{v}: agregando a cola de espera")
        self.cola_de_espera.append(v)

        # ordenar en orden descendente así seguimos sacando
        # el primer valor siempre
        logger.debug(f"{v}: reordenando cola de espera")
        self.cola_de_espera.sort(key=lambda v: v.prioridad, reverse=True)
        logger.debug(f"{v}: {self.cola_de_espera}")

def limpiar_cola_de_carga(self):
    """
    Quita todos los vehículos, ya que
    se repriorizan en cada iteracion
    """
    self.cola_de_carga = []

```

Vehículo Eléctrico

```

import datetime
from functools import cache
import logging
import math
from random import randrange
from typing import List, Tuple

import helpers.constants as c
from classes.timer import Timer
from helpers.utils import (
    distancia_en_minutos,
    get_rand_normal,
    get_rand_time,
    salidas_random,
)

logger = logging.getLogger(__name__)

class Vehiculo:
    """

```

Clase principal para crear un vehiculo electrico.

```

"""

def __init__(self, nombre: str):
    """
    Cada vehiculo es creado con sus variables ya definidas
    usando la funcion normal que esta en utils
    y las constantes de mas arriba
    """
    self.nombre = nombre

    # se le asigna un edificio cuando son creados en uno
    self.edificio = None
    self.en_el_edificio = True
    self.necesita_carga = None

    # obtener salidas para el dia
    t = Timer()
    primera_salida = get_rand_time(t.new_time(c.HORA_PRIMERA_SALIDA))
    ultimo_regreso = get_rand_time(t.new_time(c.HORA_ULTIMO_REGRESO))

    if c.MIN_SALIDAS and c.MAX_SALIDAS and c.MIN_SALIDAS <= c.MAX_SALIDAS:
        cant_salidas = randrange(c.MIN_SALIDAS, c.MAX_SALIDAS + 1)
        logger.warning(f"{self}: Usando cant de salidas seteada de {cant_salidas}")
    else:
        cant_salidas = c.CANT_SALIDAS
        logger.warning(f"{self}: Usando cant de salidas fija de {cant_salidas}")

    self.salidas: List[Tuple[datetime.datetime, datetime.datetime]] = (
        salidas_random(
            cant=cant_salidas,
            desde=primera_salida,
            hasta=ultimo_regreso,
        )
    )
    self.siguiete_salida = 0 # indice

    # ----- parametros -----
    std_b_max = math.sqrt(c.VAR_BATERIA_MAX)
    self.max_bateria = get_rand_normal(c.AVG_BATERIA_MAX, std_b_max)

    # Cuanto tiene la bateria inicialmente (y que no sobrepase el limite)
    std_b_ini = math.sqrt(c.VAR_BATERIA_INI)
    self.bateria = get_rand_normal(c.AVG_BATERIA_INI, std_b_ini)
    self.bateria = min(self.bateria, self.max_bateria)

    # rendimiento (KM/KWh) y equivalente en consumo (KWh/KM)
    std_r = math.sqrt(c.VAR_RENDIMIENTO)
    self.rendimiento = get_rand_normal(c.AVG_RENDIMIENTO, std_r)

```

```

        self.velocidad_promedio = c.VELOCIDAD_PROMEDIO

def consumo_de_viaje(self, velocidad: int, minutos: int) -> float:
    distancia = velocidad * minutos / 60 # km
    return distancia / self.rendimiento # km / km/kWh = kWh

def viajar(self):
    """
    Gasta energia segun consumo, velocidad promedio y tiempo
    """
    gasto = self.consumo_de_viaje(self.velocidad_promedio, c.MINS_POR_CICLO)
    logger.info(f"{self} perdio bateria [{gasto=:.2f}]")

    self.bateria -= gasto

    # que no baje de 0
    self.bateria = max(self.bateria, 0)

@property
def prioridad(self) -> float:
    """
    valor a usar al ordenar los vehículos en un edificio

    actualmente es el porcentaje de bateria que necesita para realizar todos sus viajes
    """
    prioridad = self.gasto_total_del_dia - self.bateria / self.max_bateria

    logger.info(
        f"{self.edificio} - {self}: [gasto_restante={self.gasto_total_del_dia:.1f} - ba
    )
    return prioridad

def gasto_de_viaje(
    self,
    t_inicio: datetime.datetime,
    t_final: datetime.datetime,
) -> float:
    """
    Gasto de energia en KWh para un viaje en un tiempo determinado
    topando el tiempo de manejo a un maximo de minutos
    (usado para calcular el gasto cuando los autos salen del edificio)
    """
    total_minutos = (t_final - t_inicio).total_seconds() / 60

    # limitar las horas de viaje
    total_minutos = min(total_minutos, c.TOPE_TIEMPO_DE_MANEJO)

    return self.consumo_de_viaje(self.velocidad_promedio, minutos=total_minutos)

```

```

@property
def gasto_sgte_salida(self) -> float:
    salida, llegada = self.salidas[self.siguiente_salida]
    return self.gasto_de_viaje(salida, llegada)

@property
@cache
def gasto_total_del_dia(self) -> float:
    """
    Total de % de bateria que se requiere diariamente
    incluyendo la holgura de alta demanda
    """
    gasto = 0

    # total de KWh que se consume en un dia
    for s in self.salidas:
        gasto += self.gasto_de_viaje(s[0], s[1])

    logger.debug(f"{self.edificio}: {self} - Gasto total del dia [gasto=%.2f%%, holgura")

    # retornar gasto en relación a la bateria total
    # (agregando la holgura de alta demanda)
    return (gasto / self.max_bateria) + (c.HOLGURA_ALTA_DEMANDA / 100)

def esta_manejando(self, t: datetime.datetime) -> bool:
    salida, llegada = self.salidas[self.siguiente_salida]
    distancia_t = distancia_en_minutos(salida, llegada)

    logger.info(
        f"{self.edificio}: {self} - "
        f"esta_manejando [salida={salida.strftime('%H:%M')}, llegada={llegada.strftime('%H:%M')}]"
    )

    # si el viaje dura 3 horas o menos, linealmente
    if c.TOPE_TIEMPO_DE_MANEJO <= distancia_t:
        tope_de_manejo = datetime.timedelta(minutes=c.TOPE_TIEMPO_DE_MANEJO / 2)

        if (salida + tope_de_manejo).time() <= t.time() <= (llegada - tope_de_manejo).time():
            logger.info(f"{self.edificio}: {self} - no esta_manejando [False]")
            return False

    logger.info(f"{self.edificio}: {self} - esta_manejando [True]")
    return True

@property
def necesita_cargarse(self) -> bool:
    """
    Revisa si tiene suficiente para funcionar durante el día

```

```

        """
        necesita_carga = self.bateria < self.gasto_total_del_dia
        logger.debug(
            f"{self}: necesita_cargarse? [bateria={self.bateria:.2f} < {self.gasto_total_de
        )
        return necesita_carga

@property
def cargado_full(self) -> bool:
    return self.bateria == self.max_bateria

def cargar(self, energia: int):
    """
    Carga la energia indicada.
    Si sobrepasa lo que aguanta la bateria, deja el valor de la bateria
    """
    # agregar la bateria
    self.bateria += energia
    # si la bateria esta llena, no se puede cargar mas
    self.bateria = min(self.bateria, self.max_bateria)
    logger.debug(
        f"{self.edificio}: {self} carga energia [bateria={self.bateria:.2f}]"
    )

    # tambien guardar la carga en potencia_usada_por_autos del edificio
    self.edificio.potencia_usada_por_autos += energia

def actualizar_status(self, t: datetime.datetime) -> None:
    """
    self.necesita_carga: si tiene suficiente para su sgte viaje
    self.en_el_edificio: si esta en el edificio en el tiempo t
    """
    # Revisar si tiene suficiente para su siguiente viaje
    self.necesita_carga = self.necesita_cargarse

    # Revisar si está en el edificio
    salida, llegada = self.salidas[self.siguiente_salida]
    s = salida.time()
    l = llegada.time()
    t_t = t.time()
    logger.debug(
        f"%s: actualizar_status %s <= %s <= %s = %s",
        self,
        s.strftime("%H:%M"),
        t_t.strftime("%H:%M"),
        l.strftime("%H:%M"),
        s <= t_t <= l,
    )

```

```

        if s <= t_t <= 1:
            logger.info(f"{self}: esta fuera de {self.edificio}")

            if t_t == 1:
                self.siguiente_salida = (self.siguiente_salida + 1) % len(self.salidas)
                logger.info(f"{self}: {self.siguiente_salida=}")

            self.en_el_edificio = False
            return

        logger.debug(f"{self}: esta dentro de {self.edificio}")
        self.en_el_edificio = True

#####
# Helper tools
#####
def __repr__(self) -> str:
    return self.nombre

@property
def salidas_str(self):
    return [(s.strftime("%H:%M"), e.strftime("%H:%M")) for s, e in self.salidas]

```

Simulacion

```

import logging
from typing import List, Optional

import helpers.constants as c
from classes.database import DB
from classes.edificio import Edificio
from classes.timer import Timer

logger = logging.getLogger(__name__)

class Simulacion:
    def __init__(
        self,
        nombre: str,
        archivo_potencias: str,
    ):
        self.nombre = nombre

        # base de datos para importar/exportar datos
        self.input = DB()
        # timer para manejar tiempos
        self.timer = Timer()

        # sacar del header los nombres de cada edificio
        csv_edificios = self.input.leer_headers(nombre=archivo_potencias)[1:]

```

```

logger.warning(f"Simulacion - {csv_edificios=}")

# revisar que los numeros sean razonables
if not csv_edificios:
    raise ValueError(f"Cantidad invalida de edificios [{csv_edificios=}]")

# crear los edificios con sus respectivos vehículos
self.edificios: List[Edificio] = []
for e in csv_edificios:
    edificio = Edificio(
        nombre=e,
        timer=self.timer,
    )
    if c.SIMULAR_FIFO:
        self.edificios.append(
            edificio.copia_FIFO(),
        )

    if c.SIMULAR_ROUNDROBIN:
        self.edificios.append(
            edificio.copia_RoundRobin(),
        )

    if c.SIMULAR_INTELIGENTE:
        e = edificio.copia_Inteligente()
        self.edificios.append(e)

def empezar(self):
    # definir formato de salida
    self.output = DB(f".{c.OUTPUT_FORMAT}")

    # crear los archivos para cada edificio
    self.output.crear_archivo_de_edificios(self.edificios)

    # mostrar datos de cada vehículo en los edificios
    for e in self.edificios:
        for v in e.vehículos:
            logger.info(f"{e} - {v}: {v.max_bateria=}, {v.bateria=}")
            logger.info(f"{e} - {v}: salidas={v.salidas_str}")

    # Inicia la simulación
    for rows in self.input.leer(c.INPUT_FILE):
        # saltar los headers

        t = self.timer.set_hh_mm(rows["Tiempo"])

        for i, e in enumerate(self.edificios):
            e.simular_ciclo(
                t,

```

```
        porcentaje_consumo=rows[e.nombre],
    )

    # exportar el minuto actual a un .csv
    self.output.guardar_estado_de_edificio(
        tiempo=self.timer.actual_str,
        e=e,
    )

    # # uncomment this for a step by step execution
    # input("PRESS ENTER TO CONTINUE, CTRL+D TO EXIT")

self.output.exportar_archivos()
```