



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de
la Bioenergía**

Campus de Soria

**MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y
SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
CARGA DE VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA
GESTIÓN DE EXCEDENTES EN
MICRORRED.**

~~~~~

**AUTOR: AMY ZULEMA VELASCO BONILLA**

**DEPARTAMENTO: CIENCIAS AGROFORESTALES**

**TUTOR/ES: LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO Y OSCAR IZQUIERDO MONGE**

SORIA, JULIO DE 2024

## AUTORIZACIÓN DE LOS TUTORES DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**D.LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO** profesor del departamento de Ingeniería Agrícola Y Forestal y **D. OSCAR IZQUIERDO MONGE** del centro de investigación del CEDER, como tutores del Trabajo Final de Máster titulado “**Diseño e implementación de carga de vehículo eléctrico para gestión de excedentes en microrred.**”, presentado por la alumna D.AMY ZULEMA VELASCO BONILLA, da el V°. B°. y autoriza la presentación de este, considerando que el alumno ha desarrollado un TFM acorde con las expectativas de este.

Soria, 21 de Julio de 2024.

Los tutores del TFM

Fdo.: Luis Hernández Callejo.

Fdo.: Oscar Izquierdo Monge.

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

D. AMY ZULEMA VELASCO BONILLA, estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el Trabajo Fin de Máster que presento para su exposición y defensa titulado **Diseño e implementación de carga de vehículo eléctrico para gestión de excedentes en microrred**, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Soria, 21 de Julio de 2024.

Fdo.: Amy Zulema Velasco Bonilla

# RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TÍTULO:** DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CARGA DE VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA GESTIÓN DE EXCEDENTES EN MICRORRED

**DEPARTAMENTOS:** CEDER e Ingeniería Agrícola y Forestal

**TUTORES:** Oscar Izquierdo Monge y Luis Hernández Callejo.

**AUTOR:** Amy Zulema Velasco Bonilla

## **RESUMEN:**

La transición hacia energías renovables se ha intensificado debido a la crisis energética global, los objetivos de neutralidad climática y el aumento de la demanda eléctrica. Tecnologías como la eólica y la solar han impulsado este cambio, con un notable incremento en la capacidad de electricidad renovable. Sin embargo, estas energías presentan desafíos como intermitencia y volatilidad, que requieren soluciones como microrredes y sistemas de almacenamiento para mantener la estabilidad de la red.

Las microrredes combinan recursos renovables con tecnologías de almacenamiento y generación gestionable, ofreciendo beneficios como la mejora de la calidad del suministro y el aumento de la eficiencia energética.

En este panorama, los vehículos eléctricos han adquirido relevancia significativa por el incremento en su número y su integración en el sistema energético. En la actualidad, no solo funcionan como medios de transporte, sino que también se están utilizando como unidades de almacenamiento de energía a través de la tecnología Vehicle-to-Grid.

Este Trabajo de Fin de Máster desarrolla una metodología para gestionar la carga de vehículos eléctricos en la microrred del CEDER, utilizando excedentes de energías renovables. Se detalla la metodología implementada, junto con los resultados obtenidos sobre su eficacia y el impacto de la temperatura ambiente en el rendimiento de los vehículos eléctricos.

**Palabras clave:** Microrred, Vehículo eléctrico, Sistema de gestión de energía, Vehicle-to-grid, Degradación de baterías

## **ABSTRACT:**

The transition to renewable energy has intensified due to the global energy crisis, climate neutrality goals, and the increased demand for electricity. Technologies such as wind and solar energy have driven this change, with a notable increase in renewable electricity capacity. However, these energies present challenges such as intermittency and volatility, which require solutions like microgrids and storage systems to maintain grid stability.

Microgrids combine renewable resources with storage and manageable generation technologies, offering benefits such as improved supply quality and increased energy efficiency.

In this context, electric vehicles have gained significant relevance due to their increasing numbers and integration into the energy system. Currently, they not only serve as means of transportation but are also being used as energy storage units through Vehicle-to-Grid technology.

This master's thesis develops a methodology to manage the charging of electric vehicles in the CEDER microgrid, using surplus renewable energy. The implemented methodology is detailed, along with the results obtained regarding its effectiveness and the impact of ambient temperature on the performance of electric vehicles.

**Keywords:** Microgrid, Electric vehicle, Energy management system, Vehicle-to-grid, Battery degradation

## **CONTENIDO**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN .....                                                                     | 9  |
| 1. ESTADO DEL ARTE.....                                                                | 11 |
| SISTEMA ELÉCTRICO.....                                                                 | 11 |
| MICRORRED.....                                                                         | 13 |
| VEHICULO ELÉCTRICO .....                                                               | 18 |
| BATERIA.....                                                                           | 20 |
| RECARGA DE VEHICULOS ELECTRICOS.....                                                   | 23 |
| IMPACTO DEL VEHICULO ELECTRICO EN LA MICRORRED .....                                   | 26 |
| 2. OBJETIVOS .....                                                                     | 30 |
| GENERALES.....                                                                         | 30 |
| PARTICULARES.....                                                                      | 30 |
| 3. METODOLOGÍA.....                                                                    | 30 |
| ESTRATEGIA DE CARGA PARA CUMPLIR LOS OBJETIVOS DE GESTION .....                        | 31 |
| DEFINICION DE PARAMETROS DE SEGUIMIENTO PARA LA GESTION .                              | 33 |
| DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS PARA LA MONITORIZACION, CONTROL Y GESTION DE LA MICRORED..... | 34 |
| DIAGRAMA DE FLUJO DE LA GESTIÓN DE LA MICRORRED CON VEHÍCULO ELÉCTRICO.....            | 35 |
| IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE GESTIÓN .....                                      | 37 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                        | 38 |
| 5. CONCLUSIONES .....                                                                  | 45 |
| 6. LINEAS DE TRABAJO FUTURAS .....                                                     | 46 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                     | 47 |
| ANEXOS .....                                                                           | 53 |

## INDICE DE TABLAS

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Factores que influyen en la degradación de baterías .....             | 22 |
| Tabla 2 Clasificación de puntos de recarga de VE .....                        | 23 |
| Tabla 3 Tipos de conectores.....                                              | 24 |
| Tabla 4 Nivel de potencia de carga .....                                      | 25 |
| Tabla 5 Beneficios y desafíos de V2G en microrredes .....                     | 27 |
| Tabla 7 Nivel de potencia de carga disponible en la microrred del CEDER ..... | 33 |
| Tabla 8 Parámetros de seguimiento de la microrred .....                       | 34 |
| Tabla 9 Carga mensual de vehículos eléctricos .....                           | 41 |
| Tabla 10 Ahorro económico mensual .....                                       | 43 |

## INDICE DE FIGURAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Estructura del sistema eléctrico convencional.....                                          | 11 |
| Figura 2 Smart Grid: Nueva estructura del sistema eléctrico .....                                    | 12 |
| Figura 3 Componentes comunes de microrred .....                                                      | 14 |
| Figura 4 Clasificación de microrredes .....                                                          | 15 |
| Figura 5 Componentes de un vehículo eléctrico con motor en corriente alterna (AC).....               | 19 |
| Figura 6 Tipos de vehículos eléctricos .....                                                         | 20 |
| Figura 7 Tipos de conectores de VE .....                                                             | 25 |
| Figura 8 Pasos para obtener la comunicación, monitorización, control y gestión de la microrred ..... | 35 |
| Figura 9 Diagrama de Flujo de la Gestión de la microrred con VE.....                                 | 37 |
| Figura 10 Monitorización en Home Assistant .....                                                     | 58 |
| Figura 11 Análisis de Consumo, potencia renovable y excedente de la microrred del CEDER.....         | 38 |
| Figura 12 Carga de VE en un día.....                                                                 | 39 |
| Figura 13 Carga lenta con potencia excedente .....                                                   | 40 |
| Figura 14 Carga de VE en una semana .....                                                            | 40 |
| Figura 15 Porcentaje de Carga con Potencia Excedente.....                                            | 42 |
| Figura 16 Porcentaje de Carga con Potencia Renovable.....                                            | 42 |
| Figura 17 Rendimiento del vehículo eléctrico en relación con la temperatura ambiente.....            | 44 |

## INDICE DE ANEXOS

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 1 Características técnicas de los principales tipos de baterías utilizadas para vehículos eléctricos ..... | 53 |
| Anexo 2 Microrred del CEDER.....                                                                                 | 53 |
| Anexo 3 Descripción específica de componentes clave de la microrred del CEDER.....                               | 54 |
| Anexo 4 Estaciones de carga del CEDER .....                                                                      | 56 |
| Anexo 5 Vehículos eléctricos del CEDER .....                                                                     | 56 |
| Anexo 6 Curva de carga del Nissan Leaf y Renault Kangoo.....                                                     | 57 |
| Anexo 7 Precios de la electricidad para la tarifa 6.1 TD del 2022,2023,2024 ..                                   | 58 |

# INTRODUCCIÓN

La importancia de la transición hacia sistemas de energías renovables se ha intensificado en respuesta a la crisis energética mundial [1], [2], los nuevos objetivos para alcanzar la neutralidad climática [2],[3] y el aumento de la demanda mundial de electricidad [4]. Este cambio se ha impulsado gracias al crecimiento en los últimos años de tecnologías como la eólica y solar, que han puesto a disposición grandes cantidades de electricidad limpia en los sistemas energéticos [4], [5], [6].

De acuerdo con el informe “Renovables 2023” de la Agencia Internacional de la Energía, la capacidad de electricidad renovable aumentó casi 50% en 2023 con respecto al año anterior [7] y se espera que la adición de energía solar fotovoltaica y eólica se duplique para 2028 [7]. Este contexto de expansión y mayor integración de energías renovables ha introducido nuevos desafíos al sistema energético actual debido a las características distintivas de las energías renovables, como baja capacidad individual, distribución extensa y dispersa, intermitencia, volatilidad y aleatoriedad [8], [9], [10].

Para mejorar el rendimiento de los sistemas de energías renovables y mantener la flexibilidad del sistema energético en rangos aceptables, se propone integrar los sistemas de energías renovables con fuentes gestionables y sistemas de almacenamiento de energía [5]. En este sentido, las microrredes se presentan como una solución para alcanzar esta integración óptima [5], [11], ya que precisamente se definen como sistemas energéticos de pequeña escala que combinan recursos energéticos renovables con recursos gestionables, como turbinas de gas, y sistemas de almacenamiento de energía para suministrar cargas locales [11].

Las microrredes, inicialmente diseñadas para áreas remotas con escasa infraestructura, han evolucionado hacia una opción para abordar la demanda de energía en zonas urbanas [12]. Se están implementando en diversos sectores, como agricultura, defensa, instituciones gubernamentales, educativas y de salud, así como en residencias y fábricas. Ofrecen ventajas como la promoción de energía renovable local, mejora de la calidad del suministro, resistencia a emergencias y aumento de la eficiencia energética [12].

Como se ha mencionado previamente, los sistemas de almacenamiento son componentes esenciales de las microrredes y desempeñan un papel crucial en el fortalecimiento de los sistemas de energía renovable. Hoy en día, la industria ofrece una amplia gama de tecnologías de almacenamiento como volantes de inercia, bombeo hidráulico, bancos de baterías, supercondensadores, aire comprimido e hidrógeno. Los vehículos eléctricos (VE) también se están destacando como una opción viable dentro de estas tecnologías. Desde su investigación inicial en los años 90, los VE han ganado importancia creciente en los últimos años como sistemas de almacenamiento energético.

El informe "Perspectivas Globales de Vehículos Eléctricos 2023" de la Agencia Internacional de Energía, los mercados de vehículos eléctricos están experimentando un crecimiento exponencial [13]. En 2022, el 5% de todos los autos nuevos vendidos eran eléctricos, mientras que en 2022 esa cifra ha aumentado significativamente, llegando al 14% [13]. Esto se deba a que en los últimos años han captado interés como una alternativa de transporte sostenible y eficiente [14]. Aunque su fin principalmente es la movilidad, también tienen el potencial de prestar servicios a la red eléctrica, como el almacenamiento de energía. Por ello, es una opción de control para microrredes mediante la gestión de la carga y descarga de las baterías. Este concepto es conocido como vehicle-to-grid (V2G) [15], [16], [17], [18].

Este trabajo de fin de máster surge de la necesidad de integrar energías renovables y optimizar la gestión de microrredes, junto con la importancia creciente de los vehículos eléctricos. Además, se alinea estrechamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, contribuyendo específicamente a:

- **ODS 7, Energía Asequible y No Contaminante:** El trabajo se centra en potenciar el uso de excedentes de energías renovables, promoviendo así el acceso a energía limpia y accesible.
- **ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles:** La implementación de microrredes con tecnologías V2G contribuye a la creación de comunidades más sostenibles y resilientes, adaptadas a las necesidades energéticas cambiantes.
- **ODS 13, Acción por el Clima:** Al mejorar la integración de energías renovables y reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales, este trabajo apoya los esfuerzos globales para mitigar los efectos del cambio climático.

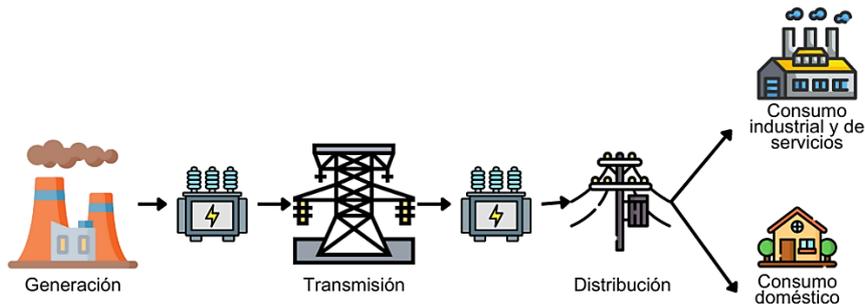
El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología para la gestión óptima de la carga de vehículos eléctricos en la microrred del CEDER-CIEMAT, usando la energía excedente de origen renovable. Para evaluar la eficacia de esta metodología, se presentan los resultados obtenidos tras su implementación, incluyendo datos relevantes sobre el rendimiento del vehículo en relación con la temperatura ambiente.

En las secciones siguientes, se desarrollará el estado de arte necesario para el desarrollo de este TFM, se presentará la metodología implementada y finalmente se presentarán los resultados alcanzados.

# 1. ESTADO DEL ARTE

## SISTEMA ELÉCTRICO

En los últimos años, el sistema eléctrico convencional ha funcionado como una macro red centralizada [19], [20] que consta de una red de componentes eléctricos que suministran, transfieren y utilizan la energía eléctrica [20]. Como se muestra en la figura 1, el sistema eléctrico generalmente se compone de los siguientes segmentos: generación, transmisión, distribución y consumo [20], [21].



*Figura 1 Estructura del sistema eléctrico convencional, Elaboración: Propia, Fuente: [20]*

El segmento de generación abarca diferentes centrales responsables de la producción de electricidad, que inicialmente se limitaban a centrales convencionales como las de carbón, nucleares o hidroeléctricas [20]. Para este tipo de estructura, la mayoría de las centrales dependen de combustibles fósiles, que tienen la característica de ser recursos limitados y emitir gases de efecto invernadero [20].

En la etapa de transmisión se encuentran componentes como los transformadores, las líneas de transmisión y las torres de energía [20]. Su función principal radica en transmitir la electricidad generada en las centrales al siguiente punto del sistema eléctrico [20]. Esto se lleva a cabo porque los transformadores elevan el voltaje de la electricidad generada en las centrales, facilitando así su transporte a largas distancias por las líneas de transmisión hasta el punto de distribución.

Finalmente, en la fase de distribución se reduce el voltaje con transformadores para entregar la electricidad a los consumidores finales por medio de líneas aéreas o subterráneas [20].

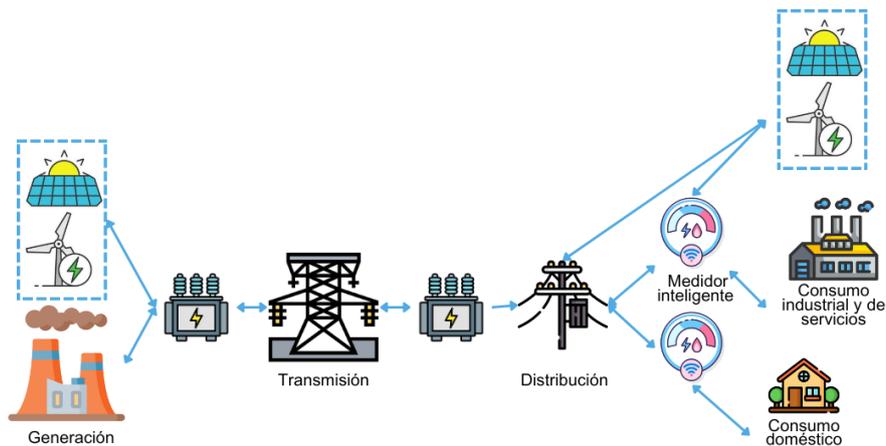
El sistema eléctrico convencional tiene la característica de que la energía fluye en una sola dirección desde la central de generación hasta el consumo y lo mismo ocurre con el flujo de comunicación [20]. Con esta estructura solo se tiene que monitorear la demanda del cliente y generar la electricidad que se vaya a requerir [20]. Además, que el usuario final solo se limita a consumir, no tiene ninguna interacción con la red [20].

## REDES INTELIGENTES

Como se ha mencionado, en los últimos años hemos presenciado un notable incremento en la generación de energía renovable. Este crecimiento ha dado lugar a un nuevo concepto que está redefiniendo el sistema eléctrico convencional: red inteligente [20], [22], [23].

La red inteligente [20], [22], [23] se define como una red eléctrica que incorpora tecnología de comunicación digital, sensores inteligentes y software avanzado, integrando así la infraestructura eléctrica con la tecnología de la información [24]. Esta combinación permite una integración generalizada de energía renovable, así como un flujo bidireccional de energía y datos [25]. Asimismo, permite la implementación de sistemas de detección en tiempo real y control dinámico tanto en la generación como en el consumo de energía [23], con el fin de alcanzar objetivos específicos, como garantizar un suministro eléctrico eficiente, sostenible, económico y seguro [24], [25].

La figura 2 muestra de manera simple la nueva estructura del sistema eléctrico, donde se puede apreciar la alta integración de energías renovables en forma de centrales de generación o como fuentes ubicadas en las redes de distribución cerca de la demanda [20].



*Figura 2 Smart Grid: Nueva estructura del sistema eléctrico, Elaboración: Propia, Fuente: [20]*

La integración de fuentes de energía renovable cerca de la carga añade una característica distintiva al sistema eléctrico, diferenciándolo de la estructura convencional. Este enfoque se conoce como Generación Distribuida (GD), que se refiere a unidades de generación a pequeña escala instaladas en el sistema de distribución y conectadas generalmente a subestaciones, alimentadores de distribución o directamente al punto de consumo del cliente [26], [27].

## MICRORRED

El interés creciente en las microrredes se debe a los cambios en el sistema eléctrico [20], a las frecuentes fallas de la red eléctrica centralizada y a que son una mejor alternativa para la electrificación rural en áreas sin acceso a la electricidad [28].

Anteriormente ya he mencionado una definición de microrred, sin embargo, la más reconocida es la de la Comisión Electrotécnica Internacional, que la define como un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos con límites eléctricos definidos que forman un sistema de energía eléctrica local en niveles de voltaje de distribución, que actúa como una única entidad controlable y es capaz de operar en modo isla o conectado a la red [28], [29]. A diferencia de la red eléctrica principal, la microrred es básicamente también una red eléctrica pero que opera a menor escala, de ahí incluso que se use el termino de micro para distinguirlo [20].

Existen más definiciones de microrredes, pero en general se resaltan las siguientes características comunes de las microrredes [20]:

1. Recursos energéticos distribuidos y conectados mediante líneas de conexión eléctrica y otros dispositivos.
2. Es un sistema energético autónomo y que puede equiparse con sistemas de gestión de energía para ser autoorganizado.
3. Capacidad de autoabastecimiento de energía gracias a sus recursos locales.

## COMPONENTES

La figura 3 presenta de manera simplificada los componentes comunes [12], [28] de la microrred que suelen ser:

- **Generación distribuida:** Puede utilizar fuentes renovables o convencionales. En términos de control de la energía generada, se clasifica en gestionable y no gestionable [28].
- **Cargas:** Pueden ser eléctricas, térmicas u de otro tipo. En las microrredes, es fundamental pronosticar la demanda de carga a corto plazo, ya que facilita su gestión [28].
- **Sistemas de almacenamiento de energía:** Importantes para lograr la gestión del lado de la demanda.
- **Sistemas de conversión de energía:** Componente que permite conectar a la microrred la generación distribuida y sistemas de almacenamiento de energía, cuya salida no se ajusta a la frecuencia del sistema. Convierten una entrada de corriente alterna (CA) con una frecuencia diferente o una entrada de corriente continua (CC) en una salida de CA con una frecuencia estándar.
- **Controlador central:** La microrred está equipada con diferentes niveles de controladores que ayudan a dar estabilidad y fiabilidad a la microrred [28].

- **Sistema de Gestión de Energía:** Busca la forma más económica e inteligente de asignar la energía de la generación distribuida y los sistemas de almacenamiento de energía [28].
- **Sistema de comunicación:** Es esencial para el control y monitoreo de la microrred. Su tipo y función dependen del sistema de control y los componentes de la microrred. Utiliza protocolos de Internet, principalmente TCP/IP, con sus cuatro capas: aplicación, transporte, red y enlace [28].
- **Sistema de protección:** Responde ante fallas tanto en la red pública como dentro de la microrred. Puede desconectar la microrred de la red principal o aislar secciones específicas de la misma [28].
- **Punto de acoplamiento:** Punto donde se hace la interconexión entre la red de distribución principal y la microrred, lo que permite el intercambio de energía entre ambas redes [12].

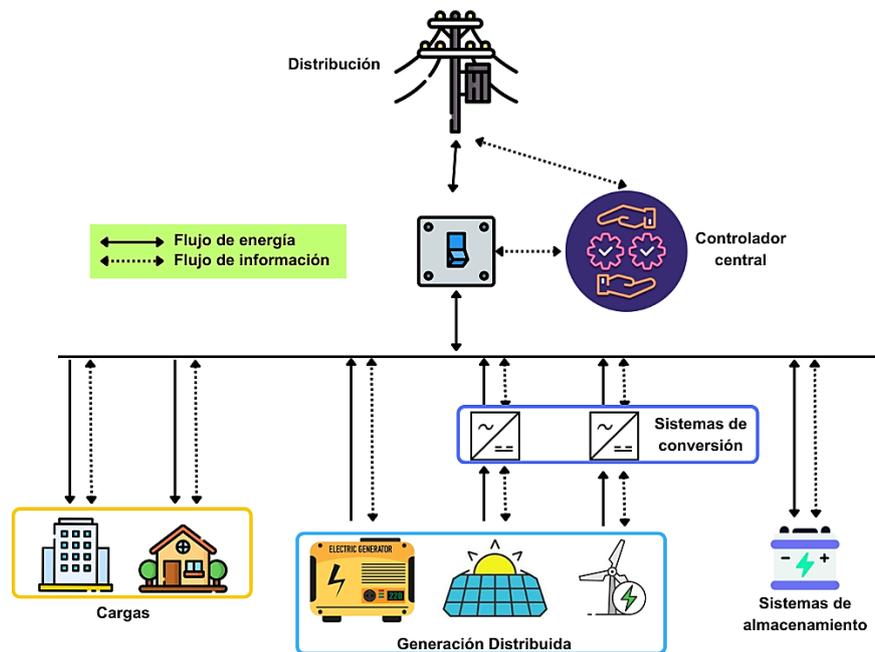


Figura 3 Componentes comunes de microrred, Elaboración: Propia

## CLASIFICACIÓN

Como se presenta en la figura 4, las microrredes se pueden clasificar dependiendo del modo de operación [20], [28], el tipo de sistema [12], [19], [28], y el área de aplicación [12], [28].

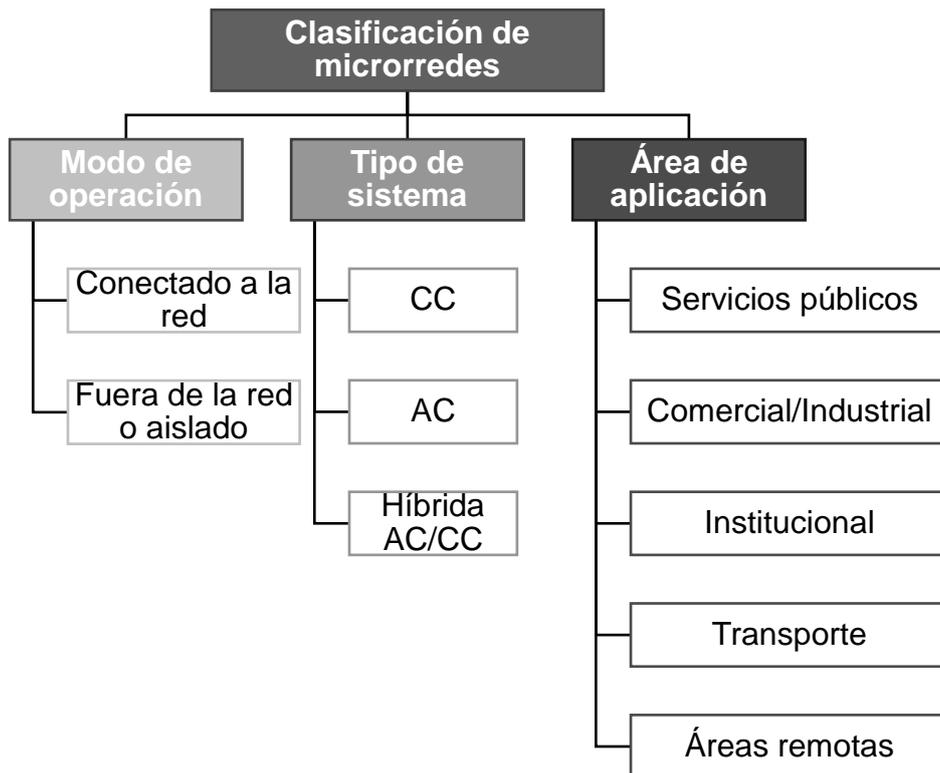


Figura 4 Clasificación de microrredes, Elaboración: Propia

El modo de operación es una clasificación ampliamente reconocida y se basa en si la red opera conectada a la red principal [20], [28]. La microrred puede cambiar entre estos dos modos de funcionamiento dependiendo de lo que se requiera:

- **Modo operación conectado a la red:** Microrred se conecta a la red principal, lo que permite intercambios bidireccionales de energía.
- **Modo operación fuera de la red o aislado:** La microrred no está conectada a la red principal y, por lo tanto, no puede realizar intercambios de energía.

La microrred integra equipos de corriente continua y alterna, conectados a un punto en común, denominado barra colectora o bus. Por esto se puede clasificar la microrred según el tipo de barra colectora utilizada [19].

- **Microrred corriente alterna:** Este tipo es el más utilizado. Posee una barra colectora de CA, lo que implica que todos los equipos CC requieren convertidores para conectarse a la misma [19], [28]. Cuando opera en modo conectado a la red, el voltaje y la frecuencia de la microrred son establecidos por la red principal. Cuando opera en modo aislado, estos parámetros son determinados por el generador de respaldo de la microrred.
- **Microrred corriente continua:** Cuenta con una barra colectora de CC. Este tipo de microrred surge debido al aumento de dispositivos que demandan o generan CC. Implementar estos elementos en una microrred

CA implica una inversión de capital y múltiples conversiones, lo que reduce la eficiencia del sistema [19]. Por tanto, al optar por este tipo de microrred, los elementos pueden conectarse directamente al bus, y se integran a la red principal mediante un convertidor CC/CA. Es importante destacar que los elementos de corriente alternan obviamente requerirán un convertidor de este tipo [28].

- **Microrred híbrida AC/CC:** Incluye barras colectoras tanto en CA como en CC [28]. Esta configuración combina las ventajas de ambos tipos de microrred, lo que contribuye a la eficiencia y fiabilidad del suministro eléctrico [19].

## CONTROL DE MICRORRED

Los estudios sobre microrredes se pueden dividir en dos categorías principales, que se centran en el control y la gestión de la energía [30].

En el ámbito de control se utilizan estrategias para regular el voltaje, la frecuencia, el equilibrio entre generación y demanda, así como la comunicación entre sus componentes [31].

Cada convertidor electrónico de potencia emplea Figuras de control de alto rendimiento y de esta manera tienen una alta capacidad de control [31]. Pero esto no es suficiente para obtener el rendimiento deseado de la microrred. Para lograr condiciones de operación estables en una microrred, cada fuente o unidad de almacenamiento está en armonía entre sí y con la red [31]. Por tanto, el control de todos los componentes dentro de una microrred es una tarea muy importante. De esta manera, se pueden lograr fácilmente la regulación de voltaje/corriente, el uso compartido de energía, el control del flujo de energía, el control del modo de operación y otros controles de alto nivel de la microrred [31].

En el control del sistema de potencia se aplican dos arquitecturas de control [10], [31]:

- **Centralizada:** Un solo punto se encarga de recopilar datos, realizar cálculos y emitir comandos para todas las unidades, lo que implica la necesidad de una infraestructura de comunicaciones amplia, compleja y bidireccional [31], [32]. Este enfoque proporciona una visión general de la microrred, pero exige un sistema de comunicación confiable y eficiente [32].
- **Descentralizada:** Cada unidad cuenta con su propio controlador local, lo que significa que solo necesita información del sistema local y emite comandos correspondientes a dicho sistema [31]. Aunque este enfoque simplifica la comunicación y facilita la reconfiguración, carece de una visión general de la microrred, lo que limita su capacidad para una gestión óptima [32].

Es importante mencionar que ninguna de las dos arquitecturas es factible debido a las necesidades de comunicación y cálculo, así como al acoplamiento entre unidades. Para ello se utiliza un enfoque de control multicapa llamado

estructura jerárquica de control que considera tres niveles asociados a distintas escalas de tiempo [10], [31], [32]. Esta estructura permite la aplicación de diferentes estrategias de control para mejorar la confiabilidad y resiliencia del sistema [31]. Esta arquitectura es más complicada, pero más eficiente para microrredes de gran escala [10].

## GESTIÓN DE MICRORRED

La gestión de la energía es otra categoría fundamental en los estudios de microrredes y una de las más importantes debido a la alta integración de recursos energéticos renovables. Implica optimizar la distribución de energía considerando diversos objetivos y restricciones, como la reducción de costos, emisiones y pérdidas, así como el aumento de ingresos [30].

Para conseguir una gestión energética óptima de la microrred, es necesario un sistema de gestión de energía (SGen), que ha sido definido por la Comisión Electrotécnica Internacional como un sistema informático que comprende una plataforma de software que proporciona servicios básicos de soporte y un conjunto de aplicaciones que proporcionan la funcionalidad necesaria para el funcionamiento eficaz de las instalaciones de generación y transmisión eléctrica de forma que se garantice seguridad adecuada del suministro de energía al mínimo costo[33].

Un sistema de gestión de energía en una microrred incluye sistemas de almacenamiento de energía y generación distribuida, así como el control de las transacciones energéticas con la red pública [34], [35].

El SGen puede controlarse de manera eficiente mediante la estructura jerárquica de control previamente descrita, integrándose en el nivel terciario de dicha estructura [35], [36]. Este sistema es crucial ya que permite controlar el flujo de energía de las fuentes de generación, siendo su principal responsabilidad el garantizar un suministro de energía seguro, fiable y rentable [35].

Para lograr este objetivo, los sistemas de gestión de energía determinan la programación óptima de las unidades gestionables en una microrred, utilizando una variedad de fuentes de información, como pronósticos de demanda, generación de energía, pronósticos meteorológicos y precios de energía [35].

En este contexto, la gestión de la energía en las microrredes puede abordarse mediante diferentes métodos [35]:

- **Heurísticos:** Son métodos básicos basados en el conocimiento, que ofrecen soluciones aproximadas utilizando reglas preespecificadas.
- **Metaheurístico:** Combina técnicas heurísticas con algoritmos genéticos, evolución biológica y mecanismos estadísticos para aproximar la mejor solución posible.
- **Analítico:** Resuelven problemas de optimización según una función de costos, ofreciendo soluciones más precisas y garantizando la

optimización, pero requieren mayores recursos computacionales para resolver los problemas de optimización.

Para este TFM se presenta una microrred con un sistema de gestión de energía compuesto por programas que permiten la comunicación con los elementos de la microrred, el seguimiento de parámetros mediante monitorización y la capacidad de enviar consignas para garantizar la fiabilidad, seguridad y suministro de energía al mínimo costo. Además, el SGEN incluye generación distribuida, sistemas de almacenamiento y cargas. El método utilizado para la gestión de esta microrred es el heurístico, ya que utiliza métodos básicos basados en el conocimiento, que ofrecen soluciones aproximadas utilizando reglas preespecificadas.

## VEHICULO ELÉCTRICO

Las innovaciones en vehículos alternativos, como los eléctricos, reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>, contaminantes atmosféricos y el ruido de los vehículos, por su eficiencia energética y la capacidad de aprovechar fuentes de energía renovable.

Un vehículo eléctrico se define como aquel impulsado por uno o más motores eléctricos que transforman la energía eléctrica almacenada en baterías recargables en energía mecánica para propulsión [37]. A diferencia de los vehículos de combustión interna, que se impulsan quemando combustible, los vehículos eléctricos utilizan exclusivamente motores eléctricos para su transmisión. La energía necesaria para el desplazamiento se almacena en baterías recargables, las cuales suministran la energía almacenada durante el funcionamiento del vehículo.

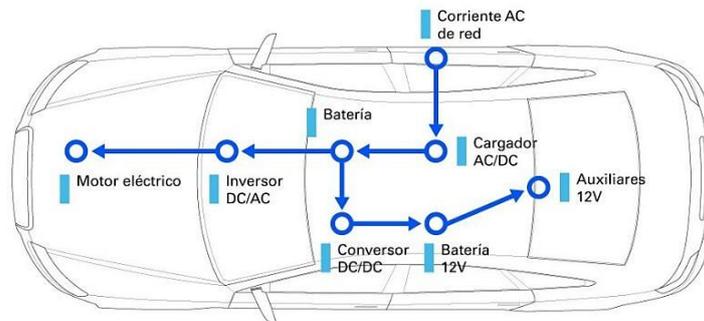
## ELEMENTOS BASICOS

Los vehículos eléctricos se componen de diversos elementos esenciales, entre los cuales destacan [37]:

- **Motor eléctrico:** Puede ser de CC o CA.
- **Cargador:** Transforma la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua para cargar las baterías. Sin embargo, este proceso puede generar calor, lo que limita la potencia del cargador y conlleva riesgos de sobrecalentamiento, especialmente en cargas intensas y prolongadas. Los cargadores pueden ser unidireccionales o bidireccionales.
- **Batería:** Dispositivo de almacenamiento que consta de una o más celdas electroquímicas que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica [38].
- **Inversor:** Convierte la corriente continua de la batería en corriente alterna monofásica o trifásica para alimentar el motor CA. Además, recupera la energía del motor durante el frenado y la devuelve a la batería.
- **Convertidor CC/CC:** Transforma el alto voltaje de las baterías al voltaje de 12 V utilizado por la batería auxiliar. Este dispositivo regula la tensión de entrada/salida para mantenerla constante.

- **Unidad electrónica de control:** Coordina el sistema de gestión de la batería, el cargador, el inversor y el convertidor. Ajusta el flujo de potencia entre el motor eléctrico y las baterías para optimizar el rendimiento del motor.

La figura 5 muestra los elementos esenciales de un VE con motor CA, incluyendo el inversor, el cual no está presente en un VE con motor CC.



*Figura 5 Componentes de un vehículo eléctrico con motor en corriente alterna (AC), Fuente: [39]*

## TIPOS

Los vehículos eléctricos se clasifican según su grado de electrificación en [37], [38]:

- **Vehículo eléctrico de batería:** también conocido como vehículo eléctrico puro, opera exclusivamente con motores eléctricos y se alimenta de baterías recargables principalmente a través de la red eléctrica [37]. Como resultado, no emite emisiones de CO<sub>2</sub> [38].
- **Vehículo eléctrico híbrido:** combina un motor de combustión interna con uno o varios motores eléctricos y recarga sus baterías mediante el motor térmico y la recuperación de energía durante la frenada [37]. Además, tiene una mayor autonomía en comparación con los demás tipos [38].
- **Vehículo eléctrico híbrido enchufable:** similar al híbrido, incorpora una batería recargable de mayor capacidad que se carga conectándola a la red eléctrica [37].
- **Vehículo eléctrico de autonomía extendida:** cuentan con un motor de combustión que actúa como generador de energía cuando las baterías se descargan, pudiendo ser enchufables o no [37].
- **Vehículo eléctrico con pila de combustible de hidrógeno:** utilizan una pila de combustible de hidrógeno para generar electricidad y alimentar los motores eléctricos, por ello no usan baterías [37]. Funcionan mediante la electrolisis inducida por hidrogeno, donde el agua y el calor son los únicos subproductos de este proceso, lo que los convierte en vehículos de cero emisiones al igual que el vehículo eléctrico de batería [38].

La figura 4 muestra los distintos tipos de VE y resalta las diferencias en sus sistemas, como se mencionó previamente. En esta representación, se

enfatisa el vehículo eléctrico de batería y el híbrido enchufable son reconocidos como vehículos eléctricos enchufables [40].

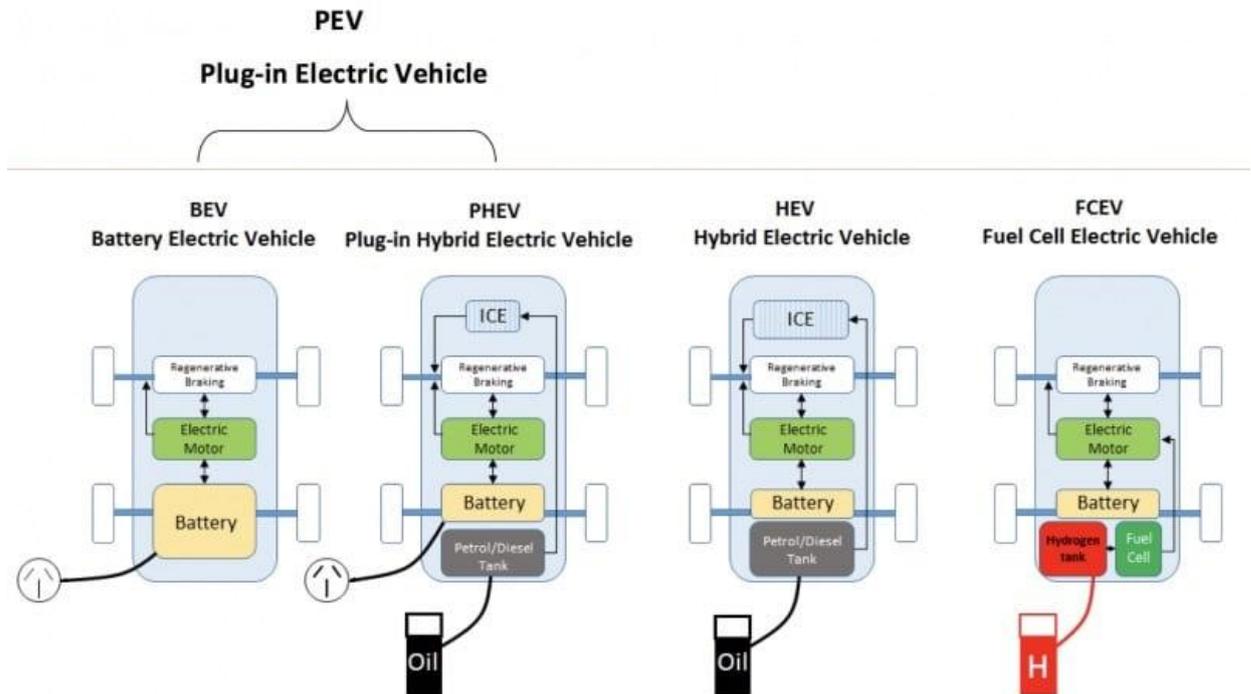


Figura 6 Tipos de vehículos eléctricos, Fuente: [40]

## BATERIA

La batería se compone de dos o más celdas, cada una con electrodos llamados cátodo y ánodo, inmersos en un electrolito conductor de iones [41], [42]. Estos electrodos trabajan en conjunto para proporcionar y absorber electrones con el voltaje suficiente para operar máquinas o dispositivos útiles [41]. En esencia, la batería almacena energía química y la convierte en energía eléctrica de corriente continua cuando es necesaria [42]. La relación más fundamental en el funcionamiento de las baterías es que cada amperio que fluye durante un tiempo determinado implica una reacción química correspondiente [41].

La batería es un componente crítico en los vehículos eléctricos, ya que su tipo y tamaño tienen un impacto directo en la autonomía y el costo del vehículo [37].

## PARÁMETROS PRINCIPALES

Existen parámetros fundamentales que definen una batería y entre estos se encuentran:

- **Voltaje:** Es la diferencia de potencial entre los terminales del cátodo y el ánodo de una celda electroquímica, se mide en voltios (V) [37].
- **Densidad energética:** Indica la cantidad de energía que una batería puede almacenar en relación con su peso. Este factor es crucial para la

autonomía y el rendimiento del vehículo, ya que influye directamente en su capacidad de propulsión. Se expresa en Wh/kg [37]

- **Capacidad de la batería:** Cantidad de energía que la batería puede proporcionar sin que el voltaje del terminal caiga por debajo de un valor específico. Generalmente expresada en amperios-hora (Ah) o kilovatio-hora (kWh).
- **Potencia específica:** Representa la potencia que una batería puede proporcionar por cada kilogramo de peso. Se expresa en W/kg. [37]
- **Ciclos de vida:** Indica el número de ciclos completos de carga y descarga que una batería puede realizar antes de necesitar ser reemplazada [37]
- **Velocidad de recarga:** Es el tiempo necesario para recargar la batería hasta el 80 % de su capacidad total [37].
- **Efecto memoria:** Se refiere a un fenómeno no deseado que puede afectar a las baterías, limitando su voltaje o capacidad con cada recarga. Esto suele ocurrir debido a largos períodos de almacenamiento, altas temperaturas o corrientes elevadas, lo que resulta en una disminución de la capacidad de la batería para almacenar energía [37]
- **Profundidad de descarga:** Es el porcentaje de la capacidad de la celda que se ha descargado [42].
- **Vida útil:** Es una medida de la capacidad de la batería para retener su carga en las condiciones de almacenamiento encontradas [42].

## TIPOS

Existen diversas opciones de baterías disponibles, cada una con capacidades y características particulares. En el ámbito de los vehículos eléctricos, se pueden encontrar baterías de plomo-ácido, níquel, zinc, litio y metal-aire [38].

Las baterías de plomo-ácido, una de las primeras tecnologías utilizadas en el transporte, son conocidas por su madurez y asequibilidad [38]. Sin embargo, presentan inconvenientes relacionados con el manejo de sustancias ácidas, la presencia de plomo en su construcción, así como una baja relación de energía almacenada por peso y volumen [38].

Posteriormente, las baterías de plomo-ácido fueron reemplazadas por las de níquel, como el níquel-cadmio (Ni-Cd) y el níquel-hidruro metálico (Ni-MH) [38]. Aunque el Ni-Cd destaca por su ciclo de vida prolongado, su uso se ha visto limitado debido a preocupaciones de salud relacionadas con el cadmio. Además, su eficiencia y rendimiento en condiciones climáticas frías son deficientes [38].

Las baterías de litio son las más populares en VE [37], y cuentan con numerosas ventajas, como peso ligero, alta energía específica, alta potencia específica y alta densidad de energía. Además, las baterías de litio no presentan efecto memoria y están libres de metales tóxicos como plomo, mercurio o cadmio. Entre las más comunes [37], [38] se encuentran las de iones de litio (Li-ion), polímero de iones de litio (LiPo) y fosfato de hierro y litio. No obstante, su principal desventaja radica en el elevado coste de producción en comparación

con las baterías de NiCad y Ni-MH. En el anexo 1 se muestra un resumen de las características técnicas de los principales tipos de baterías utilizadas en los vehículos eléctricos.

Hay otra clasificación que distingue entre las baterías primarias, que son de un solo uso y se desechan después de su agotamiento, y las baterías secundarias o acumuladoras, que pueden recargarse y utilizarse repetidamente hasta que su ciclo de vida llegue a su fin. Son estas últimas las que se emplean en los vehículos eléctricos enchufables [38].

## DEGRADACIÓN DE BATERIAS

Un tema muy importante en la actualidad es la degradación de las baterías que es un proceso complejo influenciado por varios factores. Según estudios [8], [43] aspectos como el número de ciclos, la temperatura de funcionamiento y la profundidad de descarga inciden significativamente en este proceso.

La tabla 1 muestra los efectos de estos factores que son fundamentales, dado que inciden directamente en el rendimiento, la eficiencia y la vida útil de la batería [44].

*Tabla 1 Factores que influyen en la degradación de baterías, Elaboración: Propia, Fuente: [44], [45], [46]*

| <b>Factor</b>                        | <b>Impacto en la batería</b>                                                                                                                                                           | <b>Efectos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Temperatura de funcionamiento</b> | Influye en la velocidad de reacciones y la resistencia interna, lo que puede impactar en la capacidad de la batería [44] También influye en el envejecimiento de la batería [45], [46] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar la temperatura puede mejorar el rendimiento de la batería, pero acelerar su envejecimiento [44].</li> <li>• Disminuir la temperatura puede ralentizar la reacción electroquímica y reducir la capacidad de la batería [44].</li> </ul>                       |
| <b>Numero de ciclos</b>              | Determina la durabilidad de la batería y su capacidad de retener energía con el tiempo [44]. También influye en el envejecimiento de la batería [45], [46]                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar el número de ciclos puede provocar degradación de la batería y reducir su capacidad con el tiempo [44].</li> <li>• Disminuir los ciclos puede prolongar la vida útil de la batería [44].</li> </ul>                                                          |
| <b>Profundidad de descarga</b>       | Afecta la integridad de la batería y su capacidad de mantener una carga óptima, lo que influye en su rendimiento general [44], [45].                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar la profundidad de descarga puede aumentar el estrés en la batería y acelerar su degradación [44].</li> <li>• Disminuir la profundidad de descarga puede prolongar la vida útil de la batería al reducir el estrés en los materiales activos [44].</li> </ul> |

Es importante reconocer que la degradación de la capacidad de la batería es inevitable, ya que se emplea para satisfacer total o parcialmente las necesidades del vehículo eléctrico [43].

## RECARGA DE VEHICULOS ELECTRICOS

La infraestructura de recarga para VE incluye dispositivos físicos y lógicos [37] diseñados para facilitar la conexión entre la red y los vehículos eléctricos, para recargar estos últimos. Esta infraestructura garantiza el cumplimiento de los estándares de seguridad y disponibilidad establecidos para cada situación, asegurando así un servicio completo e integral de recarga [37]. Las organizaciones internacionales de estandarización, como el Instituto de Investigación en Energía Eléctrica y la Sociedad de Ingenieros de Automoción, han establecido normas para regular y coordinar el desarrollo de esta tecnología a nivel mundial [38].

La carga de vehículos eléctricos se puede emplear mediante sistemas de CC o CA [38]. Los componentes principales incluyen estaciones de recarga, sistemas de control, canalizaciones eléctricas, paneles de mando y protección, y dispositivos de medición, dedicados exclusivamente a la recarga de vehículos eléctricos. Esta infraestructura es crucial para el éxito del despliegue de vehículos eléctricos en áreas urbanas [47].

Las estaciones y puntos de carga, junto con los modos de carga, constituyen la arquitectura básica de la recarga [47]. Las estaciones de carga o equipos de suministro de vehículos eléctricos, se refiere al equipo que se encarga de suministrar la carga a los vehículos eléctricos enchufables, mientras que el punto de carga se refiere a los conectores individuales para cargarlos [47].

La tabla 2, resume la clasificación de los modos de carga [37], [38], [47] que indica el nivel de comunicación entre el vehículo y la estación de carga. Los modos con numeraciones más altas indican infraestructuras con protocolos de comunicación más avanzados, lo que mejora el control del proceso de carga.

*Tabla 2 Clasificación de puntos de recarga de VE, Elaboración: Propia, Fuente: [37], [38], [47]*

| Estándar internacional          | Modo de carga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>DIN19 IEC20 61851</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Modo 1 o Carga domestica lenta:</b> Es la carga mediante enchufes domésticos, sin caja de control               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (250 V monofásico o 480 V trifásico; máx. 16 A; 3,7–11 kW)</li> </ul> </li> <li>• <b>Modo 2 o Carga lenta en CA:</b> Tiene conexión semiactiva al vehículo para comunicarse por motivos de seguridad, se pueden consumir 32 A.               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (250 V monofásico o 400 V trifásico; máx. 32 A; 7,4-22 kW)</li> </ul> </li> </ul> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Modo 3 o Carga lenta/rápida CA:</b> Tiene conexión activa entre el cargador y el vehículo, para garantizar la seguridad y comunicar la carga inteligente. <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (250 V monofásico o 480 V trifásico; máx. 32 A; 14,5–43,5 kW)</li> </ul> </li> <li>• <b>Modo 4 o Carga rápida CC:</b> Tiene conexión activa entre cargador y vehículo. La intensidad máxima de corriente puede llegar hasta 400 A y la potencia máxima de hasta 240 kW.</li> </ul> |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

La tabla 3 y la figura 7, muestran los tipos de conectores [37], [38], [47] que se usan para enchufar el vehículo y el punto de carga, cada uno se usa en función del modo de carga con el que son compatibles y va incluido en el cable que facilita el fabricante del VE.

*Tabla 3 Tipos de conectores, Elaboración: Propia, Fuente: [37], [38], [47]*

| Estándar internacional                                                   | Tipos de conectores                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CEE 7/4 tipo F</b>                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Schuko:</b> Enchufe convencional para alimentación monofásica, consta de 3 pines, soporta hasta 16 A y 230 V(monofásica). Compatible con modo 1 y 2.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>IEC 62196 (IEC, 2014) y modificados por IEC 62196-2 e IEC 62196-3</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>SAE J1772/Yazaki o Tipo 1:</b> Predominante en Estados Unidos y Japón, consta de 5 pines, soportando hasta 32 A y 230 V (monofásica). Compatible con el modo de carga 3.</li> <li>• <b>Mennekes o Tipo 2:</b> Adoptado por ACEA como estándar europeo, consta de 7 pines y soporta 70 A - 230 V y menos de 63 A - 400 V. Compatible con el modo de carga 3 y es único tanto para monofásica como para trifásica.</li> <li>• <b>Scame o Tipo 3:</b> Utilizado en Francia e Italia, consta de 7 pines y puede soportar hasta 32 A y 400 V en corriente alterna. Compatible con el modo de carga 3.</li> <li>• <b>CHAdeMO o Tipo 4:</b> Utilizado en Japón y Europa, soporta hasta 200 A y 500 V, consta de 10 pines. Compatible con modo 4 carga rápida CC.</li> </ul> |
| <b>Otros</b>                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Combinado CCS o Combo 2:</b> Estándar de enchufe de Europa, presenta un conector Mennekes (tipo 2) y CHAdeMO(tipo 4). Compatible con modo 2,3,4.</li> <li>• <b>Combinado o Combo 1:</b> Usado en Estados Unidos, dispone de un conector SAE J1772/Yazaki (tipo 1) y CC.</li> <li>• <b>GB/T:</b> Usado en China, compatible con modo 4 para CC y modo 3 para CA.</li> <li>• <b>Tesla:</b> Único para esta marca, se usa en Estados Unidos y Canadá.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Tipos de conectores V.E.



Figura 7 Tipos de conectores de VE, Fuente:[48]

La tabla 4, presenta una clasificación basada en el nivel de potencia de carga [38], [47], indicándonos la diferencia entre las estaciones de carga según la potencia de carga utilizada para cargar los VE.

Tabla 4 Nivel de potencia de carga, Elaboración: Propia, Fuente: [38], [47]

| Estándar internacional | Nivel de potencia de carga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EPRI y SAE             | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="470 1137 1356 1391">• <b>Nivel 1 CA, carga lenta o modo 2 con enchufe convencional (&lt;3,7 kW):</b> Permite conectar el vehículo a una toma de CA estándar. En la mayoría de los países europeos, la potencia de carga alcanza los 3.7 kW. Se utiliza frecuentemente para cargar vehículos durante la noche en casa o en el lugar de trabajo, y puede tardar entre 8 y 10 horas.</li> <li data-bbox="470 1429 1356 1541">• <b>Nivel 2 CA o carga lento (&gt;3,7 kW y &lt;22 kW):</b> Instalado en lugares públicos como aparcamientos y supermercados. Requiere de 3 a 4 horas para cargar.</li> <li data-bbox="470 1579 1356 1794">• <b>Nivel 3 CC, con cargadores rápidos (&gt;22 kW y &lt;43,5 kW para AC) y (&lt;400 kW para CC):</b> Utiliza cargadores externos para proporcionar carga rápida. Puede cargar hasta el 80% del vehículo en 20 minutos. Es más adecuado para baterías que permiten carga de alta potencia, como el Porsche Taycan.</li> </ul> |

Para este TFM, resulta fundamental la clasificación de la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos, ya que simplificará la comprensión del uso e

impacto de dichos vehículos en la microrred. Como se ha mencionado, esta infraestructura se rige por diversos estándares internacionales, lo que puede generar confusión al intentar categorizar la velocidad de recarga en lenta, media y rápida. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que, incluso con valores de potencia de carga establecidos, el tiempo de carga varía considerablemente según la capacidad de la batería del VE. En este TFM, se llevará a cabo la clasificación de la carga de los vehículos eléctricos según el nivel de potencia de carga establecido por los estándares de EPRI y SAE [38], [47], dividiéndola en las siguientes categorías: nivel 1 o carga lenta (<3,7 kW en CA), nivel 2 o carga media (entre 3,7 kW y 22 kW en CA) y nivel 3 o carga rápida (entre 22 kW y 43,5 kW en CA, y <400 kW en CC). Aunque el autor [38] define el nivel 2 como carga lenta, para evitar confusiones y diferenciarlo del nivel 1, en este TFM lo categorizaremos como carga media.

## **IMPACTO DEL VEHICULO ELECTRICO EN LA MICRORRED**

Para comprender el impacto del VE en la microrred, es crucial definir el concepto de Vehicle-to-grid, que surgió en la década de 1990 al explorar el potencial de los vehículos eléctricos para brindar servicios de generación distribuida y almacenamiento [49], reconociendo su valor para las empresas de servicios eléctricos al integrarlos como recursos energéticos flexibles y dinámicos [49], [50].

El V2G se refiere a la tecnología que utiliza las baterías de los vehículos eléctricos para respaldar las redes eléctricas [15]. Esta idea surge de la subutilización de las grandes baterías de los VE, que podrían ofrecer diversos servicios más allá de la propulsión del vehículo [15].

Entre todos los tipos de VE mencionados, el vehículo eléctrico de batería destaca como la opción óptima para integrarse en V2G, esto se debe a su exclusivo funcionamiento con motores eléctricos y a su recarga principal a través de la red eléctrica mediante baterías recargables [25].

La tabla 5 presenta un resumen de los beneficios y desafíos de la tecnología V2G en microrredes, basado en las aportaciones de diversos autores. Entre los beneficios, se destaca la mejora en la integración de energías renovables [51], facilitada por el servicio auxiliar de almacenamiento de energía. Estos servicios auxiliares ayudan a mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda, asegurando un flujo de energía confiable entre la generación y las cargas. Además, V2G contribuye al control de tensión y frecuencia, así como a la gestión eficiente de carga y demanda. Un ejemplo de servicio auxiliar es el uso de las baterías de los VE para almacenar el exceso de generación durante las horas de menor actividad, un servicio conocido como nivelación de carga.

En cuanto a los desafíos, uno de los más significativos es la degradación de la capacidad de la batería, lo cual tiene implicaciones importantes para los VE y los servicios V2G [8], [52]. La reducción de la capacidad de la batería afecta la autonomía y aumenta los costos de mantenimiento y reemplazo [8]. Para mitigar

la degradación de las baterías, se están desarrollando modelos para optimizar el comportamiento de carga y minimizar los impactos negativos [8]. Además, se recomienda mantener la capacidad de almacenamiento de la batería dentro de ciertos límites [53].

*Tabla 5 Beneficios y desafíos de V2G en microrredes, Elaboración: Propia, Fuente: [14], [16], [25], [45], [51], [52], [54], [55]*

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Beneficios</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de la integración de energías renovables [51].</li> <li>• Provisión de energía de respaldo y servicios auxiliares [55].</li> <li>• Los servicios auxiliares que puede proporcionar son: regulación de voltaje y frecuencia, nivelación de carga, reducción de picos en el consumo de energía, reservas giratorias e integración de almacenamiento de energía para mitigar la intermitencia de fuentes de energía renovable [54].</li> <li>• Control de tensión y frecuencia [45].</li> <li>• Gestión eficiente de carga y demanda [45].</li> <li>• Reducción de costos de energía eléctrica a través de la reducción de picos [55].</li> </ul>                                                                                                                         |
| <b>Desafíos</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidad en la demanda de carga debido a los hábitos de uso y necesidades de viaje de los usuarios [51].</li> <li>• Sobrecargas en momentos pico y elevación del nivel de voltaje [51].</li> <li>• Gestión de la volatilidad temporal y espacial de la carga [51].</li> <li>• Manejo de la integración de diversas incertidumbres, incluidas variaciones de carga y fluctuaciones de precios [14].</li> <li>• Retos para el funcionamiento seguro y económico de la red [51].</li> <li>• Impacto en la vida útil de los transformadores y calidad de la energía [51].</li> <li>• Degradación de las baterías debido al intercambio bidireccional frecuente [25].</li> <li>• Necesidad de mejoras continuas en la tecnología y sistemas de baterías [16], [52].</li> </ul> |

De acuerdo con el autor [54], el concepto V2G se clasifica dependiendo de la dirección de flujo en unidireccional y bidireccional. V2G unidireccional, también conocido como carga inteligente o tecnología V1G, se centra en controlar la velocidad de carga del VE desde la red eléctrica [54]. Este enfoque resulta menos costoso y complejo, ya que implica el uso de un controlador para determinar y gestionar la carga, maximizando los beneficios y reduciendo los costos y las emisiones [54]. Por otro lado, V2G bidireccional permite que la energía fluya en ambas direcciones entre el VE y la red eléctrica, para ello requiere un cargador de batería bidireccional para su implementación [54].

Aunque existen dispositivos comerciales para la carga inteligente de VE, según la revisión de la literatura las investigaciones actuales que están

explorando la integración de microrredes con vehículos eléctricos han sido mayormente implementados con simulaciones. El autor [14] que utiliza programación robusta de tres etapas para gestionar la energía en su microrred, utilizando los vehículos eléctricos como unidades de almacenamiento que participan en programas de respuesta a la demanda. Los resultados muestran una gestión más flexible que permite equilibrar intereses económicos y operativos de manera óptima bajo diversas incertidumbres. Otro autor [56] realiza simulaciones utilizando el modelo openCEM para evaluar la viabilidad y operación de V2G en microrredes residenciales, estudiando diferentes escenarios de carga de vehículos y obteniendo resultados que muestran que la operación V2G en microrredes optimizadas mejora la viabilidad económica y reduce el costo de electricidad. El autor [17] usa el software HOMER para optimizar factores como costos y emisiones de CO<sub>2</sub> en una microrred que integra biogás y fotovoltaica. En la simulación, se usan los vehículos eléctricos para almacenar energía y servir como recurso de energía distribuida, logrando una reducción significativa de la dependencia de la red eléctrica y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Otro autor [57] utiliza la plataforma MATLAB/Simulink para desarrollar la simulación y estudiar la viabilidad de utilizar vehículos eléctricos como almacenamiento de energía en una microrred experimental. Los resultados muestran que la aceptación del V2G y la disponibilidad de las baterías pueden mejorar la fiabilidad y autosuficiencia de la microrred. El autor [58] busca optimizar el uso de la energía y la participación de los VE en la gestión de la carga de la microrred basada en solar fotovoltaica, basándose en el control predictivo del modelo. Los resultados obtenidos de las simulaciones demuestran la eficacia de la estrategia propuesta para reducir la carga máxima y satisfacer las preferencias de carga de los VE.

El trabajo fin de máster que se va a exponer integra una microrred con vehículos eléctricos, aprovechando la potencia excedente de generación renovable para su carga. A diferencia de la revisión de la literatura previa, este estudio implementa una metodología en un entorno real, específicamente en la microrred del CEDER ubicada en Soria, España. Las principales contribuciones de este TFM son:

1. **Diversidad de componentes:** La microrred del CEDER incluye una variedad de tecnologías de generación y almacenamiento de energía, lo que proporciona una perspectiva completa para la gestión y facilita la recopilación de datos para un análisis exhaustivo del impacto y la eficiencia de la metodología.
2. **Diversidad en perfiles de consumo:** Los perfiles de consumo en la microrred del CEDER son similares a los de entornos industriales, del sector de servicios y domésticos, lo que permite abarcar una amplia variedad de perfiles y realizar un análisis más completo.
3. **Datos reales y precisos:** La aplicación en un entorno real proporciona datos precisos sobre el comportamiento de la microrred, validando la

metodología y permitiendo la identificación de variaciones y anomalías que ocurren en condiciones reales.

4. **Metodología accesible:** La gestión de la microrred con vehículos eléctricos se lleva a cabo utilizando programas de acceso gratuito y con una programación sencilla, facilitando su replicación y aplicación en otros contextos.
5. **Resultados reales:** Se obtienen resultados reales del impacto de la metodología en la gestión de la microrred con vehículos eléctricos, permitiendo una evaluación precisa de los beneficios y desafíos en un entorno operativo real.
6. **Análisis de factores ambientales:** Los datos recopilados sobre la carga real de los vehículos eléctricos permiten analizar el comportamiento de las baterías en relación con los factores ambientales, como la temperatura ambiente, lo que contribuye a evaluar su impacto.

## 2. OBJETIVOS

### GENERALES

- Desarrollar una metodología para la gestión óptima de la carga de vehículos eléctricos en la microrred del CEDER

### PARTICULARES

- Priorizar el uso de potencia excedente para cargar vehículos eléctricos del CEDER
- Analizar el impacto de la temperatura ambiente en las baterías de los vehículos eléctricos.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada pretende la integración de la carga de los vehículos eléctricos y la microrred del CEDER. Para lograrlo, se deben seguir una serie de pasos con el fin de gestionar adecuadamente la microrred en conjunto con los vehículos eléctricos:

- 1. Descripción de la microrred e identificación de sus componentes clave:** Este paso consiste en describir las características de la microrred, incluyendo la disponibilidad de un sistema de gestión de energía, el tipo de método utilizado para su gestión, su clasificación, ubicación y parámetros de conexión a la red principal, así como su red interna y tipos de consumos. Además, se deben describir detalladamente los elementos clave necesarios para la gestión de la microrred en conjunto con la carga de los VE. Esto proporciona una visión clara de la infraestructura existente, permitiendo comprender sus limitaciones y posibilidades.
- 2. Estrategia de carga para cumplir los objetivos de gestión:** Establecer la estrategia para optimizar la carga de los vehículos eléctricos, asegurando que se alineen con los objetivos de maximizar el uso de energía excedente y reducir la dependencia de la red principal.
- 3. Descripción del tipo de nivel de potencia de carga en la microrred:** En este paso se analiza el tipo de estaciones de carga y conectores disponibles, así como su compatibilidad con los vehículos eléctricos, con el fin de determinar los niveles de potencia de carga disponibles en la microrred. También se evalúa el tiempo de carga necesario para los vehículos eléctricos. Esta información es crucial para implementar parte de la estrategia de carga.
- 4. Definición de parámetros de seguimiento para la gestión:** Se establecerán los parámetros clave que deben ser monitoreados para garantizar una gestión efectiva de la microrred y la carga de los vehículos eléctricos.

5. **Descripción de programas para la monitorización, control y gestión:** Se identificarán los programas necesarios para llevar a cabo la monitorización, control y gestión óptima de la microrred.
6. **Diagrama de flujo de la gestión de la microrred con vehículo eléctrico:** Se creará un diagrama de flujo que represente de manera visual la programación necesaria a implementar para cumplir con el objetivo.
7. **Implementación de la metodología de gestión:** La metodología final será implementada en el programa de monitorización, control y gestión.

## DESCRIPCIÓN DE LA MICRORRED E IDENTIFICACIÓN DE SUS COMPONENTES CLAVE

El presente TFM se desarrolló en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), ubicado en la Autovía A15, Salida 56, 42290 Lubia, Soria. El CEDER, especializado en la investigación aplicada, desarrollo y fomento de energías renovables, depende del CIEMAT y está adscrito al Departamento de Energía de este organismo público de investigación.

El CEDER-CIEMAT abarca 640 hectáreas y cuenta con una microrred inteligente conectada a una línea de distribución de 45 kV, que abastece a una subestación de 45/15 kV (1.000 kVA). La energía se distribuye a través de una red subterránea a 8 centros de transformación que ajustan el voltaje a 400 V de baja tensión trifásica. Esta red puede operar en anillo o modo radial y presenta perfiles de consumo similares a los de entornos industriales, del sector de servicios y domésticos. Se puede encontrar una imagen de la microrred con las características mencionadas en el anexo 2.

En el Anexo 3 se describen las especificaciones principales de los componentes de la microrred del CEDER relevantes para este TFM. Estos componentes incluyen:

- **Generación distribuida:** sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores y una mini turbina.
- **Sistemas de almacenamiento de energía:** varios tipos de baterías.
- **Vehículos eléctricos:** Nissan Leaf y Renault Kangoo. Se incluye una fotografía de los VE disponibles en el CEDER en el anexo 5.
- **Estaciones de carga para vehículos eléctricos:** modelos Circutor Urban T24 Mix y Circutor Wallbox ePark Mix. Se incluye una fotografía de la ubicación de las estaciones en el CEDER en el anexo 4.

## ESTRATEGIA DE CARGA PARA CUMPLIR LOS OBJETIVOS DE GESTION

Para elegir la estrategia de carga más adecuada, es esencial considerar las limitaciones específicas de nuestra microrred. En el caso del CEDER, una limitación clave es la falta de estaciones de carga preparadas para un flujo bidireccional de energía. Por lo tanto, optaremos por implementar la estrategia

de carga inteligente, también conocida como V2G unidireccional, que se enfoca en controlar la velocidad de carga del VE mediante la gestión del nivel de potencia suministrado por las estaciones de carga. Esta estrategia también contribuirá a proteger la batería del VE contra cargas intensas y prolongadas.

Además, incorporaremos la estrategia de nivelación de carga, que implica utilizar las baterías de los VE para almacenar el exceso de energía generada por fuentes renovables durante las horas de menor actividad. Para implementar esta estrategia, solo necesitaremos la capacidad de enviar instrucciones a las estaciones de carga, indicándoles que prioricen la carga de VE cuando haya un excedente de generación renovable.

Por último, es fundamental considerar la necesidad de uso de los VE para transporte dentro de las instalaciones y viajes de corta distancia. La estrategia debe garantizar que la carga de los vehículos eléctricos sea obligatoria y proporcione al usuario opciones de carga de acuerdo sus necesidades. Esto refleja la dependencia eventual de la microrred en la red principal para satisfacer las necesidades de carga de VE.

En resumen, la estrategia integral de gestión de la microrred del CEDER con VE abarca la implementación de V2G unidireccional, la nivelación de carga, el cuidado de las baterías de los VE y la carga obligatoria de los vehículos eléctricos.

## **DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE NIVEL DE POTENCIA DE CARGA EN LA MICRORRED**

De acuerdo con las especificaciones, el vehículo eléctrico Renault Kangoo puede aceptar niveles de carga lenta (<3,7 kW en CA) y carga media (entre 3,7 kW y 22 kW en CA). Por su parte, el Nissan Leaf, además de estos dos niveles de potencia de carga, también tiene la capacidad de aceptar el nivel de carga rápida (entre 22 kW y 43,5 kW en CA, y <400 kW en CC).

Sin embargo, es importante señalar que las estaciones de carga del Modelo Circutor Urban T24 Mix y Modelo Circutor Wallbox ePark T-C2 solo suministran carga lenta y media. En relación con los tipos de conectores, el conector tipo Schuko ofrece una carga aproximada de 2 kW, mientras que el tipo Mennekes puede proporcionar una carga aproximada de 6,5 kW para Nissan Leaf y 7,5 Kw para Renault Kangoo.

Considerando las capacidades de las baterías, el tiempo estimado de carga para el Nissan Leaf, con una batería de 40 kWh, sería aproximadamente de 20 horas para la carga lenta y 6 horas para la carga media. En el caso del Renault Kangoo, con una batería de 32 kWh, el tiempo de carga sería de aproximadamente 16 horas para la carga lenta y alrededor de 4 horas para la carga media. En el anexo 6 se muestra la curva de carga de estos vehículos eléctricos, donde se observa visualmente la diferencia entre carga media y carga lenta en función de la potencia y el tiempo de carga.

La tabla 7 muestra un resumen del nivel de potencia de carga disponible en la microrred. Es importante destacar que el tiempo de carga dependerá de la capacidad de la batería del vehículo eléctrico y el nivel de potencia de carga. Por lo tanto, el Renault Kangoo tiene tiempos de carga más rápidos en comparación con el Nissan Leaf. Sin embargo, en cuanto a la autonomía, el Leaf tiene una autonomía mucho mayor que el Kangoo.

*Tabla 6 Nivel de potencia de carga disponible en la microrred del CEDER, Elaboración: Propia, Fuente: CEDER*

| <b>Vehículo eléctrico</b>                                      | <b>Renault Kangoo</b>                        |          | <b>Nissan Leaf</b>                  |          |        |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|--------|
| <i>Tipo de batería de vehículo eléctrico y capacidad (kWh)</i> | Iones de litio (32 kWh)                      |          | Oxido de manganeso y litio (40 kWh) |          |        |
| <i>Estaciones de carga compatibles</i>                         | Circuitor Urban T24 Mix y Wallbox ePark T-C2 |          |                                     |          | -      |
| <i>Tipos de carga aceptada</i>                                 | Lenta                                        | Media    | Lenta                               | Media    | Rápida |
| <i>Tipos de conectores disponibles</i>                         | Schuko                                       | Mennekes | Schuko                              | Mennekes | -      |
| <i>Potencia de carga (kW)</i>                                  | 2                                            | 7.5      | 2                                   | 6.5      | -      |
| <i>Tiempo de carga completa (horas)</i>                        | 16                                           | 4        | 20                                  | 6        | -      |

## DEFINICION DE PARAMETROS DE SEGUIMIENTO PARA LA GESTION

Para garantizar una gestión efectiva de la microrred y la carga de los vehículos eléctricos es importante monitorear una serie de parámetros específicos. La tabla 8 indica los parámetros que deben ser seguidos: la potencia instantánea de la microrred, renovable, de las estaciones de carga y la energía disponible en los sistemas de almacenamiento.

En este TFM, se denominará "**Consumo de red la de distribución**" cuando la potencia instantánea de la microrred sea mayor a cero, indicando consumo de energía proveniente de la red de distribución. Por otro lado, se denominará "**Potencia excedente**" a la situación en que la potencia instantánea de la microrred sea menor a cero, lo que indica que la energía renovable generada excede el consumo. Además, se utilizará el término "**Potencia renovable**" para referirse al total de la generación de los sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, la turbina hidráulica y los sistemas de almacenamiento de energía. Es importante mencionar que tener consumo de red de distribución no significa que no haya potencia renovable disponible, sino que la demanda de la

microrred es tan alta que, además del consumo de energía renovable, se requiere energía adicional de la red de distribución.

Tabla 7 Parámetros de seguimiento de la microrred, Elaboración: Propia

| Parámetros                                             | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Potencia instantánea $P(t)$ de la microrred            | Indica si la microrred consume de la red de distribución o tiene excedente de generación renovable: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><math>P(t)</math> de la microrred <math>&gt;0</math></b>: Si el valor de esta potencia es mayor que cero, la microrred está consumiendo energía de la red de distribución. Se denominará <b>Consumo de la red de distribución</b>.</li> <li>• <b><math>P(t)</math> de la microrred <math>&lt;0</math></b>: Si es menor que cero, la energía generada por las fuentes renovables excede el consumo, indicando un excedente de energía que se exporta a la red de distribución. Para fines prácticos, se denominará como <b>"Potencia excedente"</b>.</li> </ul> |
| Potencia instantánea $P(t)$ de las estaciones de carga | Indica el consumo de los vehículos eléctricos. Se denominará <b>Carga</b> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Potencia instantánea $P(t)$ renovable                  | Indica el total de la generación de los sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, la turbina hidráulica y los sistemas de almacenamiento de energía. Para términos prácticos se denominará <b>Potencia renovable</b> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Energía disponible en los sistemas de almacenamiento   | Indica energía disponible en baterías de plomo-ácido, baterías LFP, batería NMC, batería REDOX flujo de vanadio y sistemas de bombeo. Se cargan con la energía que proviene de la generación renovable.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

## DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS PARA LA MONITORIZACION, CONTROL Y GESTION DE LA MICRORED

Para dar seguimiento a todos estos parámetros se emplean dos programas de código abierto: Node-Red para la comunicación y Home Assistant para la monitorización, control y gestión.

Para lograr la comunicación en Node-Red, es necesario seguir una serie de pasos, tal como se muestra en la figura 3: primero, establecer la comunicación con los elementos de la microrred; luego, configurar los nodos de entrada y salida; interpretar los valores de las direcciones Modbus; y, finalmente, enviar la información a Home Assistant.

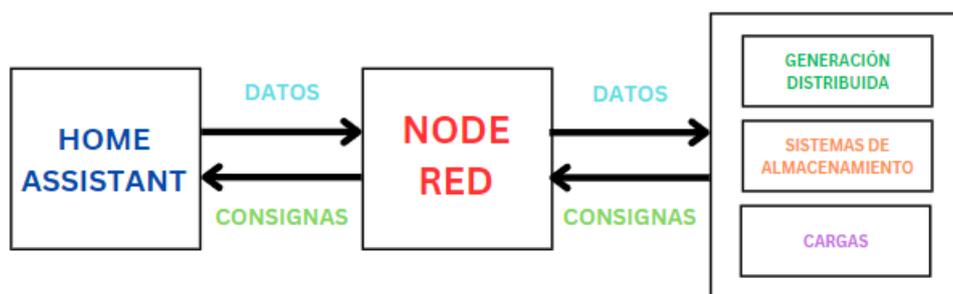
Para establecer la comunicación, se utiliza el protocolo Modbus en Node-Red. Primero, es necesario configurar un nodo Modbus para el dispositivo, lo cual implica definir la dirección IP, el número de puerto (valor predeterminado es

502) y el modo de comunicación (Modbus TCP/IP o Modbus RTU). Finalmente, se deben ajustar parámetros adicionales, como el tiempo de espera de la conexión y la frecuencia de actualización.

En la configuración de los nodos, se debe determinar el número de identificación del dispositivo (Unit-ID), la dirección del registro Modbus, el número de direcciones ocupadas por el registro y el tipo de registro (entrada, retención, etc.). Después de leer el valor de la dirección Modbus correspondiente (que es un valor entre 0 y 65536), es necesario interpretarlo mediante una función JavaScript programada para obtener el valor real de la variable que se está midiendo, en base a la información recopilada en el Trama Modbus con respecto al factor de escala y el tipo de datos (entero: int, entero sin signo: uint, punto flotante: float, etc.). Posteriormente, Node-Red envía la información a Home Assistant.

Una vez que la información se encuentra en Home Assistant, el panel de control permite visualizar los datos en tiempo real, monitorear el estado de los dispositivos y mostrar gráficos de diversas variables. Las consignas a los elementos de la microrred se pueden enviar de dos maneras: manualmente desde Home Assistant o de forma automatizada mediante Node-RED. Este último permite programar las condiciones necesarias para ejecutar las consignas de manera eficiente.

La Figura 8 muestra gráficamente cómo interactúan estos dos programas con los elementos de la microrred.



*Figura 8 Comunicación, monitorización, control y gestión de la microrred, Elaboración: Propia*

## **DIAGRAMA DE FLUJO DE LA GESTIÓN DE LA MICRORRED CON VEHÍCULO ELÉCTRICO**

Los primeros pasos de la metodología permiten identificar los componentes esenciales del Sistema de Gestión de Energía de la microrred. Esto incluye la generación distribuida, los sistemas de almacenamiento, las estaciones de carga y los vehículos eléctricos, junto con los programas necesarios para establecer la comunicación, monitorear, controlar y gestionar la energía para asegurar la fiabilidad, seguridad y suministro de energía al menor costo posible.

Como se explicó en el estado del arte, el Sistema de Gestión de Energía desempeña un papel crucial en esta gestión energética eficiente, siendo fundamental para optimizar la carga de los vehículos eléctricos en la microrred, según la estrategia previamente definida.

Para integrar la estrategia de gestión en el SEGn, se desarrollará la programación necesaria para tomar decisiones basadas en los parámetros obtenidos y enviar las consignas correspondientes a las estaciones de carga. Para ello, se elabora un diagrama de flujo que visualiza de manera general la programación necesaria para alcanzar el objetivo del SEGn.

Dado que la estrategia se enfoca en priorizar la carga de vehículos eléctricos cuando haya excedente de generación renovable, la primera decisión será cargar con potencia excedente si esta es superior a 7 kW (Carga media). Si no se cumple esta condición, la segunda decisión será cargar con 2 kW (Carga lenta), ya que se prioriza un tiempo de carga más rápido con la Carga media. Estas dos alternativas garantizan que haya suficiente potencia disponible para satisfacer las necesidades de carga, además de implementar una parte crucial de la estrategia que ofrece al usuario dos opciones de carga óptimas, ambas enfocadas en priorizar el consumo de energía renovable y cuidar la batería.

Si no se cumplen las condiciones para carga media o carga lenta, se evaluará si hay suficiente energía en los sistemas de almacenamiento. Si es así, se utilizará esta potencia para la carga; de lo contrario, el sistema procederá a iniciar la carga utilizando energía de la red de distribución. Estas decisiones forman parte fundamental de la estrategia, que considera la carga de vehículos eléctricos como una obligación debido a su necesidad de uso. Además, que da prioridad a la carga de origen renovable, ya que los sistemas de almacenamiento se recargan con este tipo de potencia.

La figura 9 muestra el diagrama de flujo implementado en el CEDER, para conseguir una gestión óptima de la carga de vehículos eléctricos en la microrred.

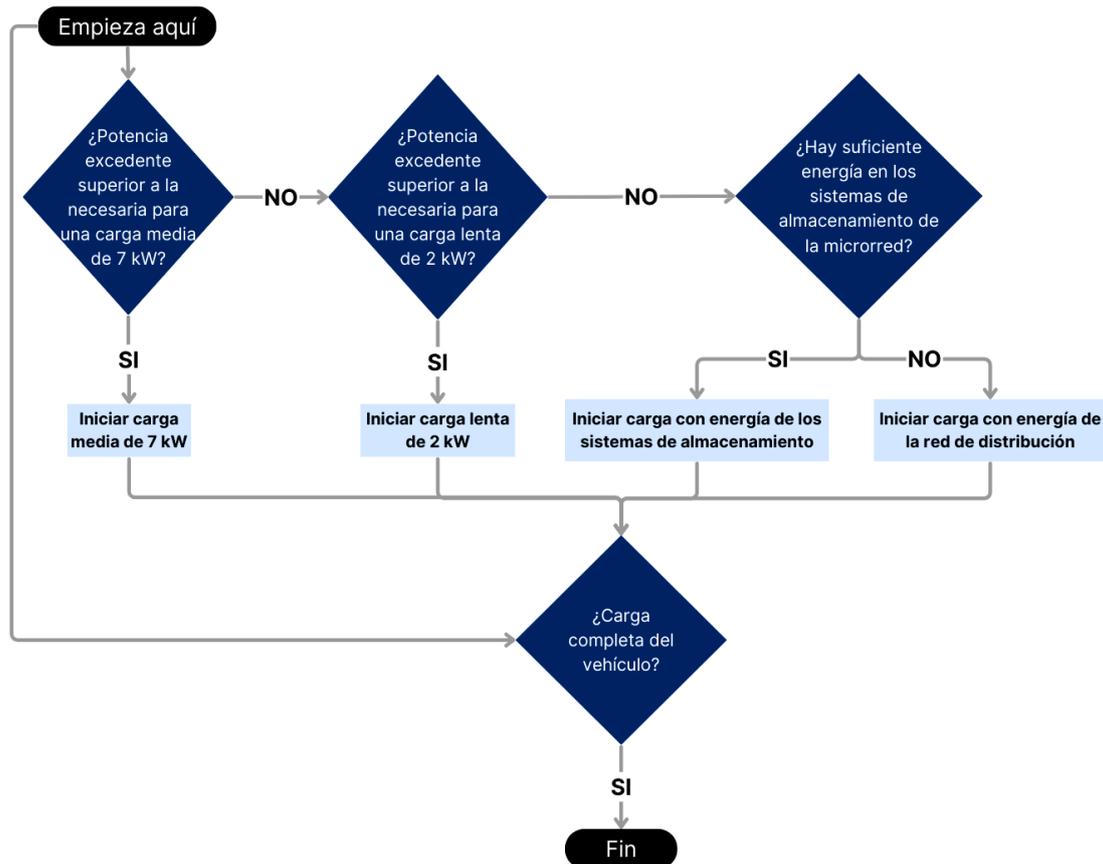


Figura 9 Diagrama de Flujo de la Gestión de la microrred con VE, Elaboración: Propia

## IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE GESTIÓN

El último paso de la metodología consiste en implementar la estrategia en los programas utilizados para el control, gestión y monitorización de la microrred. Como se mencionó anteriormente, en Node-RED podemos automatizar las consignas mediante programación basándose en el diagrama de flujo presentado.

El Anexo 7 muestra visualmente la implementación de la metodología de gestión en el panel de control de Home Assistant. Se puede observar que el Nissan Leaf está cargando debido a que hay potencia excedente disponible.

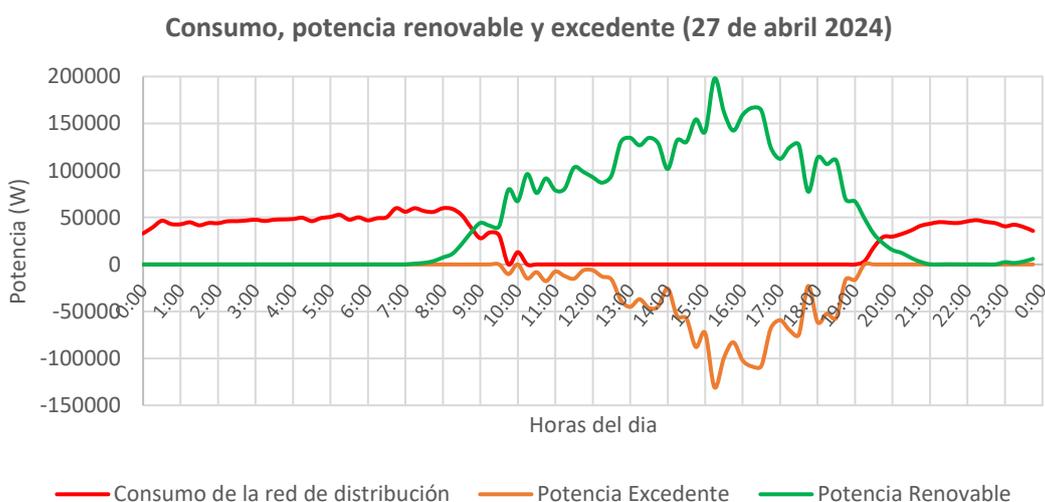
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentarán resultados que demuestran la efectividad de la metodología aplicada, obtenidos gracias al SGEN del CEDER que registra datos cada segundo y los almacena en promedios de quince minutos, coincidiendo con la frecuencia de medición de la distribuidora.

Los resultados a presentarán se dividirán en tres partes principales: primero, se analizará la dinámica entre el consumo de la red, el excedente, la generación renovable y la carga de vehículos eléctricos bajo esta metodología. En segundo lugar, se evaluará el impacto de la metodología, incluyendo el análisis del porcentaje de carga y el costo de la electricidad. Finalmente, se incluirán datos relevantes sobre la degradación de la batería, examinando el rendimiento del vehículo eléctrico en relación con la temperatura ambiente.

En la figura 11 se presentan los parámetros del día 27 de abril de 2024, representados por líneas de distintos colores: la línea roja muestra el consumo de la red de distribución, la línea amarilla indica la potencia excedente y la línea verde representa la potencia renovable.

La figura 11 ilustra que la microrred es capaz de generar potencia excedente, principalmente durante las horas del día con mayor recurso solar. Se observa que, aunque haya consumo de la red de distribución, existen períodos que coinciden con la generación renovable, como los intervalos de 7:00 a 10:00 y de 19:00 a 21:00. Durante estos períodos, tanto la línea roja (consumo de la red de distribución) como la línea verde (potencia renovable) están presentes simultáneamente. Esta sincronización se debe a que el SGEN del CEDER está configurado para priorizar el consumo de energía renovable. Así, es notable cómo la línea roja tiende a disminuir mientras que la línea verde tiende a aumentar, demostrando la adaptación del sistema para aprovechar la generación renovable disponible.



*Figura 10 Análisis de Consumo, potencia renovable y excedente de la microrred, Elaboración: Propia, Fuente: CEDER*

La figura 12 presenta nuevamente el día 27 de abril de 2024, resaltando el momento en que los vehículos eléctricos cargan durante el exceso de potencia. Durante el intervalo de las 10:30 y las 17:00 horas se puede observar la línea azul que muestra la carga del Nissan Leaf y la línea morada que corresponde al Renault Kangoo. Estas líneas aparecen cuando la línea roja desaparece, lo que indica claramente que la carga proviene del exceso de potencia y no de la red de distribución. Además, se tiene una carga continua y sin interrupciones gracias que el intervalo coincide con las horas de mayor generación renovable.

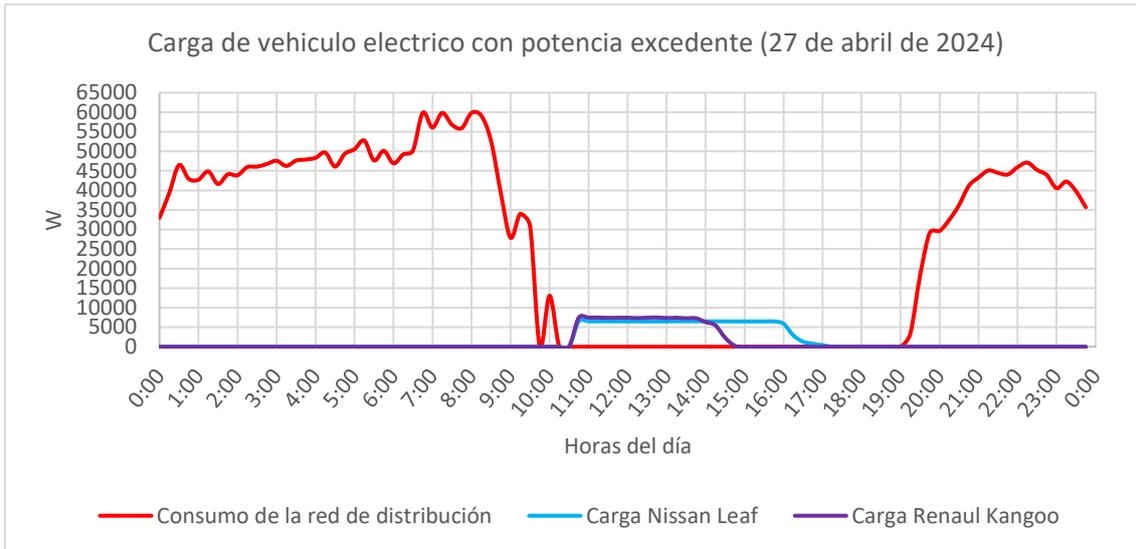
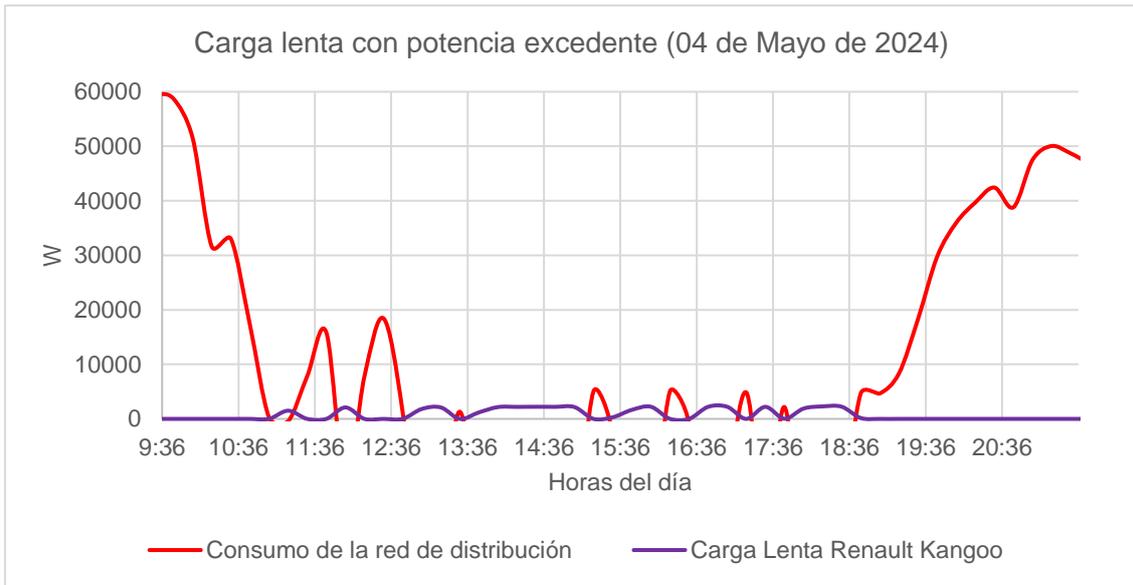


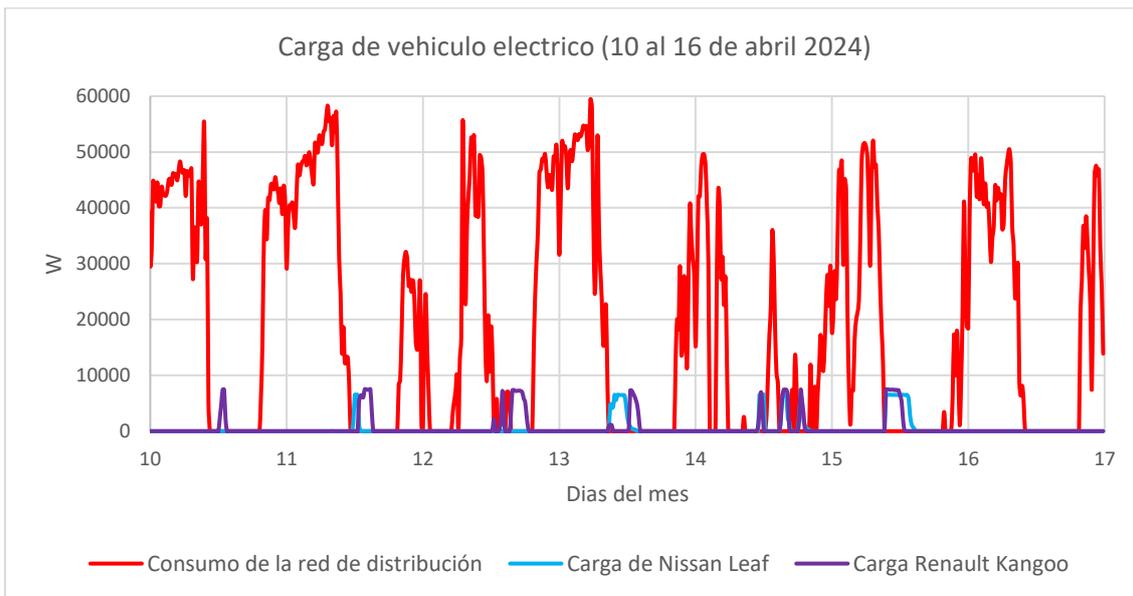
Figura 11 Carga de VE en un día, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER

En la figura 13 se muestra la carga lenta del vehículo eléctrico Renault Kangoo utilizando el excedente del día 04 de mayo de 2024. Cuando la línea roja aparece, la línea morada desaparece, indicando que la carga del vehículo eléctrico se suspende hasta que haya disponible nuevamente potencia excedente. Este patrón se repite regularmente entre las 10:30 y las 18:30 horas, lo cual demuestra que la metodología responde eficazmente a las variaciones en la generación renovable. Este aspecto es crucial cuando la potencia excedente depende de fuentes como la solar o eólica, que son intermitentes por naturaleza.



*Figura 12 Carga lenta con potencia excedente, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER*

En la figura 14 se presenta la carga de los vehículos eléctricos durante el período del 10 al 17 de abril de 2024. Se observa cómo la metodología se aplica consistentemente a lo largo de estos días. Durante los picos de consumo, la carga de los vehículos eléctricos se suspende hasta que se dispone nuevamente de potencia excedente. Esto se aprecia claramente en los días 12 y 14 de abril, donde la línea roja, que indica el consumo de la red de distribución, está presente, mientras que las líneas morada y azul, correspondientes al Renault Kangoo y al Nissan Leaf respectivamente, no aparecen. Esto confirma nuevamente la efectividad de la metodología para priorizar el uso de energía renovable excedente y reducir la dependencia de la red de distribución.



*Figura 13 Carga de VE en una semana, Elaboración: Propia: Fuente: Datos del CEDER*

La tabla 9 muestra los kWh totales mensuales de carga para cada vehículo eléctrico, así como los kWh provenientes de excedentes y de origen renovable. Estos valores no siempre coinciden, como se puede observar en abril de 2023, donde solo el 90% de la carga del Renault Kangoo provino de excedentes, pero el 100% fue de origen renovable. Este fenómeno se produce porque, aunque no haya potencia excedente disponible, sí existe generación renovable o energía disponible en los sistemas de almacenamiento entonces su origen será renovable.

*Tabla 8 Carga mensual de vehículos eléctricos, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER*

| AÑO  | MES        | Carga (kWh) |      | Carga Excedentes(kWh) |      | Carga Renovable (kWh) |      |
|------|------------|-------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|      |            | Kangoo      | Leaf | Kangoo                | Leaf | Kangoo                | Leaf |
| 2022 | Mayo       | 108         | 122  | 88                    | 116  | 104                   | 122  |
|      | Junio      | 126         | 266  | 97                    | 142  | 125                   | 200  |
|      | Julio      | 128         | 171  | 111                   | 137  | 128                   | 171  |
|      | Agosto     | 134         | 150  | 122                   | 111  | 134                   | 149  |
|      | Septiembre | 147         | 259  | 118                   | 158  | 137                   | 216  |
|      | Octubre    | 162         | 130  | 157                   | 107  | 161                   | 129  |
|      | Noviembre  | 166         | 217  | 108                   | 80   | 157                   | 215  |
|      | Diciembre  | 63          | 132  | 59                    | 27   | 62                    | 132  |
| 2023 | Enero      | 116         | 50   | 79                    | 26   | 115                   | 35   |
|      | Febrero    | 186         | 225  | 118                   | 119  | 170                   | 219  |
|      | Marzo      | 303         | 204  | 240                   | 197  | 300                   | 204  |
|      | Abril      | 256         | 119  | 231                   | 115  | 256                   | 119  |
|      | Mayo       | 241         | 250  | 184                   | 222  | 238                   | 228  |
|      | Junio      | 280         | 153  | 202                   | 145  | 279                   | 153  |
|      | Julio      | 161         | 176  | 159                   | 171  | 161                   | 174  |
|      | Agosto     | 235         | 94   | 208                   | 93   | 229                   | 94   |
|      | Septiembre | 163         | 127  | 155                   | 118  | 163                   | 127  |
|      | Octubre    | 167         | 132  | 126                   | 119  | 164                   | 132  |
|      | Noviembre  | 143         | 180  | 80                    | 124  | 135                   | 154  |
|      | Diciembre  | 224         | 152  | 101                   | 108  | 208                   | 152  |
| 2024 | Enero      | 184         | 202  | 104                   | 136  | 179                   | 178  |
|      | Febrero    | 230         | 202  | 176                   | 153  | 200                   | 202  |
|      | Marzo      | 192         | 105  | 77                    | 102  | 191                   | 105  |
|      | Abril      | 154         | 155  | 141                   | 137  | 153                   | 145  |
|      | Mayo       | 184         | 229  | 173                   | 207  | 183                   | 229  |

La Figura 15 y 16 ilustran el porcentaje mensual de potencia excedente y renovable utilizada por cada vehículo, proporcionando un resumen claro del origen de la carga. Se destaca que en la mayoría de los meses se logra un 100% de carga con energía renovable, en contraste con la carga proveniente de excedente.

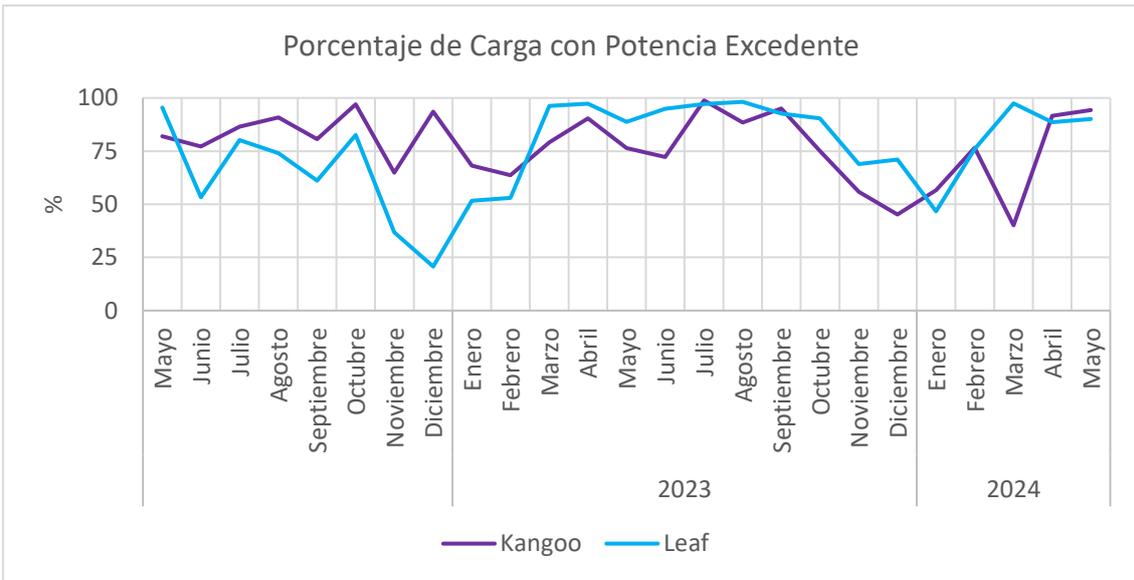


Figura 14 Porcentaje de Carga con Potencia Excedente, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER

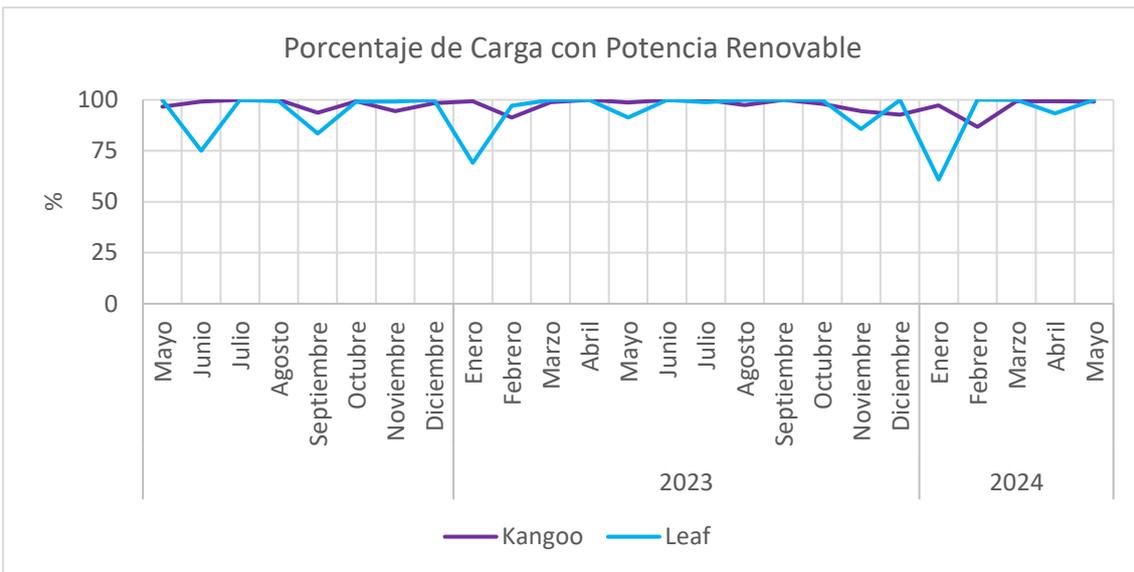


Figura 15 Porcentaje de Carga con Potencia Renovable, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER

Gracias a la metodología implementada, se ha logrado que el 78% de la carga del Kangoo y el 77% del Nissan Leaf provengan de excedentes. Esto se debe a que se aplica la estrategia de carga obligatoria cuando se necesita utilizar el vehículo, lo que implica algunos períodos de consumo directo de la red además de la energía almacenada, como ocurrió en el 40% de marzo de 2024 para el Renault Kangoo. Sin embargo, es posible alcanzar un alto porcentaje de carga procedente de energía renovable: 97% para el Kangoo y 95% para el Nissan Leaf. Esto se debe a que la mayoría de las cargas se realizan durante el horario laboral, coincidiendo con los periodos de mayor generación renovable.

Para continuar con el análisis del impacto de la metodología implementada, se presentará el ahorro económico que se ha obtenido como resultado de su aplicación. En el anexo 8 se detallan los precios de los diferentes periodos de facturación de la tarifa 6.1 TD, aplicable en España y contratada en el CEDER para los años 2022, 2023 y 2024.

En la tabla 10 se detalla el ahorro logrado al cargar vehículos eléctricos utilizando energía excedente, en comparación con el costo de cargarlos con energía de la red de distribución según las tarifas mencionadas en la tabla anterior. El ahorro anual asciende aproximadamente a 472 € para el Renault Kangoo y 430 € para el Nissan Leaf. Los meses de verano destacan por tener un ahorro más significativo debido a una mayor carga procedente de excedentes. En contraste, durante los meses de invierno, el ahorro es menor debido a un menor porcentaje de carga con excedente.

*Tabla 9 Ahorro económico mensual, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER*

| AÑO  | MES        | Costo actual de carga (€) |         | Costo de carga sin metodología (€) |         | Ahorro (€) |         |
|------|------------|---------------------------|---------|------------------------------------|---------|------------|---------|
|      |            | Kangoo                    | Leaf    | Kangoo                             | Leaf    | Kangoo     | Leaf    |
| 2023 | Junio      | 4,27 €                    | 25,96 € | 17,96 €                            | 45,56 € | 13,69 €    | 19,60 € |
|      | Julio      | 3,38 €                    | 6,62 €  | 22,41 €                            | 33,52 € | 19,03 €    | 26,90 € |
|      | Agosto     | 1,82 €                    | 7,82 €  | 19,06 €                            | 24,59 € | 17,24 €    | 16,77 € |
|      | Septiembre | 4,09 €                    | 9,11 €  | 20,75 €                            | 32,16 € | 16,66 €    | 23,05 € |
|      | Octubre    | 2,07 €                    | 7,53 €  | 21,71 €                            | 21,27 € | 19,64 €    | 13,74 € |
|      | Noviembre  | 9,65 €                    | 24,25 € | 24,74 €                            | 36,85 € | 15,09 €    | 12,60 € |
|      | Diciembre  | 1,42 €                    | 20,41 € | 11,43 €                            | 25,75 € | 10,01 €    | 5,34 €  |
|      | Enero      | 14,08 €                   | 3,52 €  | 42,75 €                            | 13,55 € | 28,67 €    | 10,03 € |
|      | Febrero    | 25,73 €                   | 41,95 € | 71,50 €                            | 88,18 € | 45,77 €    | 46,23 € |
|      | Marzo      | 23,72 €                   | 2,85 €  | 111,33 €                           | 76,18 € | 87,61 €    | 73,33 € |
|      | Abril      | 7,60 €                    | 0,99 €  | 80,29 €                            | 37,04 € | 72,69 €    | 36,05 € |
|      | Mayo       | 17,66 €                   | 1,99 €  | 75,82 €                            | 71,78 € | 58,16 €    | 69,79 € |
| 2024 | Junio      | 25,79 €                   | 2,57 €  | 93,16 €                            | 51,08 € | 67,36 €    | 48,51 € |
|      | Julio      | 0,73 €                    | 1,71 €  | 64,33 €                            | 69,84 € | 63,60 €    | 68,12 € |
|      | Agosto     | 8,65 €                    | 0,57 €  | 78,39 €                            | 31,74 € | 69,74 €    | 31,17 € |
|      | Septiembre | 2,75 €                    | 3,05 €  | 54,26 €                            | 41,69 € | 51,52 €    | 38,64 € |
|      | Octubre    | 12,87 €                   | 4,06 €  | 51,88 €                            | 41,35 € | 39,00 €    | 37,29 € |
|      | Noviembre  | 22,74 €                   | 20,70 € | 51,32 €                            | 65,72 € | 28,58 €    | 45,02 € |
| 2024 | Diciembre  | 47,79 €                   | 17,49 € | 85,45 €                            | 56,36 € | 37,66 €    | 38,87 € |
|      | Enero      | 46,26 €                   | 31,36 € | 71,09 €                            | 69,84 € | 39,82 €    | 53,47 € |
|      | Febrero    | 9,18 €                    | 34,49 € | 77,88 €                            | 79,76 € | 68,70 €    | 60,26 € |
|      | Marzo      | 40,74 €                   | 15,96 € | 69,96 €                            | 38,55 € | 29,22 €    | 37,58 € |
|      | Abril      | 3,81 €                    | 16,08 € | 24,10 €                            | 20,37 € | 20,29 €    | 19,28 € |
| Mayo | 1,53 €     | 18,22 €                   | 26,22 € | 32,70 €                            | 24,69 € | 29,47 €    |         |

La figura 17 ilustra el rendimiento del vehículo eléctrico en relación con la temperatura ambiente. La métrica de km por kWh indica cuántos kilómetros se pueden recorrer por cada kWh consumido; cuanto mayor sea este valor, mejor es el rendimiento del vehículo. En la figura se observa que los meses con mejor relación km/kWh son los más cálidos: junio, julio, agosto y septiembre. Por ejemplo, el Renault Kangoo muestra su mejor rendimiento en Julio 2023 con 5.27 km/kWh, mientras que el Nissan Leaf alcanza su máximo en Julio 2022 con 5.29 km/kWh.

Además, la figura revela una relación proporcional entre el rendimiento del vehículo y la temperatura ambiente: a medida que aumenta la temperatura, mejora la eficiencia en kilómetros por kWh; por el contrario, a medida que la temperatura ambiente disminuye, esta eficiencia también se ve afectada negativamente. Este fenómeno está explicado en el estado del arte, donde se menciona que la temperatura de funcionamiento influye en la velocidad de las reacciones químicas y en la resistencia interna de la batería, afectando tanto su capacidad como su envejecimiento.

Según los datos de la figura 14, en los meses cálidos se obtiene un mejor rendimiento del vehículo eléctrico (superior a 4.3 km/kWh), pero también se acelera el proceso de envejecimiento de la batería. En contraste, durante los meses más fríos, el rendimiento disminuye (inferior a 4.3 km/kWh) debido a la reducción de la capacidad de la batería provocada por las bajas temperaturas.

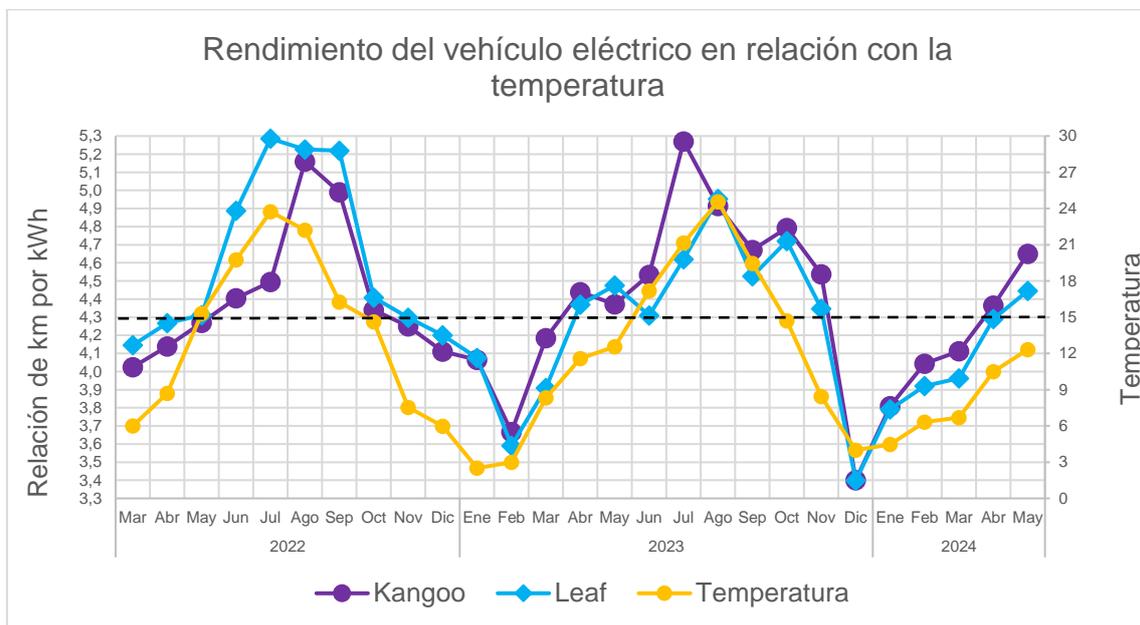


Figura 16 Rendimiento del vehículo eléctrico en relación con la temperatura ambiente, Elaboración: Propia, Fuente: Datos del CEDER

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que la metodología se ha integrado de manera eficaz al sistema de gestión de energía del CEDER, logrando una gestión óptima de la carga, un ahorro económico significativo y una mejor integración de las energías renovables. También evidencian que, gracias a las estrategias implementadas en el SGEN, los vehículos eléctricos se han integrado de manera eficiente, aprovechando la potencia excedente y garantizando una carga fiable sin impacto negativo para el usuario. En términos generales, la microrred del CEDER ha alcanzado un 78% de carga utilizando potencia excedente y un 96% con energía renovable, resultando en un ahorro anual de 903 € en la factura eléctrica.

Una ventaja significativa del TFM es haber implementado la metodología en una microrred con diversidad de componentes y perfiles de consumo, permitiendo obtener datos precisos sobre su implementación y comportamiento en un entorno real. Además, los programas de monitorización, control y gestión del CEDER son de acceso gratuito y cuentan con una programación sencilla, facilitando la replicación y aplicación de la metodología en otros contextos. Estas características aseguran su eficacia, respaldada por los resultados obtenidos.

Un aporte significativo del TFM son los datos obtenidos del análisis del rendimiento de los vehículos eléctricos respecto a la temperatura ambiente. Este análisis reveló que los vehículos tienen un mejor desempeño en los meses de verano (más de 4.3 km/kWh) en comparación con el invierno (menos de 4.3 km/kWh), debido al impacto de la temperatura en la batería. Estos resultados son crucialmente importantes ya que contribuyen significativamente al estudio de la degradación de las baterías en condiciones reales.

En resumen, la metodología implementada ofrece beneficios significativos como una carga confiable para vehículos eléctricos, maximización del uso de potencia excedente y renovable, así como la reducción de la dependencia de la red de distribución eléctrica. Este trabajo destaca la importancia de aprovechar la tecnología V2G para la gestión de microrredes, promoviendo al mismo tiempo el transporte cero emisiones y la reducción de la contaminación ambiental. Los resultados obtenidos establecen bases sólidas para continuar desarrollando esta tecnología en microrredes y contribuir a la transición hacia energías renovables.

## 6. LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

Para futuras investigaciones, se identifican tres áreas clave:

1. **Optimización de la carga de VE:** Es relevante explorar cómo mejorar la programación para maximizar el aprovechamiento de la potencia excedente, lo cual es crucial para aumentar la eficiencia energética y reducir costos operativos en sistemas de energía renovable.
2. **Monitoreo de la batería de VE:** Los datos analizados sobre el rendimiento de los VE en diferentes condiciones climáticas subrayan la importancia del monitoreo de la batería, ya que este componente es vital para prolongar la vida útil de los vehículos eléctricos.
3. **Estaciones de carga bidireccionales:** La instalación de estas estaciones permitiría la implementación de la tecnología V2G bidireccional. Esto no solo permitiría usar los VE para el almacenamiento de energía, sino también para suministrar energía a la red durante los períodos de mayor consumo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2023», Paris, 2023. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es>
- [2] Consejo Europeo Consejo de la Unión Europea, «Objetivo 55: cómo tiene previsto potenciar la UE la energía renovable». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://europa.eu/!JYNdQR>
- [3] Comisión Europea, «Pacto Verde Europeo». Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://europa.eu/!Rx69jD>
- [4] International Renewable Energy Agency, «Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power, International Renewable Energy Agency», Abu Dhabi, jun. 2023. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA\\_Innovation\\_landscape\\_for\\_smart\\_electrification\\_2023.pdf?rev=b92a90a778df450ea79ee8527ac1e334](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_Innovation_landscape_for_smart_electrification_2023.pdf?rev=b92a90a778df450ea79ee8527ac1e334)
- [5] M. A. Babaei, S. Hasanzadeh, y H. Karimi, «Cooperative energy scheduling of interconnected microgrid system considering renewable energy resources and electric vehicles», *Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110167, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110167>.
- [6] N. Vulic, M. Rüdüsüli, y K. Orehounig, «Evaluating energy flexibility requirements for high shares of variable renewable energy: A heuristic approach», *Energy*, vol. 270, p. 126885, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126885>.
- [7] International Energy Agency, «Renewables 2023», Paris, 2024. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- [8] C. Harnischmacher, L. Markefke, A. B. Brendel, y L. Kolbe, «Two-sided sustainability: Simulating battery degradation in vehicle to grid applications within autonomous electric port transportation», *J Clean Prod*, vol. 384, p. 135598, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135598>.
- [9] J. M. Reniers, G. Mulder, S. Ober-Blöbaum, y D. A. Howey, «Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modelling», *J Power Sources*, vol. 379, pp. 91-102, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.004>.
- [10] S. Tajjour y S. Singh Chandel, «A comprehensive review on sustainable energy management systems for optimal operation of future-generation of solar microgrids», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 58, p. 103377, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103377>.

- [11] M. Tostado-Véliz, A. Rezaee Jordehi, L. Fernández-Lobato, y F. Jurado, «Robust energy management in isolated microgrids with hydrogen storage and demand response», *Appl Energy*, vol. 345, p. 121319, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121319>.
- [12] A. Mittal, A. Rajput, K. Johar, y R. Kandari, «Chapter 1 - Microgrids, their types, and applications», en *Microgrids*, J. M. Guerrero y R. Kandari, Eds., Academic Press, 2022, pp. 3-40. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85463-4.00008-3>.
- [13] International Energy Agency, «Global EV Outlook 2023», Paris, 2023. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- [14] H. Xie, S. Gao, J. Zheng, y X. Huang, «A three-stage robust dispatch model considering the multi-uncertainties of electric vehicles and a multi-energy microgrid», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 157, p. 109778, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109778>.
- [15] K. Lucas-Healey, L. Jones, B. C. P. Sturmberg, y H. Ransan-Cooper, «Participation and sensemaking in electric vehicle field trials: A study of fleet vehicle-to-grid in Australia», *Energy Res Soc Sci*, vol. 107, p. 103343, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103343>.
- [16] M. Wang y M. T. Craig, «The value of vehicle-to-grid in a decarbonizing California grid», *J Power Sources*, vol. 513, p. 230472, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230472>.
- [17] H. N., S. Hampanavar, D. B., O. M. Longe, S. Mansani, y V. Komanapalli, «Assessment of microgrid integrated biogas–photovoltaic powered Electric Vehicle Charging Station (EVCS) for sustainable future», *Energy Reports*, vol. 9, pp. 139-143, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.098>.
- [18] M. M. Gamil, T. Senjyu, H. Masrur, H. Takahashi, y M. E. Lotfy, «Controlled V2Gs and battery integration into residential microgrids: Economic and environmental impacts», *Energy Convers Manag*, vol. 253, p. 115171, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115171>.
- [19] T. Xu, «1 - Overview of microgrid», en *Microgrid Methodologies and Emergent Applications*, C. Wang, T. Xu, y Y. Liu, Eds., Academic Press, 2024, pp. 3-23. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95349-8.00001-1>.
- [20] F. Luo, G. Ranzi, y Z. Y. Dong, «Chapter 4 - Power demand response and demand side management», en *Building Energy Management Systems and Techniques*, F. Luo, G. Ranzi, y Z. Y. Dong, Eds., Elsevier, 2024, pp. 29-51. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96107-3.00001-1>.
- [21] Red Eléctrica Española, «Negocio eléctrico en España | Red Eléctrica». Accedido: 3 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://www.ree.es/es/conocenos/actividades-de-negocio/negocio-electrico-en-espana>

- [22] H. Farhangi, «Smart Grids», en *Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition)*, Second Edition., M. A. Abraham, Ed., Oxford: Elsevier, 2024, pp. 538-547. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00080-2>.
- [23] X. Zhang, «Chapter 7 - Smart grid with energy digitalization», en *Advances in Digitalization and Machine Learning for Integrated Building-Transportation Energy Systems*, Y. Zhou, J. Yang, G. Zhang, y P. D. Lund, Eds., Elsevier, 2024, pp. 115-132. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13177-6.00002-3>.
- [24] T. F. Agajie y M. Fanuel, «Chapter 10 - Reliability improvement of distribution using distributed generation in smart grid: A case study», en *Active Electrical Distribution Network*, S. Padmanaban, B. Khan, O. P. Mahela, H. H. Alhelou, y S. Rajkumar, Eds., Academic Press, 2022, pp. 305-326. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85169-5.00022-8>.
- [25] J. Maeng, D. Min, y Y. Kang, «Intelligent charging and discharging of electric vehicles in a vehicle-to-grid system using a reinforcement learning-based approach», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 36, p. 101224, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101224>.
- [26] T. Funabashi, «Chapter 1 - Introduction», en *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems*, T. Funabashi, Ed., Academic Press, 2016, pp. 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803212-1.00001-5>.
- [27] M. AlMuhaini, «Chapter 10 - Impact of Distributed Generation Integration on the Reliability of Power Distribution Systems», en *Distributed Generation Systems*, G. B. Gharehpetian y S. M. Mousavi Agah, Eds., Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 453-508. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804208-3.00010-8>.
- [28] D. Zheng *et al.*, «Chapter 1 - The concept of microgrid and related terminologies», en *Microgrid Protection and Control*, D. Zheng, W. Zhang, S. Netsanet Alemu, P. Wang, G. T. Bitew, D. Wei, y J. Yue, Eds., Academic Press, 2021, pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821189-2.00008-5>.
- [29] Comisión Electrotécnica Internacional, «Vocabulario Electrotécnico Internacional», Definiciones de IEV. Accedido: 9 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=617-04-22>
- [30] M. A. Jirdehi, V. S. Tabar, S. Ghassemzadeh, y S. Tohidi, «Different aspects of microgrid management: A comprehensive review», *J Energy Storage*, vol. 30, p. 101457, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101457>.

- [31] S. E. Eyimaya y N. Altin, «Chapter 8 - Microgrids: definitions, architecture, and control strategies», en *Power Electronics Converters and their Control for Renewable Energy Applications*, A. Fekik, M. Ghanes, y H. Denoun, Eds., Academic Press, 2023, pp. 167-186. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91941-8.00008-1>.
- [32] C. Bordons, F. García-Torres, y L. Valverde, «Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable», *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001.
- [33] S. Nojavan, H. Pashaei-Didani, A. Mohammadi, y H. Ahmadi-Nezamabad, «Chapter 1 - Energy management concept of AC, DC, and hybrid AC/DC microgrids», en *Risk-based Energy Management*, S. Nojavan, M. Shafieezadeh, y N. Ghadimi, Eds., Academic Press, 2020, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817491-3.00001-5>.
- [34] P. Tejaswi y O. V. G. Swathika, «6 - Microgrid energy management systems with secure communication modeling», en *Next-Generation Cyber-Physical Microgrid Systems*, O. V. G. Swathika, K. Karthikeyan, y S. Padmanaban, Eds., Elsevier, 2024, pp. 137-154. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22187-3.00006-0>.
- [35] D. Arcos-Aviles, A. Salazar, M. Rodriguez, W. Martinez, y F. Guinjoan, «Model predictive control-based energy management system for an isolated electro-thermal microgrid in the Amazon region of Ecuador», *Energy Convers Manag*, vol. 310, p. 118479, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118479>.
- [36] L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, y J. M. Guerrero, «Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1263-1273, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.003>.
- [37] J. Trashorras Montecelos, *Vehiculos electricos*. Ediciones Paraninfo, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/uva/titulos/245516>
- [38] E. A. Nanaki, «Chapter 2 - Electric vehicles», en *Electric Vehicles for Smart Cities*, E. A. Nanaki, Ed., Elsevier, 2021, pp. 13-49. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815801-2.00006-X>.
- [39] Fundación Endesa, «La eMobility y los coches eléctricos». Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/emobility-coches-electricos>
- [40] Bryce Gatton, «The ICE age is over: Why battery cars will beat hybrids and fuel cells».

- [41] B. Schumm, «Batteries», en *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, Third Edition., R. A. Meyers, Ed., New York: Academic Press, 2003, pp. 57-75. doi: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00050-8>.
- [42] M. A. Laughton, M. Barak, y D. Inman, «29 - Batteries», en *Electrical Engineer's Reference Book (Sixteenth Edition)*, Sixteenth Edition., M. A. Laughton y D. J. Warne, Eds., Oxford: Newnes, 2003, pp. 29-1-29-19. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075064637-6/50029-0>.
- [43] J. D. K. Bishop, C. J. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, y M. D. McCulloch, «Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV», *Appl Energy*, vol. 111, pp. 206-218, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094>.
- [44] D. U. Sauer, «BATTERIES | Charge–Discharge Curves», en *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed., Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 443-451. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00052-6>.
- [45] H. Pico, I. Pazmiño, y B. Ponce, «Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo matemático superior validado en laboratorio», *Revista Técnica energética*, vol. 17, pp. 83-91, 2021, [En línea]. Disponible en: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2602-84922021000100083&nrm=iso](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2602-84922021000100083&nrm=iso)
- [46] S. Wen, N. Lin, S. Huang, Z. Wang, y Z. Zhang, «Lithium battery health state assessment based on vehicle-to-grid (V2G) real-world data and natural gradient boosting model», *Energy*, vol. 284, p. 129246, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129246>.
- [47] E. A. Nanaki, «Chapter 3 - Electric vehicle charging within smart cities», en *Electric Vehicles for Smart Cities*, E. A. Nanaki, Ed., Elsevier, 2021, pp. 51-95. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815801-2.00001-0>.
- [48] P. del A. Koneqta Energía, «INSTALACIONES DE PUNTOS DE RECARGA V.E.» Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.koneqta.com/proyectos-o-estudios/instalaciones-veh%C3%ADculo-electrico/>
- [49] W. Kempton y S. E. Letendre, «Electric vehicles as a new power source for electric utilities», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 2, n.º 3, pp. 157-175, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00001-1](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00001-1).
- [50] V. Blazek *et al.*, «A novel approach to utilization vehicle to grid technology in microgrid environment», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 158, p. 109921, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109921>.

- [51] J. Zhou, Z. Weng, J. Li, y X. Song, «Reliability evaluation, planning, and economic analysis of microgrid with access to renewable energy and electric vehicles», *Electric Power Systems Research*, vol. 230, p. 110252, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110252>.
- [52] M. Dubarry, A. Devie, y K. McKenzie, «Durability and reliability of electric vehicle batteries under electric utility grid operations: Bidirectional charging impact analysis», *J Power Sources*, vol. 358, pp. 39-49, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.015>.
- [53] K.-Y. Lo, J. H. Yeoh, y I.-Y. L. Hsieh, «Towards Nearly Zero-Energy Buildings: Smart Energy Management of Vehicle-to-Building (V2B) Strategy and Renewable Energy Sources», *Sustain Cities Soc*, vol. 99, p. 104941, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104941>.
- [54] M. Kamran, «Chapter 10 - Electric vehicles and smart grids», en *Fundamentals of Smart Grid Systems*, M. Kamran, Ed., Academic Press, 2023, pp. 431-460. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99560-3.00002-8>.
- [55] S. Bhoir, P. Caliandro, y C. Brivio, «Impact of V2G service provision on battery life», *J Energy Storage*, vol. 44, p. 103178, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103178>.
- [56] D. O'Neill, B. Yildiz, y J. I. Bilbao, «An assessment of electric vehicles and vehicle to grid operations for residential microgrids», *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4104-4116, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.302>.
- [57] S. Sagaria, M. van der Kam, y T. Boström, «Conceptualization of a vehicle-to-grid assisted nation-wide renewable energy system – A case study with Spain», *Energy Conversion and Management: X*, vol. 22, p. 100545, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100545>.
- [58] A. Ouammi, «Peak load reduction with a solar PV-based smart microgrid and vehicle-to-building (V2B) concept», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 44, p. 101027, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101027>.
- [59] NATURGY, «Precios de las tarifas de luz». Accedido: 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.naturgy.es/negocios\\_y\\_autonomos/luz/plan\\_variable\\_luz](https://www.naturgy.es/negocios_y_autonomos/luz/plan_variable_luz)

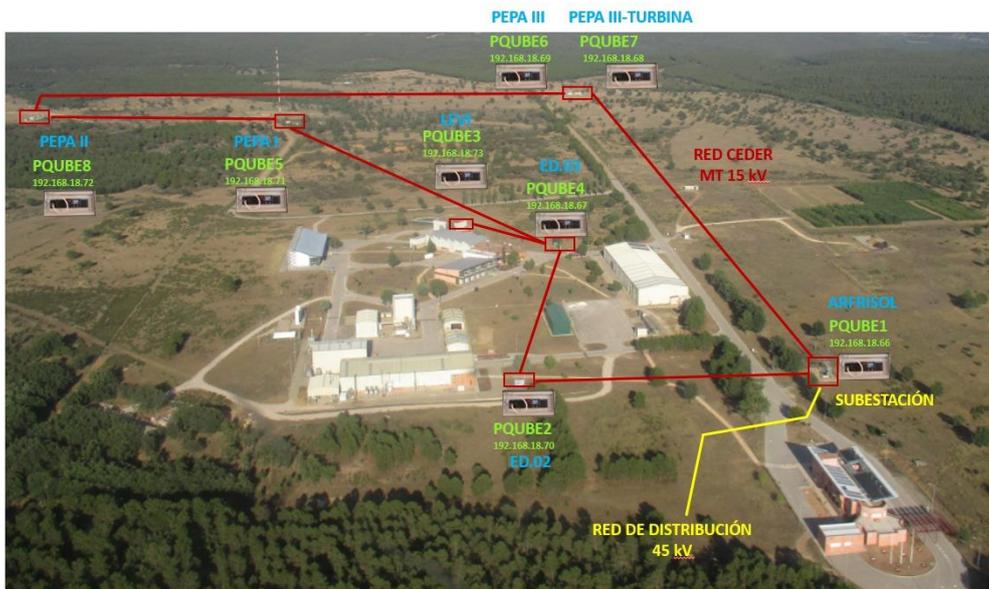
# ANEXOS

Anexo 1 Características técnicas de los principales tipos de baterías utilizadas para vehículos eléctricos, Fuente: [38]

| Tecnología de batería (tipo) | Energía específica (Wh/kg) | Coefficiente energía/volumen (Wh/L) | Coefficiente potencia/peso (W/kg) | Coefficiente de autodescarga (% por 24 h) | Número de ciclos de recarga |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Pb-ácido                     | 40                         | 70                                  | 180                               | 1                                         | 500                         |
| Ni-Cd                        | 60                         | 100                                 | 150                               | 5                                         | 1350                        |
| Ni-MH                        | 70                         | 250                                 | 1000                              | 2                                         | 1350                        |
| iones de litio               | 125                        | 270                                 | 1800                              | 1                                         | 1000                        |
| polímero de iones de litio   | 200                        | 300                                 | 3500                              | 1                                         | 1000                        |
| Na-NiCl                      | 125                        | 300                                 | 1500                              | 0                                         | 1000                        |

Anexo 2 Microrred del CEDER, Fuente: Datos del CEDER

Aquí se muestra una vista aérea de la microrred del CEDER, en la que se puede observar la distribución de la red a través del centro y los ocho centros de transformación mencionados en la sección de metodología.



Anexo 3 Descripción específica de componentes clave de la microrred del CEDER, Elaboración: Propia, Fuente: CEDER

| <b>Componente</b>                             | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Generación distribuida (GD)</b>            | Con una capacidad total de 400 kW                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <i>Fotovoltaica</i>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 21 sistemas fotovoltaicos con una potencia instalada total de 360 kW, distribuidos por todo el centro.</li> <li>• Se utilizan diferentes tipos de paneles, como monocristalinos, policristalinos, bifaciales, lámina delgada, con seguimiento y fijos.</li> <li>• Ubicada en suelo o en cubierta de edificios.</li> </ul> |
| <i>Eólica</i>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 aerogeneradores de pequeña potencia con una potencia total instalada de 164.2 kW.</li> <li>• Incluyen cuatro modelos de menos de 5 kW y uno de 100 kW, todos con tres palas y operando a barlovento. Además, incluye un modelo de 50 kW, también con tres palas, pero operando a sotavento.</li> </ul>                  |
| <i>Hidráulica</i>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mini turbina Pelton de 60 kW conectada a un generador trifásico asíncrono, con una caída de agua de 62 m.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Sistema de almacenamiento de energía</b>   | Se cuenta con una amplia variedad de sistemas de almacenamiento distribuidos.                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <i>Sistema de bombeo</i>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asociado a la turbina Pelton con tres depósitos de agua: uno inferior de 2000 m<sup>3</sup>, dos superiores de 1500 m<sup>3</sup> y 500 m<sup>3</sup>.</li> <li>• Este sistema cuenta con 4 bombas de 7,5 kW cada una, con una capacidad total de 30 kW.</li> </ul>                                                       |
| <i>Baterías de plomo-ácido</i>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos bancos de 120 celdas de 2 V cada una.</li> <li>• Un banco con capacidad de 1080 Ah y otro de 765 Ah, equivalente a 260 kWh y 180 kWh respectivamente</li> </ul>                                                                                                                                                       |
| <i>Baterías LFP</i>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 racks de 196 celdas de 3,2 V cada una, con una capacidad total de 50 Ah, equivalente a 30 kWh.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                               |
| <i>Batería NMC</i>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 módulos de 80 celdas cada uno de 3,6 V, con una capacidad total de 50 Ah, equivalente a 40 kWh.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                              |
| <i>Batería REDOX flujo de vanadio</i>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Formada por 6 electrolizadores de 15 kW cada uno conectados en serie con 50 celdas, con una capacidad total de 400 kWh.</li> </ul>                                                                                                                                                                                        |
| <b>Estaciones de carga</b>                    | Pueden pausar y reanudar el proceso de carga.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <i>4 modelos Circutor Urban T24 Mix</i>       | <b>Tipo de conector:</b> Schuko y Mennekes (Tipo 2) <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Corriente máxima de salida:</b> 32 A / 16 A</li> <li>• <b>Potencia máxima de salida:</b> 3.7 kW/ 22 kW</li> <li>• <b>Numero de tomas:</b> 4</li> </ul>                                                                                                             |
| <i>2 modelos Circutor Wallbox ePark T-C2.</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tipo de conector:</b> Mennekes (Tipo 2)</li> <li>• <b>Corriente máxima de salida:</b> 32 A</li> <li>• <b>Potencia máxima de salida:</b> 22 kW</li> <li>• <b>Numero de tomas:</b> 1</li> </ul>                                                                                                                          |

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vehículos eléctricos</b> | Cuenta con dos vehículos eléctricos de batería. Los VE se usan para transporte de personal y material en las instalaciones y para viajes de corta distancia.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <i>Renault Kangoo</i>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomía aproximada de 180 km.</li> <li>• <b>Batería de iones de litio:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de 3,6 V</li> <li>• Intensidad de corriente de 30 Ah</li> <li>• Capacidad de 32 kWh.</li> </ul> </li> <li>• <b>Tipo de conector:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Schuko:</b> Compatible con modo de carga 1 o carga domestica (3,7– 11 kW) y 2 o carga lenta en C (4-22 kW)</li> <li>• <b>Mennekes o Tipo 2:</b> Compatible con modo de carga 3 o carga lenta/rápida en CA (14,5–43,5 kW)</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                  |
| <i>Nissan Leaf 40</i>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomía de 240 km.</li> <li>• <b>Batería de óxido de manganeso y litio:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje:3,75 V</li> <li>• Intensidad de corriente: 32,5 Ah</li> <li>• Capacidad: 40 kWh</li> <li>• 24 módulos de 8 celdas cada uno.</li> </ul> </li> <li>• <b>Tipo de conector:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Schuko:</b> Compatible con modo de carga 1 o carga domestica (3,7– 11 kW) y 2 o carga lenta en C (4-22 kW)</li> <li>• <b>Mennekes o Tipo 2:</b> Compatible con modo de carga 3 o carga lenta/rápida en CA (14,5–43,5 kW)</li> <li>• <b>CHAdeMO o Tipo 4:</b> Compatible con modo de carga 4 o Carga rápida en CC.</li> </ul> </li> </ul> |

#### Anexo 4 Estaciones de carga del CEDER, Fuente: CEDER

Se muestran las 6 estaciones de carga para vehículos eléctricos descritas en la sección de metodología, además se observa la ubicación de la subestación, donde se recibe la energía de la red de distribución.



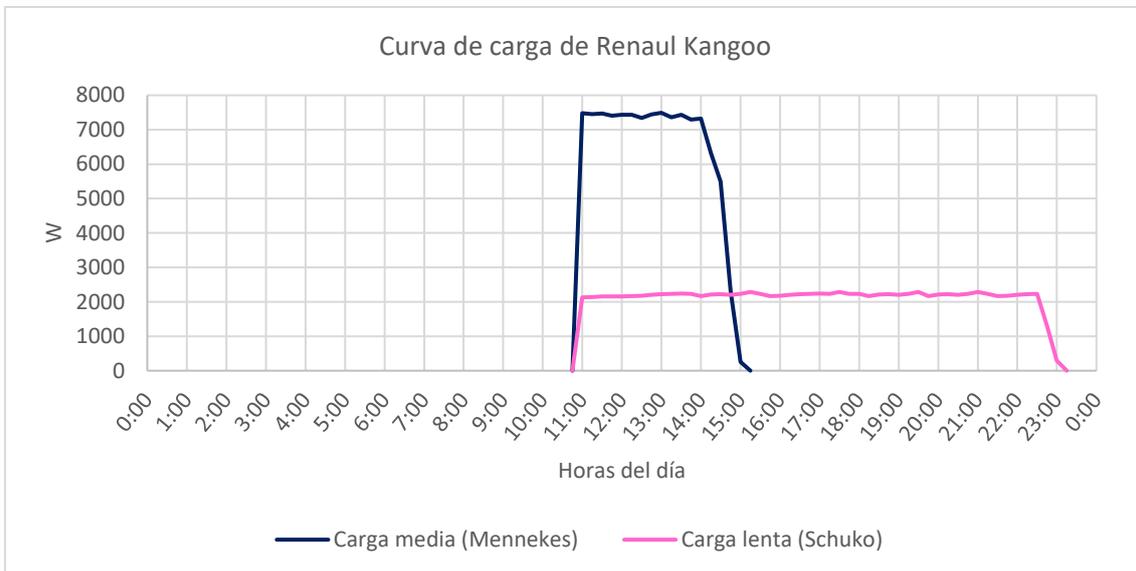
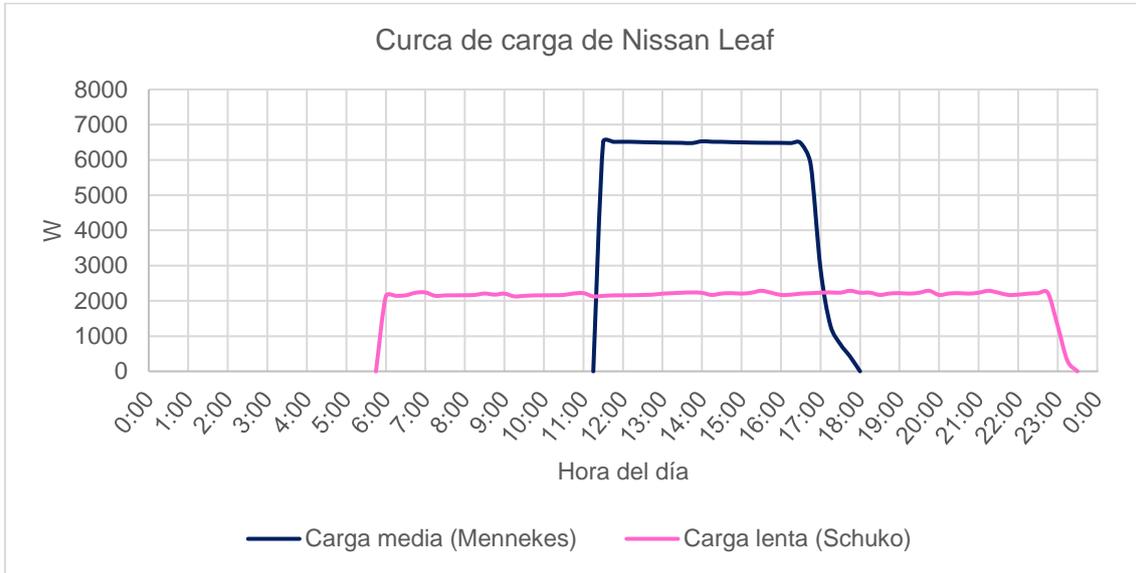
#### Anexo 5 Vehículos eléctricos del CEDER, Fuente: CEDER

Se muestran los dos vehículos eléctricos de batería con los que cuenta el CEDER.

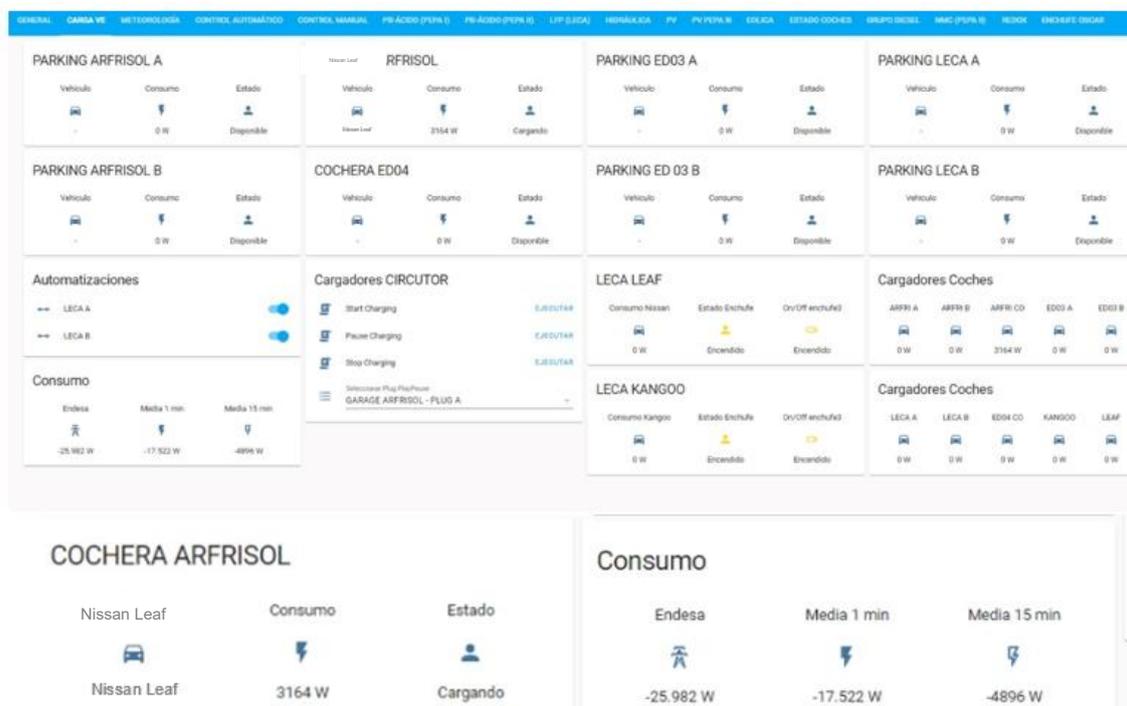


## Anexo 6 Curva de carga del Nissan Leaf y Renault Kangoo

Las siguientes figuras presentan la curva de carga del Nissan Leaf y Renault Kangoo. La línea azul marino representa una carga media, mientras que la línea rosa indica una carga lenta. Como se puede observar, a menor potencia, el vehículo requiere más tiempo para completar la carga. Esta relación se explica detalladamente en la sección de metodología.



Anexo 7 Monitorización en Home Assistant, Elaboración: Propia, Fuente: Home Assistant del CEDER



Anexo 8 Precios de la electricidad para la tarifa 6.1 TD del 2022,2023,2024, Elaboración: Propia, Fuente: [59]

|      |                     | Precio del kWh |           |           |           |           |           |
|------|---------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año  | Concepto            | P1             | P2        | P3        | P4        | P5        | P6        |
| 2022 | Energía             | 0,16182 €      | 0,15095 € | 0,12526 € | 0,11620 € | 0,10556 € | 0,09996 € |
|      | Energía + impuestos | 0,19661 €      | 0,18340 € | 0,15219 € | 0,14120 € | 0,12826 € | 0,12145 € |
| 2023 | Energía             | 0,33169 €      | 0,31948 € | 0,27740 € | 0,26264 € | 0,24681 € | 0,26013 € |
|      | Energía + impuestos | 0,40300 €      | 0,38817 € | 0,33703 € | 0,31910 € | 0,29988 € | 0,31606 € |
| 2024 | Energía             | 0,17548 €      | 0,15889 € | 0,13356 € | 0,26264 € | 0,12292 € | 0,01109 € |
|      | Energía + impuestos | 0,21321 €      | 0,19305 € | 0,16228 € | 0,31910 € | 0,14935 € | 0,01347 € |