

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Gestión de Energía de una Microrred mediante Control Predictivo Basado en Modelo

Autor: Sara Ruiz Moreno

Tutor: Carlos Bordons Alba

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Gestión de Energía de una Microrred mediante Control Predictivo Basado en Modelo

Autor:

Sara Ruiz Moreno

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Catedrático de Universidad

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Gestión de Energía de una Microrred mediante Control Predictivo Basado en Modelo

Autor: Sara Ruiz Moreno
Tutor: Carlos Bordons Alba

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mi familia,
A mis profesores,
A Raúl.

Agradecimientos

De todo éxito, por pequeño que sea, surgirá un día un esfuerzo más grande que lo completará.

WALT WHITMAN

Puesto que el trabajo realizado por una persona en ningún caso debe entenderse sin el conocimiento de las circunstancias que han llevado a él, es necesario tener en cuenta que el desarrollo de este proyecto se debe a la aportación de una serie de personas que me han permitido llevarlo a cabo.

En primer lugar, la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado no habría sido posible sin la colaboración del CEDEA, a quien estoy agradecida por haberme facilitado toda la información relativa a la microrred.

Gracias también a Carlos Bordons, quien me ha ayudado en todo momento y con el que se ha cerrado un ciclo muy significativo en mi familia.

A mis padres, que me han dado el mejor regalo que me podían hacer: la inquietud y el espíritu crítico; y a mis hermanos, por su apoyo. Gracias a ellos soy quien soy.

Finalmente, gracias a Raúl, sin el que mis ojos aún seguirían cerrados.

Resumen

Una microrred es un conjunto de fuentes, cargas y unidades de almacenamiento de energía que puede encontrarse conectado o aislado de la red de transporte. Para asegurar su correcto funcionamiento, estos sistemas cuentan con elementos de comunicación y control. En este Trabajo de Fin de Grado se propone un algoritmo de Control Predictivo Basado en Modelo para gestionar el intercambio energético en la microrred del Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA), perteneciente al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

El Control Predictivo Basado en Modelo o *Model Predictive Control* (MPC) es un método de control avanzado que se basa en la resolución de un problema de optimización. A partir de un modelo dinámico del sistema a controlar, se realizan predicciones del estado en instantes sucesivos y se calculan las señales de control óptimas para obtener la salida deseada a lo largo de un horizonte.

Abstract

A microgrid is a combination of sources, loads and energy storage units which can be connected to or isolated from the utility grid. In order to ensure the correct operation, these systems are provided with communication and control elements. In this Final Degree Project a Model Predictive Control algorithm is proposed to manage the energy exchange in the microgrid of the experimental center CEDEA, belonging to the National Institute of Aerospace Technology (INTA).

Model Predictive Control (MPC) is an advanced control method based on the resolution of an optimization problem. From a dynamic model of the system, state predictions in successive time steps are made and optimal control signals are calculated in order to obtain the desired output throughout a horizon.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
<i>Índice Abreviado</i>	IX
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo del Proyecto	2
1.3 Implementación	2
1.4 Estructura del Documento	2
2 Revisión del Concepto de Microrred	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Concepto de Microrred	7
2.3 Ventajas del Uso de Microrredes	8
2.4 Tipos de Microrredes	9
2.5 Estrategias de Control	10
3 Microrred Experimental del Laboratorio de Energía de El Arenosillo - CEDEA	11
3.1 Descripción General	11
3.2 Componentes	13

3.3	Modo de Operación	18
4	Principales Métodos Utilizados para el Control de Microrredes	21
4.1	Métodos Heurísticos	21
4.2	Métodos Basados en Optimización	22
4.3	Algoritmo del MPC	26
5	Diseño del Controlador	31
5.1	Esquema de Control	31
5.2	Modelado	32
5.3	Desarrollo Matemático	36
6	Implementación del Controlador en MATLAB®	43
6.1	Actualización de Entradas al Controlador	43
6.2	Definición del Modelo del Sistema	45
6.3	Constitución de las Matrices del Optimizador	45
6.4	Imposición de Restricciones	46
6.5	Optimización	47
6.6	Actualización de Potencias	47
7	Simulación y Evaluación	49
7.1	Simulación en Día Soleado con Baterías a Media Carga	51
7.2	Simulación en Día Soleado con Baterías Cargadas	54
7.3	Simulación en Día Soleado con Baterías Descargadas	56
7.4	Simulación en Día Nublado con Baterías a Media Carga	57
7.5	Simulación en Día Nublado con Baterías Cargadas	59
7.6	Simulación en Día Nublado con Baterías Descargadas	61
8	Conclusiones y Desarrollo Futuro	65
8.1	Comportamiento	65
8.2	Desarrollo Futuro	65
	<i>Índice de Figuras</i>	67
	<i>Bibliografía</i>	69
	<i>Glosario</i>	73

Índice

<i>Resumen</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
<i>Índice Abreviado</i>	IX
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo del Proyecto	2
1.3 Implementación	2
1.4 Estructura del Documento	2
2 Revisión del Concepto de Microrred	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Concepto de Microrred	7
2.3 Ventajas del Uso de Microrredes	8
2.4 Tipos de Microrredes	9
2.5 Estrategias de Control	10
3 Microrred Experimental del Laboratorio de Energía de El Arenosillo - CEDEA	11
3.1 Descripción General	11
3.2 Componentes	13
3.2.1 Campos Fotovoltaicos	13
3.2.2 Aerogenerador	14
3.2.3 Fuente de alimentación programable	14
3.2.4 Banco de Baterías Plomo-Ácido	14
3.2.5 Banco de Baterías Ion Litio	14
3.2.6 Electrolizador	15
3.2.7 Carga Electrónica Programable	16
3.2.8 Vehículos Híbridos	17
3.2.9 Vehículo Eléctrico	17
3.2.10 Conexión a la Red	17
3.3 Modo de Operación	18
4 Principales Métodos Utilizados para el Control de Microrredes	21
4.1 Métodos Heurísticos	21
4.1.1 Control por Banda de Histéresis	21
4.1.2 Control mediante Lógica Difusa	21
4.2 Métodos Basados en Optimización	22
4.2.1 Metaheurística	23

	Búsqueda Tabú	24
	Algoritmos Genéticos	24
	Optimización por Enjambres de Partículas	24
	Redes Neuronales	24
	4.2.2 Control Predictivo Basado en Modelo	25
4.3	Algoritmo del MPC	26
	4.3.1 Estrategia Deslizante	26
	4.3.2 Modelo	27
	4.3.3 Optimización	28
5	Diseño del Controlador	31
5.1	Esquema de Control	31
5.2	Modelado	32
	5.2.1 Ningún Coche Híbrido Conectado	34
	5.2.2 Plataforma Melex Conectada	35
	5.2.3 Plataforma Delfín Conectada	35
	5.2.4 Ambos Coches Híbridos Conectados	36
5.3	Desarrollo Matemático	36
	5.3.1 Cambio de Variables	37
	5.3.2 Función de Coste	38
	5.3.3 Restricciones	40
6	Implementación del Controlador en MATLAB®	43
6.1	Actualización de Entradas al Controlador	43
6.2	Definición del Modelo del Sistema	45
6.3	Constitución de las Matrices del Optimizador	45
6.4	Imposición de Restricciones	46
6.5	Optimización	47
6.6	Actualización de Potencias	47
7	Simulación y Evaluación	49
7.1	Simulación en Día Soleado con Baterías a Media Carga	51
7.2	Simulación en Día Soleado con Baterías Cargadas	54
7.3	Simulación en Día Soleado con Baterías Descargadas	56
7.4	Simulación en Día Nublado con Baterías a Media Carga	57
7.5	Simulación en Día Nublado con Baterías Cargadas	59
7.6	Simulación en Día Nublado con Baterías Descargadas	61
8	Conclusiones y Desarrollo Futuro	65
8.1	Comportamiento	65
8.2	Desarrollo Futuro	65
	<i>Índice de Figuras</i>	67
	<i>Bibliografía</i>	69
	<i>Glosario</i>	73

Notación

$x(t)$	Valor de x en el instante t
$x(t+k t)$	Valor de x en el instante $t+k$ calculado en el instante t
x^*	Valor óptimo de x
Δx	Incremento de x
x_{min}	Valor mínimo de x
x_{max}	Valor máximo de x
\hat{x}	Valor predicho de x
$=$	Igual que
\neq	Distinto de
$<$	Menor que
$>$	Mayor que
\leq	Menor o igual que
\geq	Mayor o igual que
$f(x,y,z)$	Valor de f evaluada en x,y,z
$\min_x f$	Valor mínimo de f variando x
$\arg \min_x f$	Valor de x que minimiza f
$\sum_{i=1}^N$	Sumatorio desde $i = 1$ hasta N
\forall	Para todo
s.a.	Sujeto a
z	Número complejo que resulta de aplicar la transformada Z
x	Entrada
y	Salida
u	Señal de control
d	Perturbación
J	Función de coste
w	Trayectoria de referencia
T_s	Tiempo de muestreo
I_n	Matriz identidad de n filas y n columnas
$A_{m \times n}$	Matriz A con m filas y n columnas
$\frac{\partial x}{\partial y}$	Derivada parcial de x respecto a y
A^T	Matriz transpuesta de A

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Tradicionalmente, los países industrializados han producido la mayor parte de la electricidad que consumían a partir de un modelo de generación centralizada mediante el cual se obtiene energía en un pequeño número de centrales eléctricas para luego ser transportada y distribuida hacia el consumidor. Debido a las grandes extensiones de terreno que necesitan y a la contaminación que producen, las distancias entre estas y las cargas son necesariamente largas, lo que hace que el proceso se vea perjudicado por pérdidas energéticas durante el transporte.

Por otro lado, existe el modelo distribuido, en el cual la generación eléctrica se puede realizar a través de diversos sistemas que se encuentran instalados en puntos cercanos a los consumidores y se conectan a la red de distribución como elementos individuales o en conjunto. De este modo, se reducen las distancias y, con ello, disminuyen los flujos de energía por la red, lo que tiene como consecuencia una reducción de las pérdidas energéticas.

En general, las fuentes de energía renovables tienen una gran capacidad de adaptación en el modelo de generación eléctrica distribuido. Esto se debe a sus cada vez mayores avances tecnológicos, a su menor tamaño y a la facilidad de algunas de ellas, como las placas fotovoltaicas y los aerogeneradores, para ser instaladas en zonas rurales y en viviendas sin afectar negativamente a su entorno. En consecuencia, esta transición resulta en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y residuos contaminantes para el medio ambiente.

En la actualidad, nos encontramos en un proceso de transición. Las nuevas políticas europeas tratan de buscar tecnologías de generación y almacenamiento para introducir el uso de energías renovables y abandonar, al cabo de un tiempo, los combustibles fósiles. Además, debido a la concienciación social, se está aumentando el uso de medios de transportes eléctricos e instalaciones fotovoltaicas, por lo que el devenir natural del sistema eléctrico resulta en un modelo distribuido.

Una microrred es un sistema compuesto por generadores y cargas con la capacidad de autoabastecerse, tanto a partir de sistemas de generación convencional, como con fuentes de energía renovables, permitiendo la conexión y desconexión de diferentes elementos para gestionar la demanda de manera eficiente. Este control se puede realizar atendiendo a diferentes criterios como, por ejemplo, el aumento de la vida útil de los componentes o el ahorro económico.

En los últimos años, ha tomado importancia el estudio de microrredes debido al avance de las nuevas tecnologías de generación y almacenamiento y a la creciente concienciación de la población en cuanto a la contaminación ambiental. En este documento, se pretende mostrar el control de gestión de la demanda de una microrred mediante control predictivo basado en modelo, en inglés, *Model Predictive Control* (MPC).

1.2 Objetivo del Proyecto

Atendiendo a las necesidades anteriormente mencionadas, el objetivo de este proyecto es realizar una gestión eficiente de los intercambios energéticos en los diferentes elementos que componen la microrred, para lo que se desarrollará y evaluará experimentalmente un controlador óptimo.

Como se verá en los diferentes capítulos de este documento, el sistema a controlar es una microrred experimental que se encuentra situada en el Centro de Experimentación de El Arenosillo, Huelva, y pertenece al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. De ella, se cuenta con un simulador sobre el que se realizarán los experimentos relativos a este trabajo. La microrred está compuesta por una serie de placas fotovoltaicas, un aerogenerador, baterías de plomo-ácido y de ion litio, un electrolizador, una carga y una fuente de alimentación programables y un punto de recarga para dos vehículos híbridos y uno eléctrico.

Se realizará un Control Preditivo Basado en Modelo (MPC) para controlar los intercambios de potencia entre los diferentes elementos que componen la microrred. Esta técnica de control se engloba dentro de los controladores óptimos y su funcionamiento se basa en el cálculo de las señales de control óptimas a enviar al sistema a partir de el estado predicho a lo largo de un horizonte y las señales de control anteriores. Para implementar el controlador, se utilizará un periodo de muestreo de un segundo, un horizonte de control de dos segundos y un horizonte de predicción de diez segundos.

Para evaluar la actuación del controlador implementado, se realizarán diversas simulaciones para las que se cuenta con perfiles de irradiación solar, velocidad del viento y demanda que emulan situaciones reales permitiendo una estimación del comportamiento bastante acertada.

1.3 Implementación

MATLAB® (*MATrix LABoratory*) es un entorno de desarrollo de alto nivel propiedad de The MathWorks® [4] que permite realizar numerosas operaciones multidimensionales de forma sencilla. Cuenta con una gran cantidad de funciones entre las que se encuentran funciones de optimización y tiene un entorno de visualización práctico y cómodo, por lo que es habitual su uso para simular el comportamiento de diferentes sucesos físicos antes de realizar pruebas con otros lenguajes de ejecución más rápida.

Por otro lado, Simulink® es una herramienta gráfica que funciona sobre MATLAB® y permite modelar y simular mediante bloques con entradas y salidas el comportamiento de diversos tipos de sistemas en tiempo continuo, discreto e híbrido.

La microrred en la que se desea realizar la gestión de energía cuenta con un modelo realizado en Simulink® al que se ha añadido un bloque correspondiente al control predictivo basado en modelo implementado en MATLAB®.

1.4 Estructura del Documento

Este documento se divide en ocho capítulos, donde los cuatro primeros proporcionan una visión general de las microrredes y de los métodos de control más empleados y los cuatro últimos son relativos a la implementación y evaluación del controlador.

Tras la presente introducción, en el segundo capítulo se describe el concepto de microrred y se mencionan los beneficios que conlleva su instalación. El tercer capítulo alberga una descripción general de la microrred objeto de estudio y describe el modo de operación y la estrategia a seguir a la hora de realizar la gestión energética. En el capítulo cuatro se realiza una clasificación de los principales métodos de control utilizados

a la hora de controlar una microrred y se describen sus características más relevantes. Posteriormente, se explica con mayor detalle el algoritmo del Control Preditivo Basado en Modelo.

El quinto capítulo aborda el diseño del controlador: obtención de un modelo, implementación de una estrategia deslizante y optimización de una función de coste. La implementación en MATLAB® se describe en el capítulo seis, donde se muestran las soluciones tomadas para los diferentes problemas y los parámetros escogidos. Una vez que se obtiene el controlador, se realizan diversas pruebas de evaluación del mismo que quedan reflejadas en el séptimo capítulo y, finalmente, en el último capítulo se realiza un análisis general de los resultados obtenidos y se presenta un posible desarrollo futuro.

2 Revisión del Concepto de Microrred

Actualmente, los campos de investigación relacionados con el estudio de microrredes se encuentran en pleno crecimiento debido a las numerosas ventajas que presentan respecto a los sistemas de generación de energía tradicionales, donde son destacables la modularidad, la portabilidad, el menor tamaño y el hecho de permitir la producción de energía con un bajo impacto ambiental. Esto último es debido a la posibilidad de integrar en ellas fuentes de energía renovables, ya que generalmente son de menor tamaño que las convencionales. En este apartado, se definirá el concepto de microrred y se describirán los tipos existentes, así como los numerosos beneficios que aportan.

2.1 Antecedentes

El sistema eléctrico tradicional está caracterizado por la generación de energía centralizada, lo que implica la existencia de grandes centrales hidroeléctricas, térmicas, eólicas, maremotrices o fotovoltaicas en las que se produce la electricidad que llega a los consumidores. Esta es trasladada a muy alta tensión (en España entre 400 y 330 kV de tensión de línea) en la Red de Transporte, gestionada por Red Eléctrica de España (REE). Posteriormente, las redes de distribución de alta (entre 45 kV y 132 kV), media (entre 1 kV y 30 kV) y baja (230 V monofásico, 400 V trifásico) tensión se encargan de hacer llegar la energía a los puntos de demanda.

Puesto que las centrales se encuentran alejadas de los núcleos urbanos, este transporte, representado en la Figura 2.1, se realiza a lo largo de cientos de kilómetros hasta llegar al consumidor, lo que ocasiona pérdidas de considerable magnitud.

El otro modelo posible es la generación distribuida, que se puede definir como el conjunto de técnicas de obtención de energía cercanas a los consumidores que proporcionan electricidad estando conectadas a estos o a la red eléctrica. La generación distribuida abarca un amplio rango de tecnologías: motores de combustión interna, turbinas de gas, microturbinas, placas fotovoltaicas, pilas de combustible y aerogeneradores. En la Figura 2.2 se muestra un esquema comparativo de los modelos descritos.

El modelo distribuido cuenta con los siguientes beneficios:

- Permite ajustar la oferta y la demanda en tiempo real.
- Se aumenta el rendimiento y se disminuyen los costes con el uso de instalaciones colectivas como, por ejemplo, las microrredes.
- Es integrable en el marco urbanístico y el transporte a través de vehículos eléctricos y edificios con autoconsumo.

- Se reducen los costes económicos y las pérdidas energéticas asociadas al transporte.
- El consumidor puede generar, almacenar, usar y vender su propia energía.

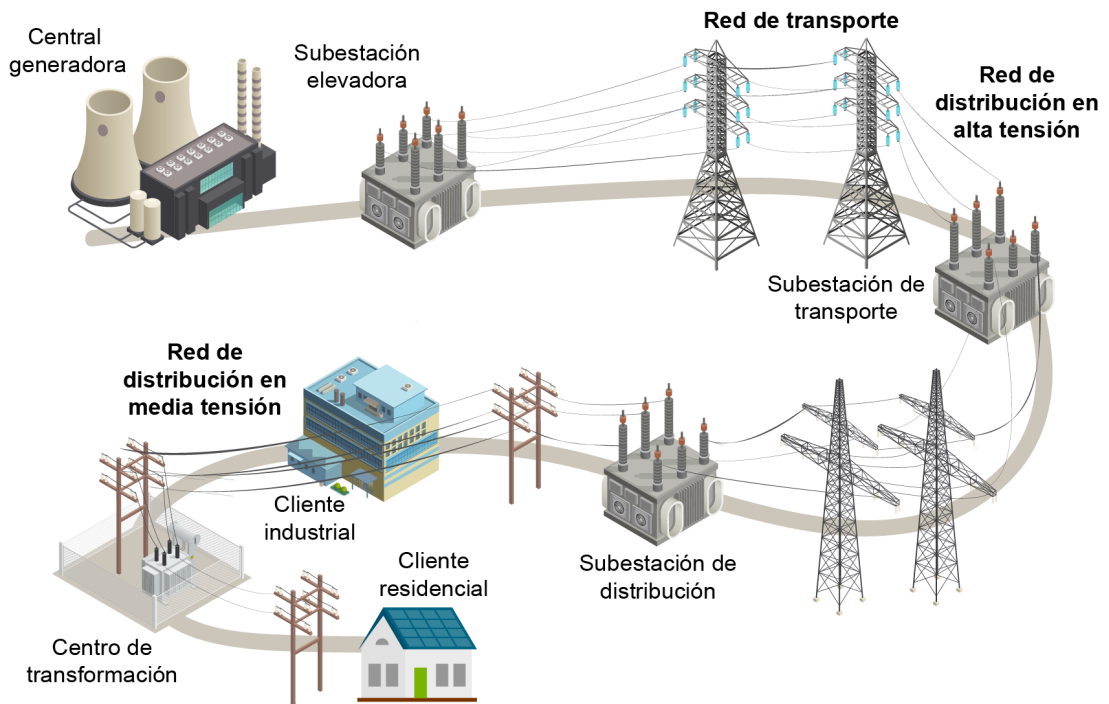


Figura 2.1 Sistema de energía eléctrica. Elaborada a partir de imágenes de [3].

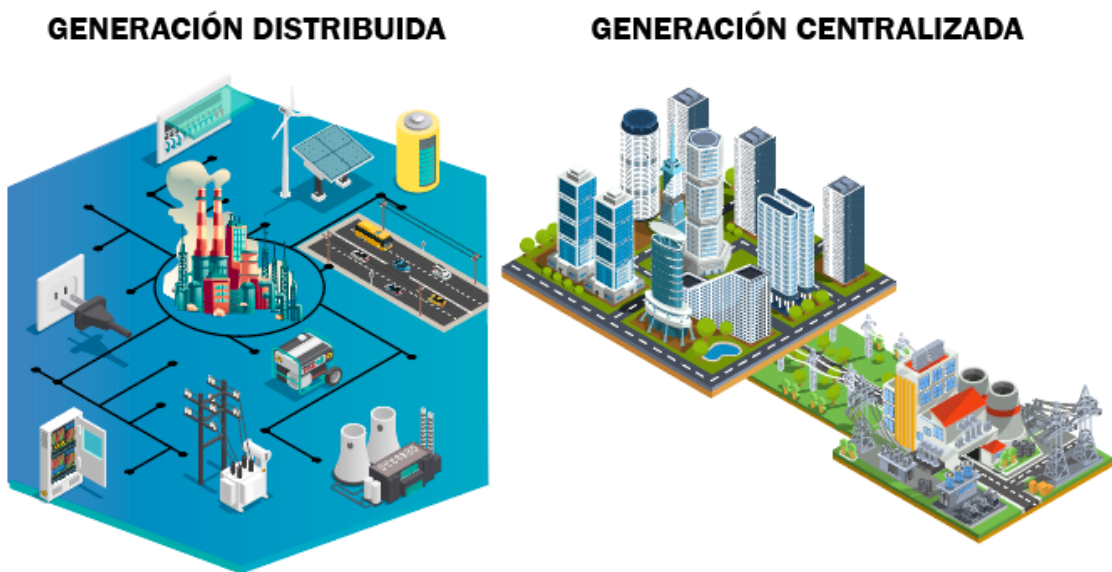


Figura 2.2 Modelos de energía centralizado y distribuido. Elaborada a partir de imágenes de [3] y [5].

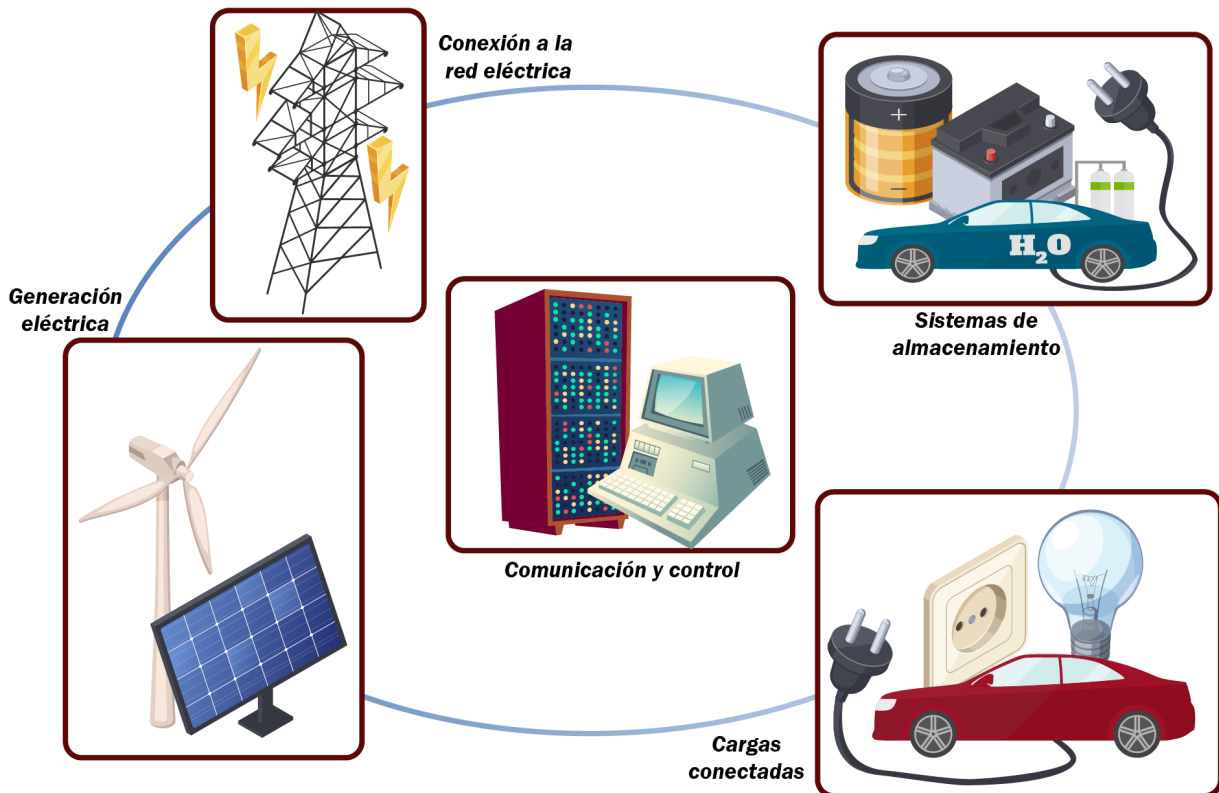


Figura 2.3 Esquema de una microrred. Elaborada a partir de imágenes de [3] y [5].

De la necesidad de asegurar una correcta gestión de la generación y la demanda a la vez que permitir el crecimiento económico y la preservación de la naturaleza surge la idea de Redes Inteligentes o *Smart Grids* (SG). De acuerdo con la *European Technology Platform of Smart Grids*, este concepto hace referencia a la posibilidad de integrar de forma inteligente el comportamiento de todos los elementos de la red: generadores, consumidores y aquellos que realizan ambas funciones. Esto supone un cambio a un modelo distribuido en el que la red de distribución juega un papel activo, no solo en el transporte, sino en el control del flujo de potencia.

El paso a un sistema eléctrico de redes inteligentes conlleva un cambio estructural y la necesidad de nuevas instalaciones como las microrredes, que pueden funcionar como cargas o como pequeñas fuentes controladas de manera separada del resto de la red.

2.2 Concepto de Microrred

Una microrred es un conjunto de fuentes, cargas y sistemas de almacenamiento energético en el que se gestiona la energía concediéndole la capacidad de funcionar eficientemente sin estar conectada a la red de distribución eléctrica a partir de una coordinación entre la oferta y la demanda. Este concepto obedece a la definición de generación distribuida o descentralizada que consiste en la unión de varias fuentes de energía pequeñas conectadas a la red eléctrica y situadas en lugares próximos a las cargas.

Las microrredes pueden estar compuestas por diferentes sistemas de generación convencionales, pero también de energía limpia. Este hecho, unido a la capacidad de autonomía, hace de ellas un interesante campo de investigación, ya que pueden llegar a permitir el autoabastecimiento de un conjunto de viviendas y a su vez disminuir el grado de contaminación.

El empleo de microrredes supone un cambio en el uso y el transporte de energía. La generación distribuida, en oposición a la generación centralizada, consiste en el uso de diversas fuentes de energía cercanas a las

cargas, disminuyendo así las pérdidas en el transporte, que ocurre de manera unidireccional hacia las cargas. Una microrred es un sistema de generación distribuida en el que el flujo de potencia es bidireccional. Esto da lugar a una mayor eficiencia en el uso de la energía, ya que ésta fluye hacia donde se requiera en cada momento.

Las microrredes se conectan a la red eléctrica durante la mayor parte del tiempo, aunque deben tener la capacidad de aislarse en determinadas situaciones dependiendo de su propósito. A esto se debe la necesidad de una gran capacidad de generación y almacenamiento. A pesar de que la capacidad de las microrredes suele comprender únicamente la baja tensión, existen microrredes conectadas a media tensión, normalmente para permitir la interconexión entre sistemas.

La idea de microrred puede definirse mediante los siguientes conceptos [25]:

- Carga local, microfuentes locales y unidades de almacenamiento.
- Modo aislado o conectado a la red.
- Control inteligente.

Se cuenta un conjunto de cargas y fuentes de pequeño tamaño que se ponen en funcionamiento siguiendo un criterio de optimización. Dicho control se realiza de forma automática.

Debido a la cantidad de definiciones existentes para el concepto de microrred y a la ausencia de un criterio común para caracterizarlas, en [25], se exponen una serie de características que no forman parte de la definición de microrred.

- Las microrredes son sistemas aislados.
- Los consumidores con fuentes propias constituyen una microrred.
- Debido a la intermitencia de los recursos de energía renovable, las microrredes no son sistemas seguros.
- Las microrredes tienen un coste demasiado elevado para un uso práctico.
- El uso de microrredes fuerza a los consumidores a adaptar el gasto según el estado de la generación.
- La integración de microrredes supondrá una reconstrucción costosa del sistema eléctrico.
- Una microrred no puede hacer frente a interrupciones de suministro.

Como se ha comentado anteriormente, una microrred tiene la capacidad de funcionar en dos modos: aislado o conectado a la red eléctrica, pero la mayor parte del tiempo se encuentra conectada. Esto, junto al uso de sistemas de almacenamiento, otorga confiabilidad al conjunto y solo en el momento de la transición es posible tener pérdidas de carga a las que se hará frente con altos niveles de energía generada y almacenada y con rechazo momentáneo de las cargas no críticas.

Por otro lado, no cualquier sistema formado por fuentes distribuidas puede ser considerado una microrred, ya que otra de sus características es la gestión eficiente de energía mediante técnicas de control y optimización, que solo controlarán el uso de las cargas en las que esto sea posible. Además, puesto que la conciencia social y la investigación en energías alternativas están en pleno auge, los costes son cada vez menores y quedan justificados por sus beneficios medioambientales.

2.3 Ventajas del Uso de Microrredes

Las características mencionadas permiten a las microrredes ser muy beneficiosas para el sistema eléctrico y para la sociedad en general desde un punto de vista económico, tecnológico y medioambiental. Las principales ventajas son las siguientes:

- Mayor eficiencia.
- Menos emisiones.
- Menos costes.
- Mayor seguridad.

La gestión óptima de la energía permite mejorar la calidad del suministro, disminuir los costes y aumentar la vida útil de los elementos que componen la microrred. Además, al contar con fuentes muy cercanas a las cargas, se elimina gran parte de las pérdidas de eficiencia asociadas al transporte.

Económicamente, la instalación de una microrred no solo permite optimizar los costes, sino que lleva a la creación de un pequeño mercado interno en el que puede funcionar como intermediaria entre los diferentes proveedores y consumidores y es capaz de actuar en horas punta para suministrar más potencia a los dispositivos con mayor necesidad.

Desde el punto de vista medioambiental, las microrredes potencian el uso de fuentes de energía renovables, ya que suelen estar formadas por paneles fotovoltaicos y aerogeneradores. De este modo, su implantación supondrá una disminución en la producción de residuos contaminantes.

Por otro lado, el uso de microrredes disminuye la dependencia con la red de distribución, pudiendo incluso ser desconectada de la misma gracias a las reservas energéticas almacenadas. Además, existiría un apoyo mutuo entre la red y la microrred, ya que una podría apoyar en cierta medida la operación de la otra en caso de fallo. Puesto que actualmente se cuenta con un modelo centralizado formado por grandes grupos síncronos rotativos que permiten a la red permanecer a 50 Hz, la conexión a la red, hoy por hoy, ayuda a mantener constante la frecuencia en la microrred y a través de la automatización de los subsistemas, es posible realizar un control sobre la potencia activa y reactiva.

2.4 Tipos de Microrredes

A pesar de que la definición de microrred proporcionada anteriormente es la más extendida y a la que se acoge este documento, no existe un acuerdo generalizado, por lo que es posible encontrar definiciones en las que una microrred se trata como un conjunto de microfuentes y cargas dispuestas unas cercanas a las otras, sin la necesidad de un control óptimo o una conexión a la red eléctrica.

El *Microgrid Institute* [7] define una microrred como un pequeño sistema de energía capaz de equilibrar la oferta y la demanda para mantener un servicio estable dentro de unos límites definidos y establece cinco categorías en las cuales se pueden dividir las microrredes:

- *Off-grid Microgrids*: sistemas no conectados a la red de distribución eléctrica como, por ejemplo, islas o lugares remotos.
- *Campus Microgrids*: están completamente interconectadas con la red local, pero también pueden mantener cierto nivel de servicio aislado en situaciones concretas como durante un corte de servicio. Los ejemplos típicos son campus universitarios y corporativos, prisiones y bases militares.
- *Community Microgrids*: se encuentran integradas en la red y abastecen a múltiples clientes o servicios dentro de una comunidad.
- *District Energy Microgrids*: proporcionan electricidad y energía térmica para la calefacción y refrigeración de instalaciones.
- *Nanogrids*: una pequeña microrred localizada en un solo edificio y compuesta por pequeñas unidades de red discretas con la capacidad de operar de manera independiente.

Aunque esta clasificación sea también aceptada y utilizada en la literatura actual, este documento se ajustará a la definición anteriormente descrita, en la cual una microrred es un sistema que debe tener conexión a la red eléctrica y contar con la posibilidad de conectarse y desconectarse de ella.

2.5 Estrategias de Control

Las arquitecturas de control más comunes son centralizada y distribuida, cuya implantación dependerá de los objetivos de control. Una implementación centralizada, aunque es más precisa, conlleva un gran gasto de recursos. Por otro lado, también existe el control descentralizado, en la que el problema se divide en distintos subproblemas con controladores locales. Al sustituir un problema complejo por una serie de problemas más sencillos, no sólo es más fácil de implementar, sino que se disminuye el gasto computacional. El término medio entre ambas opciones es la implementación distribuida: existen subproblemas que se relacionan entre sí intercambiando información. Dicha comunicación permite la coordinación entre subsistemas que caracteriza las microrredes.

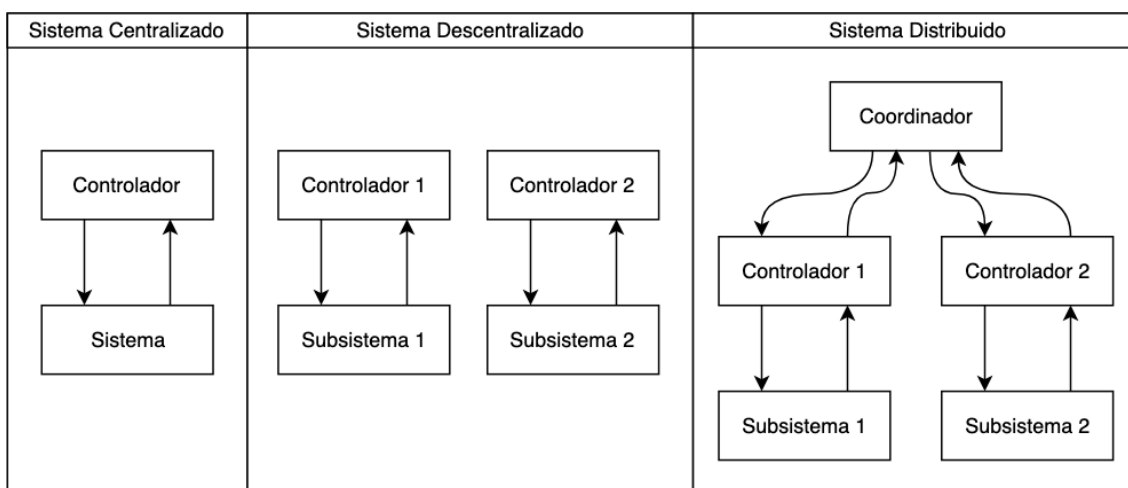


Figura 2.4 Estrategias de control centralizada, descentralizada y distribuida.

El control centralizado consiste en una configuración maestro-esclavo entre el sistema central y los diferentes elementos de la microrred. En este tipo de implementación, el controlador busca optimizar la operación completa de todos los subsistemas en conjunto, por lo que es necesario que todos ellos posean intereses en común. En [37] se propone una arquitectura centralizada para gestionar la energía de una microrred en modo aislado.

En microrredes en las que cada subsistema cuenta con diferentes objetivos de control se realiza un control distribuido. Al aumentar la cantidad de componentes de la microrred, se incrementará el número de mensajes transmitidos, por lo que se precisa de un amplio ancho de banda en el sistema de comunicación, que variará según la necesidad. Una implementación distribuida puede reducir el número de mensajes requeridos y simplificar el problema de optimización dividiéndolo en subproblemas locales. En [29], se propone un control distribuido de la potencia de una microrred en modo aislado y conectado con el objetivo de una transición suave sin necesidad de realizar un control específico durante el cambio.

3 Microrred Experimental del Laboratorio de Energía de El Arenosillo - CEDEA

El Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA) [1] es un centro de investigación perteneciente al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) [2] situado en la provincia de Huelva. Sus principales funciones son:

- Experimentación de coches de nuevo desarrollo.
- Realización de experiencias científicas con cohetes de sondeo y globos.
- Investigaciones atmosféricas.
- Pruebas de desarrollo de distintos tipos de aeronaves no tripuladas.
- Realización de programas de I+D, estudios de durabilidad y ensayos de componentes y sistemas de energía solar.

El CEDEA posee un Laboratorio de Energía que cuenta con una microrred experimental en la que se combinan sistemas de generación de energía renovable, sistemas de almacenamiento y consumos tanto móviles como estacionarios. Dicha microrred es utilizada para estudiar y evaluar tecnologías de diferentes campos: control, almacenamiento de energía, sensorización, comunicación y telemonitorización. En este capítulo se describirán brevemente la microrred, los sistemas que la componen y la estrategia de control implementada actualmente.

3.1 Descripción General

La microrred constituye un sistema híbrido en el que un bus interno de 408 VDC conecta sistemas de generación eléctrica, sistemas de almacenamiento y cargas en corriente alterna y continua. Además, está conectada a la red de 230 VAC que proporciona energía al laboratorio.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de la instalación a día 15 de enero de 2019. En naranja se muestran los equipos que han sido adquiridos e instalados hasta esa fecha y en gris los que se encuentran en fase de desarrollo. La mayor parte de las instalaciones de la microrred se muestra en la Figura 3.2, donde se pueden observar los paneles fotovoltaicos, el aerogenerador y el edificio en el que se sitúan sus componentes principales.

INTA MICROGRID CONCEPTUAL SCHEME

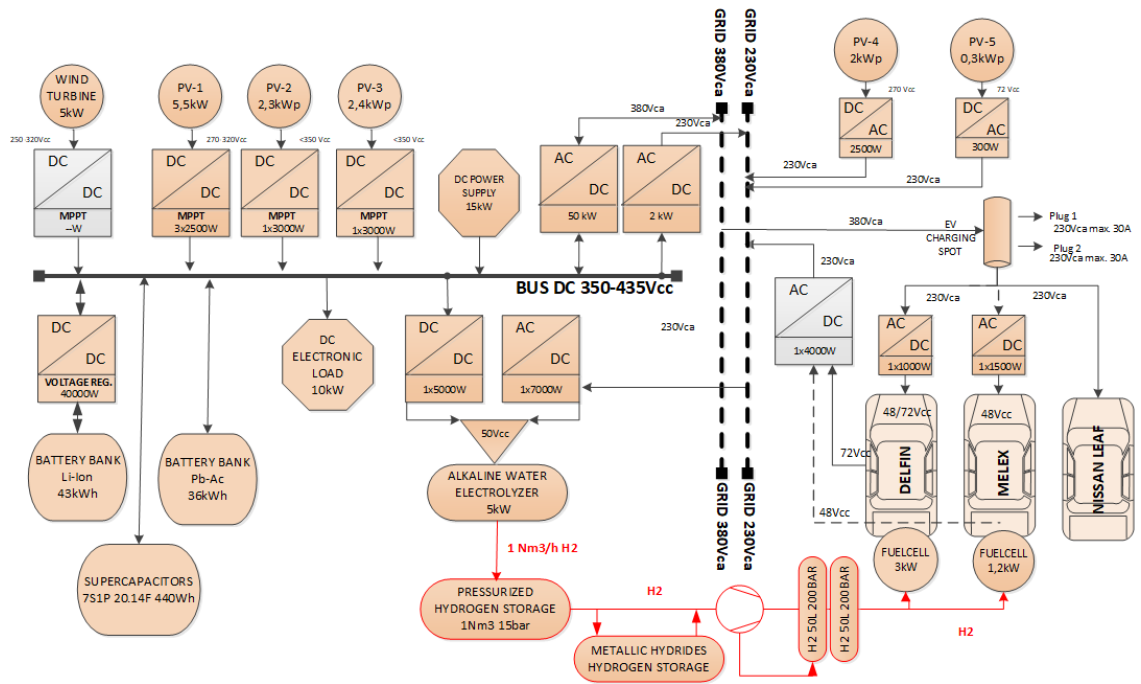


Figura 3.1 Esquema conceptual de la microrred. Fuente: INTA.



Figura 3.2 Vista aérea de la microrred. Fuente: INTA.

3.2 Componentes

Como se ha comentado en capítulos anteriores, en este Trabajo de Fin de Grado se realizará el Control Preditivo Basado en Modelo de la microrred descrita. En esta sección se describirán los elementos que forman parte del sistema de control: generación, almacenamiento y carga.

3.2.1 Campos Fotovoltaicos

Existen cuatro campos fotovoltaicos en la instalación (Figura 3.3). El primero de ellos está formado por 136 paneles BP60 monocristalinos y tiene una potencia máxima total de 5.2 Wp. Cuenta con cuatro convertidores DC/DC elevadores de tensión o de tipo Boost de 2 kWp cuya salida se conecta al bus de DC.

El segundo campo lo componen paneles dispuestos sobre superficie vertical que están destinados a integración arquitectónica. Existen cinco módulos del modelo ESF-M-BIPVGG-P156-40-161W de la marca Solar Innova. La potencia total es de 2.415 kWp y se conecta mediante convertidores Boost de 3 kWp.

El tercer campo fotovoltaico está formado por paneles flexibles sobre una superficie inclinada. La microrred cuenta con 16 módulos de la marca ENECOM, modelo HF135. En total se obtiene una potencia de 2.16 kWp. Al igual que el campo 2, se conecta con convertidores Boost de 3 kWp.

El último campo fotovoltaico está formado por 15 módulos policristalinos de paneles inclinados de la marca Wuxi modelo SI-ESF-M- P156-125W. La potencia total es de 1.875 kW y se conecta directamente a la red mediante inversores que transforman la corriente continua en corriente alterna.



Figura 3.3 Campos fotovoltaicos. Fuente: INTA.

3.2.2 Aerogenerador

Junto a los campos fotovoltaicos, la microrred cuenta con un aerogenerador trifásico de eje horizontal de la marca ESHIA modelo AERO5000W de 5 kWp (Figura 3.4). El aerogenerador necesita una etapa de rectificación y elevación para la correcta conexión al bus. De este modo, es posible aumentar la obtención de energía en días nublados. Los diferentes perfiles de generación dependerán del estado del viento, el sol y las nubes.



Figura 3.4 Aerogenerador. Fuente: INTA.

3.2.3 Fuente de alimentación programable

Además de los sistemas de generación anteriormente mencionados, se dispone de una fuente de alimentación programable de la marca SORENSEN y modelo SGI 500-30D-1C (Figura 3.5), capaz de entregar una potencia máxima de 1.5 kW. Cuenta con diferentes modos de operación: voltaje constante, corriente constante, potencia constante, protección contra sobrevoltaje, rampa de voltaje y rampa de corriente. La fuente de alimentación se utilizará en los casos de exceso de demanda en los que la generación y el aporte de las baterías no sean suficientes. Como el simulador del que se dispone no presenta ningún riesgo, este componente no se encuentra incluido.

3.2.4 Banco de Baterías Plomo-Ácido

El banco de baterías de plomo-ácido (Figura 3.6) se encuentra directamente conectado al bus de DC y su función es mantener la tensión de operación en él absorbiendo o cediendo la energía necesaria. En la instalación, se pueden encontrar 30 baterías modelo UP-100 del fabricante U-Power con tecnología VRLA-AGM. Estas baterías serán las encargadas de hacer frente a las variaciones de generación y demanda en primera instancia.

3.2.5 Banco de Baterías Ion Litio

La bancada de baterías de ion litio (Figura 3.7) se conecta al bus de DC a través de un convertidor reductor-elevador bidireccional de 40 kWp. El equipo está formado por 75 celdas de tecnología LiFePO4 modelo ROOK3 del fabricante CEGASA, con una capacidad de almacenamiento de 43.2 kWh.



Figura 3.5 Fuente de alimentación. Fuente: INTA.



Figura 3.6 Baterías de plomo - ácido. Fuente: INTA.

3.2.6 Electrolizador

La instalación cuenta también con un electrolizador (Figura 3.8) de tecnología alcalina de 30 celdas de la marca ARIEMA. Posee una potencia máxima de 5 kW y un ratio máximo de producción de hidrógeno de 1 Nm³/h a 15 bar. Se conecta mediante un convertidor reductor de tensión o Buck y un rectificador, de manera que permite un suministro eléctrico en continua y en alterna.

El hidrógeno producido se almacena en un depósito a baja presión (Figura 3.8) y puede ser utilizado de diferentes maneras: se puede almacenar en hidruros metálicos, utilizar en ensayos de pila de combustible en el laboratorio y comprimir para la recarga de vehículos con pila de combustible.



Figura 3.7 Baterías de ion litio. Fuente: INTA.



Figura 3.8 Electrolizador y depósito de hidrógeno. Fuente: INTA.

3.2.7 Carga Electrónica Programable

Se dispone de una carga electrónica programable (Figura 3.9) de 10 kW en corriente continua de la marca ADAPTATIVE POWER SYSTEMS modelo 5VP10-32. Consta de dos rangos de potencia: uno inferior de 1 kW y otro superior de 10 kW. Los modos de operación son voltaje constante, corriente constante, potencia constante, resistencia constante, modo combinado de corriente y voltaje constante y modo combinado de voltaje y potencia constante. Además, es posible programar diferentes perfiles de carga dinámicos mediante software del fabricante. Al igual que la fuente programable, la carga podrá ser utilizada para proteger a los equipos ante situaciones en las que la generación y la demanda se encuentren desacompañadas.



Figura 3.9 Carga electrónica programable. Fuente: INTA.

3.2.8 Vehículos Híbridos

Se dispone de dos vehículos híbridos (Figura 3.10) con baterías y pilas de combustible que pueden ceder o absorber potencia del sistema: Melex y Delfín. La plataforma Melex está compuesta por baterías de 48 V y una pila de combustible de 1.2 kWp. Por otro lado, el vehículo Delfín dispone de baterías de 48 V y una pila de combustible de 3 kW. Ambos tienen una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de unos 5 Nm³.

Los vehículos se pueden cargar mediante la red de alterna desde el punto de recarga situado en la instalación o pueden inyectar energía a la microrred a través de inversores. De este modo, se implementa el concepto *Vehicle To Grid* (V2G), en español, Del Vehículo A la Red [39].

Ambos vehículos podrán conectarse o desconectarse de la microrred en cualquier momento, por lo que, a la hora de realizar el control, es necesario tener en cuenta las variaciones en el estado de carga (SOC) debidas al consumo durante la circulación.

3.2.9 Vehículo Eléctrico

Además de los dos vehículos híbridos, se dispone de uno enteramente eléctrico Nissan Leaf 30 kWh Visia 2017 (Figura 3.11) que puede conectarse a la microrred para recargar su batería. El punto de recarga de los vehículos es de la marca Walbox modelo Pole.

3.2.10 Conexión a la Red

Una microrred puede funcionar en modo aislado o en modo no aislado, es decir, puede conectarse y desconectarse de la Red Eléctrica de España (REE) y mantener su funcionamiento. Esta microrred, al igual que la mayor parte de microrredes, se conecta a baja tensión.

Para habilitar el uso de la microrred en modo no aislado, se permite la inyección de potencia a la misma mediante inversores monofásicos limitados a 2 kW. Además, se ha añadido la posibilidad de realizar un intercambio bidireccional con la red mediante un inversor limitado a 50 kW.



Figura 3.10 Vehículos híbridos Melex y Delfín. Fuente: INTA.



Figura 3.11 Vehículo eléctrico Nissan. Fuente: INTA.

3.3 Modo de Operación

Tanto los campos fotovoltaicos como el aerogenerador permiten únicamente el encendido y el apagado, por lo que solamente es posible implementar un control todo o nada. Lo mismo ocurre con la batería de ácido plomo, en la que se dispone de un contactor controlado por software. Por el contrario, aunque la batería de ion litio permite el control todo o nada, es posible también modificar la consigna de operación del convertidor. En el caso del electrolizador y los vehículos híbridos también se permite el control en un rango, ya que es posible configurar la potencia de trabajo. Además, se tiene dominio total sobre la fuente y la carga programables.

En la actualidad, se realiza un control de la microrred basado en lógica difusa con operación en histéresis,

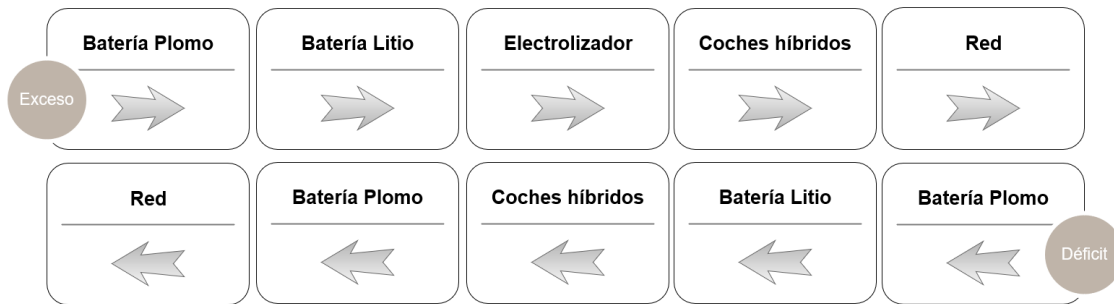


Figura 3.12 Estrategia de gestión de la energía.

donde el objetivo de control es mantener la tensión del bus de continua en torno a un valor constante, manteniendo el balance energético. La estrategia a seguir se describe en la Figura 3.12.

En caso de exceso energético, las baterías de ácido plomo deben absorber la energía hasta llegar a su carga máxima. En ese momento, las baterías de ion litio deberán hacer frente a dicho exceso hasta alcanzar su condición de máximo estado de carga. Cuando ambas tengan su SOC al máximo, el electrolizador será el encargado de compensar la energía sobrante hasta que el nivel de hidrógeno (LOH) sea máximo, llenando por completo los depósitos de la microrred y de los coches híbridos. En el caso de tener todos los SOC's y el LOH al máximo, se podrá evacuar potencia a la red eléctrica.

Si, por el contrario, existe una situación de déficit energético, las baterías de ácido plomo se descargarán hasta llegar a un nivel mínimo. Cuando estas alcancen también su nivel mínimo, se aprovecharán las baterías de los coches híbridos. Si estos alcanzan su mínimo estado de carga o la potencia suministrada por ellos no es suficiente para suplir el déficit, se volverán a usar las baterías de plomo hasta alcanzar un nuevo límite mínimo de seguridad. Finalmente, al igual que en el caso de exceso, será posible absorber potencia de la red.

Como último recurso, si siguiera existiendo un exceso o un déficit de energía, sería posible el uso de la fuente o la carga programables y la desconexión de cargas y equipos.

4 Principales Métodos Utilizados para el Control de Microrredes

En una microrred es necesario gestionar correctamente la generación y la demanda energéticas, de manera que el almacenamiento de energía y la red externa permitan satisfacer el balance en el sistema. Un Sistema de Gestión Energética o *Energy Management System* (EMS) [30] se encarga de realizar dicha tarea permitiendo un uso eficiente de los diferentes componentes de la planta.

En este capítulo se presentarán los principales sistemas de control que se emplean en la gestión energética de microrredes, donde se pueden distinguir dos grandes categorías: métodos heurísticos y métodos basados en optimización [14]. Tras ello, se describirá el Control Preditivo Basado en Modelo (MPC) con mayor grado de detalle, puesto que esta será la técnica seleccionada para controlar el flujo energético en la microrred objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Grado.

4.1 Métodos Heurísticos

Los métodos heurísticos permiten controlar sistemas de forma simple pero eficaz, lo que hace de ellos buenas técnicas de control para sistemas de energía relativamente sencillos. Es por esto que su uso está muy extendido en pequeñas microrredes. A continuación, se describirá el control por banda de histéresis y el control mediante lógica difusa y se mostrarán ejemplos de aplicación a sistemas de energía.

4.1.1 Control por Banda de Histéresis

El método heurístico más utilizado para controlar sistemas de potencia y plantas energéticas es el Control por Bandas de Histéresis o *Hysteresis Band Control* (HBC). Ejemplos de aplicación del HBC en sistemas de gestión de energía se pueden encontrar en [27] y en [46].

Mediante este sistema, las unidades de almacenamiento de la microrred absorben o ceden potencia de acuerdo a una banda de histéresis definida por los límites en su estado de carga o SOC. Estas unidades absorben el exceso energético hasta llegar a su estado de carga máximo, momento en el cual será necesario ceder potencia a la red externa o parar la generación. En el caso de existir un déficit de potencia, cederán energía hasta alcanzar el límite inferior en su SOC. En ese momento, será necesario desconectar cargas o absorber potencia de la red. En la Figura 4.1 se muestra una curva de histéresis utilizada para controlar la carga y descarga de una batería.

4.1.2 Control mediante Lógica Difusa

Por otro lado, existen los sistemas de Control de Lógica Difusa, Lógica Borrosa o *Fuzzy Logic Control* (FLC) [50] [34] [17], que permiten manejar datos imprecisos e incompletos. Su funcionamiento se basa

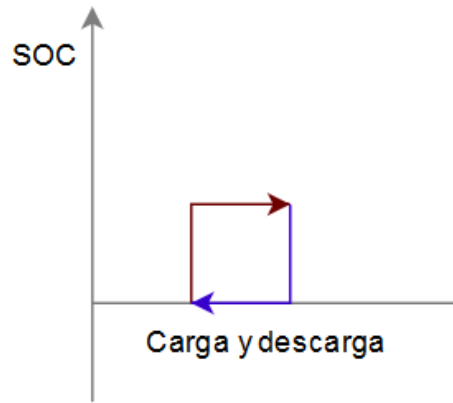


Figura 4.1 Control por Banda de Histéresis.

en una cuantificación de determinadas características a partir de información proporcionada por diferentes expertos en cada campo. En [17] se realiza el control de una microrred mediante FLC.

En la Figura 4.2 se muestra la estructura del Control de Lógica Difusa. En primer lugar, los datos de entrada pasan por un proceso de emborronamiento o *fusificación*, en el que se otorga un valor numérico a características cualitativas. Posteriormente se toman decisiones de acuerdo a unas relaciones lógicas conocidas como reglas borrosas o difusas. Finalmente, en la etapa de desemborronamiento o *defusificación*, se obtienen datos concretos, requeridos por los sistemas controlables.



Figura 4.2 Esquema del Control por Lógica Difusa.

Aunque los métodos heurísticos resulten atractivos debido a su simplicidad, esta misma propiedad es la que los hace poco adecuados a la hora de controlar sistemas complejos. Además, no son capaces de proporcionar soluciones óptimas, lo que conlleva la necesidad de utilizar métodos basados en optimización.

4.2 Métodos Basados en Optimización

La gestión de la demanda en una microrred se puede entender como la resolución de un problema de optimización atendiendo a un determinado criterio, que suele ser energético o económico. El objetivo de este problema es la minimización de una función de coste sujeta a una serie de restricciones que definen los límites de funcionamiento de la microrred. La solución proporcionará los flujos óptimos de potencia para satisfacer las restricciones y el criterio establecido.

Dependiendo del interés de control, la función de coste se adaptará según diferentes objetivos. Normalmente, se pretende que las salidas sigan una determinada trayectoria de referencia w con el menor esfuerzo Δu posible. En algunas ocasiones, también tiene en cuenta las señales de control u directamente, y no solo su incremento, para así minimizar el consumo energético y, en consecuencia, económico. Esta función suele

tener la forma de la ecuación (4.1):

$$\begin{aligned}
 J(\hat{y}(t+1|t), \dots, \hat{y}(t+N|t), \Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N_u-1)) = \\
 = \sum_{j=1}^N \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$\delta(j)$ y $\lambda(j)$ son los pesos de la función de coste, que están asociados, en la mayoría de los casos, a costes de mantenimiento y operación. En este caso, cuanto mayor sea $\lambda(j)$, mayor será la penalización sobre el incremento de control, y cuanto mayor sea $\delta(j)$, mayor será la penalización sobre el error de seguimiento de referencia. Mediante el uso de los pesos, se consigue que el cumplimiento de unos objetivos prevalezca sobre el de otros.

En el ejemplo anterior, se utiliza una función de coste cuadrática que incluye el error de referencia y el incremento de la señal de control, pero puede tener diferentes formas y permite el uso de cualquier norma. Concretamente, el uso de la norma 2 al cuadrado permite introducir errores cuadráticos de seguimiento y penalizar más los valores de potencia más altos. También es posible la optimización multiobjetivo, donde se utiliza un conjunto de funciones de coste.

Como se expone en [14], las restricciones permiten tomar en consideración los rangos de operación de la microrred e introducir un modelo de la misma en la optimización. El método de resolución del problema de optimización dependerá de la forma que tengan la función de coste y las restricciones:

- Programación Lineal (*Linear Programming*, LP): función de coste lineal con restricciones lineales [32].
- Programación Cuadrática (*Quadratic Programming*, QP): función de coste cuadrática con restricciones lineales [12].
- Programación No Lineal (*Nonlinear Programming*, NLP): restricciones no lineales [32].
- Programación Lineal de enteros Mixtos (*Mixed Integer Linear Programming*, MILP): Programación Lineal con variables discontinuas [38].
- Programación Cuadrática de enteros Mixtos (*Mixed Integer Quadratic Programming*, MIQP): Programación Cuadrática con variables discontinuas [36].
- Programación No Lineal de enteros Mixtos (acronym MINLP, MINLP): Programación No Lineal con variables discontinuas [26].
- Programación Estocástica (*Stochastic Programming*, SP): el problema se modela con variables aleatorias [44].
- Programación Dinámica (*Dynamic Programming*, DP): se resuelve un problema complejo dividiéndolo en diferentes subproblemas [13].

4.2.1 Metaheurística

Los métodos metaheurísticos, también conocidos como *Soft Computing* o métodos bioinspirados, permiten obtener soluciones aproximadas a problemas de optimización de manera heurística. Son utilizados en situaciones en las que la optimización del problema, debido a la existencia de no linealidades o a un elevado número de variables de decisión, resulta muy compleja y requiere un alto coste computacional.

Búsqueda Tabú

La Búsqueda Tabú o *Tabu Search* (TS) [23] es un procedimiento de búsqueda local. Se buscan valores de una función de evaluación registrando el historial de búsqueda en una lista tabú. Como se expone en [10], "El marco de memoria adaptativa de TS explota la historia del proceso de resolución del problema haciendo referencia a cuatro dimensiones principales, consistentes en la propiedad de ser reciente, en frecuencia, en calidad, y en influencia". De este modo, no es posible pasar dos veces por la misma solución o por soluciones similares. Esto evita el estancamiento en mínimos locales.

Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos o *Genetic Algorithms* (GA) son algoritmos cuyo funcionamiento se inspira en el proceso evolutivo de los seres vivos. Se realiza una analogía en la cual las diferentes soluciones son los genes y cuando se obtienen buenos resultados, estos se tratan como genes dominantes. De este modo, las características beneficiosas de las diferentes soluciones serán transmitidas con mayor probabilidad. En [20] se realiza un control mediante GAs sobre sistemas de energía renovable con almacenamiento de hidrógeno.

Optimización por Enjambres de Partículas

La Optimización por Enjambre de Partículas o *Particle Swarm Optimization* (PSO) [28] trata de emular el comportamiento de las partículas en la naturaleza. Se tiene una población de soluciones candidatas que se mueven en el espacio de búsqueda para converger en la mejor solución posible. Este método se utiliza para describir, por ejemplo, el comportamiento de las colonias de insectos o los bancos de peces. En la Figura 4.3 se puede observar la analogía empleada en este método.

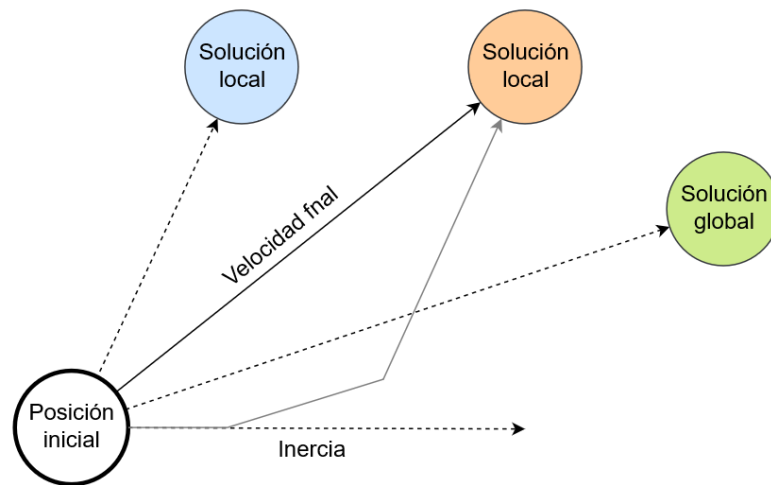


Figura 4.3 Optimización por Enjambres de Partículas.

La partícula tiene una posición y una velocidad inercial que tiene a mantenerla en una misma dirección. Además, siente atracción hacia la mejor localización que aparece en su historial y otra hacia la mejor localización encontrada por el resto de partículas del espacio de búsqueda. La solución final vendrá dada por la composición de esas tres velocidades.

Redes Neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales, también conocidas por sus siglas en inglés *Artificial Neural Networks* (ANN) son un tipo de algoritmo que trata de imitar el funcionamiento del sistema cognitivo, donde existen neuronas interconectadas que realizan diferentes tareas.

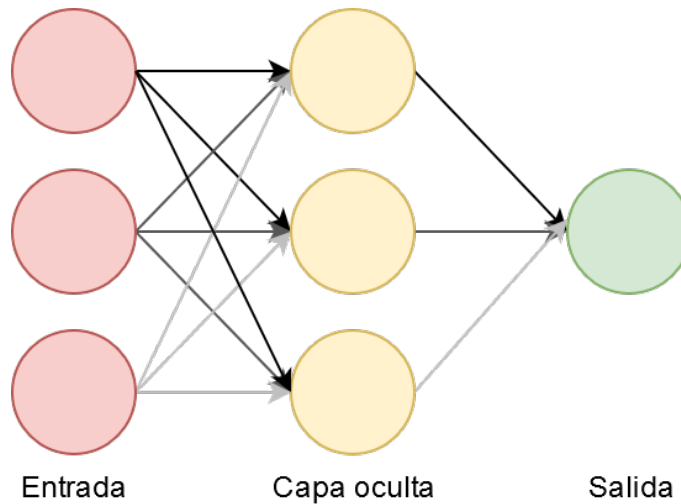


Figura 4.4 Estructura de una red neuronal *fully-connected*.

En una ANN, se tiene diferentes nodos o neuronas que realizan funciones sencillas. Cada neurona recibe como entrada las salidas de la neurona anterior y produce una salida mediante una función de activación, que cuenta con unos pesos cuyo valor se obtiene mediante un proceso de entrenamiento. Esta conexión entre las neuronas permite la ejecución de operaciones más complejas.

Los nodos están organizados por capas, existiendo tres tipos: capas de entrada, capas de salida y capas ocultas. La información que se introduce en la capa de entrada se transforma en las capas ocultas para finalmente ser convertida en información comprensible por el ser humano.

En una red neuronal básica, todas las neuronas de una capa se relacionan con todas las neuronas de la capa siguiente. Esto es lo que se conoce como capas *fully-connected* o capas completamente conectadas (Figura 4.4).

Aunque las redes neuronales permiten realizar operaciones complejas de forma muy sencilla, su uso no está muy extendido debido a la necesidad de un proceso de entrenamiento en el que se debe tener un largo histórico de datos para dar lugar a un correcto aprendizaje. Aun así, en [45] se propone el uso de una red neuronal para hallar los flujos de potencia óptimos en una microrred y en [8] se utiliza para predecir la demanda.

4.2.2 Control Predictivo Basado en Modelo

El Control Predictivo Basado en Modelo (CPBM), más conocido por siglas en inglés, *Model Predictive Control* (MPC) se basa en la optimización de una función de coste calculada mediante un modelo dinámico del proceso. Dicha función, también llamada función objetivo, representa el coste de la actuación según un determinado criterio. Una vez que se obtiene el modelo, se realiza una predicción del estado del sistema en un futuro cercano y, de acuerdo con ella, se calculan las señales de control óptimas a introducir en el sistema. Esto permite realizar un control en línea sin necesidad de una ley de control preestablecida como en los sistemas de control convencionales. En la Figura 4.7 se muestra la estructura de control del MPC.

Aunque el MPC tiene como inconvenientes el hecho de que es necesario el conocimiento previo de un modelo y que su implementación no es tan sencilla como la de otros métodos, presenta una serie de ventajas respecto a otros sistemas [16] que hacen de él un procedimiento muy atractivo:

- Puede controlar una gran variedad de procesos.
- Al ser un controlador predictivo, tiene la capacidad de compensar los tiempos muertos.
- Es capaz de compensar las perturbaciones medibles.

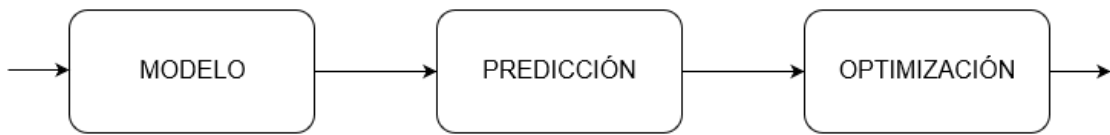


Figura 4.5 Estructura del Control Predictivo Basado en Modelo.

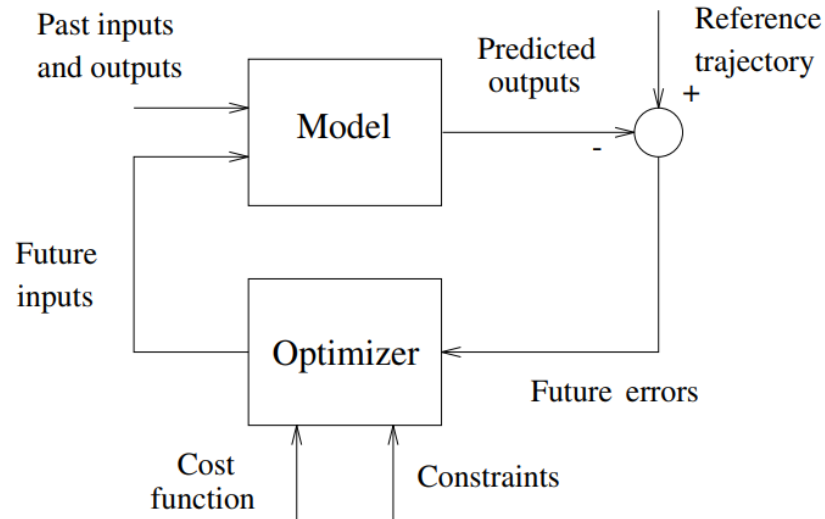


Figura 4.6 Esquema de Control del MPC. Fuente: [15].

4.3 Algoritmo del MPC

En el Control Predictivo Basado en Modelo se tiene un optimizador que proporciona las entradas óptimas al sistema minimizando una función de coste con restricciones a partir de señales de error que se calculan como la diferencia entre una trayectoria de referencia y las salidas predichas del sistema. Estas salidas se predicen mediante un modelo que toma las señales pasadas de entrada y salida y las señales futuras de entrada. La Figura 4.6 muestra el esquema de control que emplea el MPC.

4.3.1 Estrategia Deslizante

El Control Predictivo Basado en Modelo [15] es un método avanzado de control también conocido por el nombre de Control por Horizonte Deslizante, puesto que esta es la técnica que se utiliza para aplicar la actuación: se tiene una secuencia temporal que se desplaza en cada instante. Esto permite corregir la diferencia entre el comportamiento esperado en el sistema y el comportamiento real.

Un controlador predictivo se encarga de calcular las señales de control óptimas que es necesario introducir en el sistema controlado a lo largo de un horizonte. Para ello, debe optimizar una función de coste y satisfacer unas restricciones determinadas, a la vez que compensar las posibles perturbaciones.

El horizonte de predicción N es el horizonte en el cual se realizan las predicciones del estado del sistema. Para ello, se necesita modelar con cierta exactitud su comportamiento. El modelo del sistema proporcionará

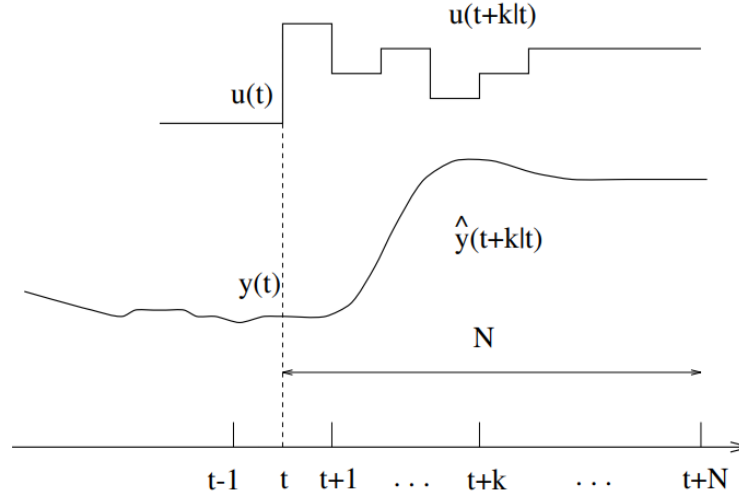


Figura 4.7 Estrategia del Control Predictivo Basado en Modelo. Fuente: [15].

la predicción de las salidas calculadas en el instante t , $\hat{y}(t+k|t)$, con $k=1, \dots, N$, dadas las salidas obtenidas en el pasado y las futuras señales de control $u(t+k|t)$, con $k=0, \dots, N-1$.

El modelo del sistema tendrá la siguiente forma, donde N_u es el horizonte de control, a partir del cual se consideran constantes las señales de control.

$$\hat{y}(t+k|t) = f(y(t), u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N_u|t)), N_u < N \quad (4.2)$$

En la Figura 4.7 se muestra la estrategia de control deslizante. En cada instante de tiempo t , se calculan las señales de control necesarias a lo largo del horizonte de control $u(t+k|t)$, con $k=0, \dots, N-1$, se envían las señales de control calculadas para dicho instante $u(t|t)$ (el resto de las componentes de la secuencia de control se desecha) y el horizonte se desplaza hacia el futuro. Debido a las perturbaciones medidas, las señales de control para un mismo instante variarán según el momento en el que fueron calculadas, es decir, $u(t+k|t+k) \neq u(t+k|t)$.

4.3.2 Modelo

Para representar la relación entre las salidas y las entradas del sistema (algunas de las cuales serán perturbaciones) es necesario un modelo matemático que describa el comportamiento que se espera del sistema. La elección del modelo es clave en el desarrollo del controlador, puesto que de ello depende la complejidad, la eficiencia y la efectividad del mismo. Por ello, el modelo debe ser lo más simple y preciso posible.

Existen diversos tipos de modelos. A continuación, se comentarán los modelos lineales más utilizados:

- **Modelo de Respuesta Impulsional:**
El modelo de respuesta ante impulsos es un modelo que proporciona la salida del sistema cuando la entrada es un impulso. Aunque es muy intuitivo necesita una elevada cantidad de parámetros y no es capaz de representar procesos inestables. La ecuación (4.3) modela la relación entre la entrada (la señal de control) y la salida, donde h_i es la salida muestreada.

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) \quad (4.3)$$

- Modelo de Respuesta ante Escalón:

El modelo de respuesta ante escalón es muy parecido al modelo de respuesta ante impulsos, con la diferencia de que este ofrece una salida cuando la entrada es un escalón. La ecuación (4.4) modela la relación entre la entrada y la salida, donde g_i es la salida muestreada y $\Delta u(t-i) = u(t) - u(t-1)$.

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t+k-i) \quad (4.4)$$

- Modelo de Función de Transferencia:

El modelo de función de transferencia es de gran aplicación en la industria debido a la necesidad de utilizar pocos parámetros, y al tipo de parámetros que emplea, aunque la derivación no es sencilla. La ecuación (4.5) presenta un ejemplo de este tipo de modelo:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) \quad (4.5)$$

donde

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= 1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \end{aligned}$$

- Representación en Espacio de Estados:

En este documento, se hará uso de la representación en espacio de estados, que permite una comprensión directa de la relación entre entradas y salidas. La ecuación (4.6) presenta el aspecto básico de este tipo de modelo.

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

- Modelos no Lineales:

Por otro lado, la linealización de los sistemas puede dar lugar a soluciones erróneas en algunos sistemas de menor simplicidad. En estos casos se requiere el uso de modelos no lineales, aumentando considerablemente la complejidad.

4.3.3 Optimización

Para obtener las señales de control óptimas, es necesario minimizar una función de coste satisfaciendo una serie de restricciones. Esta función suele tener la forma de la ecuación (4.1), donde se tiene en cuenta el incremento de la señal de control y la diferencia entre la salida y la referencia. En la ecuación (4.7) se describe el problema de optimización a resolver, que cuenta con dos restricciones.

$$\begin{aligned} \Delta u^* = \arg \quad & \underset{\Delta u}{\text{mín}} \quad J(\hat{y}(t+1|t), \dots, \hat{y}(t+N|t), \Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N_u-1)) \\ & \text{s.a.} \quad \hat{y}(t+k|t) = f(y(t), u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N_u|t)) \\ & \quad \quad g(y(t), y(t+1), \dots, y(t+N), u(t), u(t+1), \dots, u(t+N_u)) \leq 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

La primera de las restricciones en el problema de minimización es el modelo del sistema, necesario para predecir el estado en función de la señal de control enviada. Además, se pueden añadir otros tipos de restricciones, dadas por relaciones de igualdad y desigualdad. Las más usuales son sobre la señal de control y su velocidad de cambio, y sobre el valor de la salida:

$$\begin{aligned} u_{min} &\leq u(t) \leq u_{max} \quad \forall t \\ \Delta u_{min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq \Delta u_{max} \quad \forall t \\ y_{min} &\leq y(t) \leq y_{max} \quad \forall t \end{aligned} \quad (4.8)$$

Restringir el valor de la señal de control y de su incremento en cada instante dentro de un cierto umbral permitirá evitar costes muy elevados y fallos en los sistemas electrónicos, ya que se podrán establecer límites de acuerdo a recomendaciones del fabricante. Del mismo modo, limitar la salida del sistema aumenta la seguridad y la esperanza de vida de los componentes, permitiendo el ahorro de costes a largo plazo.

5 Diseño del Controlador

Como se ha comentado a lo largo de este documento, se va a realizar el Control Preditivo Basado en Modelo de la microrred del CEDEA. Este capítulo aborda el diseño de dicho controlador y el modelado de la microrred.

5.1 Esquema de Control

En la Figura 5.1 se muestran los componentes de los que consta el sistema, donde las flechas indican el sentido positivo del flujo de potencia. La Tabla 5.1 recoge la notación empleada para cada potencia y muestra su sentido por defecto, que se corresponderá con un signo positivo, y el sentido opuesto, correspondiente al signo negativo.

Tabla 5.1 Notación y signo de potencias.

Potencia	Notación	Signo positivo	Signo negativo
Placas fotovoltaicas	P_{sun}	Hacia la microrred	-
Aerogenerador	P_{wind}	Hacia la microrred	-
Baterías de ácido - plomo	P_{pb}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Baterías de ion - litio	P_{li}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Electrolizador	P_{elz}	Desde la microrred	-
Coche híbrido Melex	P_{me}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Coche híbrido Delfín	P_{de}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Coche eléctrico Nissan	P_{ni}	Desde la microrred	-
Carga programable	P_{carga}	Desde la microrred	-
Demanda	P_{demand}	Desde la microrred	-
Red eléctrica	P_{grid}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Potencia generada	P_{gen}	Hacia la microrred	-
Potencia almacenada	P_{sto}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Potencia demandada	P_{load}	Desde la microrred	-
Potencia neta	P_{net}	Hacia la microrred	Desde la microrred
Potencia de balance	$P_{balance}$	Exceso	Déficit
Potencia del sistema	P_{sist}	-	-

Se ha denominado potencia neta a la diferencia entre la generada y la consumida, sin tener en cuenta el uso de baterías ni la conexión a la red eléctrica. La potencia de balance es la que tiene en cuenta el intercambio

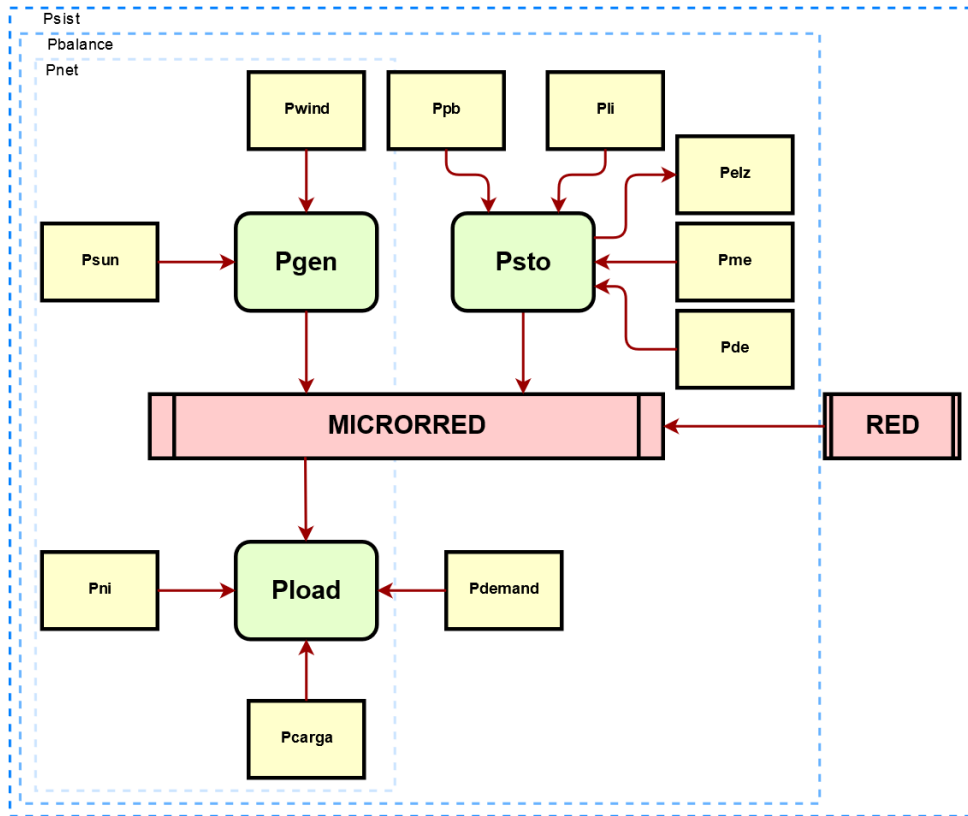


Figura 5.1 Flujo de potencias en la microrred.

únicamente en la microrred funcionando de manera aislada. La potencia del sistema es la que representa el balance en el sistema completo, que incluye tanto la microrred como la red eléctrica.

La relación entre las diferentes potencias asociadas a los componentes de la microrred viene dada por la ecuación (5.1).

$$\begin{aligned}
 P_{gen} &= P_{wind} + P_{sun} \\
 P_{sto} &= P_{pb} + P_{li} - P_{elz} + P_{me} + P_{de} \\
 P_{load} &= P_{ni} + P_{carga} + P_{demand}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Además, se definen las potencias de balance de la ecuación (5.2), donde la red y la microrred deben mantener $P_{sist} = 0$.

$$\begin{aligned}
 P_{net} &= P_{gen} - P_{load} \\
 P_{balance} &= P_{net} + P_{sto} \\
 P_{sist} &= P_{balance} + P_{grid}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

5.2 Modelado

El primer paso a la hora de realizar el control es obtener un modelo del sistema capaz de representar su comportamiento con cierta precisión. Debido a que la relación entre la potencia en los diferentes componentes

y los estados de carga se asemeja a una función lineal, el sistema se puede modelar mediante una representación en espacio de estados:

$$\begin{aligned}x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + Dd(t) \\y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\quad (5.3)$$

donde $x(t)$ es el vector de estado, $u(t)$ es la señal de control, $d(t)$ es la perturbación en el sistema e $y(t)$ es la salida.

El estado del sistema queda representado por los estados de carga de las baterías y el nivel del depósito de hidrógeno, como se observa en (5.4). El vector de estados podrá tener entre tres y cinco componentes dependiendo de si los coches híbridos están conectados o desconectados de la microrred. El estado se corresponde con la salida.

$$x(t) = y(t) = [SOC_{pb}(t) \quad SOC_{li}(t) \quad LOH(t) \quad SOC_{me}(t) \quad SOC_{de}(t)]^T \quad (5.4)$$

Las baterías de plomo se encargan de permitir que se cumpla el balance de potencia. Por ello, las variables de control son las potencias de las baterías, el electrolizador y la red (5.5). Al igual que el estado y la salida, el vector de las variables de control podrá tener entre tres y cinco componentes.

$$u(t) = [P_{grid}(t) \quad P_{li}(t) \quad P_{elz} \quad P_{me}(t) \quad P_{de}(t)]^T \quad (5.5)$$

Puesto que la generación y la demanda no forman parte del sistema de control, se tratarán como una perturbación en el sistema. Además, si los coches híbridos están conectados a la red, su consumo de hidrógeno expresado en porcentaje será también una perturbación (5.6).

$$d(t) = [P_{net}(t) \quad Cons_H(t)]^T \quad (5.6)$$

A continuación, se obtendrá un modelo lineal de los diferentes sistemas que componen la microrred relacionando los estados con las señales de control mediante su rendimiento.

Las baterías de ácido plomo se descargan al aumentar la potencia que intercambian con la microrred y se pueden modelar mediante el siguiente balance de energía:

$$SOC_{pb}(t+1) = SOC_{pb}(t) - \frac{\eta_{pb} T_s}{C_{max_{pb}}} P_{pb}(t) \quad (5.7)$$

donde $C_{max_{pb}}$ es la capacidad de la batería, η_{pb} es el rendimiento y T_s es el tiempo de muestreo.

Como se ha comentado, la potencia en la batería de plomo no es una señal de control del sistema, por lo que es necesario expresarla en función del resto de potencias mediante un balance energético.

$$P_{pb}(t) = -P_{net}(t) - P_{grid}(t) - P_{li}(t) - P_{me}(t) - P_{de}(t) + P_{elz}(t) \quad (5.8)$$

De este modo, uniendo las ecuaciones (5.7) y (5.8), se obtiene el modelo de la batería de plomo, que viene dado por la ecuación (5.9).

$$SOC_{pb}(t+1) = SOC_{pb}(t) - \frac{\eta_{pb} T_s}{C_{max_{pb}}} (-P_{net}(t) - P_{grid}(t) - P_{li}(t) - P_{me}(t) - P_{de}(t) + P_{elz}(t)) \quad (5.9)$$

La batería de ion litio se modela de igual modo que la de plomo:

$$SOC_{li}(t+1) = SOC_{li}(t) - \frac{\eta_{li} T_s}{C_{max_{li}}} P_{li}(t) \quad (5.10)$$

En el modelo del electrolizador, el nivel de hidrógeno aumenta conforme aumenta la potencia. En los momentos en lo que los coches híbridos están conectados a la microrred, es necesario añadir su consumo de hidrógeno.

$$LOH(t+1) = LOH(t) + \frac{\eta_{elz} T_s}{V_{max}} P_{elz}(t) - Cons_H(t) \quad (5.11)$$

donde V_{max} es el máximo volumen de H_2O y $Cons_H$ es la disminución del nivel de hidrógeno provocada por los coches híbridos.

Finalmente, las baterías de los coches híbridos se modelan del mismo modo que las de litio y de plomo:

$$SOC_{me}(t+1) = SOC_{me}(t) - \frac{\eta_{me} T_s}{C_{max_{me}}} (t) P_{me}(t) \quad (5.12)$$

$$SOC_{de}(t+1) = SOC_{de}(t) - \frac{\eta_{de} T_s}{C_{max_{de}}} (t) P_{de}(t) \quad (5.13)$$

La siguiente tabla recoge los valores de los diferentes parámetros del modelo, donde los valores de los rendimientos se han obtenido de forma experimental y el resto son datos obtenidos de catálogo:

Tabla 5.2 Parámetros el modelo.

	η	C_{max} (Ah)	V_{max} (Nm ³)
Batería de plomo	0.2000 (6% V ⁻¹)	125	-
Batería de litio	0.2318 (6% V ⁻¹)	225	-
Electrolizador	0.0238 (m ³ /skW)	-	1
Plataforma Melex	0.3978 (6% V ⁻¹)	125	-
Plataforma Delfín	0.3978 (6% V ⁻¹)	125	-

Puesto que los coches híbridos pueden estar conectados o desconectados de la microrred, existen cuatro posibles modelos del sistema: con los dos coches conectados, con el coche Melex conectado y el Delfín desconectado, con el coche Melex desconectado y el Delfín conectado y con los dos coches desconectados.

5.2.1 Ningún Coche Híbrido Conectado

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriormente descritas y eliminando las variables correspondientes a los coches híbridos, el modelo de la microrred queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} SOC_{pb}(t+1) \\ SOC_{li}(t+1) \\ LOH(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_{pb}(t) \\ SOC_{li}(t) \\ LOH(t) \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} P_{grid}(t) \\ P_{li}(t) \\ P_{elz}(t) \end{bmatrix} + D \cdot [P_{net}(t)] \quad (5.14)$$

donde las matrices del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 A &= I_3 \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & -\frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} \\ 0 & -\frac{\eta_{li}T_s}{C_{max_{li}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\eta_{elz}T_s}{V_{max}} \end{bmatrix} \\
 C &= I_3 \\
 D &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

5.2.2 Plataforma Melex Conectada

En este caso, las variables correspondientes al coche Melex se introducen en el modelo, de manera que aumenta el tamaño de las matrices.

$$\begin{bmatrix} SOC_{pb}(t+1) \\ SOC_{li}(t+1) \\ LOH(t+1) \\ SOC_{me}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_{pb}(t) \\ SOC_{li}(t) \\ LOH(t) \\ SOC_{me}(t) \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} P_{grid}(t) \\ P_{li}(t) \\ P_{elz}(t) \\ P_{me}(t) \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} P_{net}(t) \\ Cons_H(t) \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

donde las matrices del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 A &= I_4 \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & -\frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} \\ 0 & -\frac{\eta_{li}T_s}{C_{max_{li}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\eta_{elz}T_s}{V_{max}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\eta_{me}T_s}{C_{max_{me}}} \end{bmatrix} \\
 C &= I_4 \\
 D &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

5.2.3 Plataforma Delfín Conectada

Si la plataforma Delfín está conectada pero no lo está la plataforma Melex, el modelo tiene la misma forma que el anterior, ya que las baterías de ambos coches se modelan del mismo modo.

$$\begin{bmatrix} SOC_{pb}(t+1) \\ SOC_{li}(t+1) \\ LOH(t+1) \\ SOC_{de}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_{pb}(t) \\ SOC_{li}(t) \\ LOH(t) \\ SOC_{de}(t) \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} P_{grid}(t) \\ P_{li}(t) \\ P_{elz}(t) \\ P_{de}(t) \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} P_{net}(t) \\ Cons_H(t) \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

donde las matrices del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 A &= I_4 \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & -\frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} \\ 0 & -\frac{\eta_{li}T_s}{C_{max_{li}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\eta_{elz}T_s}{V_{max}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\eta_{me}T_s}{C_{max_{me}}} \end{bmatrix} \\
 C &= I_4 \\
 D &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

5.2.4 Ambos Coches Híbridos Conectados

Finalmente, se modela la microrred en el caso en el que las dos plataformas se encuentran conectadas. Las ecuaciones serán una combinación de las anteriores.

$$\begin{bmatrix} SOC_{pb}(t+1) \\ SOC_{li}(t+1) \\ LOH(t+1) \\ SOC_{me}(t+1) \\ SOC_{de}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_{pb}(t) \\ SOC_{li}(t) \\ LOH(t) \\ SOC_{me}(t) \\ SOC_{de}(t+1) \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} P_{grid}(t) \\ P_{li}(t) \\ P_{elz}(t) \\ P_{me}(t) \\ P_{de}(t) \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} P_{net}(t) \\ Cons_H(t) \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

donde las matrices del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 A &= I_5 \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & -\frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} \\ 0 & -\frac{\eta_{li}T_s}{C_{max_{li}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\eta_{elz}T_s}{V_{max}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\eta_{me}T_s}{C_{max_{me}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\eta_{de}T_s}{C_{max_{de}}} \end{bmatrix} \\
 C &= I_5 \\
 D &= \begin{bmatrix} \frac{\eta_{pb}T_s}{C_{max_{pb}}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

5.3 Desarrollo Matemático

Una vez que se tiene el modelo del sistema, es necesario realizar el cambio de variables correspondiente para poder introducirlo en la función de coste y resolver así el problema de optimización en torno a la función de coste implementada.

5.3.1 Cambio de Variables

Anteriormente, se ha obtenido un modelo lineal de la microrred mediante representación en espacio de estados en el que estos dependen de las señales de control y de las perturbaciones. Para simplificar el modelo, se introducirán las perturbaciones en el vector de estado. Las matrices pertenecientes al nuevo modelo resultante se conocen como matrices ampliadas.

Originariamente, el sistema tiene la forma descrita en el Capítulo 4, a la que se ha añadido la perturbación medible, como se puede observar en la ecuación (5.22). El nuevo sistema de ecuaciones se obtiene modificando dicha ecuación para dar lugar a (5.23), donde n_x es el número de estados, n_u es el número de señales de control, n_y es el número de salidas y n_d es el número de perturbaciones.

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Dd(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}, A_{n_x \times n_x}, B_{n_x \times n_u}, C_{n_y \times n_x}, D_{n_x \times n_d} \quad (5.22)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(t+1) \\ d(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & D \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ d(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5.23)$$

Por comodidad y para mantener la notación seleccionada, de ahora en adelante las matrices anteriormente definidas pasarán a representar conceptos diferentes. El nuevo vector de estados será $x(t)$ y la primera, la segunda y la tercera matriz creadas se llamarán A , B y C , respectivamente, con $A_{(n_x+n_d) \times (n_x+n_d)}$, $B_{(n_x+n_d) \times n_u}$, $C_{n_y \times (n_x+n_d)}$. De este modo, el modelo podrá ser representado por la ecuación (5.24), descrita en el Capítulo 4.

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (5.24)$$

En el sistema a controlar, la entrada no es la señal de control sino su incremento. Es por esto que se necesita representar el modelo en espacio de estados incremental. Desde este momento, el estado contiene a las señales de control y depende de su incremento $\Delta u(t)$, donde $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$, como se observa en la ecuación (5.25).

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(t+1) \\ u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(t) \\ y(t) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t-1) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5.25)$$

Nuevamente, por comodidad, el nuevo estado volverá a denominarse $x(t)$ y a las nuevas matrices se les llama M , N y Q , con $M_{(n_x+n_d+n_u) \times (n_x+n_d+n_u)}$, $N_{(n_x+n_d+n_u) \times n_u}$, $Q_{n_y \times (n_x+n_d+n_u)}$, por lo que el modelo queda representado por la ecuación (5.26).

$$\begin{cases} x(t+1) = Mx(t) + N\Delta u(t) \\ y(t) = Qx(t) \end{cases} \quad (5.26)$$

Para minimizar la función de coste, es necesario realizar las predicciones a lo largo del horizonte N que, desde ahora, se denominará N_p para evitar confusiones con la matriz N . Las dos ecuaciones del modelo serán agrupadas en una sola, lo que permitirá introducirlas en la función de coste.

$$y(t+1) = Q[Mx(t) + N\Delta u(t)] \quad (5.27)$$

Para cualquier desplazamiento de tiempo j , la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$y(t+j) = Q[Mx(t+j-1) + N\Delta u(t+j-1)] \quad (5.28)$$

Puesto que $x(t-1)$ es a su vez función de $x(t-2)$ y de $\Delta u(t-2)$, la ecuación anterior puede reescribirse para dar lugar a (5.29).

$$y(t+j) = QM^j x(t) + \sum_{i=0}^{j-1} \left(QM^{(j-i-1)} N \Delta u(t+i) \right) \quad (5.29)$$

De este modo, se tiene una nueva ecuación que contiene las predicciones en un horizonte N_p dadas por las señales de control en un horizonte N_u . Si el horizonte de control es menor que el de predicción, $\Delta u(t+j) = 0$, con $j \geq N_u$.

$$y = Fx(t) + Hu \quad (5.30)$$

El vector de predicciones y es función del estado del sistema (recuérdese que el vector de estados contiene las perturbaciones y las señales de control) y del vector de incrementos de control u .

$$y = \begin{bmatrix} y(t+1 | t) \\ y(t+2 | t) \\ \vdots \\ y(t+N_p | t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q[Mx(t) + N\Delta u(t)] \\ QM^2 x(t) + \sum_{i=0}^1 \left(QM^{(1-i)} N \Delta u(t+i) \right) \\ \vdots \\ QM^{N_p} x(t) + \sum_{i=0}^{N_p-1} \left(QM^{(N_p-i-1)} N \Delta u(t+i) \right) \end{bmatrix}, y_{N_p \cdot n_y} \quad (5.31)$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N_u-1) \end{bmatrix}, u_{N_u \times n_u} \quad (5.32)$$

$$H = \begin{bmatrix} QN & 0 & \cdots & 0 \\ QMN & QN & \cdots & 0 \\ QM^2 N & QMN & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ QM^{N_p} & QM^{N_p-1} & \cdots & 0 \end{bmatrix}, H_{(N_p \cdot n_y) \times (N_u \cdot n_u)} \quad (5.33)$$

$$F = \begin{bmatrix} QM \\ QM^2 \\ \vdots \\ QM^{N_p} \end{bmatrix}, F_{(N_p \cdot n_y) \times (n_x + n_d + n_u)} \quad (5.34)$$

5.3.2 Función de Coste

El problema de optimización se resolverá minimizando una función objetivo o función de coste cuadrática J en la que se incluyen los errores de seguimiento de referencia, las señales de control y los incrementos

de control. Las matrices $\underline{\alpha}$, $\underline{\beta}$ y $\underline{\gamma}$ son matrices diagonales contienen los pesos α , β y γ atribuidos a cada variable.

$$\begin{aligned} J &= \sum_{j=1}^{N_u} \alpha(j)u(t+j-1|t)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \beta(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 + \sum_{j=1}^{N_p} \gamma(j)[y(t+j|t) - w(t+j)]^2 = \\ &= \sum_{j=1}^{N_u} \alpha(j)u(t+j-1|t)^2 + u^T \underline{\beta} u + (y-w)^T \underline{\gamma} (y-w) \end{aligned} \quad (5.35)$$

La minimización de la función de coste se resolverá mediante un problema de programación cuadrática, caracterizado por una función de coste cuadrática y restricciones lineales, siendo una de ellas el modelo de la microrred.

En este tipo de problemas se tiene un sistema de ecuaciones lineales en el que se quiere minimizar un término. El caso general es $Ax + b = e$, donde se pretende que $e \approx 0$. Para hallar el mínimo de esta ecuación, es necesario igualar a 0 la derivada del error cuadrático.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{2} (e^T e) = 0 \quad (5.36)$$

Desarrollando la ecuación, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{2} (x^T A^T x + b^T A x + x^T A^T b + b^T b) = 0 \quad (5.37)$$

$$\begin{aligned} P &= A^T A \\ f &= b^T A \end{aligned} \quad (5.38)$$

La derivada de (5.37) equivale a la de (5.39) con el cambio de variable (5.38), donde la solución viene dada por (5.40). Si P es definida positiva, el problema tendrá un mínimo global.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{2} (x^T P x + f x) = 0 \quad (5.39)$$

$$x = -P^{-1} f^T \quad (5.40)$$

Aplicando el mismo razonamiento sobre el problema de la microrred, se tiene la siguiente minimización:

$$\begin{aligned} u^* &= \arg \min \left(\frac{1}{2} (u^T P u + f u) \right) \\ \text{s.a.} \quad & R u \leq c \\ & u \geq 0 \end{aligned} \quad (5.41)$$

Para obtener la función de coste, es necesario que sus tres términos (seguimiento de referencia, control e incremento de control) estén en función de u y sea posible agruparlos como en la ecuación (5.41).

El valor de la señal de control en los instantes sucesivos será la suma de los incrementos calculados hasta llegar a ese instante más su valor al inicio del horizonte de control, por lo que la transformación de $u(t)$ queda de la siguiente forma, donde $U(t-1)$ es un vector que contiene el valor de $u(t-1)$ en todas sus filas y T es una matriz diagonal inferior formada por submatrices identidad de tamaño $N_u \cdot n_u$:

$$\frac{\partial}{\partial u} \left(\sum_{j=0}^{N_u} \alpha(j) u(t+j|t)^2 \right) = \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{1}{2} u^T T^T \underline{\alpha} T u + 2U(t-1)^T \underline{\alpha} T u \right) \quad (5.42)$$

Suponiendo una sola componente, el cálculo realizado se representaría como en la ecuación (5.43).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \Delta u(t+j)} \alpha \left(\sum_{i=0}^j \Delta u(t+i) + u(t-1) \right)^2 = \\ & = \frac{\partial}{\partial \Delta u(t+j)} \alpha \left(\left(\sum_{i=0}^j \Delta u(t+i) \right)^2 + 2u(t-1) \sum_{i=0}^j \Delta u(t+i) \right) \end{aligned} \quad (5.43)$$

Por otro lado, teniendo en cuenta (5.30) y el desarrollo expuesto en (5.37), el error de seguimiento de referencia pasa a ser $y-w = Hu + Fx - w$, que queda en función de u .

$$\frac{\partial}{\partial u} \left((y-w)^T \underline{\gamma} (y-w) \right) = \frac{\partial}{\partial u} \left(u H \underline{\gamma} H^T u^T + (Fx(t) - w)^T \underline{\gamma} H u \right) \quad (5.44)$$

De este modo, se obtienen las matrices del problema de optimización mostrado en (5.41).

$$\begin{aligned} P &= 2 \left(T^T \underline{\alpha} T + \underline{\beta} + H^T \underline{\gamma} H \right) \\ f &= 2 \left(U(t-1)^T \underline{\alpha} T + (Fx(t) - w)^T \underline{\gamma} H \right) \end{aligned} \quad (5.45)$$

5.3.3 Restricciones

Las restricciones del problema de optimización deben ser relaciones de igualdad o desigualdad lineales y dependientes del vector u . En este problema se impondrán restricciones en la señal de control y su incremento y en la salida del sistema. Además, se añaden las restricciones correspondientes a la batería de plomo ácido.

$$\begin{aligned} u_{min} &\leq u(t) \leq u_{max} & \forall t \\ \Delta u_{min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq \Delta u_{max} & \forall t \\ y_{min} &\leq y(t) \leq y_{max} & \forall t \\ P_{pb_{min}} &\leq P_{pb}(t) \leq P_{pb_{max}} & \forall t \\ \Delta P_{pb_{min}} &\leq \Delta P_{pb}(t) \leq \Delta P_{pb_{max}} & \forall t \end{aligned} \quad (5.46)$$

Las restricciones se pueden agrupar en el sistema $Ru \leq c$, que está formado por diferentes submatrices:

$$\begin{aligned} R &= [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6 \ A_7 \ A_8 \ A_9 \ A_{10}]^T \\ c &= [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ b_7 \ b_8 \ b_9 \ b_{10}]^T \end{aligned} \quad (5.47)$$

La expresión matricial de las restricciones sobre el incremento de control es directa:

$$\begin{aligned} A_1 &= I_{N_u \cdot x n_u} \\ b_1 &= [\Delta u_{max} \quad \Delta u_{max} \quad \dots \quad \Delta u_{max}]_{N_u \cdot x n_u}^T \end{aligned} \quad (5.48)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= -I_{N_u \cdot x n_u} \\ b_2 &= -[\Delta u_{min} \quad \Delta u_{min} \quad \dots \quad \Delta u_{min}]_{N_u \cdot x n_u}^T \end{aligned} \quad (5.49)$$

El cálculo de las restricciones sobre la señal de control y la salida se realiza de forma análoga a como se calculó la función de coste.

$$\begin{aligned} A_3 &= T_{N_u \cdot n_u} \\ b_3 &= [\Delta u_{max} \quad \Delta u_{max} \quad \dots \quad \Delta u_{max}]_{N_u \cdot n_u}^T - U(t-1) \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} A_4 &= -T_{N_u \cdot n_u} \\ b_4 &= -[\Delta u_{min} \quad \Delta u_{min} \quad \dots \quad \Delta u_{min}]_{N_u \cdot n_u}^T + U(t-1) \end{aligned} \quad (5.51)$$

$$\begin{aligned} A_5 &= H_{(N_p \cdot n_y) \times (N_u \cdot n_u)} \\ b_5 &= [y_{max} \quad y_{max} \quad \dots \quad y_{max}]_{N_p \cdot n_y}^T - Fx(t) \end{aligned} \quad (5.52)$$

$$\begin{aligned} A_6 &= -H_{(N_p \cdot n_y) \times (N_u \cdot n_u)} \\ b_6 &= -[y_{min} \quad y_{min} \quad \dots \quad y_{min}]_{N_p \cdot n_y}^T + Fx(t) \end{aligned} \quad (5.53)$$

Para reescribir las restricciones en la potencia de la batería de plomo, es necesario tener en cuenta su relación con el resto de potencias, hallada en la ecuación (5.8). Para ello, se hará uso de una nueva matriz diagonal T' . Esta matriz contiene los signos que resultan de despejar el resto de potencias de la ecuación. A continuación, se muestra la forma de T' para el caso en el que los dos coches híbridos estén conectados. De no ser así, los vectores contenidos en la diagonal tendrán menos componentes.

$$T'_{N_u \times (N_u \cdot n_u)} = \begin{bmatrix} [-1 - 1 + 1 - 1 - 1] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & [-1 - 1 + 1 - 1 - 1] & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & [-1 - 1 + 1 - 1 - 1] \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

Debido a que no se realiza predicción sobre las perturbaciones, de las que forma parte la potencia neta, su incremento se supondrá nulo. Las submatrices restantes se detallan a continuación:

$$\begin{aligned} A_7 &= T'_{N_u \times (N_u \cdot n_u)} \\ b_7 &= [\Delta P_{pb_{max}} + \Delta P_{net}(t) \quad \Delta P_{pb_{max}} \quad \dots \quad \Delta P_{pb_{max}}]_{N_u}^T \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$\begin{aligned}
 A_8 &= -T'_{N_u \times (N_u \cdot n_u)} \\
 b_8 &= - \left[\Delta P_{pb_{max}} - \Delta P_{net}(t) \quad \Delta P_{pb_{max}} \quad \dots \quad \Delta P_{pb_{max}} \right]_{N_u}^T
 \end{aligned} \tag{5.56}$$

$$\begin{aligned}
 A_9 &= T'_{N_u \times (N_u \cdot n_u)} T_{N_u \cdot n_u} \\
 b_9 &= \left[P_{pb_{max}} + P_{net}(t) \quad P_{pb_{max}} + P_{net}(t) \quad \dots \quad P_{pb_{max}} + P_{net}(t) \right]_{N_u}^T - T'U(t-1)
 \end{aligned} \tag{5.57}$$

$$\begin{aligned}
 A_{10} &= -T'_{N_u \times (N_u \cdot n_u)} T_{N_u \cdot n_u} \\
 b_{10} &= - \left[P_{pb_{min}} + P_{net}(t) \quad P_{pb_{min}} + P_{net}(t) \quad \dots \quad P_{pb_{min}} + P_{net}(t) \right]_{N_u}^T + T'U(t-1)
 \end{aligned} \tag{5.58}$$

Puesto que ya se han obtenido las restricciones y la función de coste, es posible realizar la optimización. Para ello, se hará uso de la función *quadprog* de MATLAB® destinada a la solución de problemas de programación cuadrática, es decir, problemas de optimización en los que la función de coste es cuadrática y está sujeta a una serie de restricciones lineales de igualdad o desigualdad.

6 Implementación del Controlador en MATLAB®

En este capítulo se describirá la implementación propuesta para el controlador diseñado anteriormente adaptándose al modelo existente de la microrred realizado en Simulink® y se mostrarán los valores otorgados a los pesos de la función de coste y los límites de operación de los distintos elementos que la componen. La Figura 6.1 muestra las diferentes fases de las que se compone el algoritmo, que se detallarán posteriormente.

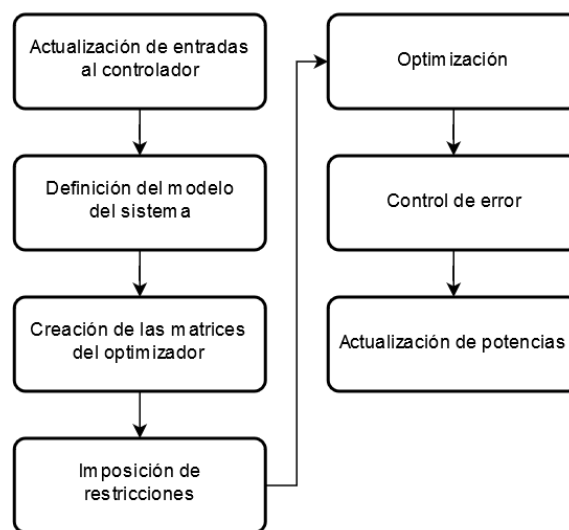


Figura 6.1 Algoritmo del controlador implementado.

6.1 Actualización de Entradas al Controlador

El controlador constituye un bloque de Simulink® que es añadido al modelo de la microrred y funciona como una caja negra en la que existe una serie de entradas y salidas. Las salidas de dicho bloque son las variables de control, es decir, los flujos de potencia de la microrred, y las variables de entrada son las descritas a continuación:

- Salidas del sistema:

- Estado de carga de la batería de plomo (SOC_{pb}).
- Estado de carga de la batería de litio (SOC_{li}).
- Nivel del depósito de hidrógeno (LOH).
- Estado de carga de la batería de la plataforma Melex (SOC_{me}).
- Estado de carga de la batería de la plataforma Delfín (SOC_{de}).
- Variables binarias:
 - Sensor de conexión de la plataforma Melex a la microrred (δ_{me}).
 - Sensor de conexión de la plataforma Delfín a la microrred (δ_{de}).
- Perturbaciones
 - Potencia neta (P_{net}).
 - Potencia neta en el instante anterior.
 - Consumo de hidrógeno por parte de los vehículos híbridos ($Cons_H$).
- Entradas de control en el instante anterior:
 - Potencia de la red (P_{grid}).
 - Potencia de la batería de litio (P_{li}).
 - Potencia del electrolizador (P_{elz}).
 - Potencia de la batería de la plataforma Melex (P_{me}).
 - Potencia de la batería de la plataforma Delfín (P_{de}).

El modelo del sistema permite relacionar la variación en las salidas con las señales de control y las perturbaciones. Es posible calcular estas últimas a partir de una predicción del estado en el instante posterior, de su valor actual y de las perturbaciones, por lo que es necesario recibirlo como entrada al controlador en cada instante.

Además, puesto que los vehículos híbridos pueden estar conectados o desconectados de la microrred en cualquier momento, es necesario recibir una señal que lo indique para poder intercambiar potencia con ellos. De no ser así, la microrred podría estar tratando de ceder potencia a un elemento inexistente. Para evitar este inconveniente, se utilizará un modelo diferente para cada combinación de δ_{me} y δ_{de} .

No solo es importante obtener el valor de la potencia neta actual para conocer las perturbaciones, sino que es necesario conocer también su valor en el instante anterior. Esto será útil para calcular las restricciones en el incremento de potencia de la batería de plomo, ya que permitirá despejar su valor de la relación entre los incrementos de potencia.

Finalmente, los valores de las señales de control en el instante anterior, permitirán calcular sus valores en el siguiente instante para poder imponer las restricciones. Esto es necesario debido a que el control se realiza sobre su incremento y no directamente sobre su valor.

6.2 Definición del Modelo del Sistema

En el caso de la microrred de estudio, dos de los elementos del sistema pueden encontrarse conectados o desconectados, lo que implica que el modelo no es lineal, sino que cuenta con variables binarias. Puesto que el uso de sistemas no lineales con variables discretas aumenta considerablemente la complejidad del controlador, se ha decidido optar por el uso de cuatro modelos lineales que serán intercambiados según los valores de δ_{me} y δ_{de} .

Cada vez que uno de los dos vehículos híbridos se conecte a la microrred, hará variar la señal enviada por el sensor e informará del estado de carga con el que ha llegado. Esto permitirá usar sus baterías del mismo modo que se utiliza el resto de componentes, ya que en los momentos en los que llegue uno de los coches, se tomará como SOC anterior el valor proporcionado.

De este modo, cada vez que se requiera el uso del número de estados n_x , salidas n_y y variables de control n_u , este variará según los valores de las variables binarias. Además, puesto que no se realiza un control en el circuito de hidrógeno, su consumo por parte de los coches híbridos será una perturbación y se podrá representar mediante una única variable. Por tanto, el número de perturbaciones será también variable.

$$\begin{aligned} n_x(t) &= 3 + \delta_{me}(t) + \delta_{de}(t) \\ n_y(t) &= 3 + \delta_{me}(t) + \delta_{de}(t) \\ n_u(t) &= 3 + \delta_{me}(t) + \delta_{de}(t) \\ n_d(t) &= 1 + \frac{\delta_{me}(t) + \delta_{de}(t)}{\delta_{me}(t) + \delta_{de}(t)} \end{aligned} \quad (6.1)$$

En la Figura 6.2, se pueden observar los pasos de los que se compone esta sección del algoritmo, los cuales han sido desarrollados en el Capítulo 5:

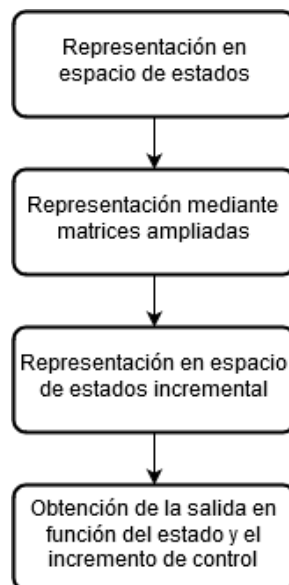


Figura 6.2 Algoritmo que constituye la definición del modelo del sistema.

6.3 Constitución de las Matrices del Optimizador

A continuación, se definen las matrices necesarias para introducir en el optimizador, descritas con detalle en el Capítulo 5. Estas matrices son las que permiten modelar el sistema con la forma de la (6.2) y así

optimizar la función de coste que aparece en la (6.3), donde se ha seleccionado un horizonte de control $N_u = 2$ y un horizonte de predicción $N_p = 10$.

$$y = Fx(t) + Hu \quad (6.2)$$

$$J = u^T T^T \underline{\alpha} T u + 2U(t-1)^T \underline{\alpha} T + u^T \underline{\beta} u + (y-w)^T \underline{\gamma} (y-w) \quad (6.3)$$

Las matrices $\underline{\alpha}$, $\underline{\beta}$ y $\underline{\gamma}$ están formadas por los factores de ponderación de la función de coste para las señales de control, sus incrementos y el error de seguimiento, respectivamente, contenidos en sus diagonales. Sus valores se han obtenido empíricamente atendiendo a los objetivos de control y teniendo en cuenta las magnitudes de las variables a las que se asocian:

Tabla 6.1 Pesos de la función de coste.

	α	β	γ
Red	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	-
Batería de plomo	-	-	$1 \cdot 10^{-8}$
Batería de litio	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$
Electrolizador	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Plataforma Melex	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Plataforma Delfín	$1.55 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$

6.4 Imposición de Restricciones

En la microrred, es necesario imponer una serie de restricciones que protegen a sus componentes de sobrecargas y alargan su vida útil. Como se ha explicado anteriormente, se impondrán restricciones en las señales de control y sus incrementos, en los estados y en la potencia de la batería de plomo y su variación. Los límites de operación quedan recogidos en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Límites de operación de los elementos de la microrred.

	Potencia (kW)	Ratio de potencia (kW/s)	Estado de carga (%)
Red	[-52,+50]	-	-
Batería de plomo	[-0.36,+1.404]	[-1,+1]	[30,80]
Batería de litio	[-16.38,+24.24]	[-1,+1]	[30,80]
Electrolizador	[0,+5]	[-0.5,+0.02]	[0,95]
Plataforma Melex	[-1.5,+2]	[-1,+1]	[50,95]
Plataforma Delfín	[-1,+2]	[-1,+1]	[50,95]

En las restricciones sobre el estado de carga mínimo de las baterías de los coches híbridos y las baterías de plomo se dan casos especiales que llevan a la necesidad de una segunda restricción.

Por una parte, los coches híbridos tienen un límite inferior del 50% para que puedan contar con cierta autonomía a la hora de desconectarse de la microrred. El cumplimiento de esta restricción no es siempre posible, ya que si estos llegan con un SOC demasiado bajo, será imposible atender a los requisitos y el

optimizador no encontrará ninguna solución factible. Es por ello que la restricción anterior solo se podrá aplicar si el estado de carga actual ya es superior a ese valor. En el caso contrario, su valor mínimo será 0%.

En el caso de la batería de plomo, existe un segundo límite inferior, denominado estado de carga mínimo de seguridad, que permite de nuevo el uso de la batería en el momento en el que todos los componentes de la microrred estén cediendo potencia en la medida de sus posibilidades. Recuérdese que la batería de plomo es la encargada de hacer frente en primera instancia al déficit y exceso energético. Este nuevo límite permite disminuir el estado de carga al 10%.

6.5 Optimización

Para optimizar la función de coste sujeta a las restricciones anteriores se utiliza la función *quadprog* de MATLAB® dedicada a la resolución de problemas de programación cuadrática, que se caracterizan por una función de coste cuadrática y restricciones de igualdad y desigualdad lineales.

El algoritmo seleccionado para ser implementado en esta función es el *interior point convex* o algoritmo del punto interior, que es capaz de optimizar problemas convexos rápidamente manteniendo su búsqueda dentro de las restricciones. Además, utiliza un módulo de preresolución que permite eliminar redundancias y simplificar el problema.

Por otro lado, aunque en la mayor parte de los pasos de simulación las iteraciones necesarias para alcanzar una solución aceptable no ascienden al valor por defecto (200 iteraciones), se ha seleccionado un número máximo de 1500 para obtener mejores resultados.

A pesar de que en la mayoría de los casos el algoritmo es capaz de reponerse ante soluciones infinitas o inviables, en ocasiones como la entrada y salida de los vehículos híbridos, puede dirigirse a lugares no factibles y devolver soluciones vacías. Para solventar este problema, se ha implementado un sencillo módulo de tratamiento de errores en el que, si la función no ha podido encontrar una solución, las potencias se mantendrán con el mismo valor que en el instante anterior y la red será la encargada de hacer frente a la variación en la potencia neta. Las predicciones realizadas en los instantes previos permitirán que esta solución no ocasione problemas para el cumplimiento de restricciones.

6.6 Actualización de Potencias

Una vez que se han calculado los incrementos en las variables de control (potencia de la red, potencia de la batería de litio y potencias de los vehículos híbridos, si procede), son sumados a sus valores anteriores para obtener la señal que es necesario enviar al sistema.

Puesto que la batería de plomo es la encargada de permitir el balance de potencia en la microrred, su valor se calcula a partir de las potencias del resto de elementos y de la potencia neta. Finalmente, esta se envía a la microrred junto al resto.

7 Simulación y Evaluación

En este capítulo se realizarán pruebas sobre la microrred para evaluar el comportamiento del controlador implementado. Esta evaluación se realizará sobre un modelo de la misma realizado en Simulink® y proporcionado por Ángel Durán López (Figura 7.1), alumno de Ingeniería de la Energía. La figura Figura 7.2 muestra el modelo completo de la microrred una vez que se ha añadido el controlador, realizando las transformaciones necesarias para adaptar la señal de salida de la microrred a la de entrada al controlador.

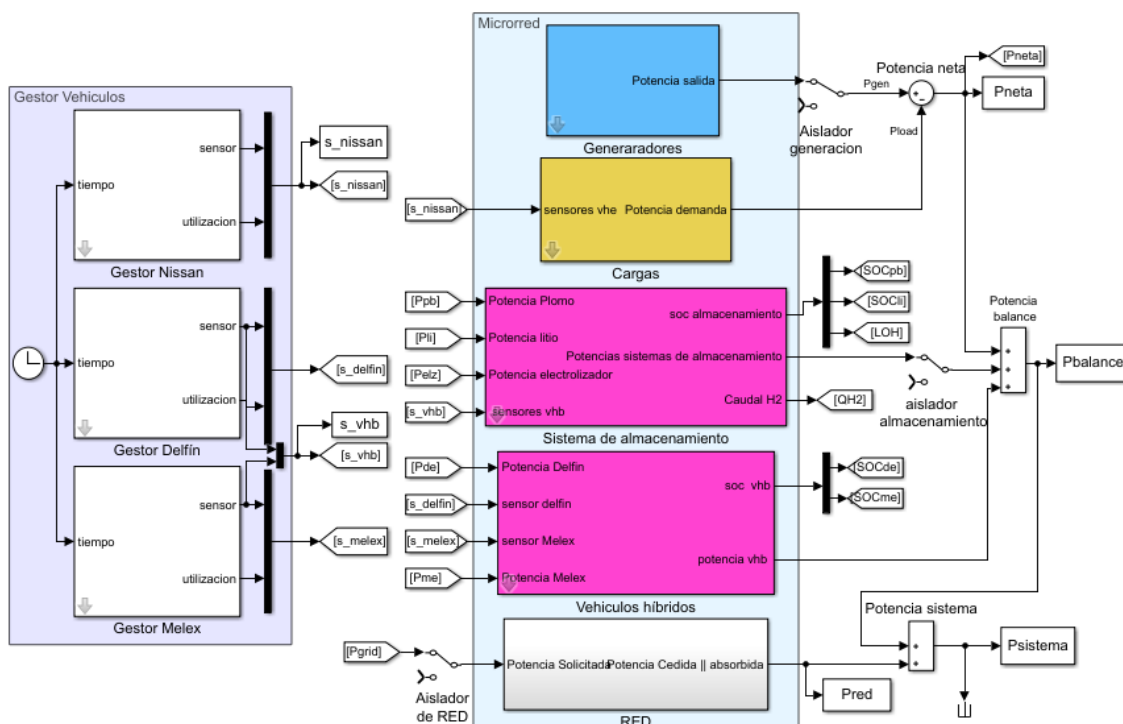


Figura 7.1 Modelo de la microrred.

Se simulará el comportamiento de la microrred durante un día completo de funcionamiento, suponiendo dos condiciones ambientales diferentes: día soleado y día nublado y, para cada uno de los dos perfiles de irradiancia solar, se realizará una simulación con distintos estados iniciales para comprobar su capacidad de actuación en situaciones de alto y bajo estado de carga.

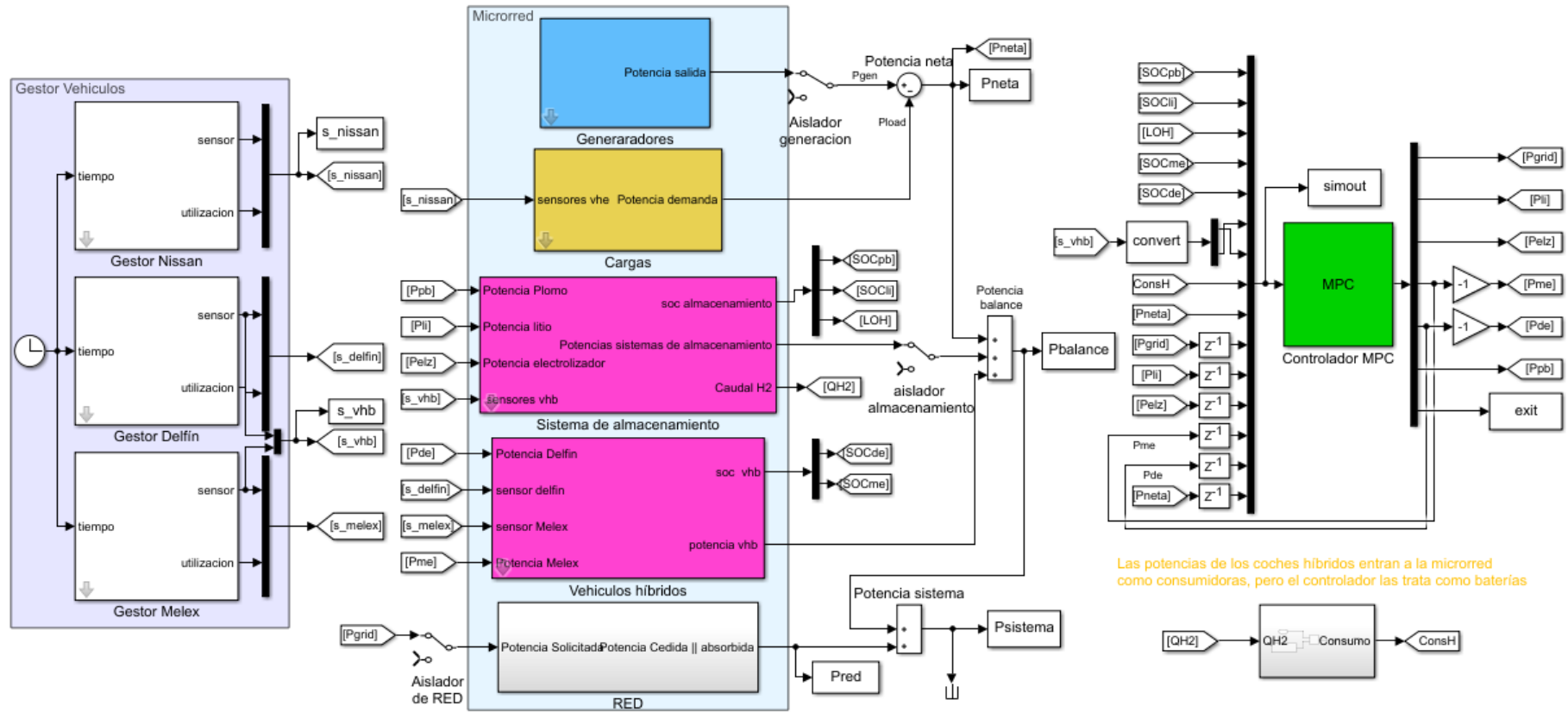


Figura 7.2 Modelo de la microrred con controlador.

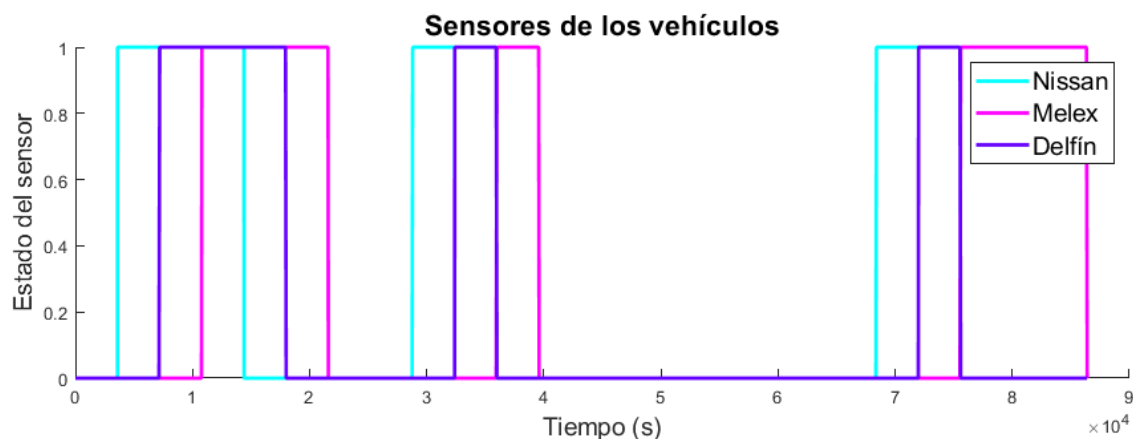


Figura 7.3 Entrada y salida de los vehículos en la microrred.

Los vehículos híbridos y eléctrico se conectarán y desconectarán de la microrred según se muestra en la Figura 7.3. Cuando cada uno de ellos se conecte, enviará a la microrred una señal e informará de su estado de carga, proporcionando así un estado inicial al controlador. El sistema también proporciona el consumo de hidrógeno por parte de los vehículos híbridos cuando estos se conectan a la microrred. Además, se simulará una disminución del estado de carga de los vehículos correspondiente a su consumo en circulación.

7.1 Simulación en Día Soleado con Baterías a Media Carga

Esta simulación se ha realizado bajo las siguientes condiciones:

- Perfil de generación solar: día soleado.
- Estado de carga inicial de las baterías: 50 %.
- Nivel de hidrógeno inicial: 50 %.

Las siguientes gráficas verifican que la microrred sigue el esquema de control descrito en los capítulos anteriores, donde la batería de plomo se encarga de hacer frente a las variaciones de potencia en primera instancia, después lo hace la de litio, posteriormente actúa el electrolizador y, finalmente, se intercambia potencia con los vehículos híbridos en el caso de encontrarse conectados en el punto de recarga. En la Figura 7.5 se observa el carácter predictivo del controlador ya que, aunque en algunas ocasiones es posible aumentar la potencia del electrolizador, esto impediría que cuando el LOH se acercase a su máximo no fuera posible anular la potencia en un tiempo suficiente. En cuanto se conectan los vehículos híbridos, el nivel de hidrógeno disminuye drásticamente debido a que su consumo es muy elevado, como se puede observar en la Figura 7.6.

Por otro lado, los cambios en el estado de los vehículos, tanto híbridos como eléctrico, al conectarse y desconectarse del puesto de recarga provoca una variación brusca en el balance que conlleva la necesidad de conectarse a la red eléctrica durante las transiciones, ya que es el único elemento en el que se ha permitido una variación de potencia más rápida. En la Figura 7.7 se puede observar como, posteriormente, la potencia de la red disminuye de manera suave para ser sustituida por la de las baterías.

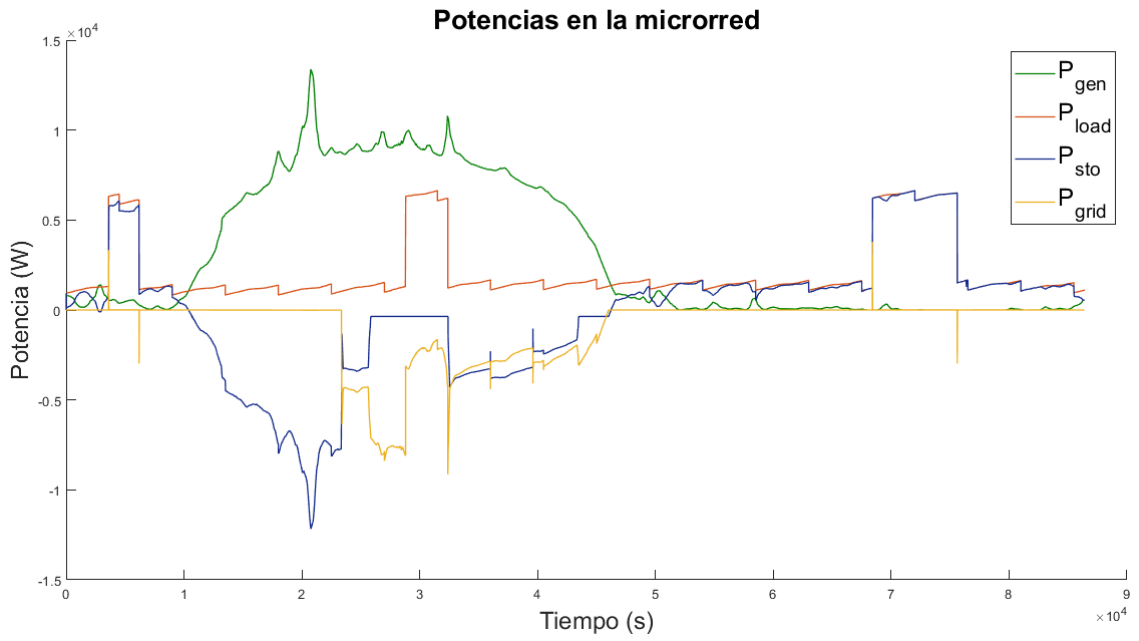


Figura 7.4 Potencias en la microrred en día soleado y con carga inicial media.

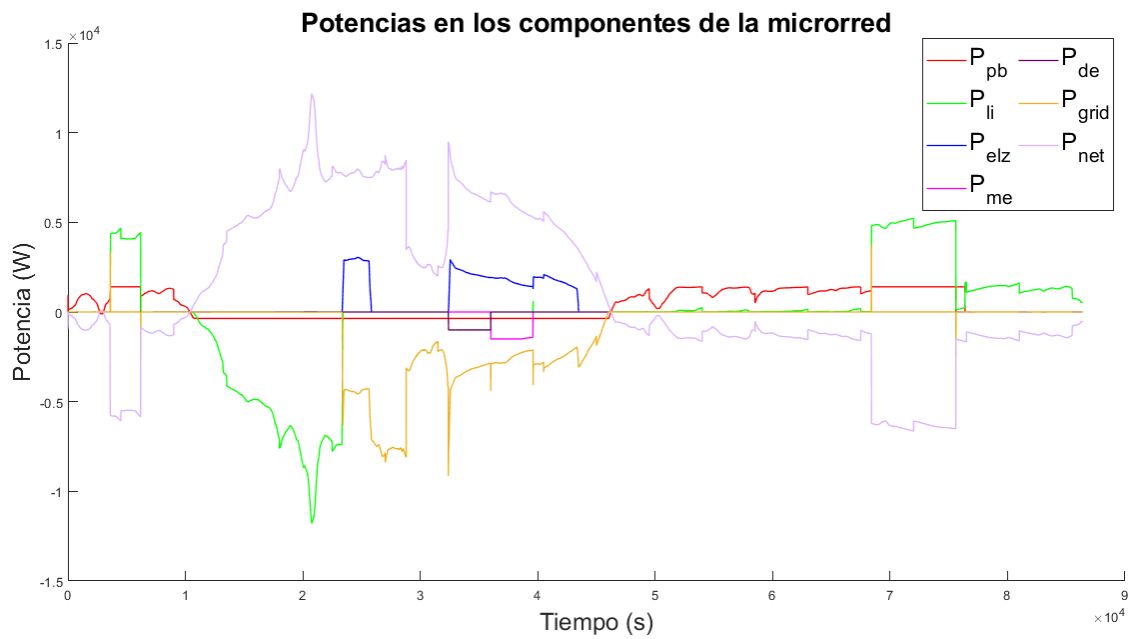


Figura 7.5 Potencias en los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial media.

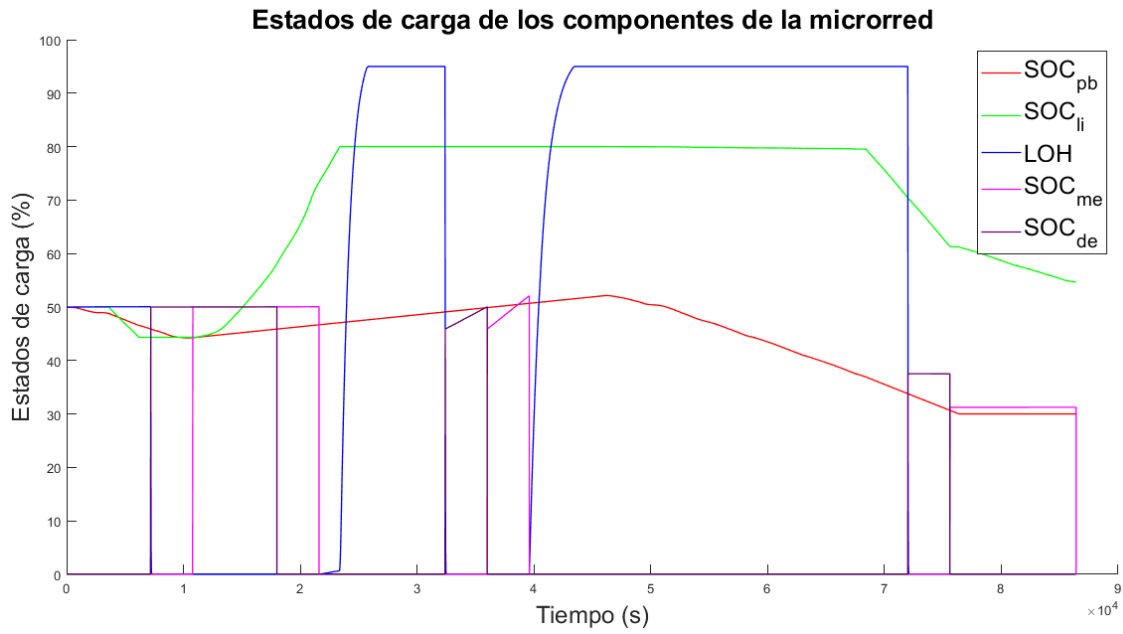


Figura 7.6 Estados de carga de los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial media.

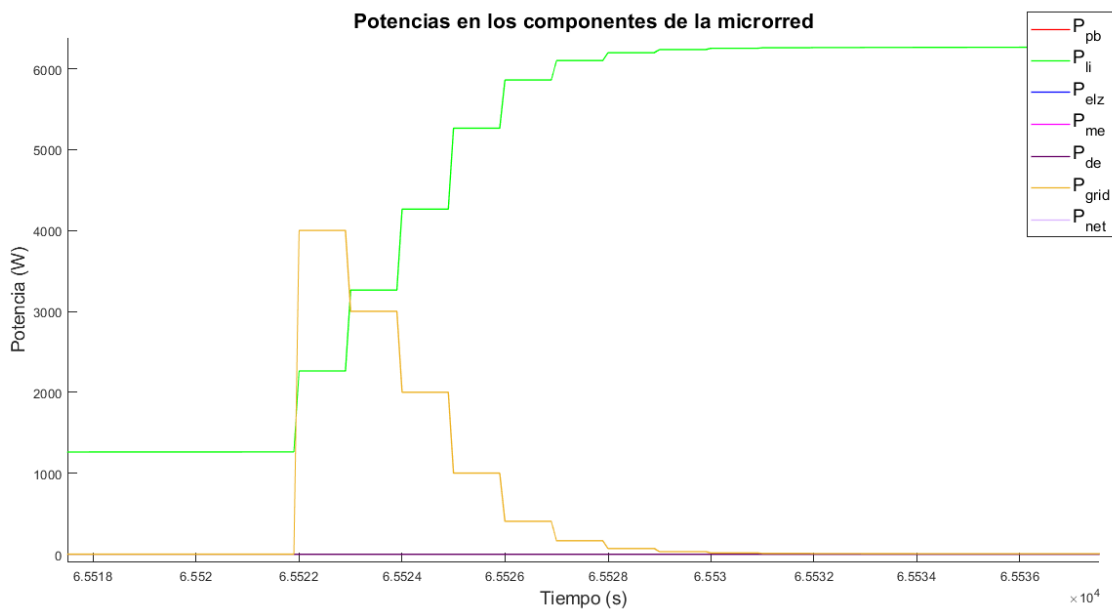


Figura 7.7 Variación de potencia en una conexión del vehículo eléctrico.

7.2 Simulación en Día Soleado con Baterías Cargadas

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos cuando el estado inicial de las baterías es elevado. Puesto que en la simulación predomina el exceso de generación, su SOC se encontrará en nivel alto la mayor parte del tiempo, como se puede comprobar en la Figura 7.10, por lo que será necesario absorber más energía de la red eléctrica. Esto evidencia la necesidad de la microrred de contar con un modo de conexión, ya que solo sería posible la operación aislada durante la noche y en ausencia de vehículos.

Esta simulación se ha realizado bajo las siguientes condiciones:

- Perfil de generación solar: día soleado.
- Estado de carga inicial de la batería de plomo: 75 %.
- Estado de carga inicial de la batería de litio: 70 %.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Melex: 82 %.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Delfín: 80 %.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Nissan: 85 %.
- Nivel de hidrógeno inicial: 90 %.

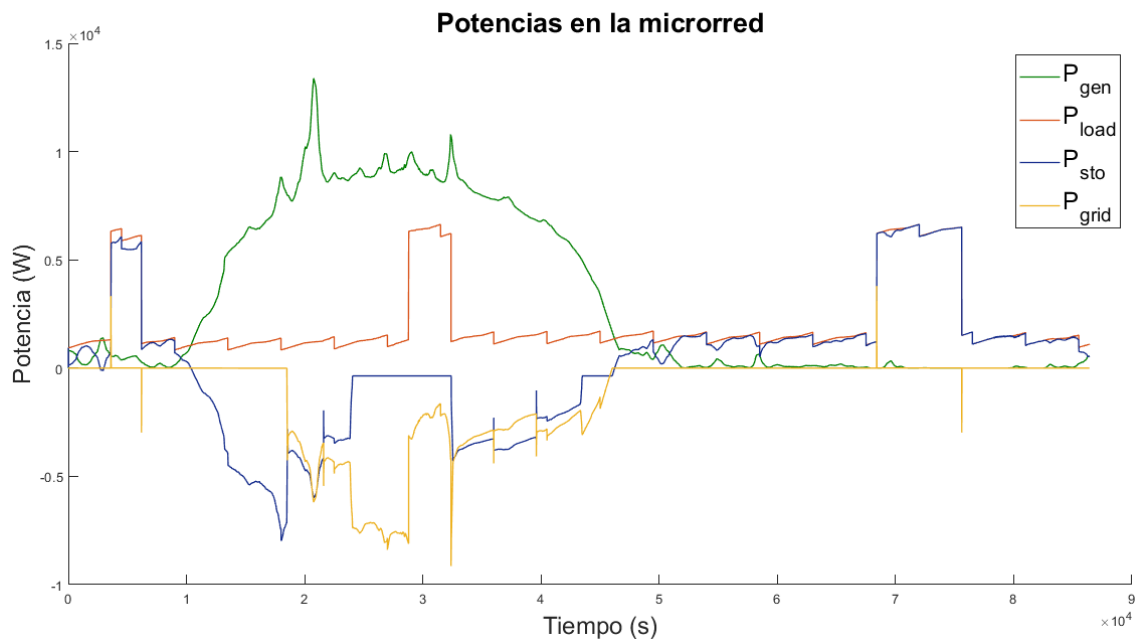


Figura 7.8 Potencias en la microrred en día soleado y con carga inicial alta.

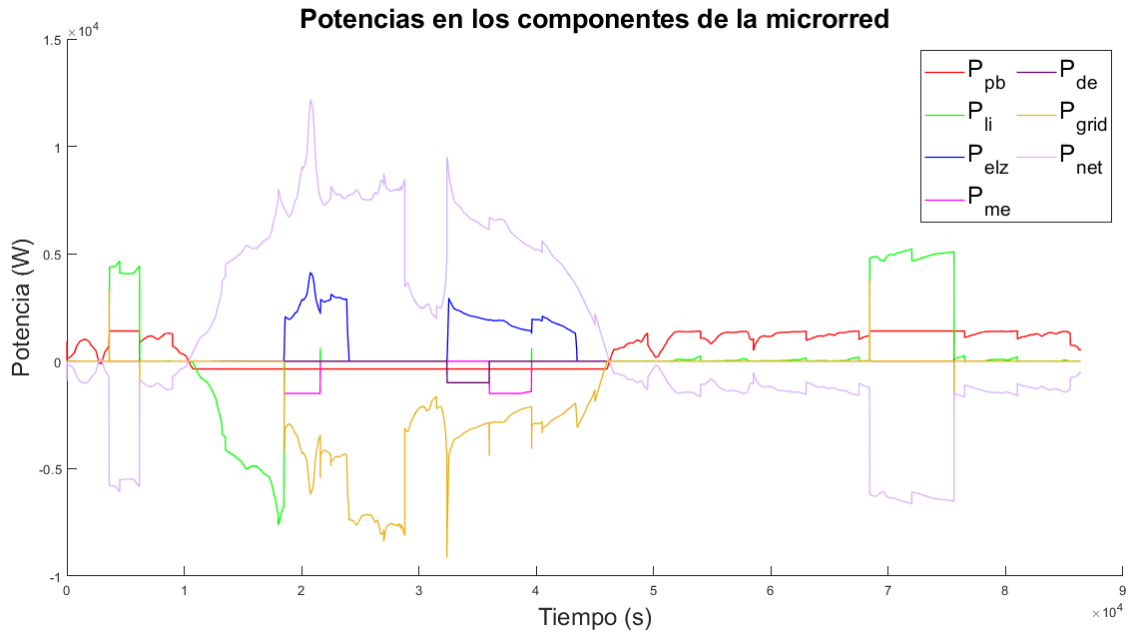


Figura 7.9 Potencias en los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial alta.

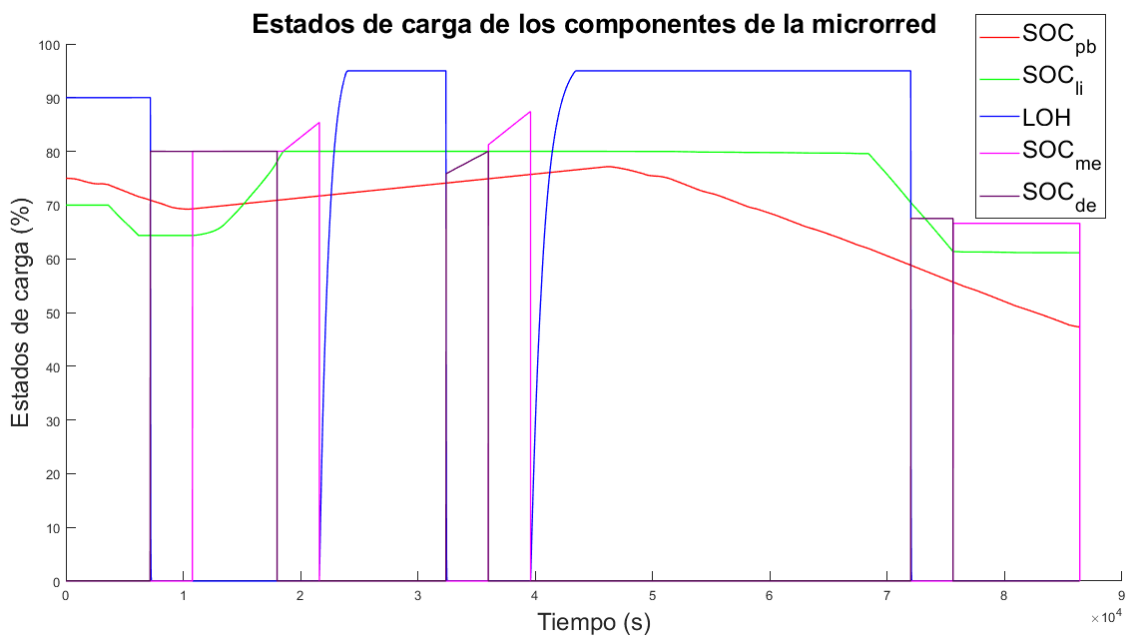


Figura 7.10 Estados de carga de los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial alta.

7.3 Simulación en Día Soleado con Baterías Descargadas

No solamente es necesario conectar la microrred a la red eléctrica cuando la generación es elevada y las baterías se encuentran cargadas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar el experimento con las baterías descargadas, donde se comprueba que incluso en las situaciones más favorables para la desconexión (generación alta y bajo estados de cargas), el modo aislado es inviable y se demuestra la eficacia del controlador:

- Perfil de generación solar: día soleado.
- Estado de carga inicial de la batería de plomo: 35%.
- Estado de carga inicial de la batería de litio: 40%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Melex: 25%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Delfín: 20%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Nissan: 30%.
- Nivel de hidrógeno inicial: 30%.

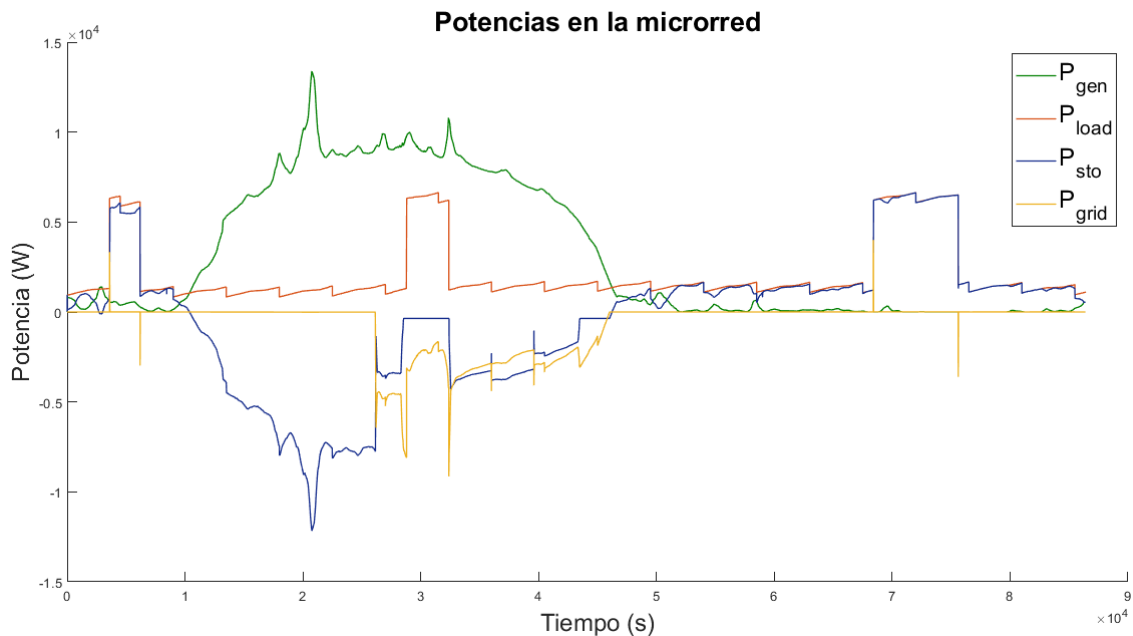


Figura 7.11 Potencias en la microrred en día soleado y con carga inicial baja.

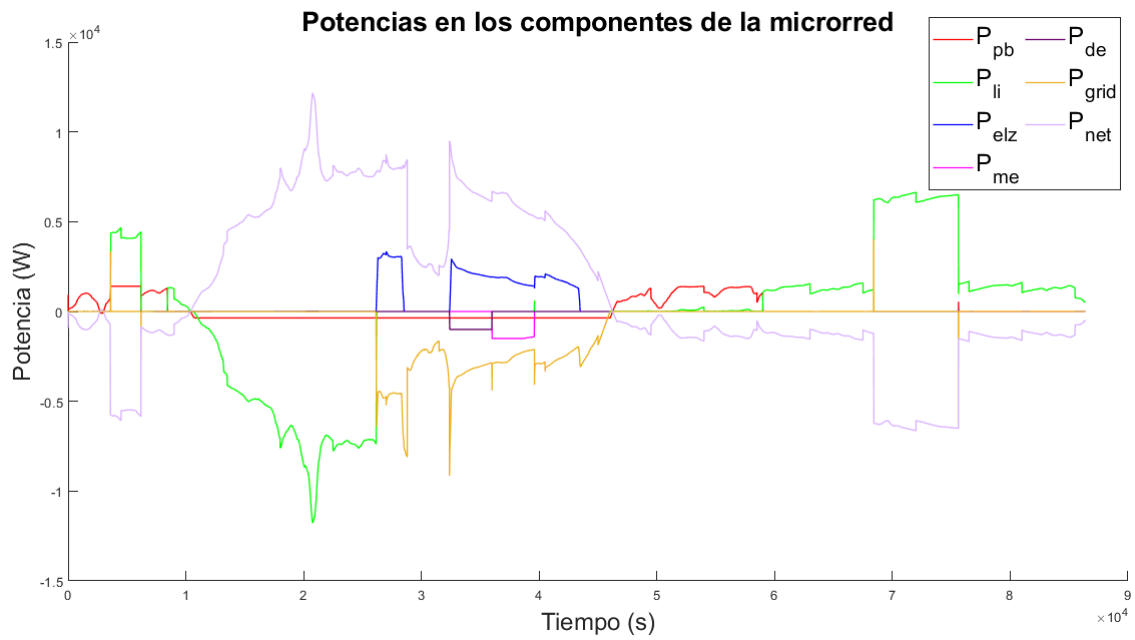


Figura 7.12 Potencias en los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial baja.

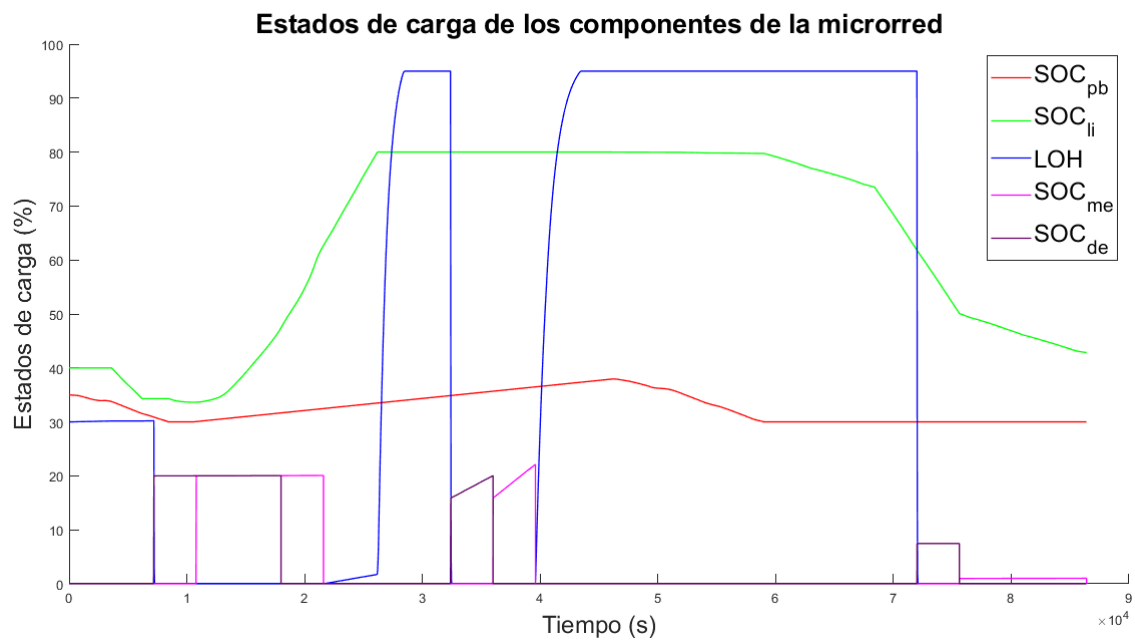


Figura 7.13 Estados de carga de los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial baja.

7.4 Simulación en Día Nublado con Baterías a Media Carga

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a un día nublado, donde la generación será más baja que en los casos anteriores. Aun así, seguirá predominando el exceso energético, por lo que será necesario también ceder potencia a la red. El controlador es capaz de mantener una operación en la microrred con bastante independencia del tipo de generación.

Esta simulación se ha realizado bajo las siguientes condiciones:

- Perfil de generación solar: día nublado.
- Estado de carga inicial de las baterías: 50%.
- Nivel de hidrógeno inicial: 50%.

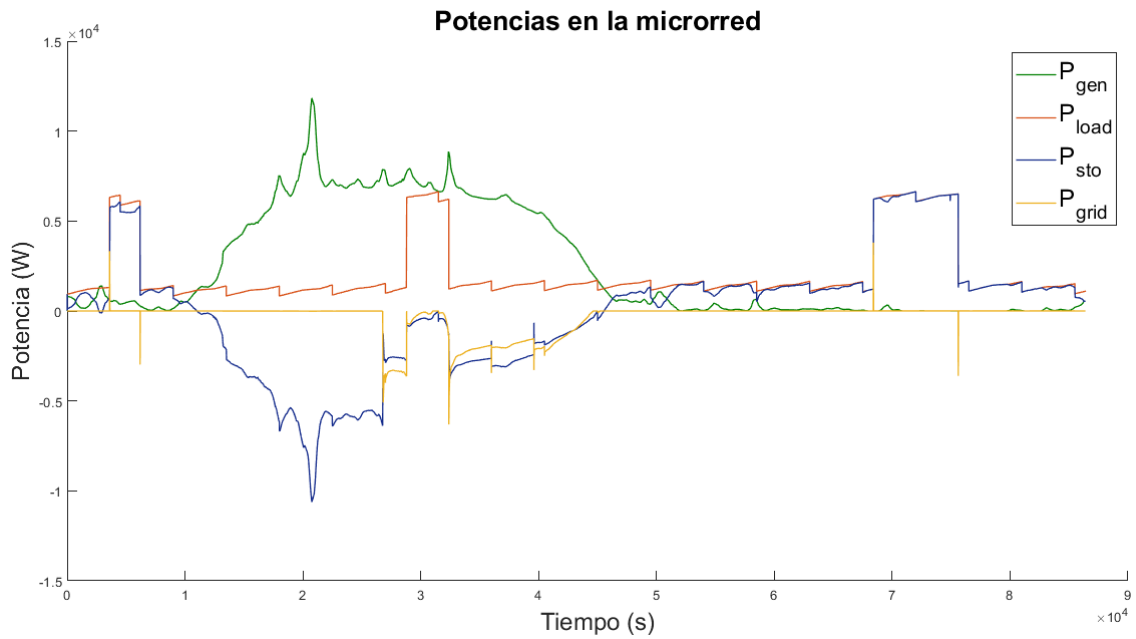


Figura 7.14 Potencias en la microrred en día nublado y con carga inicial media.

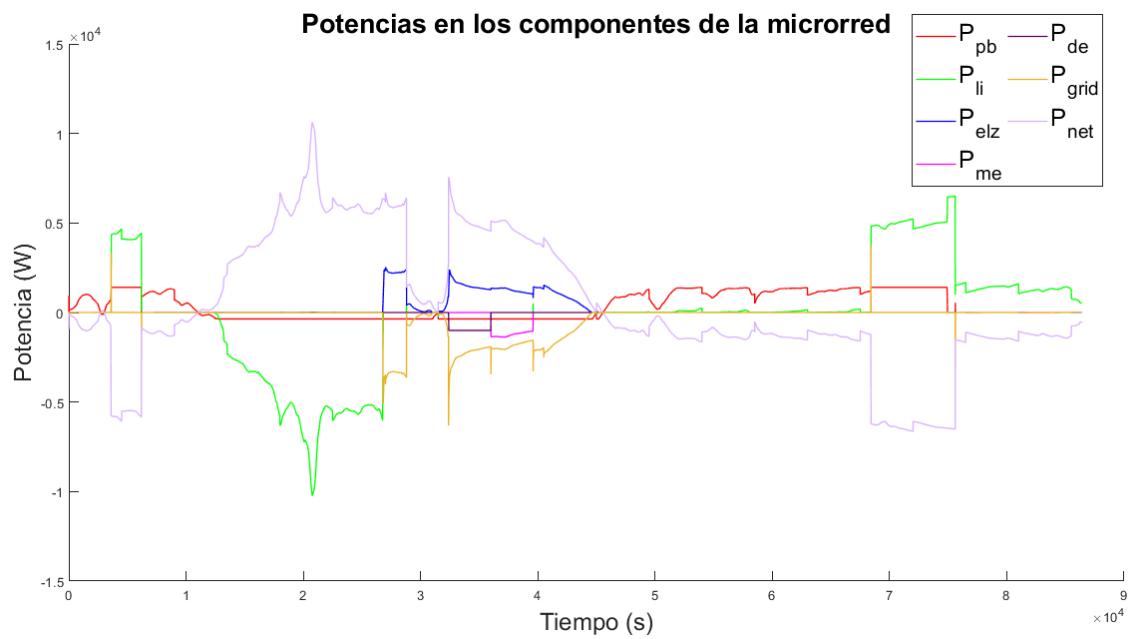


Figura 7.15 Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial media.

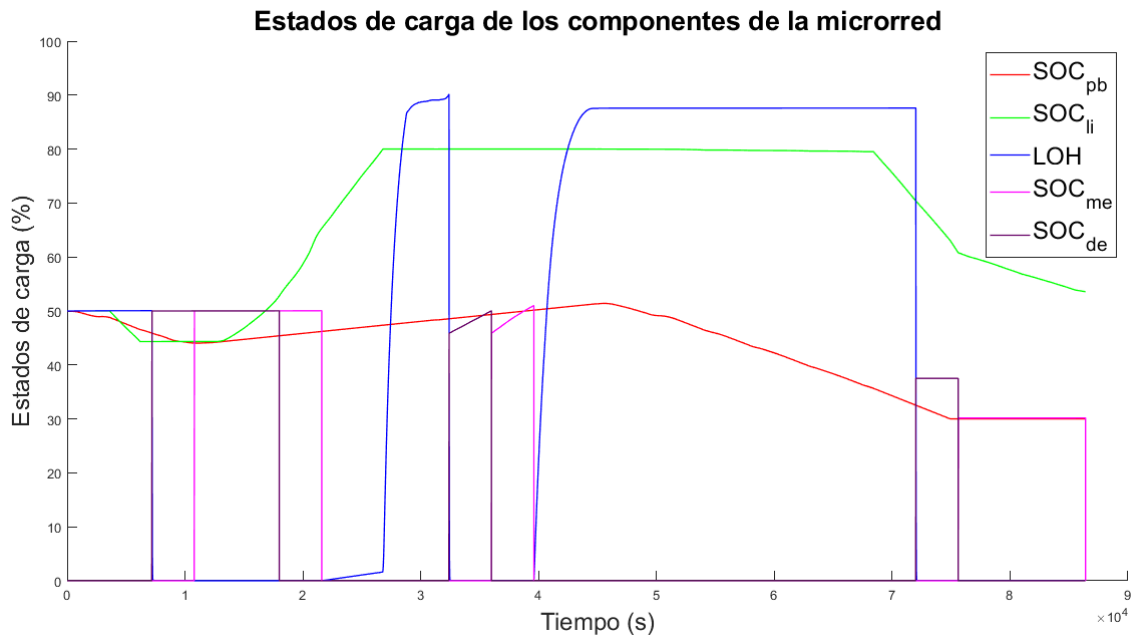


Figura 7.16 Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial media.

7.5 Simulación en Día Nublado con Baterías Cargadas

Al igual que en el caso de un día despejado, el funcionamiento de la microrred se complica cuando las baterías comienzan cargadas. Aun así, el control es capaz de gestionar la energía de manera que la batería de plomo, cuya carga es más lenta y el electrolizador, que se descarga en cuanto aparecen los vehículos híbridos, hagan frente a la generación en la medida de lo posible.

Esta simulación se ha realizado bajo las siguientes condiciones:

- Perfil de generación solar: día soleado.
- Estado de carga inicial de la batería de plomo: 75%.
- Estado de carga inicial de la batería de litio: 70%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Melex: 82%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Delfín: 80%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Nissan: 85%.
- Nivel de hidrógeno inicial: 90%.

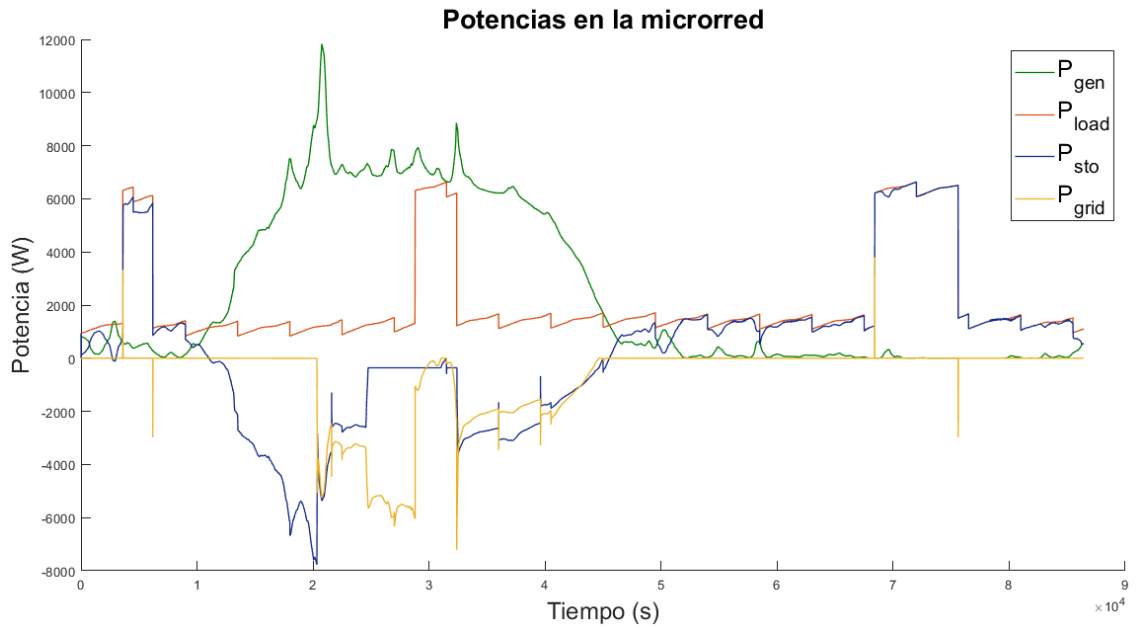


Figura 7.17 Potencias en la microrred en día nublado y con carga inicial alta.

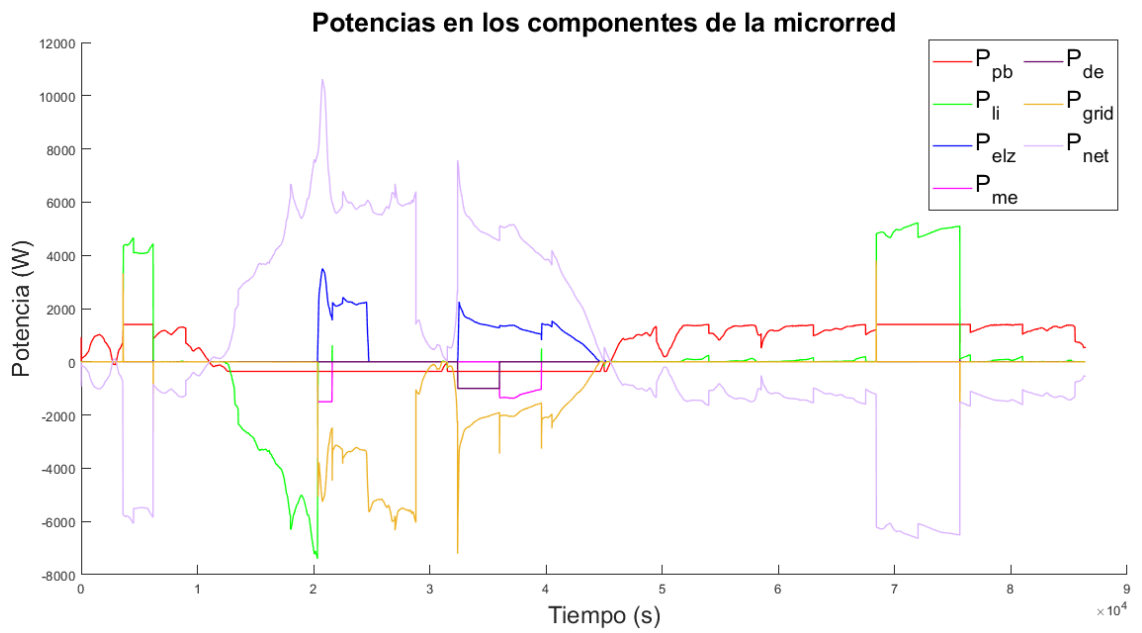


Figura 7.18 Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial alta.

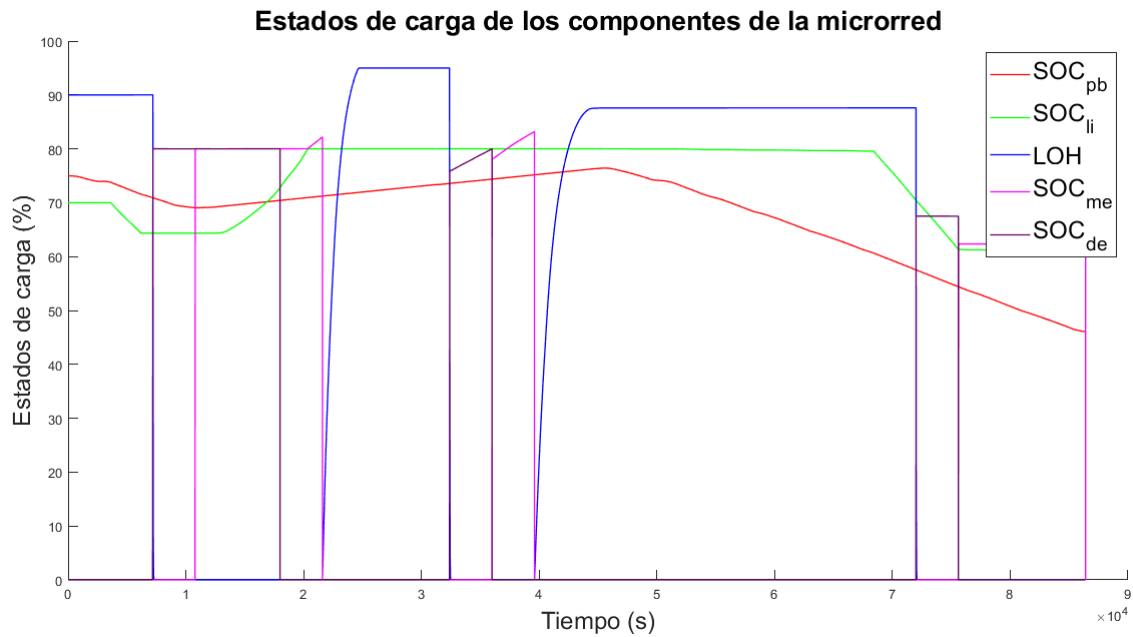


Figura 7.19 Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial alta.

7.6 Simulación en Día Nublado con Baterías Descargadas

Finalmente, se muestra la operación de la microrred en otro de los casos extremos: generación más baja y menor estado de carga inicial en las baterías. Esta situación permite una mayor independencia de la microrred respecto a la red eléctrica y un mayor aprovechamiento de las unidades de almacenamiento. Esta simulación se ha realizado bajo las siguientes condiciones:

- Perfil de generación solar: día soleado.
- Estado de carga inicial de la batería de plomo: 35%.
- Estado de carga inicial de la batería de litio: 40%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Melex: 25%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Delfín: 20%.
- Estado de carga inicial de la batería del vehículo Nissan: 30%.
- Nivel de hidrógeno inicial: 30%.

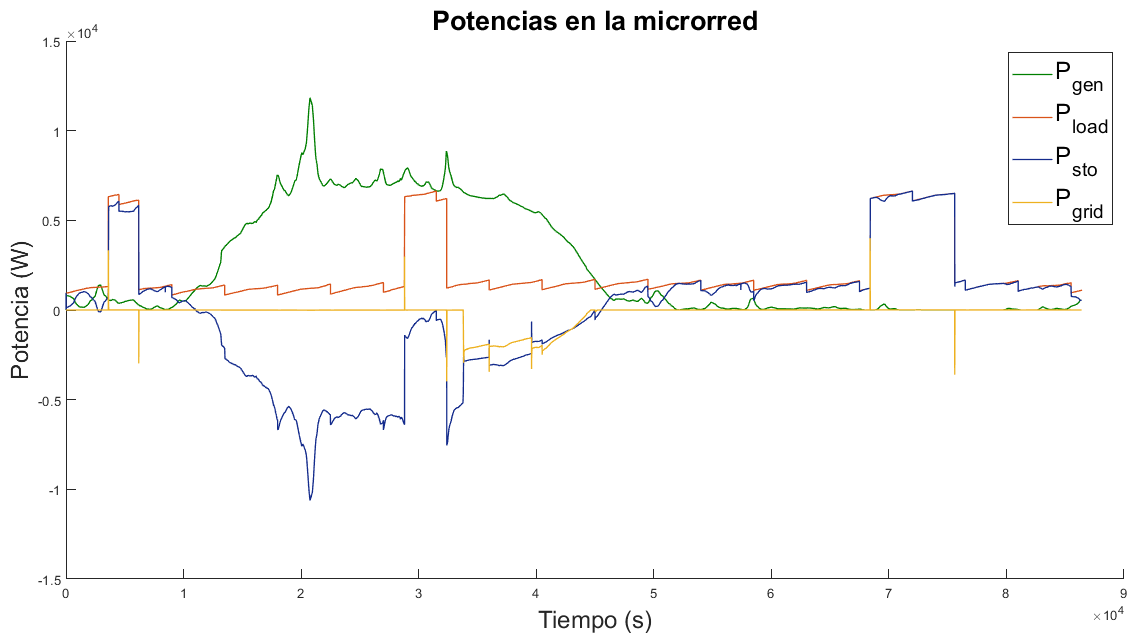


Figura 7.20 Potencias en la microrred en día nublado y con carga inicial baja.

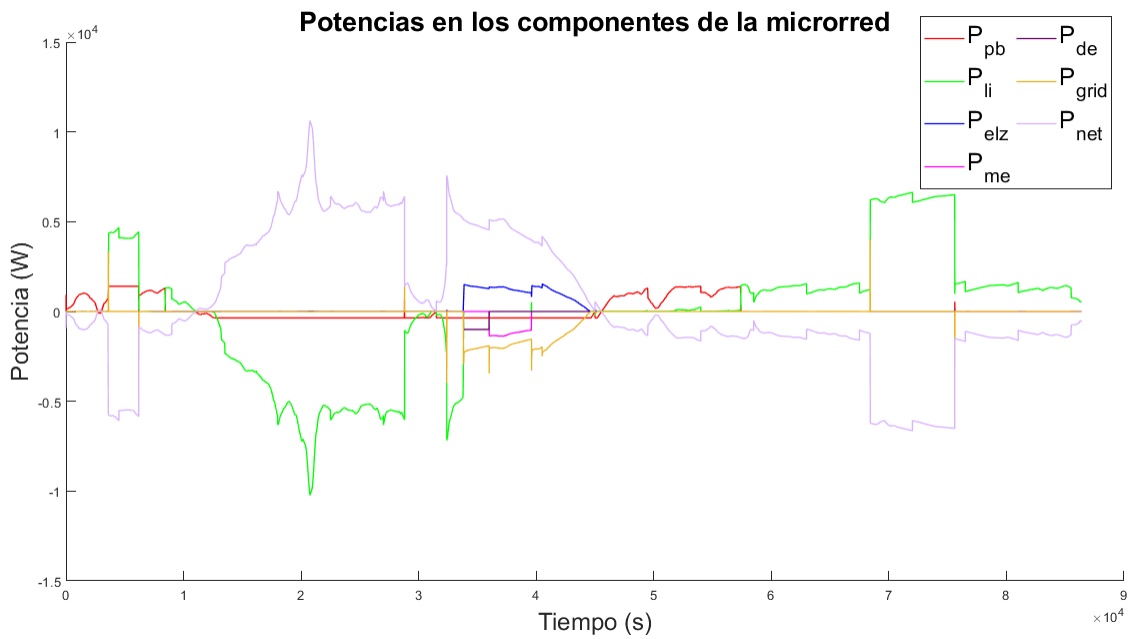


Figura 7.21 Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja.

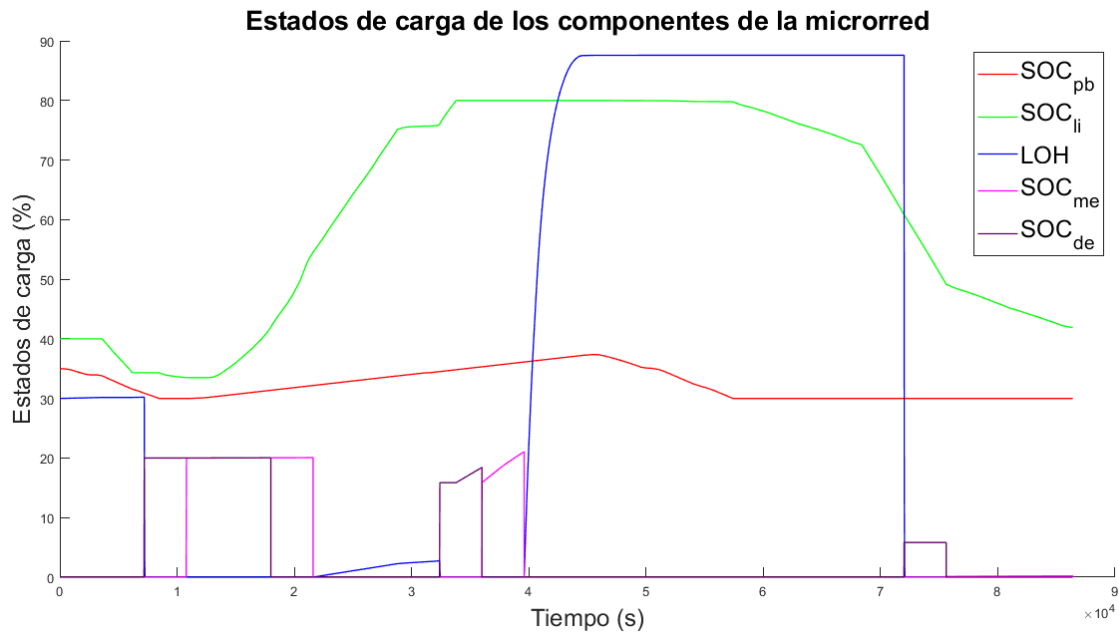


Figura 7.22 Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja.

Puesto que la generación total supera a la demanda, en ningún caso ha sido necesario absorber potencia de las baterías de los vehículos híbridos. Se ha realizado una última prueba aumentando el número de horas en las que el vehículo híbrido se encuentra consumiendo potencia, haciendo que aumente el déficit y las baterías se descarguen más rápido. El controlador ha sido capaz de retomar la utilización de la batería de plomo hasta alcanzar el nuevo valor límite (Figura 7.23 y Figura 7.24).

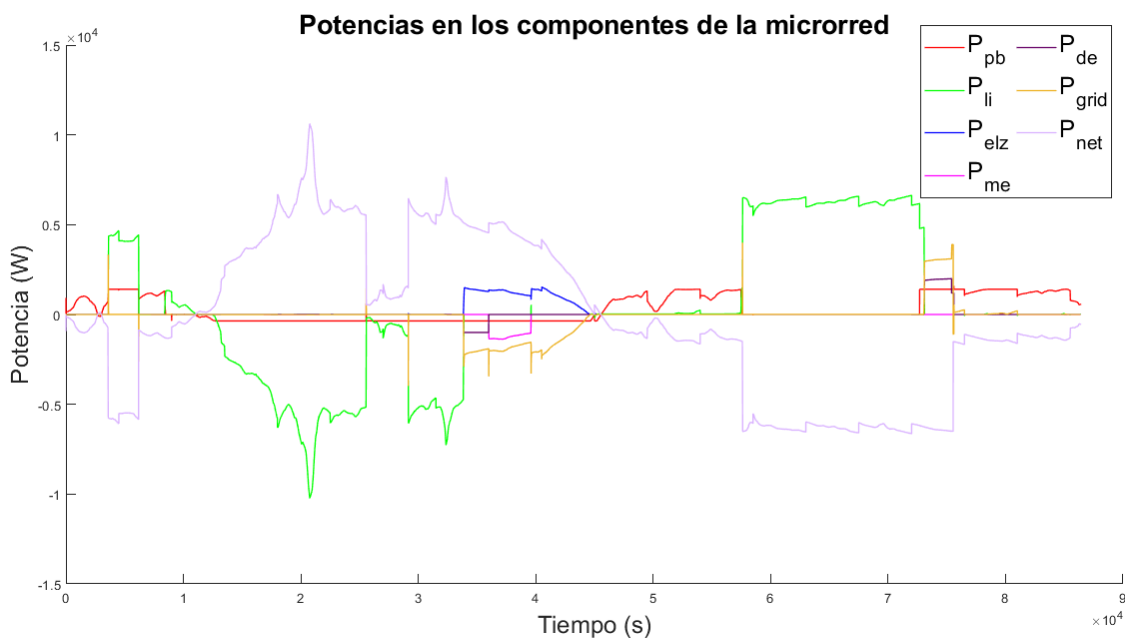


Figura 7.23 Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja aumentando el consumo del vehículo eléctrico.

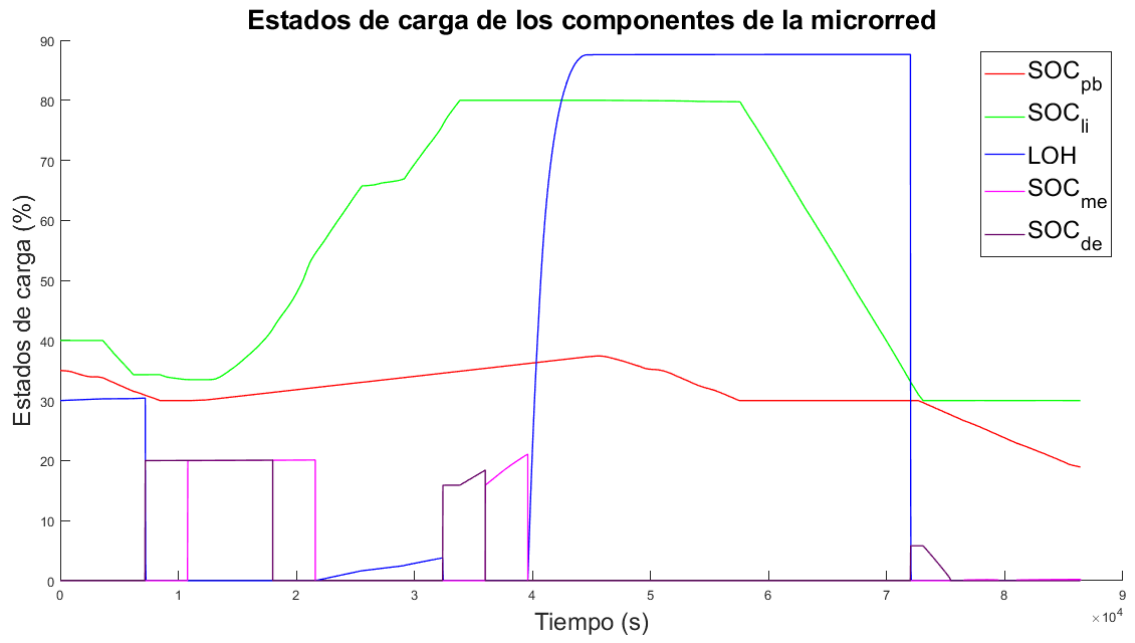


Figura 7.24 Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja aumentando el consumo del vehículo eléctrico.

8 Conclusiones y Desarrollo Futuro

En capítulos anteriores se ha descrito un algoritmo para gestionar el intercambio energético entre los diferentes componentes de una microrred experimental mediante Control Predictivo Basado en Modelo (MPC). A continuación, se mostrarán las conclusiones obtenidas tras la evaluación del controlador implementado y se propondrá una posible mejora como línea de desarrollo futuro.

8.1 Comportamiento

Los resultados obtenidos evidencian el buen funcionamiento del control predictivo a la hora de seguir una determinada estrategia de control como es en este caso un orden concreto en el uso de los diferentes componentes de la microrred. El controlador es capaz de satisfacer la demanda en todo momento y predecir el estado futuro para así enviar las señales de control óptimas.

En el capítulo Capítulo 4 se realizó una clasificación de los métodos de control empleados en microrredes, distinguiendo entre métodos heurísticos y métodos basados en optimización. En la Figura 8.1 se muestra el resultado de aplicar un control heurístico convencional a un electrolizador. Se observa como el electrolizador absorbe potencia a una tasa determinada hasta que su nivel de hidrógeno llega al máximo. En este momento, la potencia debe disminuir drásticamente hasta llegar a cero provocando daños en el componente. El MPC, tal como se ha podido comprobar en las simulaciones realizadas, permite realizar un control en la variación de potencia en cada instante, evitando llegar a niveles muy altos que no permitan una disminución segura para los equipos.

Otra gran ventaja de este método de control es la posibilidad de incorporar un elevado número de restricciones, algo que no es posible en la mayoría de técnicas convencionales. El algoritmo implementado cuenta con un total de once restricciones, teniendo en cuenta el modelo de la microrred, y los resultados son favorables, lo que permite incremento en la vida útil de los equipos y un mayor beneficio económico.

8.2 Desarrollo Futuro

Para controlar la microrred se ha utilizado un modelo lineal de cada uno de sus componentes debido a que el uso de modelos no lineales complica el control en exceso, pero es inevitable la existencia de una serie de variables discontinuas que han llevado a la necesidad de utilizar varios modelos a lo largo de la operación.

Una posible mejora en el control puede darse mediante el uso de un solo modelo con variables binarias ya que, aunque los resultados han sido favorables, ha sido necesario realizar un control de error en los instantes

de conexión y desconexión de los vehículos. Otra posible línea de investigación consiste en una gestión que realice estas transiciones de manera gradual, otorgando prioridad al vehículo que pretenda ser desconectado e impidiendo que esto ocurra hasta que su potencia no se haya anulado.

Por otro lado, cabe destacar que no se ha realizado ningún control en el circuito de hidrógeno, más que el de impedir que los vehículos traten de consumir cuando el depósito está vacío. El tratamiento del consumo de hidrógeno como una variable de control en lugar de como una perturbación en el sistema permitiría un mejor control del electrolizador y evitaría el completo vaciado del depósito.

Otro posible desarrollo futuro sería la incorporación de una señal de precio combinada con una nueva estructura de control en la que el objetivo sea permitir la autonomía de los vehículos híbridos optimizando el beneficio económico.

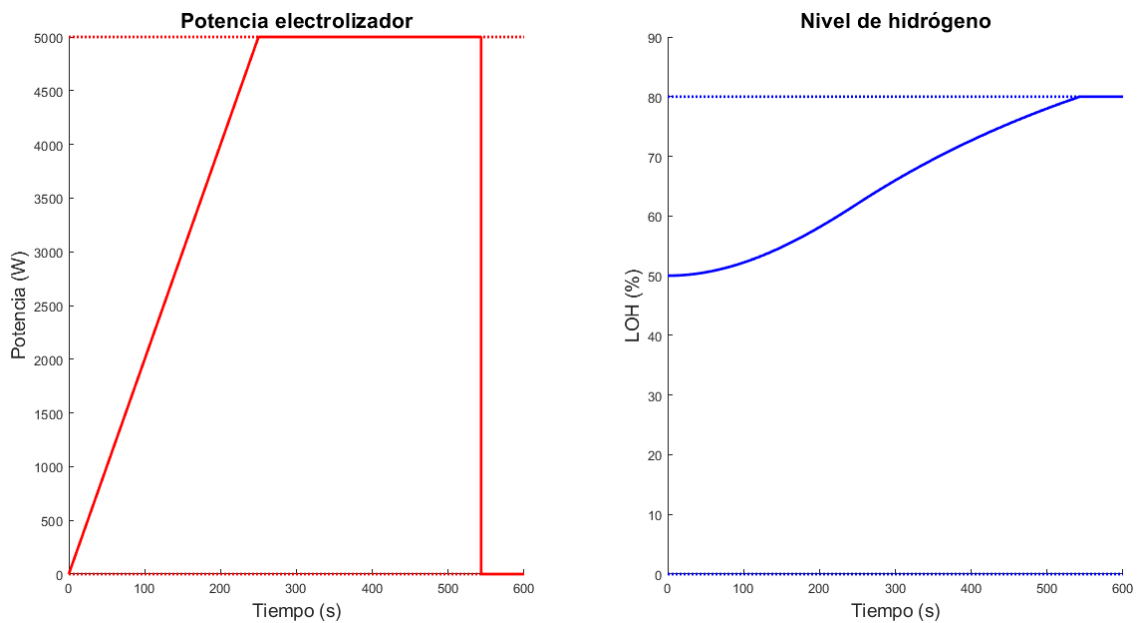


Figura 8.1 Control convencional de un electrolizador.

Índice de Figuras

2.1	Sistema de energía eléctrica. Elaborada a partir de imágenes de [3]	6
2.2	Modelos de energía centralizado y distribuido. Elaborada a partir de imágenes de [3] y [5]	6
2.3	Esquema de una microrred. Elaborada a partir de imágenes de [3] y [5]	7
2.4	Estrategias de control centralizada, descentralizada y distribuida	10
3.1	Esquema conceptual de la microrred. Fuente: INTA	12
3.2	Vista aérea de la microrred. Fuente: INTA	12
3.3	Campos fotovoltaicos. Fuente: INTA	13
3.4	Aerogenerador. Fuente: INTA	14
3.5	Fuente de alimentación. Fuente: INTA	15
3.6	Baterías de plomo - ácido. Fuente: INTA	15
3.7	Baterías de ion litio. Fuente: INTA	16
3.8	Electrolizador y depósito de hidrógeno. Fuente: INTA	16
3.9	Carga electrónica programable. Fuente: INTA	17
3.10	Vehículos híbridos Melex y Delfín. Fuente: INTA	18
3.11	Vehículo eléctrico Nissan. Fuente: INTA	18
3.12	Estrategia de gestión de la energía	19
4.1	Control por Banda de Histéresis	22
4.2	Esquema del Control por Lógica Difusa	22
4.3	Optimización por Enjambres de Partículas	24
4.4	Estructura de una red neuronal <i>fully-connected</i>	25
4.5	Estructura del Control Predictivo Basado en Modelo	26
4.6	Esquema de Control del MPC. Fuente: [15]	26
4.7	Estrategia del Control Predictivo Basado en Modelo. Fuente: [15]	27
5.1	Flujo de potencias en la microrred	32
6.1	Algoritmo del controlador implementado	43
6.2	Algoritmo que constituye la definición del modelo del sistema	45
7.1	Modelo de la microrred	49
7.2	Modelo de la microrred con controlador	50
7.3	Entrada y salida de los vehículos en la microrred	51
7.4	Potencias en la microrred en día soleado y con carga inicial media	52
7.5	Potencias en los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial media	52
7.6	Estados de carga de los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial media	53
7.7	Variación de potencia en una conexión del vehículo eléctrico	53
7.8	Potencias en la microrred en día soleado y con carga inicial alta	54
7.9	Potencias en los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial alta	55
7.10	Estados de carga de los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial alta	55

7.11	Potencias en la microrred en día soleado y con carga inicial baja	56
7.12	Potencias en los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial baja	57
7.13	Estados de carga de los componentes de la microrred en día soleado y con carga inicial baja	57
7.14	Potencias en la microrred en día nublado y con carga inicial media	58
7.15	Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial media	58
7.16	Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial media	59
7.17	Potencias en la microrred en día nublado y con carga inicial alta	60
7.18	Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial alta	60
7.19	Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial alta	61
7.20	Potencias en la microrred en día nublado y con carga inicial baja	62
7.21	Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja	62
7.22	Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja	63
7.23	Potencias en los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja aumentando el consumo del vehículo eléctrico	63
7.24	Estados de carga de los componentes de la microrred en día nublado y con carga inicial baja aumentando el consumo del vehículo eléctrico	64
8.1	Control convencional de un electrolizador	66

Bibliografía

- [1] *CEDEA*, <http://www.inta.es/WEB/INTA/es/quienes-somos/historia/el-arenosillo/>.
- [2] *INTA*, <http://www.inta.es/WEB/INTA/es/>.
- [3] *Macrovector / freepik*, <https://www.freepik.com/macrovector>.
- [4] *MathWorks*, <https://www.mathworks.com/>.
- [5] *Vectorpocket / freepik*, <https://www.freepik.com/vectorpocket>.
- [6] *Ieee guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems*, 2011.
- [7] *Microgrid institute*, April 2014, <http://www.microgridinstitute.org>.
- [8] Nima Amjady, Farshid Keynia, and Hamidreza Zareipour, *Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy*, *IEEE Transactions on smart grid* **1** (2010), no. 3, 286–294.
- [9] C Dennis Barley, C Byron Winn, Larry Flowers, and H James Green, *Optimal control of remote hybrid power systems. part 1: Simplified model*, Tech. report, National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States), 1995.
- [10] Belén Melián Batista and Fred Glover, *Introducción a la búsqueda tabu*, vol **3** (2006), 1–36.
- [11] Alberto Bemporad and Manfred Morari, *Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints*, *Automatica* **35** (1999), no. 3, 407–427.
- [12] Alberto Bemporad and Panagiotis Patrinos, *Simple and certifiable quadratic programming algorithms for embedded linear model predictive control*, *IFAC Proceedings Volumes* **45** (2012), no. 17, 14–20.
- [13] Dimitri P Bertsekas, *Dynamic programming and optimal control 3rd edition, volume ii*, Belmont, MA: Athena Scientific (2011).
- [14] Carlos. Bordons, Félix Garcia-Torres, and Miguel Ridao, *Model predictive control of microgrids*, Springer, 2019.
- [15] Eduardo F. Camacho, *Model predictive control*, 2nd ed. ed., Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer London, London, 2007.

- [16] Eduardo F Camacho and Carlos Bordons, *Control predictivo: Pasado, presente y futuro*, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial **1** (2010), no. 3, 5–28.
- [17] Enrico De Santis, Antonello Rizzi, and Alireza Sadeghian, *A hierarchical genetic optimization of a fuzzy logic system for flow control in micro grids*, arXiv preprint arXiv:1604.04789 (2016).
- [18] Darryl DeHaan and Martin Guay, *Robust adaptive model predictive control of nonlinear systems*, Model Predictive Control, IntechOpen, 2010.
- [19] Florian Dörfler, John W Simpson-Porco, and Francesco Bullo, *Breaking the hierarchy: Distributed control and economic optimality in microgrids*, IEEE Transactions on Control of Network Systems **3** (2015), no. 3, 241–253.
- [20] Rodolfo Dufo-Lopez, José L Bernal-Agustín, and Javier Contreras, *Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage*, Renewable energy **32** (2007), no. 7, 1102–1126.
- [21] Carlos E Garcia, David M Prett, and Manfred Morari, *Model predictive control: theory and practice—a survey*, Automatica **25** (1989), no. 3, 335–348.
- [22] Fred Glover and Harvey J Greenberg, *New approaches for heuristic search: A bilateral linkage with artificial intelligence*, European Journal of Operational Research **39** (1989), no. 2, 119–130.
- [23] Fred Glover and Manuel Laguna, *Tabu search: effective strategies for hard problems in analytics and computational science*, Handbook of Combinatorial Optimization, **21** (2013), 3261–3362.
- [24] Nelson González, Carlos Cusguén, Eduardo Mojica-Nava, and Andrés Pavas, *Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales*, Revista UIS Ingenierías **16** (2017), no. 2, 93–104.
- [25] Nikos Hatziargyriou, *Microgrids: architectures and control*, John Wiley & Sons, 2014.
- [26] Linh Huynh, John Kececioglu, Matthias Köppe, and Ilias Tagkopoulos, *Automatic design of synthetic gene circuits through mixed integer non-linear programming*, PloS one **7** (2012), no. 4, e35529.
- [27] Dimitris Ipsakis, Spyros Voutetakis, Panos Seferlis, Fotis Stergiopoulos, Simira Papadopoulou, and Costas Elmasides, *The effect of the hysteresis band on power management strategies in a stand-alone power system*, Energy **33** (2008), no. 10, 1537–1550.
- [28] James Kennedy, *The particle swarm: social adaptation of knowledge*, Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'97), IEEE, 1997, pp. 303–308.
- [29] Jaehong Kim, Josep M Guerrero, Pedro Rodriguez, Remus Teodorescu, and Kwanghee Nam, *Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible ac microgrid*, IEEE Transactions on power electronics **26** (2010), no. 3, 689–701.
- [30] P Giridhar Kini and Ramesh C Bansal, *Energy efficiency in industrial utilities*, Energy Management Systems (2011), 1.
- [31] Robert H Lasseter and Paolo Piagi, *Microgrid: A conceptual solution*, IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 6, Citeseer, 2004, pp. 4285–4291.
- [32] David G Luenberger, Yinyu Ye, et al., *Linear and nonlinear programming*, vol. 2, Springer, 1984.
- [33] José M Maestre, Rudy R Negenborn, et al., *Distributed model predictive control made easy*, vol. 69, Springer, 2014.

- [34] Ebrahim H Mamdani and Sedrak Assilian, *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*, International journal of man-machine studies **7** (1975), no. 1, 1–13.
- [35] Ricardo David Medina, *Microrredes basadas en electrónica de potencia: características, operación y estabilidad*, Ingenius (2014), no. 12, 15–23.
- [36] Paulo RC Mendes, Jose M Maestre, Carlos Bordons, and Julio E Normey-Rico, *A practical approach for hybrid distributed mpc*, Journal of process Control **55** (2017), 30–41.
- [37] Daniel E Olivares, Claudio A Cañizares, and Mehrdad Kazerani, *A centralized optimal energy management system for microgrids*, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [38] Akomeno Omu, Ruchi Choudhary, and Adam Boies, *Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming*, Energy Policy **61** (2013), 249–266.
- [39] Yutaka Ota, Haruhito Taniguchi, Tatsuhito Nakajima, Kithsiri M Liyanage, Jumpei Baba, and Akihiko Yokoyama, *Autonomous distributed v2g (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging*, IEEE Transactions on Smart Grid **3** (2011), no. 1, 559–564.
- [40] Sina Parhizi, Hossein Lotfi, Amin Khodaei, and Shay Bahramirad, *State of the art in research on microgrids: A review*, Ieee Access **3** (2015), 890–925.
- [41] Alessandra Parisio, Evangelos Rikos, and Luigi Glielmo, *A model predictive control approach to microgrid operation optimization*, IEEE Transactions on Control Systems Technology **22** (2014), no. 5, 1813–1827.
- [42] Motahareh Pourbehzadi, Taher Niknam, Jamshid Aghaei, Geev Mokryani, Miadreza Shafie-khah, and Jo ao P.S. Catálo, *Optimal operation of hybrid ac/dc microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems **109** (2019), 139 – 159.
- [43] Mahmoud Saleh, Yusef Esa, and Ahmed A Mohamed, *Communication-based control for dc microgrids*, IEEE Transactions on Smart Grid **10** (2018), no. 2, 2180–2195.
- [44] Alexander Shapiro, Darinka Dentcheva, and Andrzej Ruszczyński, *Lectures on stochastic programming: modeling and theory*, SIAM, 2009.
- [45] Manuel E Gamez Urias, Edgar N Sanchez, and Luis J Ricalde, *Electrical microgrid optimization via a new recurrent neural network*, IEEE Systems Journal **9** (2014), no. 3, 945–953.
- [46] L Valverde, F Rosa, AJ Del Real, A Arce, and C Bordons, *Modeling, simulation and experimental set-up of a renewable hydrogen-based domestic microgrid*, international journal of hydrogen energy **38** (2013), no. 27, 11672–11684.
- [47] Jonas Witt and Herbert Werner, *Approximate model predictive control for nonlinear multivariable systems*, Model Predictive Control, IntechOpen, 2010.
- [48] Carmen Wouters, *Towards a regulatory framework for microgrids—the singapore experience*, Sustainable Cities and Society **15** (2015), 22–32.
- [49] Xinghuo Yu, Carlo Cecati, Tharam Dillon, and M Godoy Simoes, *The new frontier of smart grids*, IEEE Industrial Electronics Magazine **5** (2011), no. 3, 49–63.
- [50] Lotfi A Zadeh, *Fuzzy logic= computing with words*, Computing with Words in Information/Intelligent Systems 1, Springer, 1999, pp. 3–23.

Glosario

ANN *Artificial Neural Network*. 24, 25

CEDEA Centro de Experimentación de El Arenosillo. 2, 11, 31

CPBM Control Preditivo Basado en Modelo. 2, 3, 13, 21, 25, 26, 31, 65

DP *Dynamic Programming*. 23

EMS *Energy Management System*. 21

ETP *European Technology Platform*. 7

FLC *Fuzzy Logic Control*. 21, 22

GA *Genetic Algorithm*. 24

HBC *Hysteresis Band Control*. 21

INTA Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. 2, 11

LOH *Level Of Hydrogen*. 19, 51

LP *Linear Programming*. 23

MILP *Mixed Integer Linear Programming*. 23

MINLP *Mixed Integer Nonlinear Programming*. 23

MIQP *Mixed Integer Quadratic Programming*. 23

MPC *Model Predictive Control*. VIII, X, 1, 2, 21, 25–27, 29, 65

NLP *Nonlinear Programming*. 23

PSO *Particle Swarm Optimization*. 24

QP *Quadratic Programming*. 23

REE Red Eléctrica de España. 5, 17

SG *Smart Grid*. 7

SOC *State of Charge*. 17, 19, 21, 45, 46, 54

SP *Stochastic Programming*. 23

TS *Tabu Search*. 24

V2G *Vehicle To Grid*. 17