

Universidad
LOYOLA

Departamento de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad Loyola Andalucía

Trabajo Final de Grado

Optimización del Despacho Económico de una microrred

Pablo Vázquez Zamudio
pvazquezzamudio@al.uloyola.es

Dirección:

D. Lázaro Alvarado Barrios

Junio 2020

Agradecimientos

*A la Universidad Loyola Andalucía,
por las oportunidades que me ha brindado
y el crecimiento adquirido, tanto
en el plano académico como en el personal.*

*A mis compañeros, que han contribuido
en mi crecimiento personal y académico,
y haber sido un gran apoyo durante estos años.*

*A Lázaro, mi tutor, que ha favorecido y
contribuido al desarrollo del trabajo, así como
a la adquisición de nuevos conceptos.*

A mi familia, por todo el apoyo que me dan.

Abstract

The future of electricity grids is undergoing a major change in environmental, social, economic and technological concepts. Increasing the use of energy generation through renewable energy, developing the use of energy storage systems and climate change awareness means that microgrids are taking a crucial role in energy distribution and consumption.

Consequently, in this Final Thesis is modelled and optimized the Economic Dispatch of a microgrid, which is formed by dispatchable generation elements (diesel engine and microturbine), renewable generation elements (wind turbine and photovoltaic unit) and a battery-powered energy storage system to improve microgrid control.

An objective second-order function is proposed that relates power to fuel cost. Economic Dispatch is used to minimize microgrid operating costs. There are different linear constraints on the operation of the microgrid, related to the power limit generated, state of charge of the batteries and power balance.

Three optimizations of the economic office are performed, in which the initial and final state of charge of the batteries are varied. Different results are obtained in each simulation to achieve the minimum operating cost.

Keywords: optimization, microgrid, Economic Dispatch

Índice general

Agradecimientos	I
Abstract	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos	9
1.3. Estructura del Trabajo Fin de Grado	10
2. Microrredes	11
2.1. Introducción	11
2.2. Características de la microrred	11
2.3. Técnicas de optimización para la gestión de energía en la microrred	14
2.3.1. Programación dinámica:	17
2.3.2. Programación integrada:	18
2.3.3. Programación estocástica:	18
2.3.4. Programación no lineal:	19
2.3.5. Programación integrada mixta:	20
3. Aplicación del Despacho Económico a la microrred	23
3.1. Introducción	23
3.2. ¿Qué es el Unit Commitment y el Despacho Económico?	23
3.3. Descripción del problema	25
3.4. Estructura y elementos de la microrred	28
3.4.1. Fuentes de energía renovable	29
3.4.2. Fuentes de energía convencional	32
3.4.3. Sistemas de almacenamiento de energía	34

4. Propuesta de caso de estudio	37
4.1. Introducción	37
4.2. Planteamiento del problema	37
4.3. Formulación matemática	38
4.3.1. Función objetivo	39
4.3.2. Restricciones	40
4.4. Estructura y datos de la microrred a estudiar	42
5. Simulación	47
5.1. Introducción	47
5.2. Casos de estudio	47
5.2.1. Influencia de las baterías en los casos de estudio	48
5.2.2. Influencia de los límites de generación en los casos de estudio	54
6. Conclusiones	63
6.1. Conclusiones generales	63
6.2. Limitaciones	64
6.3. Futuros trabajos	64
Bibliografía	67

Índice de figuras

1.1. Producción de energía renovable mundial en % (2018) [1]	3
1.2. Evolución de la producción de energía renovable [2]	4
1.3. Producción de energía renovable por países (2018) [1]	5
1.4. Evolución generación renovable/no renovable España [3]	6
1.5. Potencia instalada en España (2018) [3]	6
1.6. Potencia generada en España (2018) [3]	7
1.7. Ratio de potencia renovable/potencia total en España por Comuni- dades Autónomas (2018) [3]	8
2.1. Clasificación de las microrredes [4]	12
2.2. Clasificación de los tipos de sistemas de comunicación [4]	14
2.3. Control óptimo de microrredes	15
2.4. Métodos de optimización [5]	17
3.1. Microrred [6]	25
3.2. Unidades de la microrred [7]	29
3.3. Aplicación energía fotovoltaica	30
3.4. Aplicación energía eólica	31
3.5. Generador diésel	33
3.6. Elementos de una microturbina [8]	34
3.7. Sistema de almacenamiento de energía [9]	35
4.1. Modelado de la programación del despacho económico	38
4.2. Estructura de la microrred	43
4.3. Demanda, generación eólica y fotovoltaica	45
5.1. Evolución del sistema en el Caso 1	49
5.2. Evolución de las baterías en el Caso 1	49
5.3. Evolución del sistema en el Caso 2	50
5.4. Evolución de las baterías en el Caso 2	51
5.5. Evolución del sistema en el Caso 3	51

5.6. Evolución de las baterías en el Caso 3	52
5.7. Evolución del sistema en el Caso 4	55
5.8. Evolución de las baterías en el Caso 4	56
5.9. Evolución del sistema en el Caso 5	57
5.10. Evolución de las baterías en el Caso 5	57
5.11. Evolución del sistema en el Caso 6	58
5.12. Evolución de las baterías en el Caso 6	59

Índice de tablas

4.1. Potencias máximas y mínimas para cada unidad	44
4.2. Coeficientes de coste	44
4.3. Parámetros de las baterías	44
5.1. Casos de estudio	48
5.2. Casos de estudio	55
5.3. Coste total de operación de la microrred	60

Nomenclatura

Acrónimos

DE	Generador diésel
MT	Microturbina
WT	Turbina eólica
PV	Unidad fotovoltaica
BESS	Sistema de almacenamiento de energía por baterías
SOC	Estado de carga
UC	Unit Commitment

Índice

i	índice unidad
t	índice tiempo

Parámetros

a_i, b_i y c_i	Coefficientes de la función de coste
P_{max_i}	Capacidad máxima de generación de la unidad i
P_{min_i}	Capacidad mínima de generación de la unidad i
P_{max}^c	Ratio máximo de carga de las baterías en t
P_{max}^d	Ratio máximo de descarga de las baterías en t
SOC_{max}	Estado de carga máximo de las baterías
SOC_{min}	Estado de carga mínimo de las baterías
η_c	Eficiencia de carga de las baterías
η_d	Eficiencia de descarga de las baterías
P_t^d	Potencia demandada en t

Variables

$P_{i,t}$	Potencia generada por la unidad i en t
SOC_t	Estado de carga de las baterías en t

Capítulo 1

Introducción

El actual modelo de sociedad depende de un suministro seguro de energía. Es posible constatar una creciente preocupación por la existencia de energía primaria, así como por el envejecimiento de las infraestructuras de distribución y transmisión de energía que están causando problemas de fiabilidad, calidad y seguridad en el sistema de suministro de energía. Para solucionar estos inconvenientes se debe invertir grandes cantidades de dinero, por lo tanto la manera más eficiente de atajar el problema es la de encontrar soluciones alternativas e innovadoras relacionadas con la tecnología y la arquitectura de las redes [10].

El futuro de las redes eléctricas pasa por un gran cambio en los conceptos medioambientales, sociales, económicos y tecnológicos. Para garantizar la operación del sistema en un mercado abierto debe revisarse el concepto actual de red eléctrica y realizar cambios en términos de seguridad del sistema, calidad del suministro eléctrico, entorno ambiental, seguridad en las operaciones, coste de la energía y eficiencia del sistema [11].

En esta línea aparece el concepto de *smart grid*, que se define como una red eléctrica que puede integrar de manera inteligente las acciones requeridas de todos los usuarios conectados a ella, para garantizar de una manera eficiente la entrega segura, económica y sostenible de energía. Este tipo de red emplea un control, monitorización y comunicación inteligente del sistema [12]. El cambio actual se está realizando en el nivel de distribución de energía, tendiendo a convertirlos en sistemas inteligentes. A nivel de transporte de energía el sistema siempre se ha comportado de forma eficiente.

El modelo de distribución de energía está tendiendo a cambiar de un sistema

centralizado a un sistema descentralizado, esto permite que el sentido del flujo de energía sea bidireccional. Este formato de red eléctrica facilita la integración de energía renovables, generación distribuida, la integración de la demanda y los sistemas de almacenamiento de energía. Es también una oportunidad de integración de nuevas tecnologías y servicios. La función principal de los sistemas descentralizados es la de conectar de una manera eficiente los sistemas de generación con los consumidores finales de energía, permitiendo que se siga un modelo óptimo en tiempo real de distribución de energía [10].

La generación distribuida ofrece la posibilidad de acercar la fuente de energía al lugar donde va a ser consumida, esto permite obtener unas pérdidas menores de energía y reducir las limitaciones que se dan como resultado de un sistema de transmisión congestionado. En este aspecto juega un papel fundamental las fuentes de energía renovables, las cuales están aumentando su aparición en el sistema debido tanto a sus precios competitivos sobre las fuentes de energía convencionales como a la perspectiva social, ya que se consideran fuentes de energía que respetan el medioambiente y reducen las emisiones respecto a las fuentes de energía convencionales. Las microrredes pueden conectarse a la red o trabajar en modo isla, es aquí cuando cobra especial importancia la presencia de fuentes de energía renovable, ya que permiten el suministro de energía independiente. Aunque el principal inconveniente de estas fuentes es que son intermitentes, es decir, no producen energía de forma constante ya que dependen de las condiciones meteorológicas. Por lo tanto este es un factor a tener en cuenta cuando se realice el control de una microrred [13].

La descentralización del modelo de red eléctrica necesita de modificaciones en los conceptos de red, en esta línea surge el concepto de microrred, siendo quizás el modelo de red más prometedor. La microrred se puede definir como un sistema que comprende la distribución local de energía utilizando fuentes de energía distribuida, como puede ser la energía fotovoltaica, eólica, microturbinas, generadores diésel, etc, junto a los sistemas de almacenamiento de energía y las cargas. Estos sistemas pueden ser operados de forma independiente, si están desconectados de la red principal de suministro de energía, o centralizado, si están conectados a la red principal de suministro de energía. Si se coordinan de manera eficiente, las fuentes de energía en la microrred pueden aportar diferentes beneficios al sistema global [14].

Desde el punto de vista del operador de la red, la microrred puede verse como una carga en el sistema o como un elemento de generación, el cual da estabilidad al sistema y la posibilidad de rédito económico. Por otra parte, desde el punto de vista del consumidor final, la microrred proporciona un suministro de energía mientras que mejora la fiabilidad local, reduce las emisiones (debido a la integración de energías renovables), mejora la calidad del suministro energético y disminuye los costes del suministro de energía. Con lo cual la microrred puede verse como un elemento que participa en la generación y el consumo de energía, basándose en una compenetración entre los elementos de generación locales y las cargas locales [15].

La generación de energía renovable ha crecido notablemente en todo el mundo debido a aspectos socioeconómicos. Así, cabe destacar los diversos acuerdos para la reducción de la emisión de gases contaminantes. El consumo de carbón bajó un 3,6 % en 2019 respecto al crecimiento del 0,6 % que experimentó en 2018. Como se puede observar en la Fig. 1.1, a fecha de 2018 las energías renovables constituían un 26 % de la generación mundial de energía [1].



Figura 1.1: Producción de energía renovable mundial en % (2018) [1]

En la Fig. 1.2 se puede observar el aumento de generación de energía renovable en el mundo desde el 2000 hasta el 2015, pasando de aproximadamente 17% de la producción total al 23% en 2015, estando en 26% en 2018. Lo que muestra un crecimiento en este sector en términos de energía.

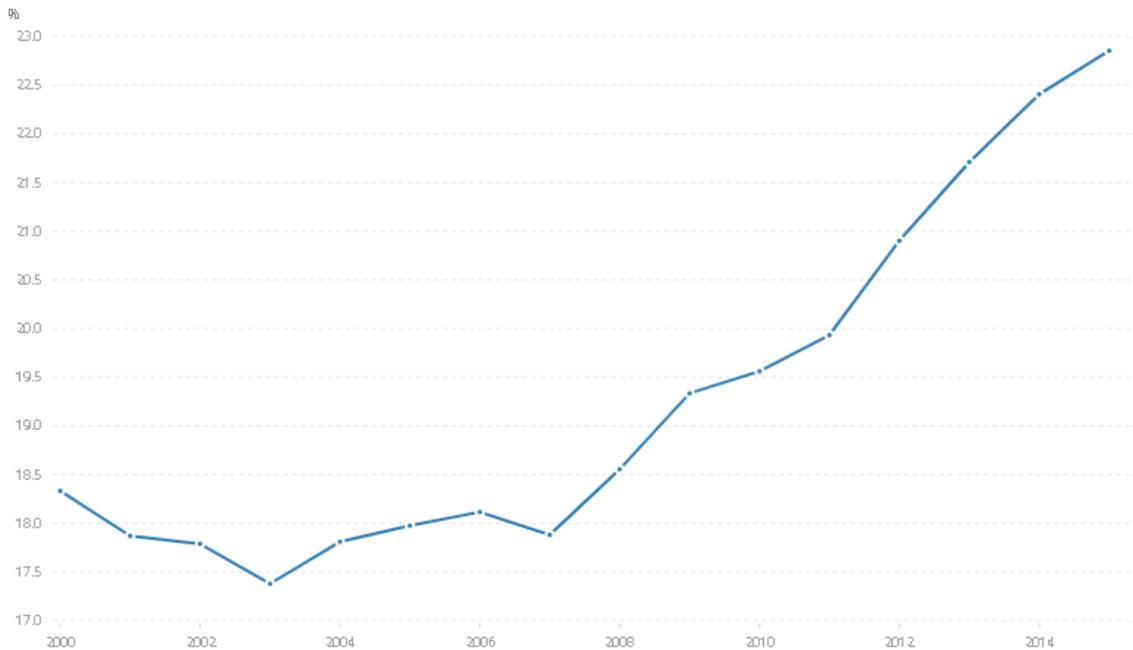


Figura 1.2: Evolución de la producción de energía renovable [2]

A continuación, se expone a nivel mundial el porcentaje que representa la producción de energía renovable respecto a la generación total de energía. Como se puede observar en la Fig. 1.3, existen países con una gran presencia de renovables representando casi el total de la producción. Noruega encabeza la lista de países con mayor producción de energía renovable con un 97,9%, seguida por Nueva Zelanda y Brasil con un 83,1% y 82,5% respectivamente.

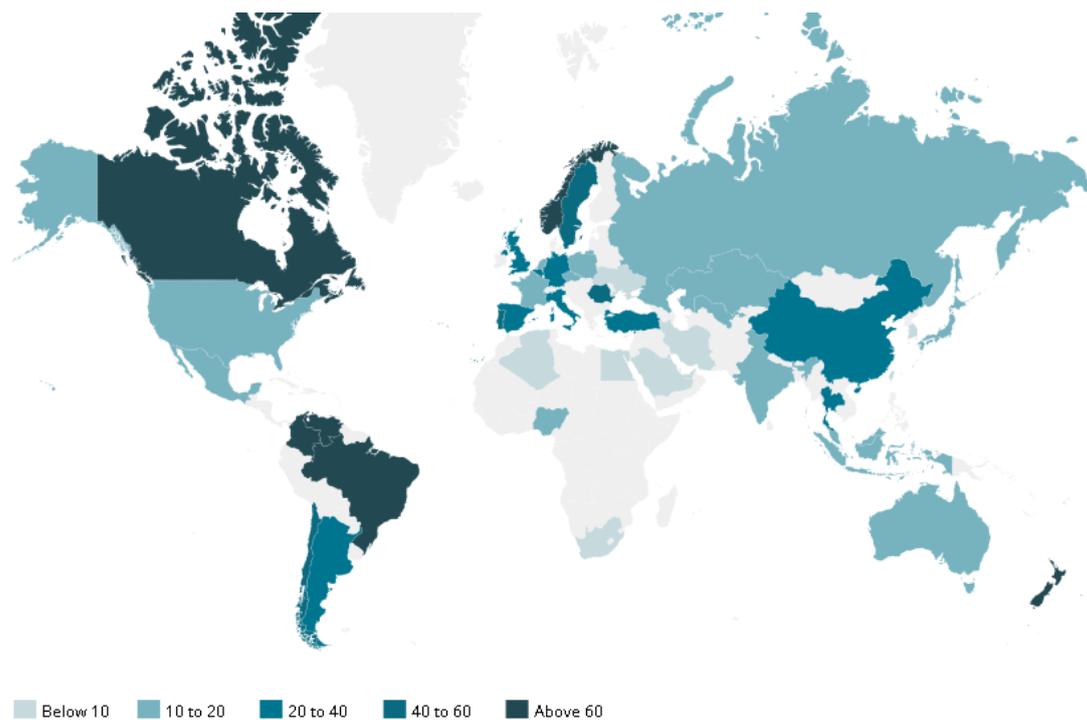


Figura 1.3: Producción de energía renovable por países (2018) [1]

El objetivo español es la reducción en un 40 % de las emisiones de efecto invernadero respecto a 1990 para el año 2030, para ello se plantea una estrategia de descarbonización para la próxima década. El uso de la electricidad y las energías renovables serán fundamentales para alcanzar este objetivo. El éxito de esta reducción se basará en la conexión de los recursos renovables, así como el almacenamiento y las interconexiones [3].

Así la evolución de las energías renovables desde el año 2009 ha sido positiva pasando de que un 26,4 % de la energía total producida fuese renovable a un 38,44 % en 2018, pudiéndose alcanzar como cifra más alta entorno al 45 % de la generación total en determinados días. En la Fig. 1.4 puede observarse cómo la generación de energía a partir de las tecnologías de generación no renovable han disminuido desde 2009, pasando del 73,6 % al 61,56 %.

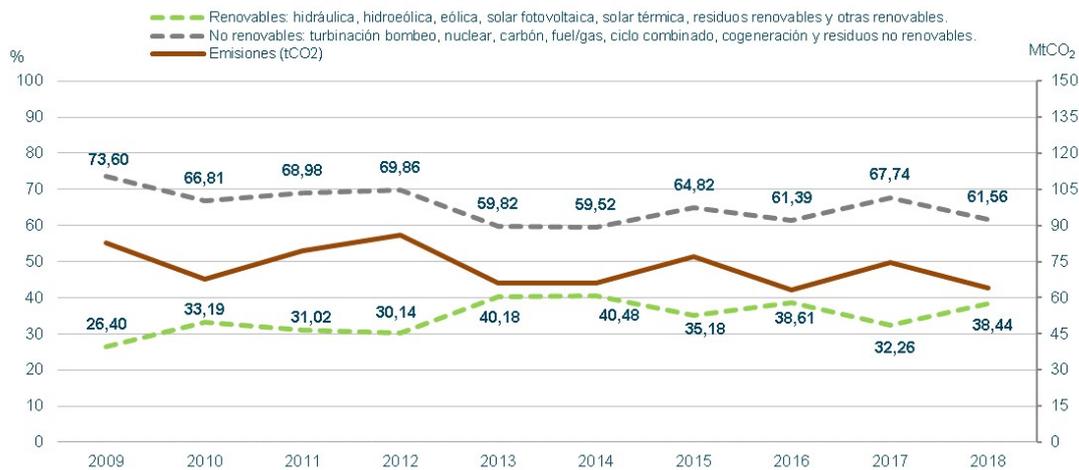


Figura 1.4: Evolución generación renovable/no renovable España [3]

A finales de 2018 se tenía una potencia instalada de energías renovables del 46,7 % de la potencia instalada total. Como se puede apreciar en la Fig. 1.5, la mayoría de la potencia instalada de energías renovables está constituida por la tecnología hidráulica y eólica, siendo una 16,4 % y 22,6 % respectivamente del total de potencia instalada.

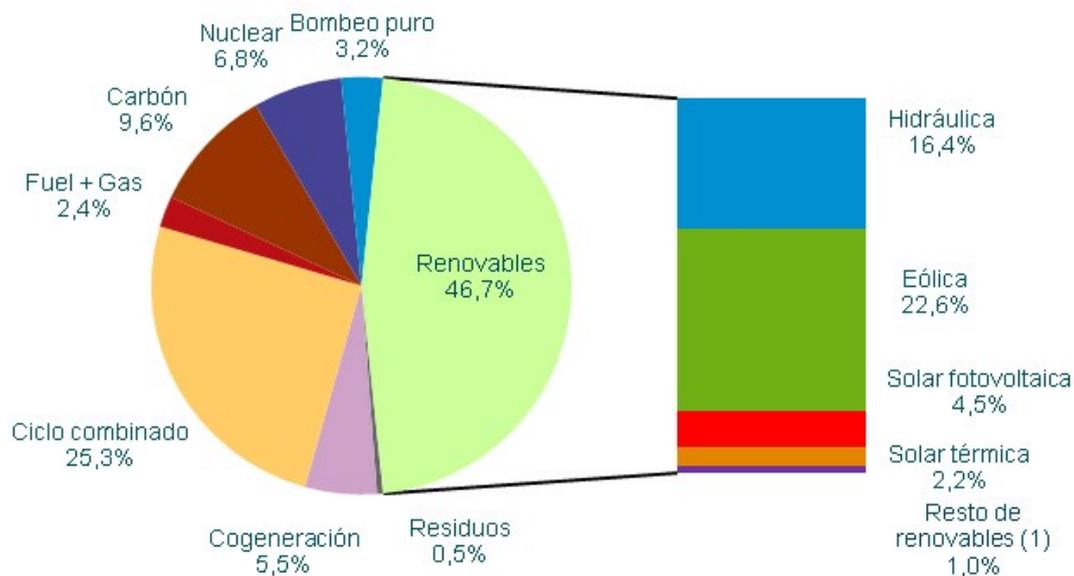


Figura 1.5: Potencia instalada en España (2018) [3]

En cuanto a la potencia generada el porcentaje de generación de energía renovable se ve disminuido respecto al total debido a las horas de funcionamiento, siendo las energías renovables una fuente dependiente de las condiciones meteorológicas. Existen plantas como las de energía nuclear que están en constante funcionamiento. Aún así, la generación de energía renovable representa el 38,4 % de la generación total de energía en 2018. Siendo también las tecnologías hidráulicas y eólica las que mayor porcentaje de generación ostentan entre las energías renovables respecto a la generación total de energía, con el 13,1 % y 19 % respectivamente.

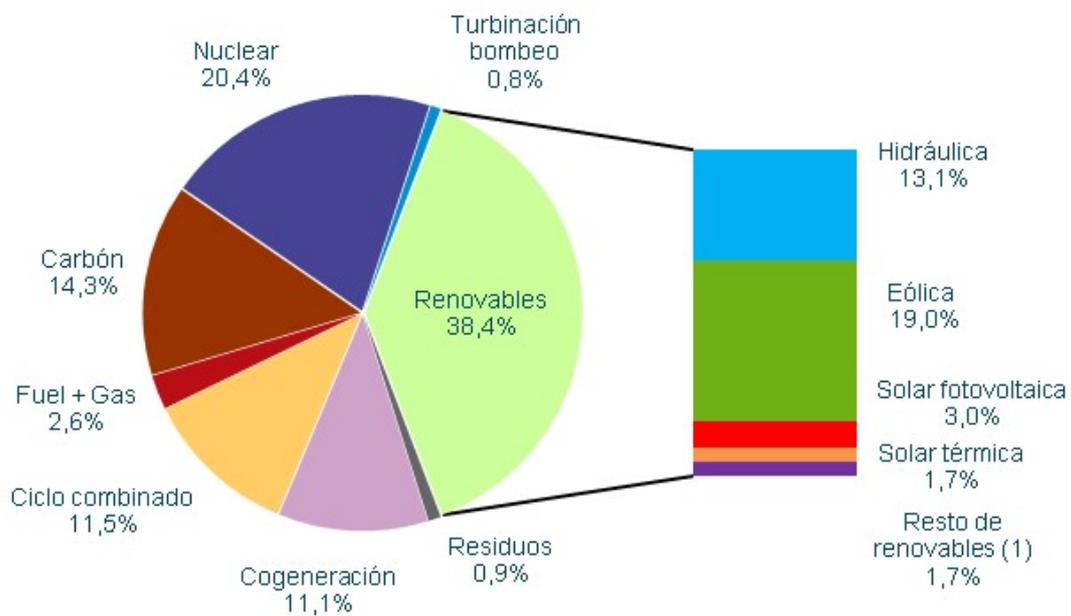


Figura 1.6: Potencia generada en España (2018) [3]

Respecto al ratio de potencia renovable/potencia en las Comunidades Autónomas españolas a finales de 2018, destaca Castilla y León con el 78 % de la energía total generada por tecnologías renovables, siendo la potencia renovable 10.350 MW. Seguidamente se encuentra Castilla-La Mancha con 72 % y 5.860 MW

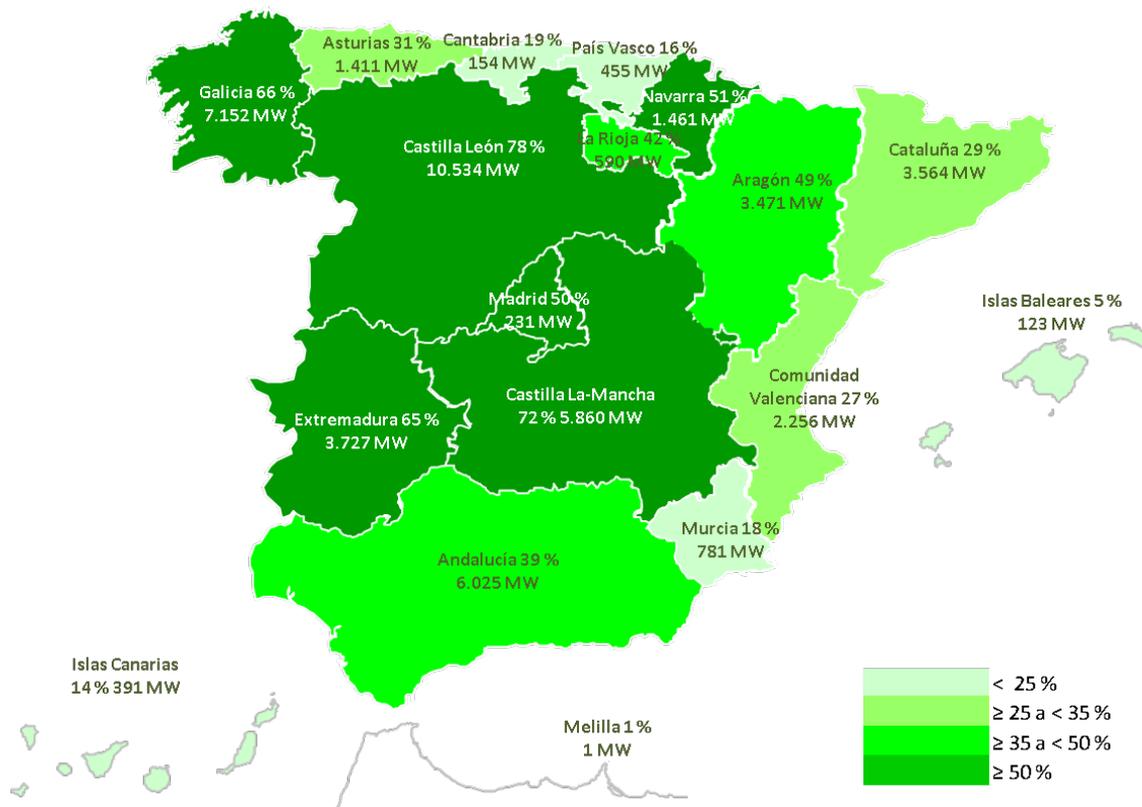


Figura 1.7: Ratio de potencia renovable/potencia total en España por Comunidades Autónomas (2018) [3]

Con lo anteriormente expuesto es inevitable la evolución del actual modelo de transporte y distribución de energía a sistemas descentralizados y con un mayor impacto de energías renovables. Esto debe ir ligado al objetivo de la reducción de emisiones de gases contaminantes producidos por energías no renovables y la optimización de la energía, así como el aumento de la eficiencia energética. El aumento de las energías renovables está ligado a la instalación de energías verdes y no contaminantes debido a los pactos alcanzados para la reducción de emisiones de CO₂, así como la reducción del precio de esta tecnología a medida que avanza la investigación en el campo de las energías renovables.

1.1. Motivación

La realización de este trabajo ha estado motivada por la transformación en la que está envuelta la red eléctrica global, en la que aparecen nuevas formas de percibir la red eléctrica dejando atrás el modelo tradicional. En esta línea aparece la microrred, concepto impulsado por el cambio y asociada a ella, existe la necesidad de impulsar estrategias de control de la operación de las mismas. Las principales razones son:

- El estudio de las diversas opciones y herramientas utilizadas para la optimización de la microrred.
- El control de la microrred basándose en la conexión y desconexión de las unidades de generación distribuida y de las cargas.
- La importancia de las unidades de almacenamiento de energía en el entorno de operación y control de la microrred.
- El estudio de diferentes objetivos a cumplir en el momento de plantear el control y operación de la microrred.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es proponer una metodología para lograr la gestión óptima de la energía en una microrred. De esta manera, se minimiza el consumo de combustible y así se contribuye a la reducción de emisiones contaminantes. Para ello, se proponen los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio del arte sobre gestión de energía en microrredes.
- Analizar y definir los modelos de las fuente de generación controlables, recursos de energía renovables y sistemas de almacenamiento de energía. Posteriormente, proponer un caso de estudio.
- Utilizar la herramienta de Despacho Económico para realizar la programación horaria de la microrred en un corto periodo de tiempo, 24 horas hacia delante.

1.3. Estructura del Trabajo Fin de Grado

Este Trabajo de Fin de Grado está estructurado en cinco capítulos:

- En el Capítulo 1, se presentan las motivaciones que siguieron a la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Se introduce la evolución del modelo actual de los sistemas energéticos, junto con la evolución de la generación a partir de energías renovables a nivel mundial y español.
- En el Capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica sobre las microrredes. Posteriormente, se expone una revisión bibliográfica sobre gestión de energía en las microrredes, describiendo las diversas propuestas de optimización de una microrred.
- En el Capítulo 3, se continúa con la revisión del estado del arte sobre una microrred. En este caso se describen las herramientas empleadas en la optimización. Además, se describe el problema planteado en este trabajo, así como la descripción de la estructura y los diferentes elementos que intervienen en una microrred.
- En el Capítulo 4, se propone el caso de estudio del sistema, planteando el problema sobre el que se trabaja. De la misma forma se exponen las ecuaciones necesarias que intervienen en el sistema. Por último se plantea la estructura y datos de la microrred.
- En el Capítulo 5, se analizan las simulaciones obtenidas a partir del modelado del sistema en el Capítulo 4 y posteriormente implementado en MATLAB.
- En el Capítulo 6, se añaden las conclusiones generales, así como las limitaciones y las posibilidades de continuidad del trabajo realizado.

Capítulo 2

Microrredes

2.1. Introducción

La intención de este capítulo es la de abordar las características de una microrred, así como los distintos modos de optimización de esta. En esta línea, se procede a una descripción de los diferentes métodos de optimización y a las soluciones de los problemas existentes de gestión energética.

2.2. Características de la microrred

Debido al aumento de conciencia sobre el cambio climático, y desde un punto de vista socioeconómico, las microrredes tienden a ser sistemas de energías sostenibles. En las que la principal fuente de generación es la energía renovable, acompañada de sistemas de generación eficientes [4].

Una microrred está compuesta de diferentes elementos de generación distribuida y cargas que demandan energía. La microrred generalmente está conectada a la red de suministro a través de un punto de conexión [16]. Para poder controlar, medir y alcanzar los objetivos cada unidad de generación cuenta con un sistema de electrónica de potencia, esto aparece tanto en microrredes conectadas a la red como en microrredes en modo isla [17].

En una microrred conectada a la red se puede sacar beneficio de la compra y venta de energía con la red principal. Una de las principales ventajas de una

microrred es cuando aparece una perturbación en la red principal. En este caso, la microrred es capaz de pasar a modo isla para proteger los elementos de ésta. La microrred tiene la capacidad de alimentar las cargas críticas, esto se consigue a través de unos modelos de programación, los cuales se desarrollarán en los siguientes capítulos [17].

La microrred puede ser controlada por un controlador local o un controlador central. Independientemente si es local o central, se busca el correcto funcionamiento y un desarrollo sostenible de la microrred a través de una administración efectiva y coordinada de los diferentes elementos de generación [17].

Existen diferentes criterios para clasificar una microrred. Se pueden clasificar según [4]:

- Tipo de potencia: AC/DC.
- Tipo de supervisión: la microrred puede tener un controlador central, en este caso tiene una supervisión centralizada. O puede tener un controlador local, en este caso tiene una supervisión descentralizada.
- Modo de operación: en isla o con conexión a la red.
- Aplicación: se puede dividir en uso privado (residencial, comercial o industrial) o uso público (municipal, empresa de servicio público o militar)

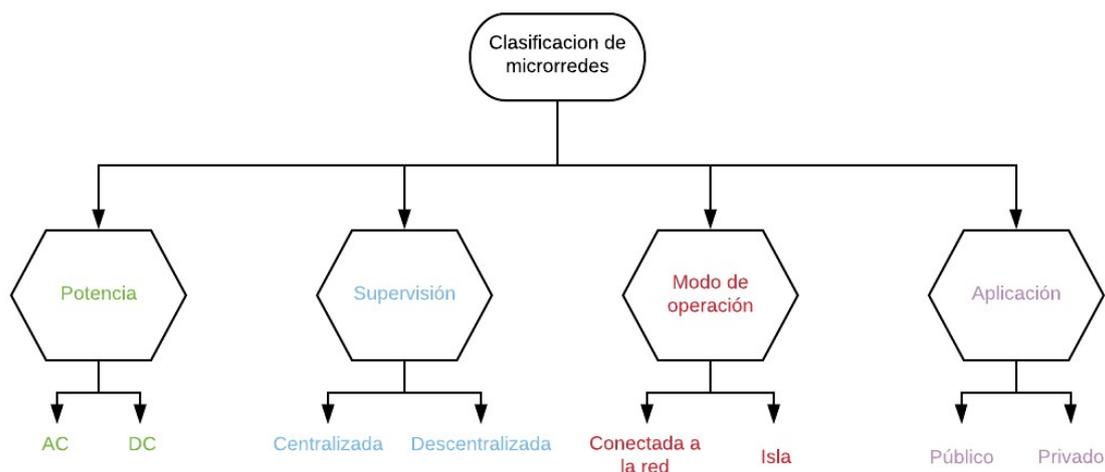


Figura 2.1: Clasificación de las microrredes [4]

La optimización de las microrredes puede realizarse mediante diferentes estrategias, las cuales se desarrollarán en el siguiente capítulo. Estas estrategias de optimización pretenden incrementar la eficiencia energética, la fiabilidad, reducir las pérdidas del sistema, reducir la emisión de gases contaminantes, reducir el consumo de energía y reducir el coste operacional de los elementos de generación [4].

Otro aspecto a tener en cuenta en las microrredes es la comunicación entre los diferentes elementos de generación y la demanda de las cargas del sistema, para ello se necesita una infraestructura de comunicación a través de la cual comunicar los diferentes elementos, compartir información y poder optimizar las operaciones en la microrred [18]. Para conseguir un sistema de comunicación eficiente debe tener un flujo de información constante, fiable, rápido y preciso, sin perturbaciones ni desconexiones. Sin embargo, hay que tener en cuenta el aspecto económico, el cual depende del número de repetidores instalados para la transmisión de información. Desde el punto de vista económico debe equilibrarse el coste de la instalación y la fiabilidad del sistema instalado. Para ello debe llevarse a cabo un estudio sobre qué sistema conviene en cada situación, existiendo diferentes tipos de sistemas de comunicación. En este sentido se puede hacer una comparación de los sistemas en base al área que cubre y a la tasa de datos [19].

En el siguiente gráfico se pueden observar los diferentes sistemas de comunicación y su coste:

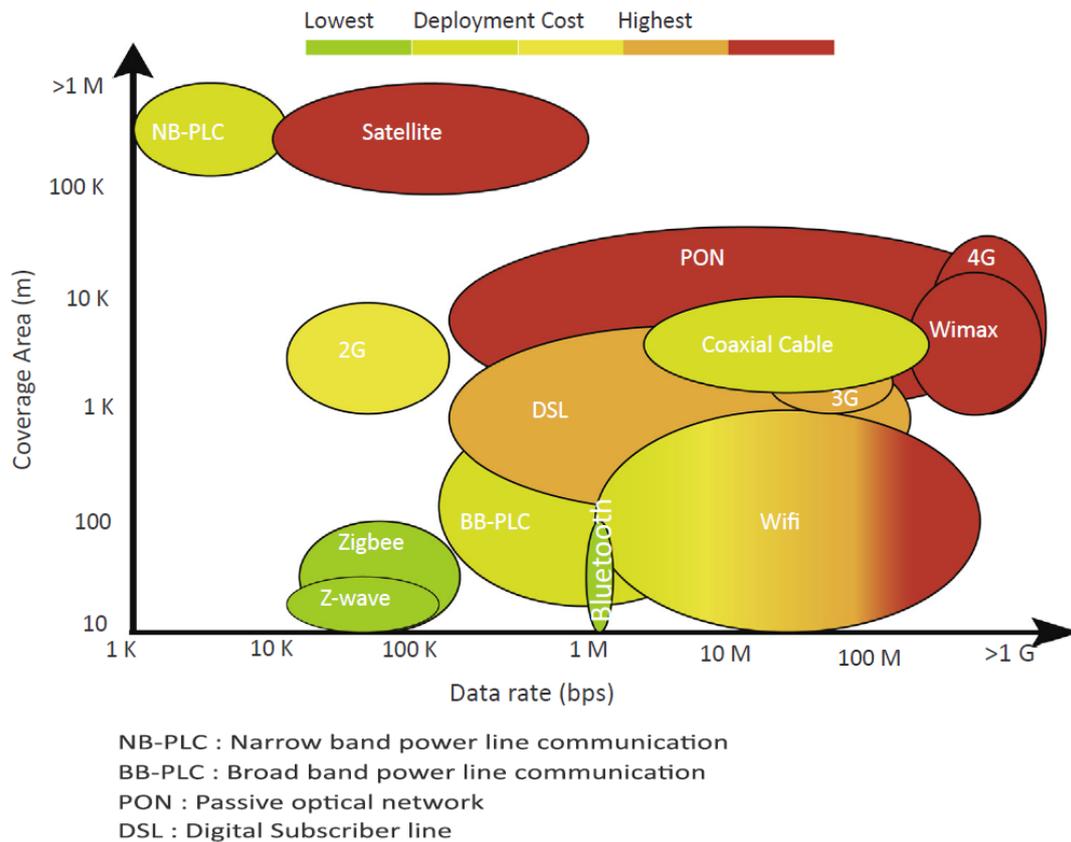


Figura 2.2: Clasificación de los tipos de sistemas de comunicación [4]

2.3. Técnicas de optimización para la gestión de energía en la microrred

Con el fin de garantizar la estabilidad de la microrred y un funcionamiento fiable de la misma, y para considerar aspectos económicos y ambientales, la optimización depende de disminuir el consumo de combustibles fósiles, la gestión de las unidades de almacenamiento y las cargas. En las herramientas de control de las microrredes es necesario considerar una función de coste y unas determinadas restricciones [20]. La Figura 2.3 presenta una clasificación de técnicas de control óptimo de microrredes:

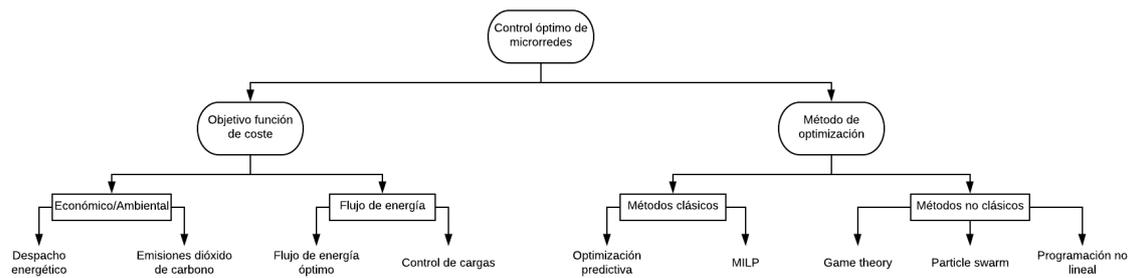


Figura 2.3: Control óptimo de microrredes

Las técnicas de control óptimo de las microrredes incluidas en la Figura 2.3 se clasifican de acuerdo con la minimización de la función objetivo y a los métodos de optimización [21]. A continuación, se detallan algunas de las anteriores técnicas de optimización de la función de coste objetivo:

Despacho económico:

Para entrar en el estudio de un despacho económico se deben diferenciar dos tipos de microrredes, conectada o en modo isla.

Para las microrredes conectadas a la red principal se busca optimizar la función de coste objetivo, a la vez que se maximiza el intercambio de energía con la red de suministro y la producción de energía [22].

En las microrredes en isla, aparece una dificultad añadida debido a la variabilidad de la producción de energía renovable y a la demanda no constante de energía por parte de las cargas. Para ello se expone una solución basada en diferentes algoritmos predictivos, como por ejemplo una red neuronal artificial [23].

Emisiones de dióxido de carbono:

Uno de los principales objetivos de las microrredes es la reducción de las emisiones de dióxido de carbono. Para ello se ha investigado incluir en la optimización de la función de coste objetivo variables que minimicen las emisiones de dióxido de carbono. También, se debe garantizar la estabilidad de la microrred, esté o no conectada a la red de suministro principal [24].

Flujo de carga óptimo:

Debido a las variaciones en la red, a las variaciones en las demandas de las diferentes cargas del sistema y al intercambio de energía entre la red principal y la microrred, el flujo de carga óptimo se ha convertido en un desafío a la hora de controlar la operación de una microrred [21].

Para conseguir solucionar estos problemas la comunidad científica ha propuesto diferentes métodos. Uno de ellos es plantear una red de telecomunicación y el uso de medidores inteligentes para facilitar el intercambio de datos de energía consumida y cedida por la microrred y así poder conseguir un equilibrio entre la producción y la demanda [25].

Otro método es el uso de una función objetivo para la optimización del flujo de carga con diferentes restricciones, teniendo en cuenta las diferentes unidades de generación y los elementos de almacenamiento como las baterías[23].

También se propone un control centralizado en el cual se mantiene una frecuencia de referencia constante en los nodos que intervengan en la minimización de la función cuadrática del coste de generación de energía [26].

Por último, se plantea un control estratégico de las unidades de almacenamiento para alcanzar un consumo de energía óptimo en la microrred, considerando tanto las unidades de almacenamiento como su voltaje y límite de almacenamiento, restricciones del sistema [27].

Control de cargas:

La estabilidad de frecuencia y voltaje de una microrred puede verse afectada por perturbaciones en el sistema. Para remediar esta inestabilidad se diseñan algoritmos protectores basados en los límites de frecuencia y tensión bajo esquemas de control de cargas. Este método se ha estudiado ya que aparecían situaciones no óptimas de control de cargas y descoordinación de las microrredes, así como por la necesidad de diseñar una estrategia de control que garantice la estabilidad en el sistema [21].

Para paliar el problema de la gestión de la energía en las microrredes la comunidad científica ha empleado diferentes técnicas de optimización. En la Figura

2.4 se presenta los tipos de optimización usados para solucionar el problema de la gestión de la energía.

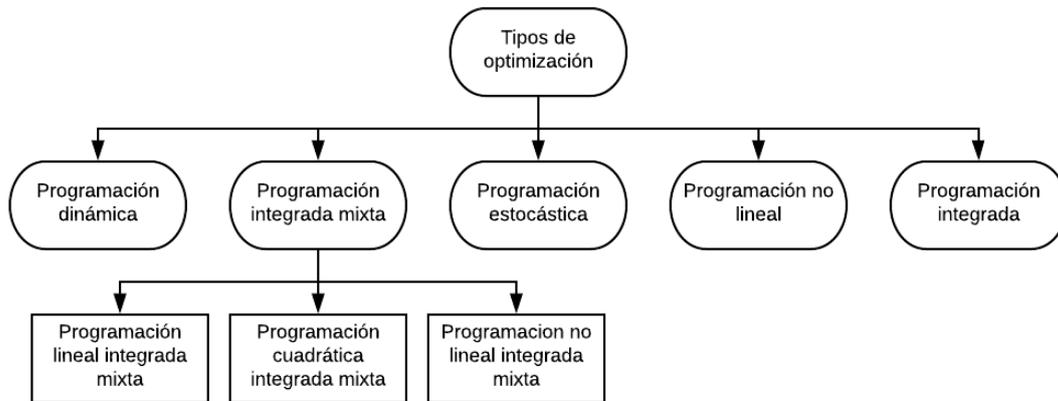


Figura 2.4: Métodos de optimización [5]

A continuación, se discuten los aspectos relevantes de cada tipo específico de optimización:

2.3.1. Programación dinámica:

Este modelo de programación propone a los clientes presentar horarios de demanda de energía, así como supervisar los precios. La microrred está obligada a transmitir información de previsión de demanda a la red principal. Además, los usuarios deben participar en las ofertas de energía y responder a las señales de gestión de la microrred en tiempo real. Se puede implantar un sistema inteligente que independientemente ejecute estas tareas sin necesidad de llevarlas a cabo el usuario final. La microrred está equipada con generación distribuida, conexión a la red, elementos de almacenamiento de energía y cargas [28].

La programación dinámica puede ser usada simultáneamente para minimizar el coste de la energía y maximizar el tiempo de vida de las baterías. Para esto, el controlador de la microrred debe encontrar el mejor modelo de carga y descarga de las baterías. Esto puede conseguirse observando los consumos y usos de electricidad de los usuarios finales. Los patrones de consumo de electricidad en hogares pueden modelarse a través de una distribución Gaussiana [29].

Otro punto de vista de la programación dinámica es la de proponer un mecanismo de contrato dinámico para regular el control de las microrredes basados en el tiempo. El contrato se basa en la proposición de unos compromisos de compra de unos determinados horarios para cumplir los requisitos de las cargas de la microrred, a la vez que permite flexibilizar los compromisos futuros. Se utiliza un programa estocástico para actualizar los compromisos teniendo en cuenta el estado del almacenamiento y una predicción del consumo [30].

Un enfoque económico de una programación dinámica plantea una estrategia basada en el establecimiento de precios en tiempo real. En esta los consumidores compiten por minimizar los costes, lo que contribuiría a una solución óptima de consumo de energía. Este enfoque engloba el punto crítico de consumo de energía renovable por parte de la microrred y el precio de la energía [31].

El problema del unit commitment también puede ser solucionado con una programación dinámica, la cual tiene como objetivo minimizar las emisiones de CO₂ y el consumo de combustibles fósiles. Para reducir la incertidumbre en la producción de energía solar, un sistema inteligente calcula las referencias de producción de los generadores con una hora de antelación. Esto plantea la reducción de costes del sistema y la optimización de los sistemas de almacenamiento [24].

2.3.2. Programación integrada:

Un modelo basado en la programación integrada busca la conexión entre diferentes microrredes para compensar el exceso de energía en los elementos de almacenamiento de una microrred y enviarla a otra microrred que no tenga capacidad suficiente de generación de energía para alimentar sus cargas. Realizando esta transacción de manera eficiente entre las microrredes, es posible reducir la dependencia de la red principal de suministro, aumentar la utilización de energías renovables y reducir cargas en la red principal [32].

2.3.3. Programación estocástica:

En este método de programación se puede observar diferentes enfoques desde la comunidad científica, todos ellos enfocados a la optimización de la microrred.

En el primer enfoque se utiliza simulaciones de Monte Carlo para investigar el comportamiento de una microrred cuando se conecta con otras microrredes y así obtener un suministro adecuado a las cargas. En este método se utiliza la programación estocástica para minimizar la exposición a vulnerabilidades en las microrredes [33].

Este tipo de programación puede ser usado para minimizar el coste de la energía y a la vez satisfacer la demanda de los clientes. En este aspecto se puede proponer un esquema que considera varios tipos de respuesta a la demanda. Para ello todo tipo de clientes como residenciales, comerciales e industriales pueden contribuir a la demanda, considerándoles como consumidores de energía o almacenamiento de energía [34].

También se puede utilizar esta programación para el cálculo de microrredes adecuadas para el entorno y el tipo de generación. El problema se plantea como una optimización con diferentes restricciones, y se usan hasta tres tipos de algoritmos diferentes dependiendo de la etapa: algoritmo de optimización de búsqueda, algoritmos relacionados con la teoría de grafos y algoritmos basados en forward-backward. Se estima que el método propuesto puede ayudar al diseño de microrredes capaces de trabajar en modo isla [35].

Por último, esta programación puede ser usada para el control de la energía reactiva de una microrred. Se utiliza una función de varias restricciones para maximizar las reservas de energía reactiva, minimizar las pérdidas y mantener la tensión de referencia de seguridad.

Para ello se utiliza la optimización Particle Swarm. Ésta puede ser mejorada usando datos en tiempo real ya que la energía renovable introduce una incertidumbre en la programación diaria [36].

2.3.4. Programación no lineal:

Este modelo de optimización basado en la programación no lineal tiene como objetivo maximizar los beneficios de la venta y la compra de energía a la red de suministro.

Se introduce un nuevo concepto, probabilidad de autosuficiencia, que se define como la probabilidad que tiene una microrred de abastecer la demanda local de manera autosuficiente. Se trabaja en la optimización de la capacidad de pro-

ducción de energía de las fuentes renovables para abaratar el precio de la energía. Un punto crítico de esta optimización es la coordinación entre las diferentes fuentes de energía renovable, la relación con otras microrredes y la interacción con la red de suministro [37].

Con estas herramientas se pueden construir microrredes en diferentes tipos de edificios, para ello es necesario un uso más extendido de la generación y almacenamiento de energía. Aspectos como la demanda y el abastecimiento incluyen la generación de energía renovable, tecnologías de almacenamiento, precios dinámicos y control de cargas [38].

2.3.5. Programación integrada mixta:

Programación integrada mixta lineal:

La programación integrada lineal mixta, en inglés conocida como MILP, propone diferentes enfoques a la solución de problemas relacionados con la energía.

El propósito principal se basa en la optimización del coste anual seleccionando adecuadamente las diferentes cargas de la microrred y la generación de fuentes renovables [5].

En este método de optimización se propone una doble capa para la gestión de la microrred: la capa de despacho y la capa de programación. En esta última capa, se utiliza la programación integrada mixta lineal, que proporciona un modelo económico basado en previsión de demanda; mientras que la capa de despacho se encarga de controlar las potencias de las cargas basándose en datos en tiempo real. Una aplicación de esta programación es la carga de vehículos eléctricos mediante paneles fotovoltaicos usando una microrred inteligente [39].

Este tipo de programación es usada para garantizar un buen servicio a los clientes y minimizar los costes de operación, esto incluye los costes de intercambio de energía con la red principal, los costes de operación de los generadores, los costes de encendido y apagado de equipos, los pagos de penalizaciones por cortes no programados. También es usada para minimizar el coste de la electricidad y el coste de operación de las baterías, siempre minimizando el uso de energías contaminantes y que emiten CO₂. Esta optimización puede ser aplicable

a microrredes residenciales [40].

Programación integrada mixta cuadrática:

La programación integrada mixta cuadrática, en inglés MQP, trata sobre programación a largo plazo de una microrred de energía renovable con conexión con la red principal con almacenamiento de energía híbrido. En este tipo de sistemas aparecen elementos que hacen que la programación sea cuadrática. Se tiene en cuenta la degradación, parada y arranque, el tiempo de vida, costes de mantenimiento y operación [41].

Es posible la aplicación de la programación integrada mixta cuadrática para el cálculo de una optimización con diferentes restricciones relacionadas con el medioambiente y problemas económicos provenientes de la generación híbrida de energía, también se tienen en cuenta las emisiones de gases nocivos y los costes de mantenimiento y operación [42].

Programación integrada mixta no lineal:

En este tipo de programación se utilizan los sistemas no lineales para minimizar la función de coste cuadrática. El control óptimo de la microrred se desarrolla a partir de la solución de la ecuación Hamilton-Jacobi-Bellman. Esta ecuación se utiliza para sistemas no lineales por coeficientes dependientes. Este método es usado para realizar un intercambio de energía eficiente entre diferentes elementos de generación, para ello se utilizan convertidores electrónicos [43].

Se puede contemplar el escenario de la automatización de la microrred. Este caso es complejo, pero se puede realizar a través de un método basado en la búsqueda de automatismos locales y controles remotos, considerando diferentes escenarios y buscando el de mayor beneficio [44].

Capítulo 3

Aplicación del Despacho Económico a la microrred

3.1. Introducción

En este capítulo, con el fin de controlar la microrred de un manera óptima van a ser descritas en detalle las herramientas utilizadas. En primer lugar, se describen las herramientas necesarias, como el Unit Commitment y el Despacho Económico. A continuación, se plantea una descripción del problema propuesto y de los posibles objetivos a seguir en la optimización de una microrred. Posteriormente se desarrolla en detalle los elementos y estructura de la microrred. Por último, se expone el modelado del sistema a optimizar, sus límites y restricciones.

3.2. ¿Qué es el Unit Commitment y el Despacho Económico?

Para comenzar la definición de despacho económico se debe tener conocimiento previo sobre qué es el Unit Commitment.

El UC es uno de las herramientas más usadas en la generación y consumo de energía. Se define como un problema de optimización utilizado para el control de las unidades, imponiéndoles una ruta de funcionamiento calculada en intervalos de una hora, variando las unidades de generación y las cargas dependiendo de diferentes restricciones [45].

El UC tiene como restricciones cumplir la demanda, cumplir los requisitos de las reservas e interactuar con el mercado, todo ello de una manera óptima y eficiente en todo el periodo de intervalos. También tiene como restricciones la capacidad del sistema, la fiabilidad del sistema, las capacidad para el intercambio de energía y las restricciones ambientales [46].

La demanda de energía está en constante cambio, generando incertidumbre y variabilidad en el sistema. Por ello, el UC es utilizado para programar que las unidades de generación correspondientes estén disponibles en el momento adecuado, abasteciendo las cargas que demanden energía, manteniendo la fiabilidad del sistema y mantener las restricciones de potencia de acuerdo a las condiciones de operación del sistema [45].

Los modelos de los mercados energéticos no tienen la capacidad actualmente de ser integrados totalmente por energías no predecibles como puede ser la energía eólica. Esta limitación está siendo un tema a tratar por los operadores de la red, debido al aumento de presiones sociales y políticas por el aumento de generación a partir de las energías renovables, las cuales dependen de las condiciones meteorológicas. En esta discusión juega un papel fundamental la herramienta del UC, la cual permite el control de las energías renovables combinadas con otras fuentes de generación de energía. También es útil para controlar de una manera eficiente las variaciones e incertidumbres introducidas por las condiciones meteorológicas a la hora de producir energía a partir de fuentes de generación renovables [47].

Una vez definido el Unit Commitment se desarrolla el despacho económico. En primer lugar se toman decisiones con el UC y posteriormente se aplica el Despacho Económico. Las decisiones tomadas en el UC pasan por controlar las unidades de generación que están en funcionamiento cada hora, considerando las restricciones de las unidades, las necesidades de la capacidad del sistema incluyendo los sistemas de almacenamiento, arranques y paradas de los generadores. En segundo lugar se toman decisiones con el Despacho Económico, para ello se tiene en cuenta la capacidad de las reservas rodantes, concepto a desarrollar posteriormente, y satisfacer todas las demandas del sistema. Esto se lleva a cabo distribuyendo los elementos mencionados entre las unidades de generación en los diferentes intervalos de tiempo marcados en el UC [48].

En el Despacho Económico se llevan acabo decisiones tomadas en el intervalo de tiempo implementado. Esta herramienta es utilizada para controlar las

incertidumbres y las numerosas restricciones que el operados tiene que manejar [49].

En la microrred se pueden encontrar al menos dos tipos de incertidumbres: las desviaciones en las previsiones y la fiabilidad de los equipos. Las desviaciones de las previsiones son un aspecto que aparece continuamente en el sistema y están compuestas por la incertidumbre en las cargas, la generación y el intercambio de energía con la red principal de suministro. La fiabilidad de los equipos afecta a la generación de energía y a los cortes en las líneas. Para paliar estas incertidumbres en el sistema se programan unidades para que excedan la capacidad de satisfacer las cargas de la microrred. Este exceso de capacidad se le denomina reserva operativa, en la que está incluida la reserva rodante [49].

3.3. Descripción del problema

En esta sección se plantea la descripción del problema a tratar en este Trabajo de Fin de Grado y las herramientas utilizadas en una microrred comprendida por diferentes elementos de generación y de consumo de energía.

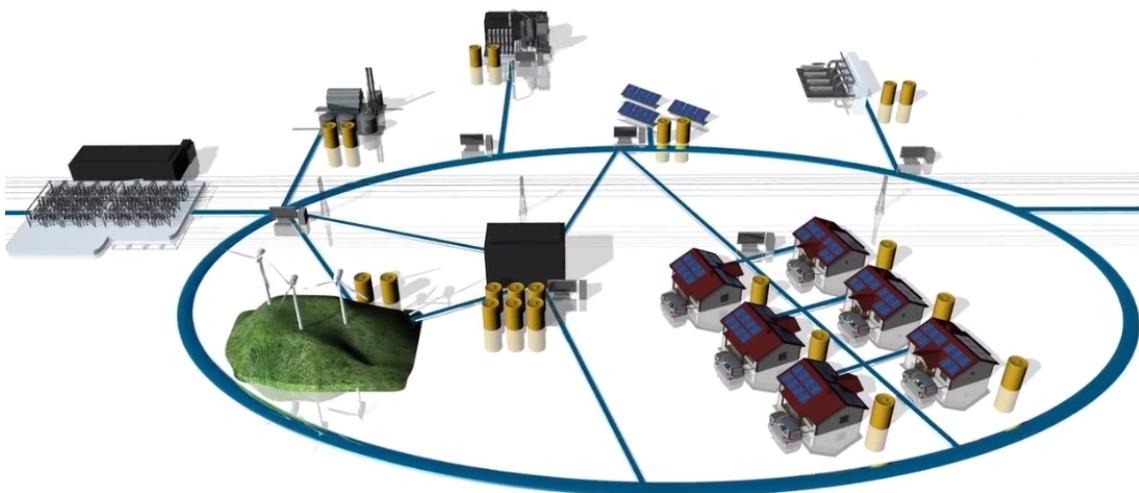


Figura 3.1: Microrred [6]

El problema a resolver en este Trabajo de Fin de Grado es la planificación de la operación de una microrred, a corto plazo. Para ello existen diferentes objetivos

de optimización a cumplir y diferentes herramientas. Se utilizará la herramienta del Unit Commitment ya calculado y se desarrollará el paso posterior comprendido por la Despacho Económico. También se estudiarán las diferentes restricciones que puedan aparecer en el sistema, teniendo en cuenta que las energías renovables pueden variar dependiendo de las condiciones meteorológicas.

Existen grandes diferencias entre la generación tradicional de energía y las microrredes, por ello las aproximaciones y los métodos seguidos son diferentes [50]. En las microrredes se pueden resaltar los siguientes objetivos a cumplir:

- **Minimizar el costo de combustible:** en este objetivo se selecciona la hoja de ruta que presente el mayor ahorro en combustible, para ello se realiza un estudio a corto plazo de la microrred. Se puede aplicar tanto a microrredes aisladas como a microrredes conectadas a la red principal, pero lo más común es aplicar este objetivo a redes aisladas.
- **Maximizar ganancias:** en los diversos métodos propuestos se trabaja con una microrred conectada con la red principal de suministro y se busca el máximo beneficio económico. Este beneficio se consigue vendiendo energía producida por la microrred en el momento en el que la energía tiene un precio más alto, y se compra la energía requerida por las cargas en el momento en el que la energía alcanza un precio más bajo. En este proceso las unidades de almacenamiento juegan un papel fundamental para poder almacenar la energía que posteriormente será utilizada para satisfacer la demanda.
- **Minimizar el costo ambiental:** este objetivo es de difícil cumplimiento si se siguen los objetivos anteriores, pero las investigaciones cada vez van más enfocadas a la minimización del impacto ambiental ligado a la minimización del costo de combustible o maximizar ganancias.

Existen diferentes modelos que cumplan los objetivos expuestos anteriormente. A continuación, se exponen alguno de los mismos.

Se propone un modelo basado en la minimización de los costes de operación y en la reducción de emisión de CO₂. La microrred propuesta para este caso se compone por diferentes fuentes de energía renovable, una microturbina, un generador diésel y un banco de baterías. Para asignar el funcionamiento de las unidades se sigue el criterio de las emisiones, dándole prioridad a las unidades

que emiten menos CO₂. Para determinar el uso del generador diésel, se obtiene de la curva de demanda calculada del día siguiente el funcionamiento mínimo requerido de esta unidad. Para el Despacho Económico este método sigue una aproximación cuadrática de programación [51].

El siguiente modelo se basa, como el anterior, en la minimización de costes de operación y en la reducción de emisión de CO₂. En este modelo se añade un sistema de almacenamiento al que se le aplica un modelo de carga y descarga siguiendo los objetivos de minimizar costes y emisiones. Se contempla un programa de carga de vehículos eléctricos como parte de la demanda, este tema no se trata en este Trabajo de Fin de Grado pero es interesante mencionarlo para reconocer que existe esta posibilidad. Para la optimización este modelo sigue un modelo heurístico de programación [52].

En el siguiente modelo se presenta una microrred con conexión a la red principal de suministro. Se busca la optimización del intercambio entre la microrred y la red principal. Para ello tiene como objetivo minimizar los costes de operación, minimizar las emisiones y maximizar las ganancias. Se plantea una organización óptima del tiempo de funcionamiento de las unidades de generación y el intercambio de energía entre la red principal y las unidades de almacenamiento. Se plantea una programación integrada mixta cuadrática para la optimización del modelo [53].

En este Trabajo de Fin de Grado se propone la optimización de una microrred aislada sin conexión con la red de distribución principal. Para ello se propone un modelo de optimización basada en la programación no lineal, en la que se tienen restricciones lineales. Se toma como objetivo minimizar el costo de combustible, produciendo así grandes beneficios en consumo de combustible. Se organizarán cortos intervalos en el tiempo y se analizará la microrred 24 horas antes. La herramienta propuesta se adapta a la incertidumbre en la demanda [54]. Esta herramienta comprende tres fases [50]:

- La primera fase está basada en los datos recopilados de la demanda, se utiliza una herramienta para conseguir la curva de demanda estimada de 24 horas. Esta herramienta hace un cálculo estimado de la demanda que se va a producir en las próximas 24 horas, para ello hace uso del histórico de datos sobre el consumo de energía.
- La segunda fase comprende una etapa de planificación, basándose en la predicción de generación de energía renovable y en la curva de deman-

da calculada anteriormente. Se realiza una planificación utilizando la herramienta Unit Commitment, las reservas rodantes se incluyen en las unidades de despacho comprendidas en el UC.

- La tercera fase comprende una etapa de operación, la función principal de esta etapa es la toma de decisiones respecto a qué unidad de despacho cubre la demanda, habiendo definido previamente con el UC qué unidades están encendidas o apagadas. Para esta etapa se utiliza el Despacho Económico.

3.4. Estructura y elementos de la microrred

Los sistemas tradicionales de producción de energía tienen una estructura definida en la que sus elementos se pueden considerar generadores, que son los encargados de suministrar energía, el sistema de transmisión de energía y el sistema de distribución, que se encarga de satisfacer la demanda de las cargas. Este modelo está cambiando a un sistema que es capaz de generar y consumir su propia energía [55].

La arquitectura de las microrredes puede variar, normalmente incluyen fuentes de energía renovable, fuentes de energía controlables y sistemas de almacenamiento de energía. Las microrredes pueden estar conectadas a la red principal de suministro u operar de modo aislado.

Los diferentes elementos que se pueden localizar en la microrred dependen de la carga demandada, las características de los equipos y el emplazamiento del sistema.

La estructura de la microrred que se va a estudiar en este Trabajo de Fin de Grado está compuesta por turbina eólica, una planta fotovoltaica, una microturbina, un generador diésel y un sistema de almacenamiento de energía.

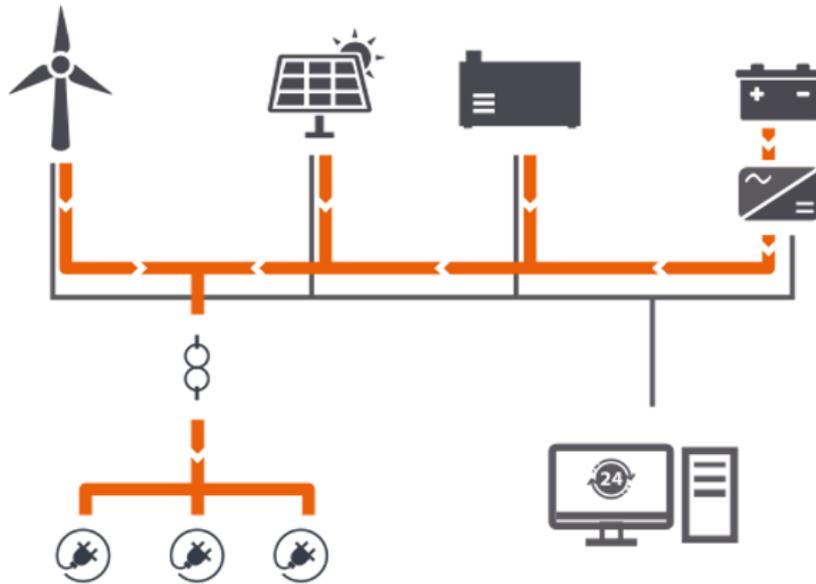


Figura 3.2: Unidades de la microrred [7]

Entre las tecnologías mas utilizadas en las microrredes se encuentran las fuentes de energía renovable, las fuentes de energía convencionales y los elementos de almacenamiento.

3.4.1. Fuentes de energía renovable

Son las fuentes de energía que se obtienen de recursos naturales renovables, que no emiten emisiones de gases contaminantes y que producen energía de forma indefinida e inagotable. Son fuentes de energía variables ya que dependen de las condiciones meteorológicas. Algunos tipos de fuentes de energía renovable pueden ser la energía fotovoltaica, eólica, hidráulica o termosolar entre muchas otras. En este Trabajo de Fin de Grado se va a considerar solo la energía fotovoltaica y la energía eólica.

Energía fotovoltaica

Se obtiene por la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica. Cuando un fotón incide sobre la superficie de un semiconductor es capaz de energizar la capa externa del mismo, creando así una diferencia de potencial.

Cuando se conecta un hilo entre las dos capas del semiconductor, los electrones energizados circulan y crean una corriente eléctrica [56].

Actualmente es la tecnología menos contaminante puesto que es sencilla y no necesita de combustibles, únicamente necesita radiación solar.



Figura 3.3: Aplicación energía fotovoltaica

La tecnología de la energía renovable se basa en agrupar diferentes celdas fotovoltaicas para generar energía eléctrica. Una de las ventajas de la energía fotovoltaica es que es modular, por lo tanto se pueden agrupar diferentes módulos según el tamaño del sistema deseado. Esta energía eléctrica tiene varios usos:

- Suministro de energía a una microrred
- Inyección de energía eléctrica en las redes eléctricas.
- Aplicaciones específicas como puede ser suministrar energía a un satélite o recarga de vehículos eléctricos.

Los aspectos a tener en consideración en el momento del diseño de la microrred son los siguientes [56]:

- Geometría solar: hay que considerar la ubicación de la instalación fotovoltaica.

- **Inclinación y orientación de los paneles:** es necesario una correcta instalación de la planta fotovoltaica teniendo en cuenta la inclinación y orientación de los paneles, para no perder así eficiencia o que los paneles creen sombras entre sí.
- **Componentes:** es importante la adecuada elección de los componentes de la instalación fotovoltaica.

Energía eólica

Esta tecnología utiliza la energía eólica para convertirla en energía eléctrica. Para esta transformación se utilizan las turbinas eólicas. La generación eólica ha experimentado una enorme mejora desde sus inicios hasta la actualidad, siendo 12 kW la potencia máxima conseguida por los primeros molinos y entorno a 9 MW con tecnología offshore [57].



Figura 3.4: Aplicación energía eólica

Actualmente existen dos tipos de generación de energía eólica: mediante un generador síncrono o a través de un generador asíncrono, la más común es la obtenida mediante generadores asíncronos controlados por convertidores [56].

Una de las ventajas que tiene este tipo de tecnología es que es fácilmente escalable al tamaño de la microrred, pudiendo elegirse pequeñas turbinas eólicas.

En el momento del diseño de la instalación eólica es necesario considerar los siguientes aspectos [56]:

- **Potencia del viento:** es la cantidad de potencia que el viento es capaz de proporcionar a la turbina, por lo tanto es importante la correcta ubicación de la instalación eólica.
- **Potencia máxima aprovechable:** se define como la máxima potencia que el molino es capaz de captar del viento, se rige por la ley de Betz, que formula que el generador solamente es capaz de captar como máximo entorno a un 59 % de la potencia del viento.
- **Características físicas de los generadores:** en el momento de la elección de un generador debe considerarse el rendimiento, la altura, el diámetro de las palas y otros factores que influyen en la transformación de energía eléctrica.
- **Rosa de los vientos:** define la velocidad y dirección del viento, por lo tanto es un factor clave en el momento del diseño de la instalación eólica.

3.4.2. Fuentes de energía convencional

Las fuentes de energía convencionales utilizan combustibles para generar energía, por lo tanto se tiende a minimizar la utilización de este tipo de tecnologías.

Existen diferentes tipos de fuentes de energía convencionales, pero destacan dos tecnologías: el generador diésel y la microturbina.

Generador diésel

Son motores de combustión interna en los que los gases de combustión empujan a un émbolo, el cual hace girar un cigüeñal en un movimiento de rotación, produciendo así energía mecánica. Esta energía será posteriormente transformada en energía eléctrica [56].



Figura 3.5: Generador diésel

Son capaces de responder ante las variaciones del sistema y pueden suministrar un flujo constante de energía al contrario de las energías renovables que dependen de las condiciones meteorológicas.

Se utilizan en sistemas de cogeneración como pueden ser hospitales y también en sistemas como las microrredes. Los motores diésel se conectan a la red a través de generadores síncronos.

Los principales inconvenientes del motor diésel son las emisiones de NO_x y el rendimiento, alcanzando entorno al 50 %.

Microturbina

Están compuestas por una turbina, un generador, un compresor y un recuperador, todo ello montado en un único eje.

Al igual que los generadores diésel, son capaces de responder ante variaciones del sistema, garantizando el suministro de energía demandada.

Sus principales ventajas son su tamaño compacto, escaso número de partes móviles y escasa emisión de ruido.

El principal inconveniente de las microturbinas es la emisión de gases contaminantes, por lo que se tiende a optimizar el uso de las mismas.

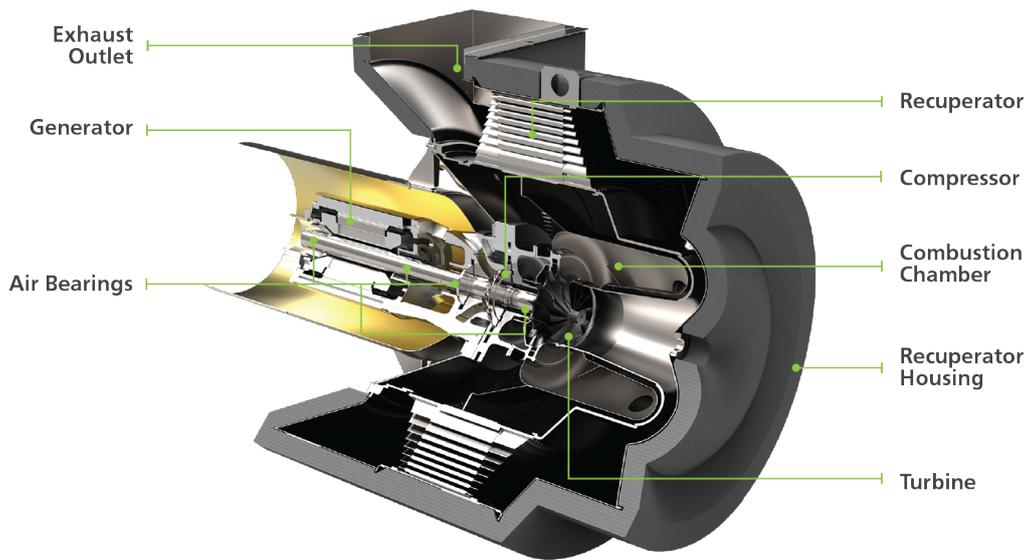


Figura 3.6: Elementos de una microturbina [8]

Es posible instalar un sistema de cogeneración, del que se obtiene calor y electricidad. Aprovechando así la energía térmica aparte del objetivo principal que es generar energía. Con este sistema de cogeneración se incrementa el aprovechamiento de la energía en el combustible [56].

3.4.3. Sistemas de almacenamiento de energía

Se instalan en el sistema para poder almacenar energía, en este caso las unidades de almacenamiento actuarían como cargas en el sistema ya que estarían absorbiendo energía de la microrred. Los elementos de almacenamiento también pueden ser utilizados como generadores, ya que pueden ceder la energía almacenada al sistema y así contribuir a satisfacer la demanda. Son objeto de estudio debido a la baja capacidad que tenemos actualmente. Algunos ejemplos son los supercondensadores, las baterías químicas, almacenaje de aire comprimido y la batería inercial [58].



Figura 3.7: Sistema de almacenamiento de energía [9]

Para la elección del tipo de batería se debe de tener en cuenta diferentes aspectos [55]:

- La capacidad de la batería, esta característica define cuánta energía puede almacenar.
- Los ratios de carga y descarga de la batería.
- El máximo ratio de descarga, esta característica define el porcentaje de la batería que puede ser descargado respecto a la capacidad total.

Un nuevo término, como es el estado de carga, es relevante en las baterías. Se define como la energía existente en los elementos de almacenamiento en un momento en concreto. Por lo tanto existe un rango en el que se debe operar, este rango lo marca las características físicas de los elementos.

El estado de carga es dinámico y cambia con el sistema, los elementos de almacenajes se cargan y se descargan, por lo tanto influye la eficiencia de carga y descarga [55].

Como las baterías pueden ceder o absorber energía, desde la perspectiva del sistema pueden consumir o aportar potencia. Lo que haría que fuesen generadores o cargas, por lo tanto hay que tener en cuenta que según las características físicas del elemento existe un rango de potencia máxima que puede ceder o absorber a la microrred.

Capítulo 4

Propuesta de caso de estudio

4.1. Introducción

En este Capítulo se propone un caso de estudio. Se expone una microrred integrada por unidades de generación controlables (una microturbina y un generador diésel), fuentes de generación de energía renovables (una unidad de generación eólica y una unidad de generación fotovoltaica) y un sistema de almacenamiento por baterías. Se plantea el problema a resolver, su formulación matemática y la estructura y datos de la microrred a estudiar.

4.2. Planteamiento del problema

En este Trabajo de Fin de Grado, teniendo en cuenta el caso de estudio propuesto en [50], se propone el diseño de un sistema de gestión de energía para una microrred que trabaja en modo de operación aislada. Para ello se aplica la herramienta del Despacho Económico en una microrred. Para realizar la programación horaria de las unidades de generación controlables (generador diésel, microturbina y sistema de almacenamiento de energía) se escoge un periodo de tiempo corto, 24 horas hacia delante. En este TFG se asume que el UC se aplicó anteriormente y se definen las unidades que están encendidas y apagadas a cada hora.

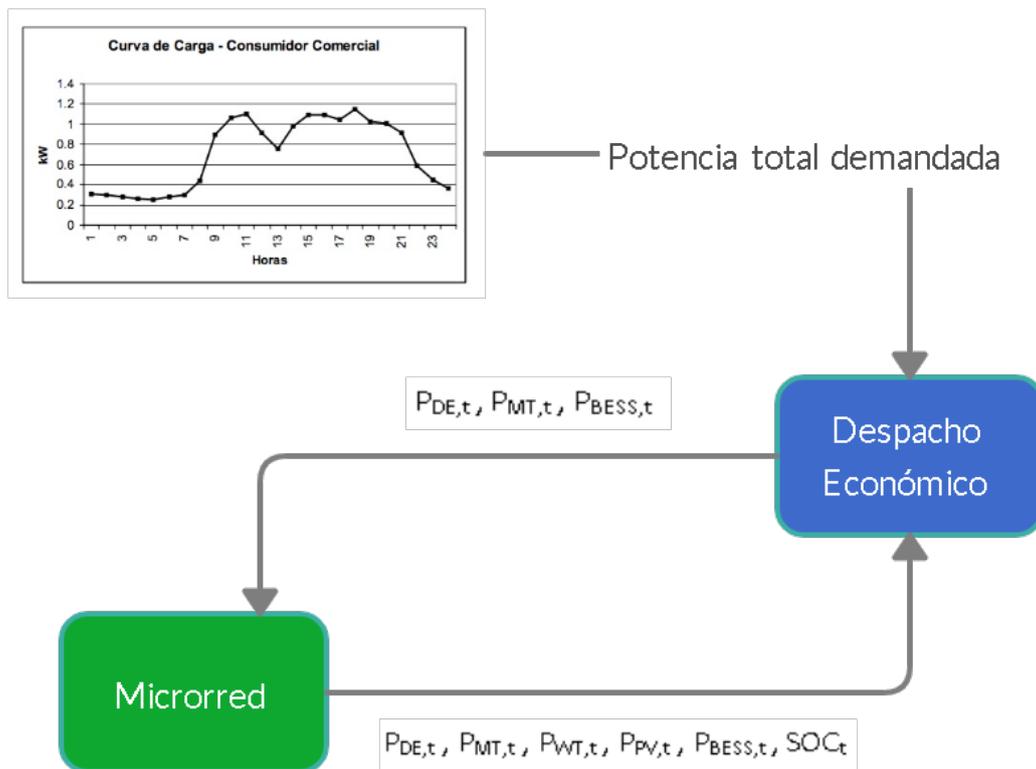


Figura 4.1: Modelado de la programación del despacho económico

La Fig. 4.1 muestra el algoritmo de gestión de energía de la microrred. Como se puede observar, basándose en la curva de predicción de la demanda y conocida la predicción de la potencia generada por la turbina eólica y la generación fotovoltaica, mostradas en la Fig. 4.3, el Despacho Económico asigna las potencias a generar a las unidades de generación diésel y microturbina y a las unidades de almacenamiento por baterías.

Con lo anteriormente expuesto se puede decir que el DE es un modelo bidireccional, en el que cada hora se asigna una potencia al generador diésel y a la microturbina añadiéndole el sistema de almacenaje de energía por baterías.

4.3. Formulación matemática

En este Trabajo de Fin de Grado se propone aplicar el Despacho Económico a una microrred para gestionar la energía de forma óptima. Para ello, se expone un problema de optimización con el objetivo de minimizar el coste de las operaciones

de una microrred aislada. En el caso de estudio, los costes de operación están asociados a los costes de combustible que demandan el generador diésel y la microturbina.

Se asume, por tanto, conocidas las curvas de demanda y de la potencia generada por las fuentes de energía renovables (eólica y fotovoltaica), como se planteó en el apartado 4.2., y por tanto se definen como variables de control o a optimizar las potencias entregadas por el generadores diésel, la microturbina y el sistema de almacenamiento por baterías.

El problema de optimización se formula como un problema de programación no lineal, dado que la función de coste de combustible se modela como un polinomio de segundo orden. Las restricciones son todas lineales. Para su solución se desarrolló un algoritmo en MATLAB utilizando la función de optimización *intlinprog*.

4.3.1. Función objetivo

A continuación, se expone la función objetivo a optimizar:

$$\min \sum_{t=1}^{24} [a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2] \quad (4.1)$$

donde $P_{i,t}$ es la potencia entregada por cada generador y los coeficientes a_i , b_i y c_i son los coeficientes de la función de coste de combustible del DE y de la MT y dependen de propiedades intrínsecas de los generadores.

El objetivo propuesto en este TFG es el uso del Despacho Económico para minimizar el consumo de combustibles y reducir los costes de operación del sistema, organizando la potencia de cada generador para satisfacer la demanda de las cargas de la microrred.

Las función de coste a optimizar esta relacionada las funciones de coste del generador diésel y la microturbina. Los costes del combustible, mantenimiento, operación y de transporte del combustible están incluidos en el coste total de generación de cada unidad. Estos costes se incluyen como un coste fijo en la función de coste a optimizar [55]. La función coste del generador diésel y la mi-

cro turbina siguen una función cuadrática. A partir de las siguientes expresiones se puede establecer una relación entre el coste y la potencia [58].

Generador diésel:

$$C_{DE,t} = a_{DE} + b_{DE}P_{DE,t} + c_{DE}P_{DE,t}^2 \quad (4.2)$$

Microturbina:

$$C_{MT,t} = a_{MT} + b_{MT}P_{MT,t} + c_{MT}P_{MT,t}^2 \quad (4.3)$$

donde $C_{i,t}$ son los costes de operación de los generadores en un instante determinado, $P_{i,t}$ es la potencia estimada y los coeficientes son parámetros intrínsecos de los generadores.

4.3.2. Restricciones

En el control y modelado de la microrred existen diferentes restricciones que deben tenerse en cuenta, así como límites en las diferentes unidades que componen en el sistema y que influyen enormemente en el control de operaciones durante el Despacho Económico. Los límites y restricciones existentes son los siguientes [50]:

Límites de generación

La generación de energía debe de mantenerse en un rango establecido debido a límites físicos de los generadores.

$$P_{min_{DE}} \leq P_{DE,t} \leq P_{max_{DE}} \quad (4.4)$$

$$P_{min_{MT}} \leq P_{MT,t} \leq P_{max_{MT}} \quad (4.5)$$

Tanto en la ecuación 4.4 como en 4.5 se tienen en cuenta para calcular los límites de generación del generador diésel y de la microturbina. P_{min_i} y P_{max_i} definen los límites inferiores y superiores de generación.

Restricciones de almacenamiento

La potencia de las baterías puede ser positiva o negativa. Cuando la potencia es negativa significa que la batería está absorbiendo energía, es decir, está almacenando energía y actúa como una carga en el sistema. Cuando la potencia es positiva significa que la batería está entregando energía y actúa como un generador.

La potencia que cede o absorbe la batería está delimitada físicamente en un rango establecido por las características de la unidad, en la ecuación 4.6 se puede observar estos límites, donde P_{max}^c define la máxima potencia admisible en la batería y P_{max}^d define la máxima potencia de descarga de la batería.

$$-P_{max}^c \leq P_{BESS,t} \leq P_{max}^d \quad (4.6)$$

El concepto de SOC (State Of Charge), estado de carga en inglés, se define como la capacidad de carga de la batería y es un concepto variable en el tiempo. Debido a limitaciones físicas el SOC está limitado en un rango, el cual puede observarse en la ecuación 4.7, donde SOC_{min} y SOC_{max} son los valores mínimos y máximos de estado de carga de la batería.

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (4.7)$$

En los procesos de carga y descarga de la batería intervienen otros factores como la eficiencia, esto afecta al estado de carga de la batería. En la ecuación

4.8 se puede observar que cuando la potencia de la batería es positiva, la batería se está descargando y actúa como generador, entonces al estado de carga de la batería del instante anterior en el tiempo hay que restarle la potencia cedida por la batería dividida por la eficiencia de descarga, como resultado se obtiene el estado de carga de la batería en el instante deseado. Cuando la batería está absorbiendo energía, es decir, está funcionando como una carga, se realiza el mismo procedimiento pero al instante anterior se le resta la potencia absorbida por la batería multiplicada por la eficiencia de carga.

$$SOC_t = \begin{cases} SOC_{t-1} - \frac{\Delta t P_{BESS,t}}{\eta_d} & \text{si } P_{BESS,t} \geq 0 \\ SOC_{t-1} - \Delta t P_{BESS,t} \eta_c & \text{si } P_{BESS,t} \leq 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Balance de energía

La potencia total demandada en cada momento del día debe coincidir con la potencia total entregada por los generadores y/o los sistemas de almacenamiento.

$$P_t^d = P_{MT,t} + P_{DE,t} + P_{WT,t} + P_{PV,t} + P_{BESS,t} \quad (4.9)$$

4.4. Estructura y datos de la microrred a estudiar

La microrred está compuesta por elementos de generación controlables (generador diésel y microturbina), elementos de generación de energía renovable (generación eólica y fotovoltaica), elementos de almacenamiento de energía y cargas que demandan energía. Los elementos de generación aportan energía a la microrred, los elementos de almacenamiento de energía pueden aportar o consumir energía y las cargas consumen energía de la microrred.

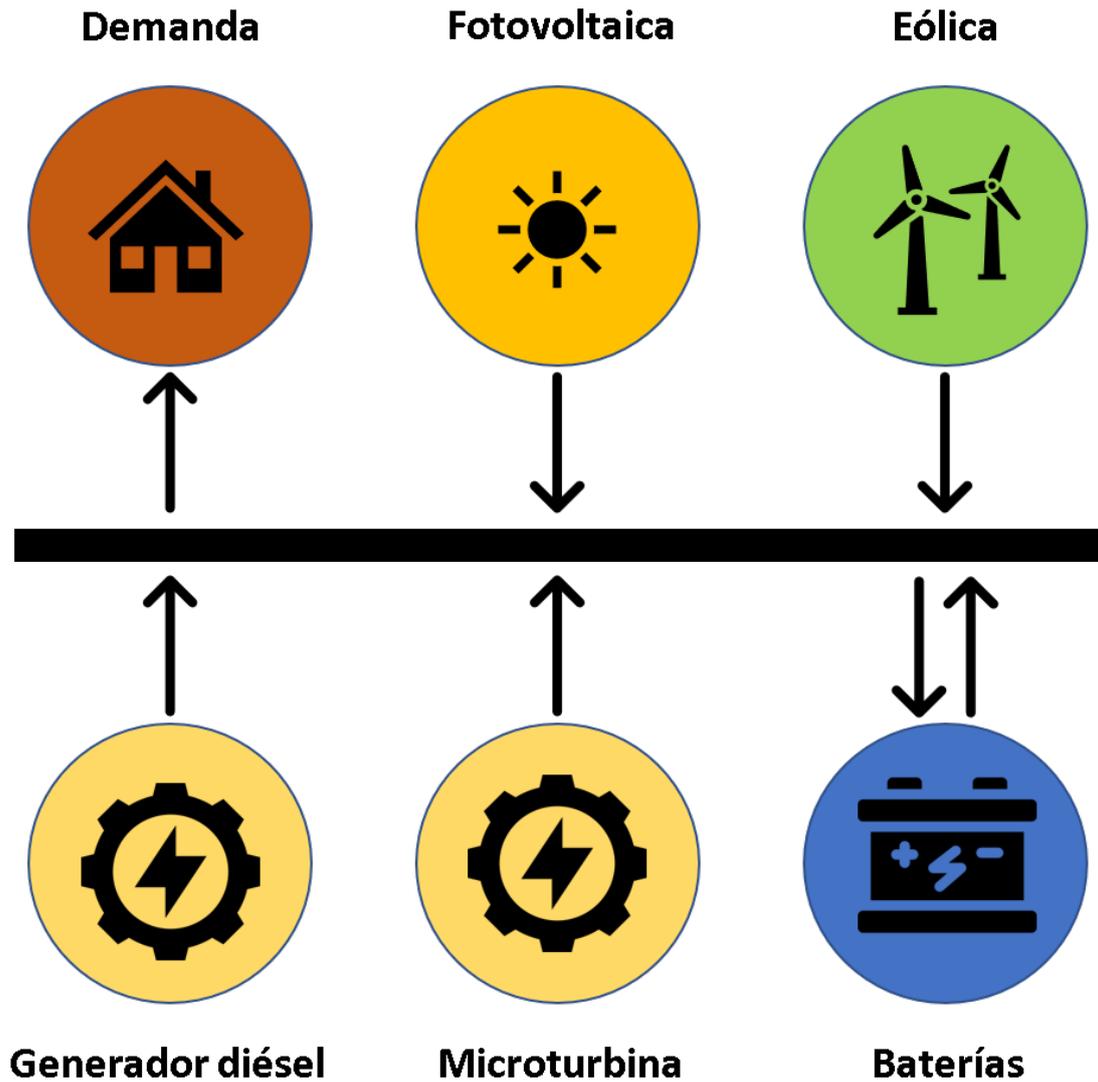


Figura 4.2: Estructura de la microrred

Los datos de los diferentes casos de estudios han sido obtenidos teniendo en cuenta el caso de estudio propuesto en [50]. Las unidades de generación mantienen unos límites máximos y mínimos fijos de potencia, como se puede observar en la Tabla 4.1. La potencia que aportan estas unidades varía según la demanda de energía pero en el caso de la energía fotovoltaica y eólica aportan un flujo de potencia constante, siguiendo la curva de generación de la Fig. 4.3. Estos parámetros se van a tener en cuenta en las simulaciones de los diferentes casos.

Tabla 4.1: Potencias máximas y mínimas para cada unidad

Fuentes	$P_{min}(kW)$	$P_{max}(kW)$
Generador diésel	15	150
Microturbina	5	20
Eólica	50	80
Fotovoltaica	0	40

Un parámetro que influye en el cálculo del coste del combustible es los coeficientes de coste del generador diésel y la microturbina. Como se puede observar en la Tabla 4.2, varían según el tipo de unidad.

Tabla 4.2: Coeficientes de coste

Unidades de generación	Coeficientes de coste		
	a (\$)	b (\$/kW)	c (\$/kW ²)
Generador diésel	0.6	0.05	0.02
Microturbina	2.62	0.15	0.15

Los parámetros a tener en cuenta de las baterías a la hora de las simulaciones son varios, entre ellos se encuentran: η_c , η_d , P_{max}^c , P_{max}^d , SOC_{min} y SOC_{max} . Estos dos últimos varían según el caso de estudio, pero los anteriores, como pueden observarse en la Tabla 4.3, se mantienen fijos para todas las simulaciones.

Tabla 4.3: Parámetros de las baterías

	η_c	η_d	P_{max}^c	P_{max}^d
Baterías	0.9	0.9	120	120

Finalmente, como se puede observar en la Fig. 4.3, se tienen las curvas de predicción de la demanda y la curva de predicción de la potencia generada por la turbina eólica y la generación fotovoltaica, calculada para 24 horas hacia delante. Cabe destacar que la demanda sufre un pico entorno a las 14 horas llegando a su máximo en 250 kW. La generación eólica se mantiene constante con sus correspondientes subidas y bajadas durante las 24 horas. La generación fotovoltaica produce entre las 8 y 20 horas sufriendo un pico de generación alrededor de las 15 horas.

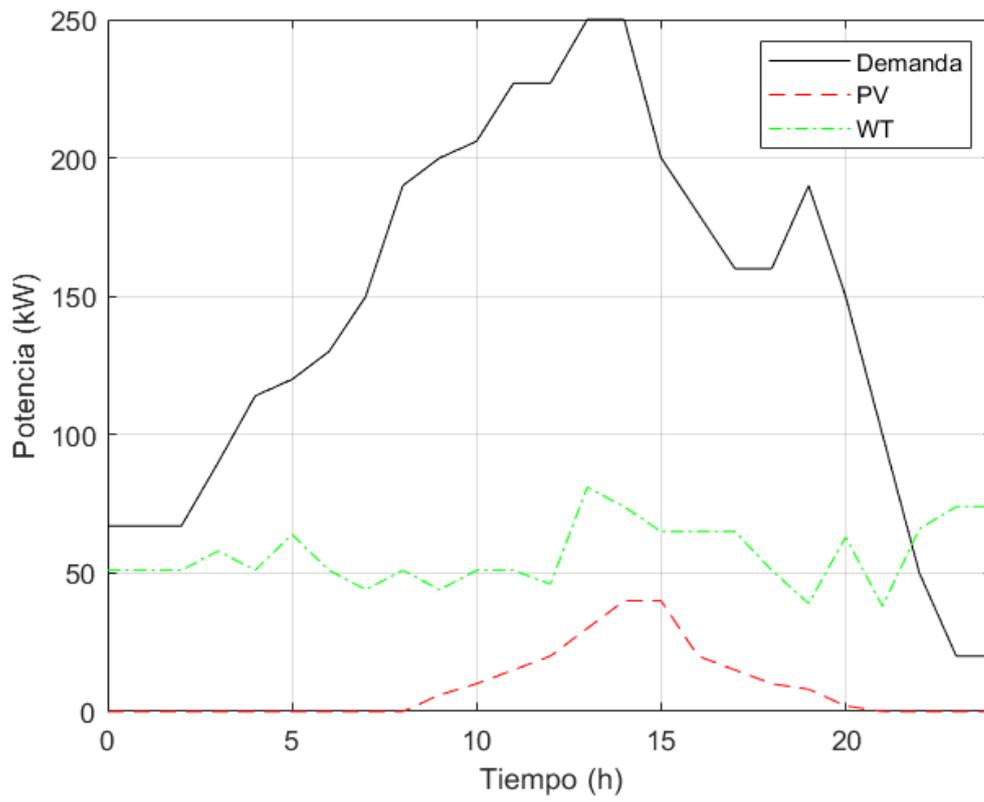


Figura 4.3: Demanda, generación eólica y fotovoltaica

Capítulo 5

Simulación

5.1. Introducción

En este Capítulo se realiza una descripción del algoritmo implementado, se plantean diferentes casos de estudio y se realizan las simulaciones de los mismos. Posteriormente, se comentan los resultados obtenidos.

5.2. Casos de estudio

Para la resolución del problema se ha implementado un algoritmo en MATLAB, que a través de la función *intlinprog* se obtiene la solución a la función objetivo planteada. En este algoritmo se han implementado los datos iniciales de curvas de demanda y curvas de generación de energía renovable, las cuales pueden observarse en en la Fig. 4.3. También se implementa como entrada los límites de las unidades de generación, como puede observarse en la Tabla 4.1. Además, se implementan como datos de entrada los parámetros en las Tablas 4.2 y 3.7. Los datos de entrada que varían según el caso son el SOC_{min} y el SOC_{max} .

Para la simulación del problema se implementa en el algoritmo la función coste que aparece en la Ecuación 4.1, con los datos de entrada anteriormente mencionados y esta función, se aplica la función de MATLAB *intlinprog*. Esta función aplica un método de programación lineal para resolver el problema. Una vez el problema está resuelto se imprimen unas gráficas para analizar la evolución del sistema en 24 horas.

5.2.1. Influencia de las baterías en los casos de estudio

Inicialmente, se plantean tres casos de estudio para analizar el efecto de las unidades de almacenamiento de energía sobre el sistema, y como afectan a la solución del problema.

En la Tabla 5.1, se plantean los casos de estudio variando parámetros de las baterías. Se va a variar el SOC_{min} y el SOC_{max} , variando así el estado de carga de la batería para observar como evoluciona en el periodo de 24 horas hacia delante.

Tabla 5.1: Casos de estudio

Caso	$SOC_{min}(kWh)$	$SOC_{max}(kWh)$
1	70	280
2	0	280
3	70	250

Caso 1

En este caso se analiza la evolución del sistema cuando el SOC_{min} y el SOC_{max} de las baterías es 70 kWh y 280 kWh respectivamente.

Se obtiene como solución de la función objetivo, un coste de 922.05\$. Lo que significa que ese sería el mínimo coste de operación de la microrred en las condiciones de este caso de estudio, en 24 horas hacia delante.

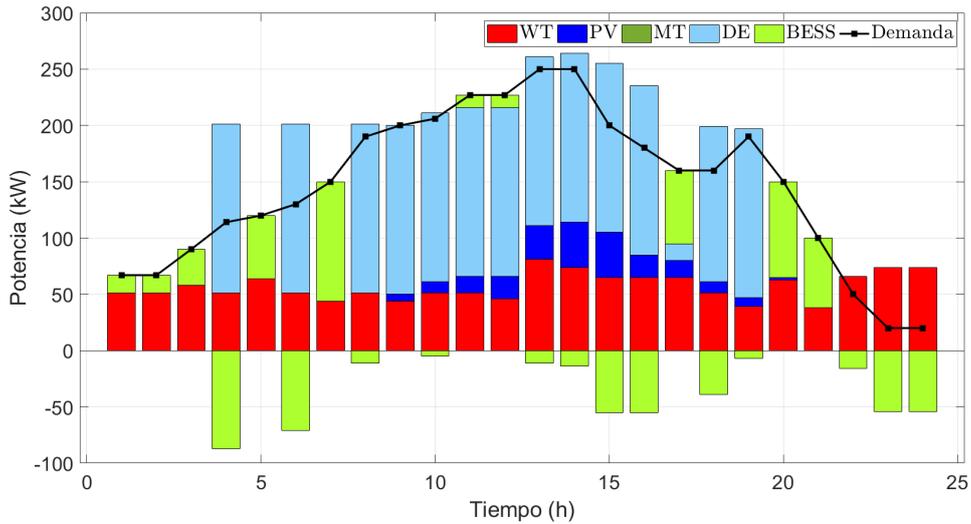


Figura 5.1: Evolución del sistema en el Caso 1

En la Fig. 5.1, se muestran los valores de generación de las unidades del sistema, resultado de la aplicación del Despacho Económico. Los valores negativos de las baterías indican que las baterías se están cargando y los valores positivos indican que las baterías están cediendo energía al sistema. En este caso las baterías se están cargando durante 13 horas y ceden energía durante 10 horas, hay una hora en la que las baterías ni ceden ni consumen energía. El generador diésel interviene produciendo energía durante 14 horas, en algunas ocasiones generando en exceso, llegando a su máxima capacidad. No es aconsejable tener en el sistema una unidad de generación operando al máximo de su capacidad.

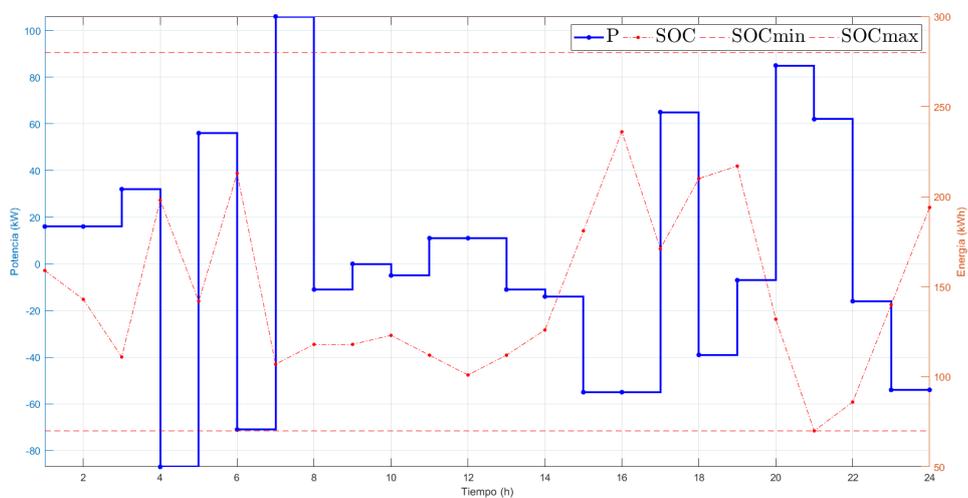


Figura 5.2: Evolución de las baterías en el Caso 1

Caso 2

En este caso se analiza la evolución del sistema cuando el SOC_{min} y el SOC_{max} de las baterías es 0 kWh y 280 kWh respectivamente.

Se obtiene como solución de la función objetivo, un coste de 919.70\$. Lo que significa que ese sería el mínimo coste de operación de la microrred en las condiciones de este caso de estudio, en 24 horas hacia delante.

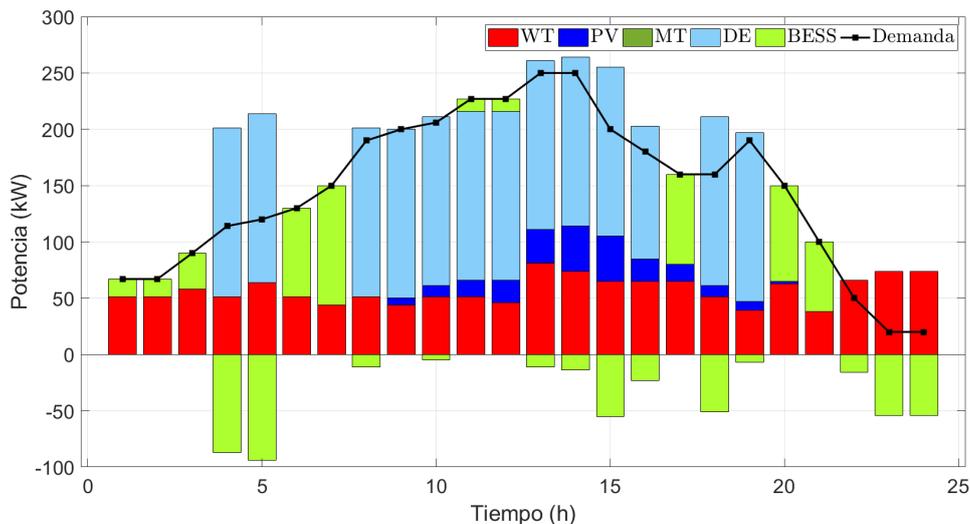


Figura 5.3: Evolución del sistema en el Caso 2

En la Fig. 5.3, se muestra el resultado de la aplicación del Despacho Económico al sistema. En este caso, el generador diésel opera durante 13 horas, en algunas ocasiones por encima de la demanda de energía para ceder esta diferencia a las baterías y así poder cargarlas. La microturbina no interviene en este caso. Respecto a las unidades de almacenamiento por baterías, se cargan durante 13 horas y ceden energía durante 10 horas, debido a que hay una hora en la que las baterías no consumen ni ceden energía al sistema, al igual que ocurre en el caso anterior. Las unidades de generación no controlables, como son la turbina eólica y la unidad fotovoltaica, producen energía siguiendo las curvas de generación definidas en la Fig. 4.3.

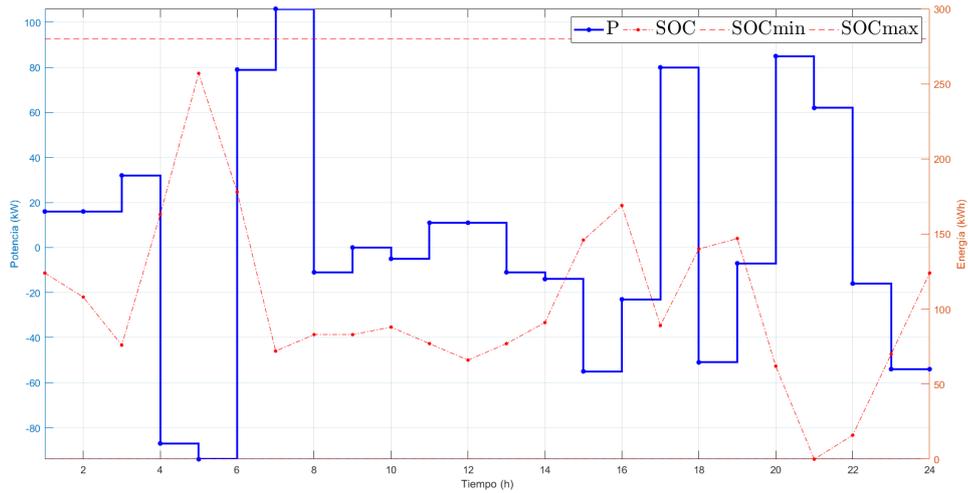


Figura 5.4: Evolución de las baterías en el Caso 2

Caso 3

En este caso se analiza la evolución del sistema cuando el SOC_{min} y el SOC_{max} de las baterías es 70 kWh y 250 kWh respectivamente.

Se obtiene como solución de la función objetivo, un coste de 922.80\$. Lo que significa que ese sería el mínimo coste de operación de la microrred en las condiciones de este caso de estudio, en 24 horas hacia delante.

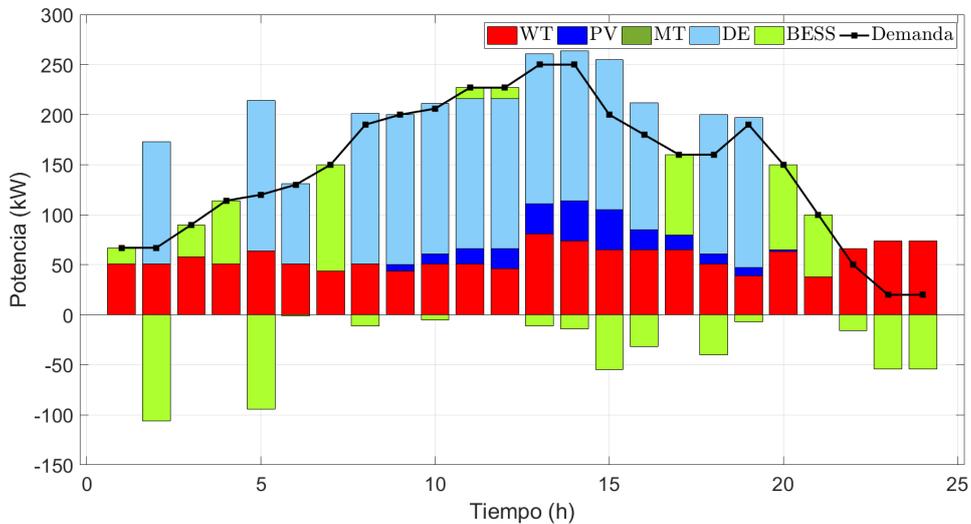


Figura 5.5: Evolución del sistema en el Caso 3

En la Fig. 5.5, se muestra el resultado de la aplicación del Despacho Económico a la microrred. En este caso, las baterías consumen energía del sistema y se cargan durante 13 horas y aportan energía durante 10 horas. Respecto a las unidades de generación controlables, el generador diésel genera energía durante 14 horas de las 24 horas analizadas. En este caso la microturbina no interviene en el Despacho Económico.

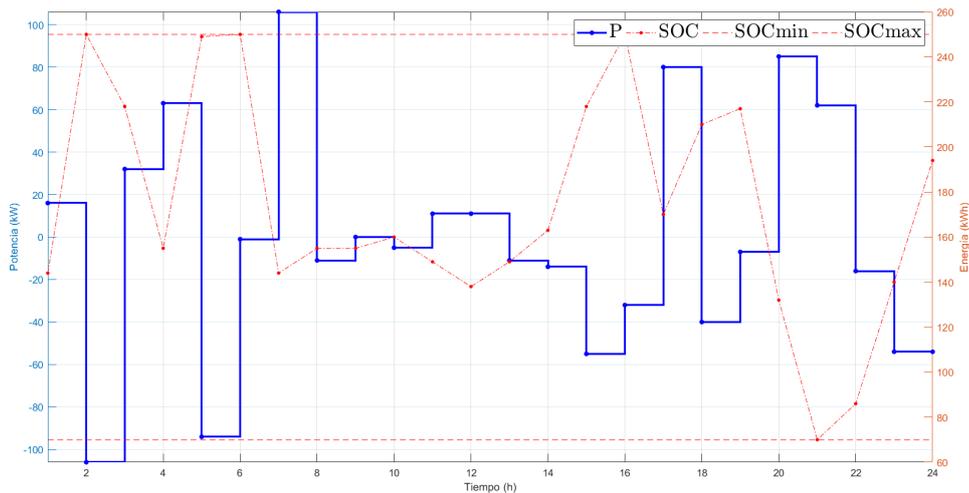


Figura 5.6: Evolución de las baterías en el Caso 3

Como puede observarse en las Fig. 5.1, Fig. 5.3 y Fig. 5.5 se cumple la demanda de carga para las 24 horas del estudio. Durante las 24 horas se tiene un suministro casi constante de energía eólica, apoyado por el suministro de energía fotovoltaica. En este caso, juega un papel fundamental la generación de energía por parte del generador diésel, que ante el aumento de la demanda y la no posibilidad de satisfacerla por parte de las energías renovables, debe cubrir esa diferencia de generación hasta llegar a cubrir la demanda. En algunos casos ayudado por la entrega de energía almacenada por las baterías.

Se plantean horas determinadas en las que el generador diésel genera más energía de la demandada, para poder así ceder parte de esa energía a las baterías y poder almacenarla para su posterior consumo.

El aspecto a destacar en los tres casos es la evolución de la carga de las baterías y la potencia que generan o consumen. La principal diferencia reside en las primeras horas del estudio, ya que en cada caso las baterías generan o

consumen una energía determinada, aspecto relacionado con el estado de carga y la intervención de la generación de energía por parte del generador diésel.

- En el Caso 1, como puede observarse en la Fig. 5.2, la batería cede energía al sistema, pero a partir de la hora 4 empieza a consumir energía del sistema. Es en este momento cuando el generador diésel empieza a generar energía para cubrir la demanda. Esto se debe a que el estado de carga de la batería disminuye y por tanto en las siguientes horas no es capaz de suministrar la energía suficiente. Por ello en la siguiente hora almacena energía para posteriormente volverla a ceder al sistema. Así se crea una sinergia entre las unidades de generación controlables y las baterías.

Respecto al estado de carga de la batería, como puede observarse en la Fig. 5.2, está directamente relacionado con la energía que las baterías ceden o absorben de la microrred. Coincidiendo en este caso que el estado de carga llega a su mínimo a las 21 horas, con una subida en la entrega de energía al sistema durante la hora anterior.

- En el Caso 2, como puede observarse en la Fig. 5.4, la batería cede energía al sistema, pero a partir de la hora 4 empieza a consumir energía del sistema. Es en este momento cuando el generador diésel empieza a generar energía para cubrir la demanda. En este caso al ser el estado de carga inicial menor que en el caso anterior, las baterías almacenan energía durante más tiempo. Por ello en las siguiente dos horas almacena energía para posteriormente volverla a ceder al sistema. Así se crea una sinergia entre las unidades de generación controlables y las baterías.

Respecto al estado de carga de la batería, como puede observarse en la Fig. 5.4, está directamente relacionado con la energía que las baterías ceden o absorben de la microrred. Coincidiendo en este caso que el estado de carga llega a su mínimo a las 21 horas, al igual que en el caso anterior, con una subida en la entrega de energía al sistema durante la hora anterior. Aunque cabe destacar que en este caso, mientras las baterías almacenaban energía entre las horas 4 y 6, el estado de carga está cerca de llegar a su máximo.

- En el Caso 3, como puede observarse en la Fig. 5.6, el estado de carga inicial es menor que en los casos anteriores, por ello el generador diésel comienza a generar energía en la segunda hora.

Respecto al estado de carga de la batería, como puede observarse en la Fig. 5.6. El estado de carga alcanza su máximo hasta en tres ocasiones en

este caso, esto se debe a que el generador diésel genera energía suficiente para almacenar en las baterías y para satisfacer la demanda. Al igual que en los casos anteriores las baterías alcanzan su estado de carga mínimo entorno a las 21 horas.

En este caso, cabe destacar que las baterías sufren ciclos de carga y descarga más profundos respecto a los casos anteriores.

Debido a los coeficientes de coste definidos previamente, la unidad de generación controlable más económica, trabajando a las potencias de los casos planteados, es el generador diésel. Por ello comienza a generar energía antes que la microturbina.

Como puede observarse en los tres casos el precio de la función objetivo optimizada varía en un rango muy pequeño.

En conclusión, al tener en los tres casos la misma curva de demanda y de generación de energía renovable, solo varía el estado de carga mínimo y máximo de las baterías, lo que hace que las unidades de generación controlables deban generar energía a diferentes horas y a diferentes potencias. Con lo cual se puede decir que para el correcto diseño de una microrred, hay que tener en cuenta el correcto dimensionamiento de las baterías y controlar el estado de carga de las mismas.

5.2.2. Influencia de los límites de generación en los casos de estudio

Como se puede observar en los casos anteriormente planteados, el generador diésel trabaja en determinadas horas a máxima potencia y la microturbina no aporta energía al sistema. No es conveniente tener en el sistema una unidad generando a su máxima capacidad, por ello en esta sección se van a variar los límites de generación de las unidades controlables para analizar el impacto en el sistema. Los parámetros de la batería se mantendrán constantes a los niveles fijados en el Caso 1 ($SOC_{min} = 70kWh$ y el $SOC_{max} = 280kWh$).

Tabla 5.2: Casos de estudio

Caso	$P_{min}MT(kW)$	$P_{max}MT(kW)$	$P_{min}DE(kW)$	$P_{max}DE(kW)$
4	5	20	15	100
5	5	50	15	100
6	5	50	15	70

Caso 4

En este caso, se reduce el límite de generación superior del generador diésel a 100 kW, manteniendo los límites de generación de la microturbina de la configuración inicial de la microrred.

Se obtiene como solución de la función objetivo, un coste de 717.29\$. Lo que significa que ese sería el mínimo coste de operación de la microrred en las condiciones de este caso de estudio, en 24 horas hacia delante.

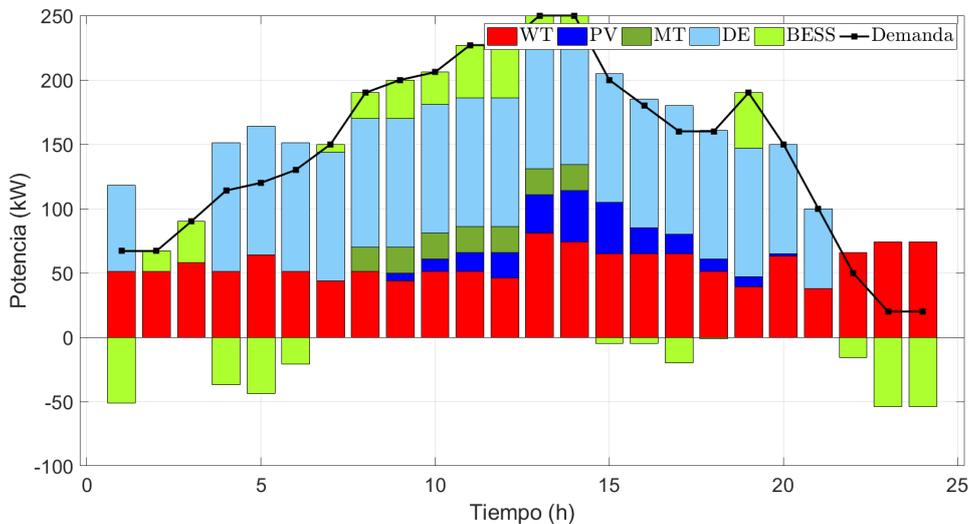


Figura 5.7: Evolución del sistema en el Caso 4

En la Fig. 5.7, se observa el resultado de la aplicación del Despacho Económico a la microrred, mostrándose los valores de generación de cada unidad. En este caso, las baterías consumen energía del sistema, durante 11 horas y cediendo energía durante 11 horas, ya que existen dos horas en la que las baterías no consumen ni ceden energía al sistema. Respecto a las unidades de generación controlables, el generador diésel aporta energía al sistema durante 19 horas,

mientras que la microturbina opera durante 7 horas. Como se puede observar en la gráfica, de 8 horas a 14 horas es necesario que las baterías ayuden a satisfacer la demanda de energía, ya que las unidades de generación controlables están operando al límite de su capacidad, debido a que en este caso se ha bajado el límite superior del generador diésel pero no se ha subido el límite superior de generación de la microturbina.

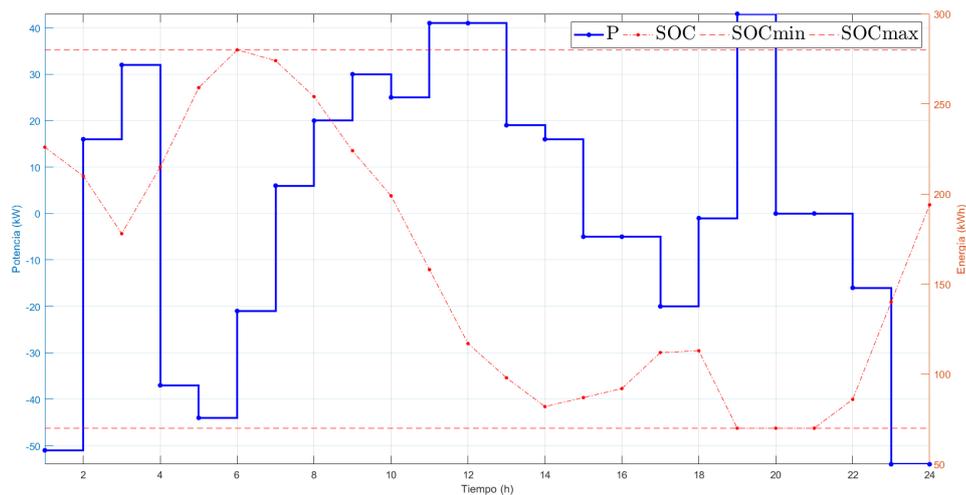


Figura 5.8: Evolución de las baterías en el Caso 4

Caso 5

En este caso, se mantiene el límite de generación superior del generador diésel, respecto al caso anterior. Aunque el límite de generación superior de la microturbina se aumenta a 50 kW.

Se obtiene como solución de la función objetivo, un coste de 850.81\$. Lo que significa que ese sería el mínimo coste de operación de la microrred en las condiciones de este caso de estudio, en 24 horas hacia delante.

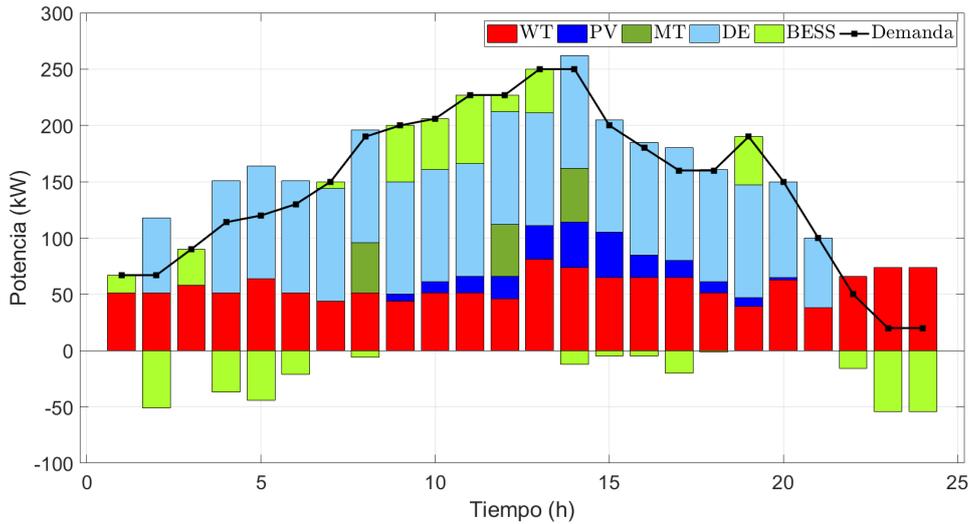


Figura 5.9: Evolución del sistema en el Caso 5

En la Fig. 5.9, se observa el resultado de la aplicación del Despacho Económico al sistema. En este caso, las baterías consumen energía del sistema durante 13 horas y aportan energía a la microrred durante 9 horas, existen 2 horas en las que las baterías no consumen ni ceden energía. Respecto a las unidades de generación controlables, el generador diésel opera durante 19 horas y la microturbina produce energía durante 3 horas. Cabe destacar que durante las horas de una alta demanda de energía, las baterías aportan energía. A diferencia del caso anterior la microturbina interviene en el pico de demanda aportando energía solo durante 3 horas y no a su máxima capacidad de generación.

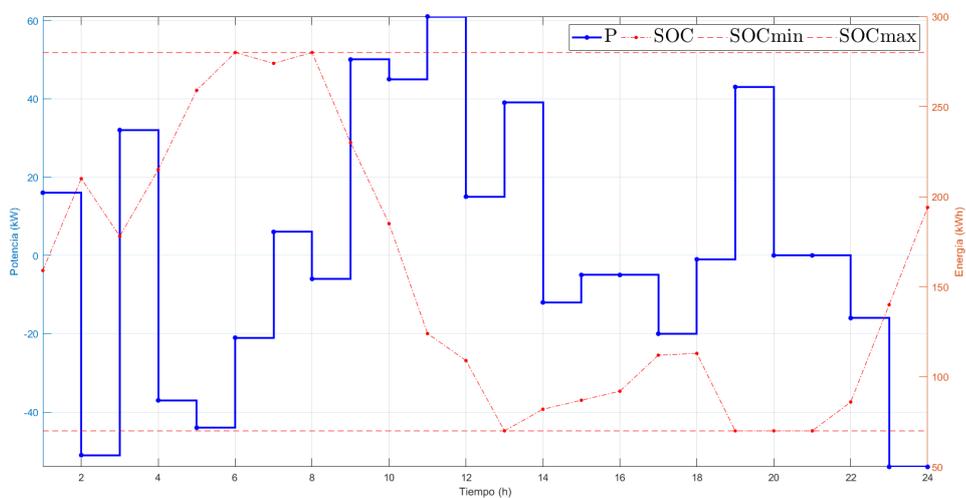


Figura 5.10: Evolución de las baterías en el Caso 5

Caso 6

En este caso, se mantiene el límite superior de generación de la microturbina a 50 kW, pero se baja el límite de generación del generador diésel a 70 kW.

Se obtiene como solución de la función objetivo, un coste de 772.99\$. Lo que significa que ese sería el mínimo coste de operación de la microrred en las condiciones de este caso de estudio, en 24 horas hacia delante.

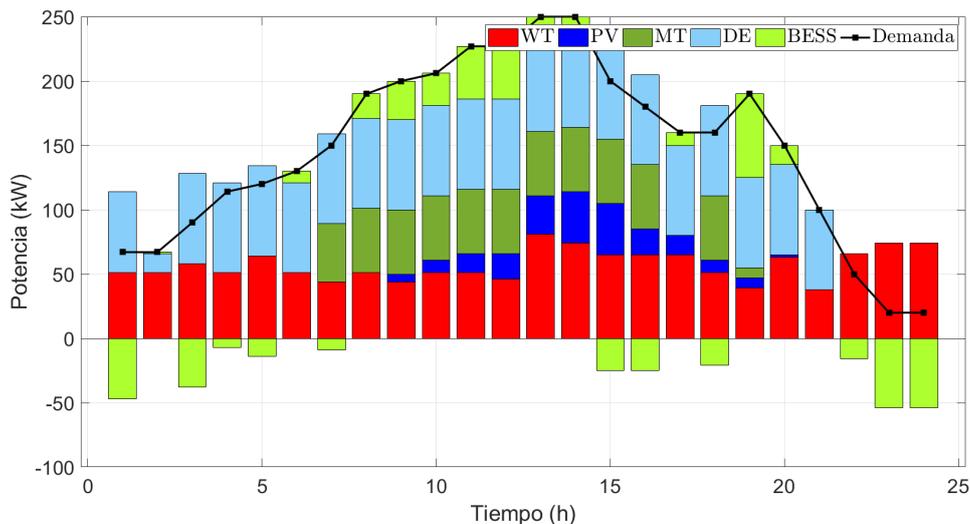


Figura 5.11: Evolución del sistema en el Caso 6

En la Fig. 5.11, se muestra el resultado de la aplicación del Despacho Económico al sistema. En este caso, las baterías consumen energía del sistema durante 11 horas y aportan energía a la microrred durante 12 horas, existe 1 hora en la que las baterías ni consumen ni ceden energía. Respecto a las unidades de generación controlables, el generador diésel interviene en el sistema durante 21 horas y la microturbina opera durante 11 horas. Cabe destacar que en las horas de más demanda las baterías ayudan a la generación de energía ya que las unidades de generación controlables están operando a su máxima capacidad, aspecto negativo de la simulación. Las unidades de generación renovables operan según las curvas de generación definidas previamente en la Fig. 4.3.

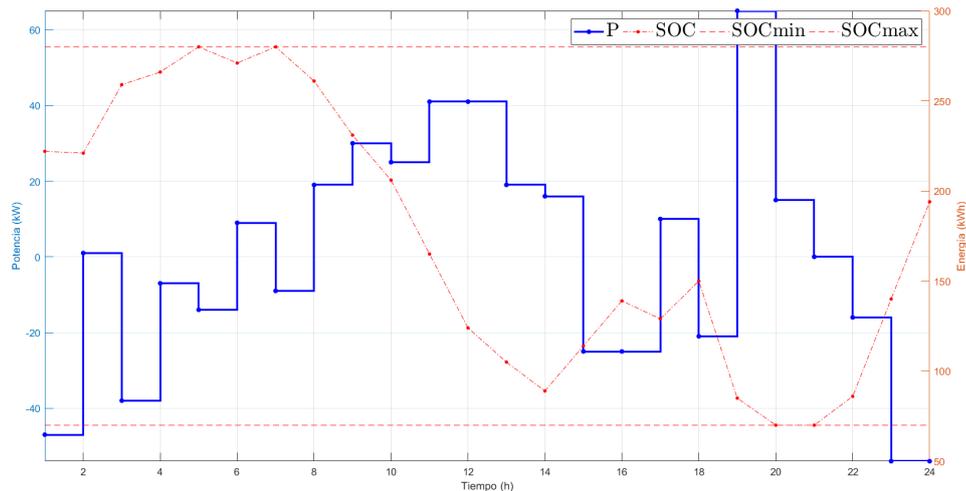


Figura 5.12: Evolución de las baterías en el Caso 6

Como puede observarse en las Fig. 5.7, Fig. 5.9 y Fig. 5.11 se cumple la demanda de carga para las 24 horas del estudio. Durante las 24 horas se tiene un suministro casi constante de energía eólica, apoyado por el suministro de energía fotovoltaica. En estas simulaciones se puede observar el impacto de los límites de operación en el cálculo del Despacho Económico. Tras analizar los diferentes casos, interviene la microturbina a diferencia de los tres primeros casos simulados, pero sigue predominando la aparición del generador diésel ante la microturbina debido a los coeficientes de costes expuestos en la Tabla 4.2. En algunos casos debido a disminuir el límite superior de operación del generador diésel, se obtiene que las unidades operan a su máxima capacidad, aunque estas situaciones suceden con una menor frecuencia respecto a los tres primeros casos.

Respecto a los procesos de carga y descarga de las baterías y los estados de carga de las mismas, en cada caso se obtienen resultados diferentes aunque similares, ya que en las tres simulaciones los parámetros de las baterías no varían. Las observaciones a destacar son:

- En el Caso 4, como puede observarse en la Fig. 5.8, las baterías alcanzan su máximo estado de carga a las 6 horas de simulación, produciéndose después una fuerte descarga de las mismas desde las 6 horas hasta las 14 horas, hasta llegar casi a su límite inferior de carga. Posteriormente, se cargan las baterías hasta que a las 19 horas de simulación llegan a su límite inferior de carga permaneciendo en este durante 2 horas. Finalmente, se cargan de 21 horas a 24 horas y alcanzan el estado de carga inicial.

- En el Caso 5, como puede observarse en la Fig. 5.10, las baterías intervienen cediendo energía en las primeras horas y posteriormente se cargan hasta alcanzar el estado de carga máximo a las 6 horas, permaneciendo en este durante 2 horas. Posteriormente, sufren una fuerte descarga desde las 8 horas hasta las 13 horas, llegando a su estado de carga mínimo. De 13 horas a 18 horas las baterías logran cargarse, aunque posteriormente vuelven al estado de carga mínimo hasta las 21 horas. Finalmente, se cargan de 21 horas a 24 horas y alcanzan el estado de carga inicial.
- En el Caso 6, como puede observarse en la Fig. 5.12, las baterías comienzan desde el primer momento a cargarse hasta alcanzar su nivel máximo de carga a las 5 horas, en este permanece durante aproximadamente dos horas. Posteriormente, las baterías sufren un proceso de 7 horas a 14 horas, en este momento las baterías permanecen próximas a su estado mínimo de carga, aunque posteriormente se cargan. Las baterías alcanzan el nivel mínimo de carga a las 20 horas, permaneciendo en este durante una hora. Finalmente, se cargan de 21 horas a 24 horas y alcanzan el estado de carga inicial.

Un aspecto a destacar del comportamiento de las baterías en estas simulaciones es la profundidad de descarga que sufren en determinadas horas. Teniendo un comportamiento similar en las tres simulaciones aunque diferenciándose en momentos puntuales debido a la intervención de las unidades de generación controlables a diferentes horas. El fuerte proceso de descarga que se pueden observar en las tres simulaciones se relaciona con el hecho de que las baterías ayudan en las horas de más demanda del sistema debido a la variación de los límites de generación de las unidades.

Respecto al coste total de operación de la microrred, varía según el caso planteado. A continuación se exponen los precios totales de cada caso:

Tabla 5.3: Coste total de operación de la microrred

Caso	Coste (\$)
1	922.05
2	919.70
3	922.80
4	717.29
5	850.81
6	772.99

En los tres primeros casos, se obtienen unos costes de operación similares, ya que se varía el estado de carga de las baterías y esto no supone un gran cambio en cuanto a precios de generación. El caso de menor coste es el Caso 2, se obtiene cuando se define el límite de estado de carga inferior en 0 kWh.

En los tres siguientes casos, se obtienen unos costes de operación de la microrred menores respecto a los tres primeros casos, esto se debe a la disminución de los límites de generación de las unidades controlables. En estos casos intervienen las baterías cediendo energía en momentos claves como el aumento de la demanda en el sistema. El caso de menor coste es el Caso 4, se obtiene cuando se establece el límite superior de generación del generador diésel en 100 kW. Esto produce que las unidades de generación controlables intervengan aportando una energía menor y las baterías intervengan aportando más energía que en los casos anteriores. Al no tener gasto asociado a las baterías, obtenemos un menor coste de operación del sistema.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

Respecto al objetivo de la investigación de este Trabajo de Fin de Grado que es la optimización del coste de operación de una microrred trabajando en modo aislado de la red principal de suministro de energía, los resultados obtenidos ha permitido concluir que la aplicación del Despacho Económico a la microrred, a través de una programación no lineal del problema propuesto, cumple con el objetivo propuesto.

Para la optimización del Despacho Económico en la microrred, son de vital importancia las unidades de generación controlables y las unidades de almacenamiento de energía por baterías. Las conclusiones que pueden derivarse del objetivo planteado son:

- Cuando las unidades de generación controlables generan energía para cubrir la demanda, las baterías son capaces de beneficiarse y acumular energía para posteriormente cederla al sistema, como se ha podido ver en las simulaciones. De esta forma las baterías se constituyen como un elemento crucial en el control y optimización de la microrred.
- En las simulaciones realizadas, de las unidades de generación controlables (generador diésel y microturbina), el generador diésel ha intervenido con mayor frecuencia. Esto se debe a que los coeficientes de coste de generación son menores en el caso del generador diésel respecto a la microturbina.

- No es conveniente tener unidades de generación operando a su máxima capacidad como se observa en determinadas simulaciones. Por ello se varían los límites de generación y en este sentido se concluye con una mayor participación de las baterías en las simulaciones.

Los resultados obtenidos sugieren que las unidades de almacenamiento de energía por baterías son un elemento de gran utilidad para la microrred, ya que ayudan a los elementos de generación controlables en el objetivo de optimización de la microrred.

6.2. Limitaciones

Las limitaciones encontradas durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado han sido varias:

- La materia trabajada durante la realización de este Trabajo excede los conceptos adquiridos durante el transcurso del Grado, por ello se han simplificado algunos conceptos complejos.
- Por motivos mencionados en el punto anterior, el problema de programación no lineal se ha linearizado en el algoritmo utilizado para el cálculo del objetivo de minimizar el coste de operación de una microrred.
- En este Trabajo de Fin de Grado no se ha tenido en cuenta el coste de operación de las baterías, relacionado con el proceso de carga y descarga. Aspecto que puede afectar al coste total de operación de la microrred en un caso práctico.

6.3. Futuros trabajos

Como futuros trabajos se puede plantear el problema desde un enfoque distinto de programación de la optimización del coste de operación de la microrred. Existen otros métodos como la programación cuadrática, programación entera, programación estocástica, etc.

También, se puede ampliar el alcance de la investigación a la aplicación del paso previo del Despacho Económico, el Unit Commitment. Así se llevaría a cabo

un punto de vista más amplio y completo del problema propuesto. Esta propuesta puede ser una opción de Trabajo de Fin de Máster, ya que abarca una extensión y conocimiento mayor que el Trabajo de Fin de Grado.

Bibliografía

- [1] “Enerdata,” <https://datos.enerdata.net>.
- [2] “World Bank Open Data,” <https://datos.bancomundial.org>.
- [3] R. E. de España, “Las energías renovables en el sistema eléctrico español,” 2018.
- [4] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, and M. Benbouzid, “Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects,” *Applied energy*, vol. 222, pp. 1033–1055, 2018.
- [5] A. A. Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar, and A. Anpalagan, “A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1664–1683, 2016.
- [6] “Tknika,” <https://tknika.eus/cont/micro-red-isare/>.
- [7] “Norvento,” <https://www.norvento.com/caso-estudio-microrredes/>.
- [8] “Capstone Turbine Corporation (CPST),” <https://es.capstoneturbine.com/services>.
- [9] “El periódico de la energía,” <https://elperiodicodelaenergia.com/europa-ha-perdido-la-batalla-de-las-baterias-de-ion-litio-contra-los-paises-asiaticos/>.
- [10] C. Schwaegerl and L. Tao, “The microgrids concept,” in *Microgrids: Architectures and control*. Wiley, 2013, pp. 1–24.
- [11] N. Hatziargyriou, J. Amantegui, B. Andersen, M. Armstrong, P. Boss, B. Dalle, G. de Montravel, A. Negri, C. A. Nucci, and P. Southwell, “Cigre wg “network of the future”.”
- [12] Y. Bamberger, J. Baptista, R. Belmans, B. M. Buchholz, M. Chebbo, J. L. D. V. Doblado, V. Efthymiou, L. Gallo, E. Handschin, N. Hatziargyriou *et al.*,

“Vision and strategy for europe’s electricity networks of the future: European technology platform smart grids,” 2006.

- [13] Y. Zhang, N. Gatsis, and G. B. Giannakis, “Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables,” *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944–953, 2013.
- [14] N. D. Hatziargyriou, F. Kanellos, G. Kariniotakis, X. Le Pivert, N. Jenkins, N. Jayawarna, J. A. P. Lopes, J. Gil, C. Moreira, J. Oyarzabal *et al.*, “Modelling of micro-sources for security studies,” 2004.
- [15] N. Hatziargyriou, N. Jenkins, G. Strbac, J. A. Lopes, J. Ruela, A. Engler, G. Kariniotakis, J. Oyarzabal, and A. Amorim, “Microgrids-large scale integration of microgeneration to low voltage grids,” 08 2006.
- [16] G. Davis, “Integration of distributed energy resources the certs microgrid concept,” *California Energy Commission*, 2003.
- [17] L. Yunwei and F. Nejabatkhah, “Overview of control, integration and energy management of microgrids,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 212–222, 2014.
- [18] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, “Smart grid technologies: Communication technologies and standards,” *IEEE transactions on Industrial informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011.
- [19] F. Gomez-Cuba, R. Asorey-Cacheda, and F. J. Gonzalez-Castano, “Smart grid last-mile communications model and its application to the study of leased broadband wired-access,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 5–12, 2013.
- [20] A. Varela Souto, “Optimization and energy management of a microgrid based on frequency communications,” 2016.
- [21] L. I. Minchala-Avila, L. E. Garza-Castañón, A. Vargas-Martínez, and Y. Zhang, “A review of optimal control techniques applied to the energy management and control of microgrids,” *Procedia Computer Science*, vol. 52, pp. 780–787, 2015.
- [22] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou, “Centralized control for optimizing microgrids operation,” in *2011 IEEE power and energy society general meeting*. IEEE, 2011, pp. 1–8.

- [23] S. Conti, R. Nicolosi, and S. Rizzo, "Optimal dispatching of distributed generators in an mv autonomous micro-grid to minimize operating costs and emissions," in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2010, pp. 2542–2547.
- [24] H. Kanchev, V. Lazarov, and B. Francois, "Environmental and economical optimization of microgrid long term operational planning including pv-based active generators," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*. IEEE, 2012, pp. LS4b–2.
- [25] S. Li, J. Proano, and D. Zhang, "Microgrid power flow study in grid-connected and islanding modes under different converter control strategies," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2012, pp. 1–8.
- [26] M. Andreasson, D. V. Dimarogonas, K. H. Johansson, and H. Sandberg, "Distributed vs. centralized power systems frequency control," in *2013 European Control Conference (ECC)*. IEEE, 2013, pp. 3524–3529.
- [27] Y. Levron, J. M. Guerrero, and Y. Beck, "Optimal power flow in microgrids with energy storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3226–3234, 2013.
- [28] C. O. Adika and L. Wang, "Autonomous appliance scheduling for household energy management," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 5, no. 2, pp. 673–682, 2013.
- [29] A. Hooshmand, B. Asghari, and R. Sharma, "A novel cost-aware multi-objective energy management method for microgrids," in *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [30] L. Duan and R. Zhang, "Dynamic contract to regulate energy management in microgrids," in *2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. IEEE, 2013, pp. 660–665.
- [31] K. Ma, G. Hu, and C. J. Spanos, "Energy consumption scheduling in smart grid: A non-cooperative game approach," in *2013 9th Asian control conference (ASCC)*. IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [32] M. Erol-Kantarci, B. Kantarci, and H. T. Mouftah, "Cost-aware smart microgrid network design for a sustainable smart grid," in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 2011, pp. 1178–1182.

- [33] A. M. Giacomoni, S. Y. Goldsmith, S. M. Amin, and B. F. Wollenberg, "Analysis, modeling, and simulation of autonomous microgrids with a high penetration of renewables," in *2012 IEEE power and energy society general meeting*. IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [34] A. Zakariazadeh, S. Jadid, and P. Siano, "Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 523–533, 2014.
- [35] S. A. Arefifar, Y. A.-R. I. Mohamed, and T. H. El-Fouly, "Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1491–1502, 2012.
- [36] B. Khorramdel and M. Raoofat, "Optimal stochastic reactive power scheduling in a microgrid considering voltage droop scheme of dgs and uncertainty of wind farms," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 994–1006, 2012.
- [37] B. Zhao, Y. Shi, X. Dong, W. Luan, and J. Bornemann, "Short-term operation scheduling in renewable-powered microgrids: A duality-based approach," *IEEE Transactions on sustainable energy*, vol. 5, no. 1, pp. 209–217, 2013.
- [38] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, and T. S. Raj, "Optimal sizing of distributed energy resources for integrated microgrids using evolutionary strategy," in *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. IEEE, 2012, pp. 1–8.
- [39] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380–3389, 2013.
- [40] T. Wakui, T. Kinoshita, and R. Yokoyama, "A mixed-integer linear programming approach for cogeneration-based residential energy supply networks with power and heat interchanges," *Energy*, vol. 68, pp. 29–46, 2014.
- [41] F. Garcia and C. Bordons, "Optimal economic dispatch for renewable energy microgrids with hybrid storage using model predictive control," in *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2013, pp. 7932–7937.

- [42] S. Wang, X. Fan, L. Han, and L. Ge, "Improved interval optimization method based on differential evolution for microgrid economic dispatch," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 16, pp. 1882–1890, 2015.
- [43] F. Ornelas-Tellez and J. J. Rico-Melgoza, "Optimal tracking control for energy management systems in microgrids," in *2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2013, pp. 489–492.
- [44] M. Khederzadeh, "Optimal automation level in microgrids," *IET Conference Proceedings*, pp. 0160–0160(1), January 2013. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2013.0587>
- [45] S. Y. Abujarad, M. Mustafa, and J. Jamian, "Recent approaches of unit commitment in the presence of intermittent renewable energy resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 215–223, 2017.
- [46] B. Saravanan, E. Vasudevan, and D. Kothari, "Unit commitment problem solution using invasive weed optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 21–28, 2014.
- [47] F. Bouffard and F. D. Galiana, "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. IEEE, 2008, pp. 1–11.
- [48] T.-O. Ting, M. Rao, C. K. Loo, and S. Ngu, "Solving unit commitment problem using hybrid particle swarm optimization," *Journal of heuristics*, vol. 9, no. 6, pp. 507–520, 2003.
- [49] P. A. Ruiz, C. R. Philbrick, E. Zak, K. W. Cheung, and P. W. Sauer, "Uncertainty management in the unit commitment problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 642–651, 2009.
- [50] L. Alvarado-Barrios, Á. R. del Nozal, J. B. Valerino, I. G. Vera, and J. L. Martínez-Ramos, "Stochastic unit commitment in microgrids: Influence of the load forecasting error and the availability of energy storage," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2060–2069, 2020.

- [51] V. M. Raj and S. Chanana, "Fuel cost optimization of an islanded microgrid considering environmental impact," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 120–124, 2016.
- [52] C. Deckmyn, J. Van de Vyver, T. L. Vandoorn, B. Meersman, J. Desmet, and L. Vandeveldel, "Day-ahead unit commitment model for microgrids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2017.
- [53] M. K. Al-Saadi, P. C. Luk, and W. Fei, "Impact of unit commitment on the optimal operation of hybrid microgrids," in *2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [54] A. M. A. El Motaleb, S. K. Bekdache, and L. A. Barrios, "Optimal sizing for a hybrid power system with wind/energy storage based in stochastic environment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1149–1158, 2016.
- [55] Á. Rodríguez del Nozal, D. Gutiérrez Reina, L. Alvarado-Barrios, A. Tapia, and J. M. Escaño, "A mpc strategy for the optimal management of microgrids based on evolutionary optimization," *Electronics*, vol. 8, no. 11, p. 1371, 2019.
- [56] J. Domínguez, J. Amador, and A. Martín, "Energías renovables y generación distribuida," *Current Trends in Energy and Sustainability 2017 Edition*, p. 17, 2017.
- [57] J. Oviedo-Salazar, M. Badii, A. Guillen, and O. L. Serrato, "Historia y uso de energías renovables history and use of renewable energies," *Daena Int. J. Good Conscience*, vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2015.
- [58] J. Zhu, *Optimization of power system operation*. John Wiley & Sons, 2015.