

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Optimización de los procesos de carga y descarga de baterías en redes de energía eléctrica con generación distribuida mediante Lógica Difusa

Autor: Carmen Rodríguez Ortiz

Tutor: Pablo Cortés Achedad

**Depto. de Organización Industrial y Gestión de
Empresas II**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Optimización de los procesos de carga y descarga de baterías en redes de energía eléctrica con generación distribuida mediante Lógica Difusa

Autor:

Carmen Rodríguez Ortiz

Tutor:

Pablo Cortés Achedad

Catedrático de Universidad

Depto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Optimización de los procesos de carga y descarga de baterías en redes de energía eléctrica con generación distribuida mediante Lógica Difusa

Autor: Carmen Rodríguez Ortiz

Tutor: Pablo Cortés Achedad

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Índice

Índice	7
Índice de Tablas	10
Índice de Figuras	11
1 Objeto del proyecto	15
2 Introducción	17
2.1 Energía eléctrica	17
2.2 Generación Distribuida	19
2.3 Sistemas de almacenamiento.....	21
3 Descripción del problema	23
3.1 Acumuladores	23
3.2 Generación solar	25
3.3 Equipos auxiliares	26
3.4 Conexiones entre equipos	27
4 Modelado	30
4.1 Equipos energéticos de la instalación.....	30
4.2 Datos y variables.....	31
4.2.1 Placas fotovoltaicas	31
4.2.2 Baterías	33
4.2.3 Generales	35
4.3 Restricciones técnicas.....	37
4.3.1 Restricciones técnicas de placas fotovoltaicas.....	37
4.3.2 Restricciones técnicas de baterías.....	38

4.4 Balances de energía	40
4.5 Función de costes	43
5 Descripción de la instalación.....	45
5.1 Situación geográfica.....	45
5.2 Características de la instalación	46
5.3 Consumo del inmueble.....	46
5.4 Características de los equipos.....	52
6 Lógica difusa.....	54
6.1 Marco teórico	54
6.2 Características de la Lógica Difusa	55
6.3 Metodología de resolución	56
6.4 Lógica Difusa aplicada al problema.....	58
6.4.1 Objetivo	58
6.4.2 Variables.....	59
6.4.3 Reglas lingüísticas	60
6.4.4 Funciones de membresía.....	63
6.4.5 Defuzzificación.....	64
6.4.6 Comprobar el sistema.....	64
7 Implementación de la lógica difusa.....	65
7.1 Lógica difusa en Matlab.....	65
7.2 Variables de entrada del sistema	67
7.3 Funciones de membresía	70
7.4 Salida del sistema fuzzy	73
8 Heurística de solución.....	76
8.1 Modelo difuso	76
8.2 Salida del modelo difuso	76
8.3 Resolución para un periodo.....	78
8.4 Resolución para un día completo	91
9 Resolución para distintos escenarios.....	93

9.1 Escenarios de 12 periodos	93
9.1.1 Primer escenario.....	95
9.1.2 Segundo escenario	98
9.1.3 Tercer escenario	101
9.2 Escenarios de 96 periodos	105
9.2.1 Demanda baja	106
9.2.2 Demanda media.....	109
9.2.3 Demanda alta	112
9.3 Nuevo escenario de resolución	117
9.3.1 Demanda Baja	118
9.3.2 Demanda Media.....	121
9.3.3 Demanda Alta	125
9.4 Comparación entre escenarios.....	129
10 Conclusiones	133
Bibliografía.....	137
Anexo A: Lógica Difusa para un periodo	139
Anexo B: Lógica Difusa para un día completo	145

Índice de Tablas

Tabla 1 - Datos técnicos de las placas fotovoltaicas	31
Tabla 2 - Datos económicos de las placas fotovoltaicas.....	32
Tabla 3 - Variables de las placas fotovoltaicas.....	32
Tabla 4 - Datos técnicos del equipo de baterías	33
Tabla 5 - Datos económicos del equipo de baterías.....	33
Tabla 6 - Variables principales del equipo de baterías	34
Tabla 7 - Variables auxiliares del equipo de baterías	35
Tabla 8 - Datos técnicos del sistema.....	35
Tabla 9 - Datos económicos totales y de la red eléctrica.....	36
Tabla 10 - Variables de la red eléctrica	36
Tabla 11 - Consumo eléctrico de tres habitaciones.....	48
Tabla 12 - Cálculo del consumo para un periodo.....	49
Tabla 13 - Consumo eléctrico de una habitación	50
Tabla 14 - Consumo eléctrico de seis habitaciones	51
Tabla 15 - Consumo (kWh) de energía eléctrica para 96 periodos.....	52
Tabla 16 - Características técnicas de los equipos	53
Tabla 17 - Matriz reglas lingüísticas	61
Tabla 18 - Pseudocódigo	81
Tabla 19 - Costes de operación	117

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolución de la demanda de energía eléctrica (TWh)	18
Figura 2 - Fuentes de energía para cargar las baterías	24
Figura 3 - Esquema del paso de la energía recibida del sol	27
Figura 4 - Flujo de electricidad	28
Figura 5 - Diagrama energía eléctrica.....	37
Figura 6 - Flujo de energía eléctrica.....	40
Figura 7 - Panel solar fotovoltaico	45
Figura 8 - Función de membresía	63
Figura 9 - Comando Fuzzy en MatLab.....	66
Figura 10 - Radiación global por horas	68
Figura 11 - Tarifas horarias julio	69
Figura 12 - Función de membresía de la variable potencia fotovoltaica	71
Figura 13 - Función membresía de la variable precio.....	71
Figura 14 - Función de membresía de la variable demanda.....	72
Figura 15 - Función de membresía de la variable de salida	73
Figura 16 - Salida fuzzy	74
Figura 17 - Demanda energética para los tres escenarios	94
Figura 18 - Nivel de almacenamiento primer escenario	95
Figura 19 - Coste primer escenario.....	96
Figura 20 - Distribución de costes por equipo del primer escenario	97
Figura 21 - Proporción de costes por equipo del primer escenario.....	97
Figura 22 - Generación energía en el primer escenario	98
Figura 23 - Nivel de almacenamiento segundo escenario	98
Figura 24 - Coste segundo escenario	99
Figura 25 - Distribución de costes por equipo del segundo escenario.....	100
Figura 26 - Proporción de costes por equipo del segundo escenario	100
Figura 27 - Generación energía en el segundo escenario.....	101
Figura 28 - Nivel de almacenamiento tercer escenario	102
Figura 29 - Coste tercer escenario.....	103

Figura 30 - Distribución de costes por equipo del tercer escenario	104
Figura 31 - Proporción de costes por equipo del tercer escenario	104
Figura 32 - Generación energía en el tercer escenario	105
Figura 33 - Distribución de la demanda para los tres escenarios de 96 periodos.....	106
Figura 34 - Nivel de almacenamiento demanda baja	106
Figura 35 - Coste demanda baja.....	107
Figura 36 - Distribución de costes por equipo demanda baja.....	108
Figura 37 - Proporción de costes demanda baja.....	108
Figura 38 - Generación energía con demanda baja	109
Figura 39 - Nivel de almacenamiento demanda media	110
Figura 40 - Coste demanda media.....	110
Figura 41 - Distribución de costes por equipo demanda media.....	111
Figura 42 - Proporción de costes demanda media.....	111
Figura 43 - Generación energía con demanda media	112
Figura 44 - Nivel de almacenamiento demanda alta	113
Figura 45 - Coste demanda alta.....	114
Figura 46 - Distribución de costes por equipo demanda alta.....	114
Figura 47 - Proporción de costes demanda media.....	115
Figura 48 - Generación energía con demanda alta	115
Figura 49 - Comparación costes de operación para las tres demandas	116
Figura 50 - Radiación global	117
Figura 51 - Demanda eléctrica para las tres situaciones	118
Figura 52 - Nivel de almacenamiento demanda baja	119
Figura 53 - Evolución del coste con demanda baja.....	119
Figura 54 - Distribución de costes por equipo con demanda baja	120
Figura 55 - Proporción de costes demanda baja.....	121
Figura 56 - Generación energía con demanda baja	121
Figura 57 - Nivel de almacenamiento demanda media	122
Figura 58 - Evolución del coste con demanda media.....	123
Figura 59 - Distribución de costes por equipo con demanda media	123
Figura 60 - Proporción de costes demanda media.....	124
Figura 61 - Generación energía con demanda media	124
Figura 62 - Evolución del nivel de almacenamiento con demanda alta	125
Figura 63 - Coste por periodo demanda alta.....	126
Figura 64 - Distribución de costes por equipos en demanda alta	127
Figura 65 - Proporción de costes por equipo en demanda alta	127

Figura 66 - Generación energía en demanda alta.....	128
Figura 67 - Comparación de los costes de operación para las tres demandas	129
Figura 68 - Comparación del coste de operación con demanda baja.....	130
Figura 69 - Comparación del coste de operación con demanda media.....	130
Figura 70 - Comparación del coste de operación con demanda alta.....	131

1 Objeto del proyecto

El **objetivo** de este trabajo es diseñar un sistema que gestione el funcionamiento del equipo de almacenamiento de un edificio con generación distribuida, con el fin de obtener resultados que permitan la optimización de los procesos de carga y descarga de las baterías.

El edificio cuenta con un sistema de generación de energía eléctrica por placas fotovoltaicas, un equipo de almacenamiento y conexión a la red eléctrica. De esta manera, y asegurando siempre que se satisface la demanda del edificio, se consigue una gestión eficiente tanto técnica como económica del uso de los equipos gracias al sistema diseñado.

El trabajo **comienza** estableciendo los motivos que han impulsado su realización, el estado actual del consumo de energía en España y las diferentes formas de obtenerla.

Una vez **comentada la situación** y los equipos presentes en el edificio, se diseña el modelo que define el problema. Este modelo muestra las distintas relaciones que pueden darse entre los equipos instalados, y se compone de las especificaciones y las restricciones técnicas de cada equipo, así como de las ecuaciones que modelan el funcionamiento de cada uno de ellos.

Tras la definición del modelo, se detalla cada parte de la instalación del inmueble, analizando los equipos y las características del edificio que influyen directamente en la resolución del problema, tales como la demanda eléctrica o la situación geográfica y climatológica de la zona.

El problema se resuelve aplicando una metodología de resolución llamada **lógica difusa**, de la que se obtienen las directrices de funcionamiento para las baterías en cada periodo de tiempo. Una vez resuelto el problema mediante lógica difusa, se desarrolla la programación del modelo ya definido, y se realizan distintas interacciones.

Para llevar a cabo las interacciones en cada periodo, es necesario conocer determinados datos de cada intervalo. Estos son la demanda de energía eléctrica, el estado de carga de los dispositivos de almacenamiento, el precio de consumo de la red eléctrica y la radiación solar incidente sobre las placas fotovoltaicas, que se traduce en la energía que se recogerá a través de las mismas.

Tras realizar las implementaciones, se muestran los resultados obtenidos para diferentes escenarios. Con las directrices de funcionamiento que resultan de la ejecución del programa se tiene una gestión eficiente de los equipos, aunque dadas sus características no es posible el funcionamiento en isla, es decir, sin disponer de conexión a la red eléctrica. Prescindir de esta conexión en un edificio cuyo objetivo es dar el mejor servicio a los clientes puede arriesgar la calidad de la estancia, si bien tendría que disponer de un generador para picos de demanda no esperados.

El sistema debe adaptarse a distintas instalaciones en las que los elementos difieran de los presentados en este trabajo, incorporando nuevos o eliminando algunos de los presentes. En tal caso, únicamente habría que añadir o eliminar las restricciones que incluyan el nuevo estado de los equipos del edificio, y realizar modificaciones en cuanto a los datos establecidos en el presente trabajo, si fuese necesario.

De igual forma, si las variaciones son de carácter geográfico, estableciendo los nuevos datos y parámetros de funcionamiento obtenidos para la nueva situación climatológica, se completarían los cambios necesarios para el funcionamiento del sistema.

2 Introducción

Desde los años 20 y a lo largo del siglo XX, se hizo necesario el abastecimiento de energía, garantizando unos estándares de calidad y aumentando progresivamente la energía demandada hasta los años 70. Fue a partir de esta década y a causa de la crisis del petróleo, cuando se redujo notablemente el suministro de energía.

A lo largo de este apartado, se presentan algunos datos sobre la demanda de energía eléctrica en España, los distintos tipos de generación distribuida y los sistemas de almacenamiento de energía. El consumo de energía eléctrica aumenta cada año, mientras que las fuentes de producción tradicionales van disminuyendo sus reservas. Surge por tanto la necesidad de desarrollar alternativas que permitan generar energía eléctrica con recursos naturales, como son el sol, el agua o el viento, así como dispositivos para almacenar esta energía generada.

Debido a esta creciente necesidad, este trabajo se desarrolla sobre un edificio que cuenta con un sistema de generación de electricidad a partir de la radiación solar. De esta manera y gracias a un sistema de almacenamiento, se reduce el consumo de energía de la red eléctrica y optimiza el uso de sus equipos. La alternativa de generar frente a consumir el total de la demanda energética de la red eléctrica no solo contribuye en una bajada de los costes, sino que reduce notablemente la contaminación.

2.1 Energía eléctrica

A medida que la sociedad se ha ido desarrollando ha aumentado la demanda de energía eléctrica. Las fuentes no renovables de energía, como son los combustibles fósiles, presentan un gran problema al ser limitados, además de la contaminación que suponen los deshechos que se generan en sus tratamientos.

También tienen un impacto socioeconómico, al encontrarse situados en un determinado número de países, que tienen el control sobre esta materia. Esto puede

llegar a originar grandes problemas globales, como las dos crisis del petróleo de 1973 y 1979, que tuvieron un significativo efecto sobre la política y economía a nivel mundial.

Actualmente, la energía eléctrica es uno de los pilares fundamentales de la economía mundial. Disponer de ella se ha convertido en algo imprescindible, debido a su amplio campo de aplicación en todos los aspectos de la sociedad.

En la figura 1 se muestra la evolución del consumo de energía eléctrica en España durante los últimos años, según la compañía Red Eléctrica de España.

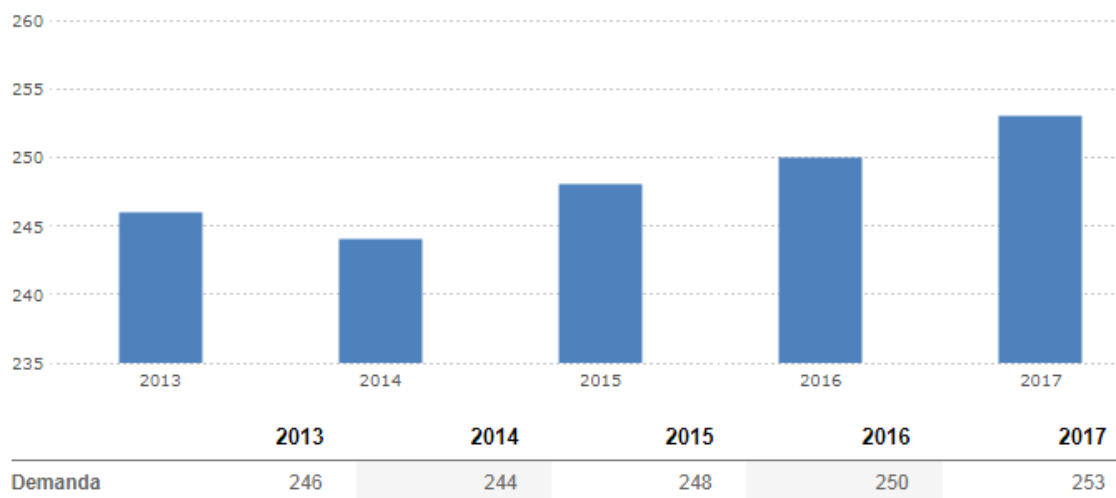


Figura 1 - Evolución de la demanda de energía eléctrica (TWh)

Fuente: Red Eléctrica de España

La demanda está aumentando a lo largo de los últimos años, y con previsión de continuar su ascenso. Por ello preocupa especialmente la evolución que están teniendo los sistemas de generación de energía no renovable, y la consideración de que no son inagotables.

Esta preocupación motiva a centrar este proyecto en un edificio con generación distribuida, haciendo uso de paneles fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento, consiguiendo reducir costes y contaminación al igual que garantizar una buena gestión del funcionamiento de los equipos.

2.2 Generación Distribuida

Hoy en día, los países industrializados, se abastecen de la energía generada en grandes instalaciones centralizadas. Uno de los inconvenientes de este sistema de producción son las pérdidas que se generan debido al transporte hasta el consumidor cuando se tienen que recorrer largas distancias.

La generación distribuida es la producción de electricidad en zonas cercanas al punto de consumo y aparece, entre otros, tras las nuevas políticas referidas tanto al mercado eléctrico como al medio ambiente. También motiva su aparición el desarrollo de sistemas de generación de energía a través de fuentes alternativas que se establecen en lugares próximos al punto de consumo, evitando así los inconvenientes del transporte.

Se instaura así una nueva forma para producir electricidad, disminuyendo las pérdidas por transporte al evitar grandes distancias y aprovechando, en muchos casos, las fuentes de energía renovables. En función de las necesidades del consumidor, se diferencian dos tipos de generación distribuida.

- Generación distribuida interconectada a la red: se mantiene la conexión a la red eléctrica, de manera que mientras sea posible se consumirá la energía generada, pero en los periodos del día en que sea necesario, el consumo se satisfará con la red eléctrica.
- Generación distribuida en isla: No existe la conexión a la red eléctrica, porque sea posible el autoabastecimiento, por dificultad geográfica o inviabilidad económica. Suelen ir acompañados de equipos de almacenamiento y generación por medio de energías no renovables para garantizar el abastecimiento.

También se pueden clasificar en función de la fuente de energía utilizada, diferenciándose entonces la generación distribuida renovable y la no renovable. A continuación, se muestran los sistemas de generación más utilizados:

- Generación distribuida renovable:
 - Mini-hidráulica: aprovecha la energía potencial del agua, que al mover una turbina, transforma esta energía en energía eléctrica. Para pertenecer a la categoría de mini-hidráulica, la potencia máxima instalada no superará los 10 MW.

- Eólica: la fuente de energía utilizada es el viento, que mueve las palas de los molinos, y esta energía mecánica se transforma en eléctrica por medio de un generador.
- Solar térmica: la radiación solar es la fuente utilizada para calentar un fluido, generalmente agua. Posteriormente se transforma en energía eléctrica o, en el caso de pequeñas instalaciones, se aprovecha como energía térmica directamente.
- Solar fotovoltaica: Los paneles fotovoltaicos se componen de pequeñas células que absorben la radiación solar que, al generar una corriente continua, terminan transformándola en energía eléctrica.
- Energía mareomotriz: las centrales mareomotrices hacen pasar el agua por turbinas, que aprovechan la energía del ascenso y descenso de las mareas.
- Energía geotérmica: es la energía térmica que se encuentra en el interior de la tierra, acumulada en rocas o agua. En zonas volcánicas, se hace pasar un fluido que absorba temperatura y lo transporte hasta la superficie de la tierra. Esta energía obtenida se puede aprovechar como energía térmica o transformarla en energía eléctrica.

➤ Generación distribuida no renovable:

- Motor alternativo: motores térmicos de combustión interna que aprovechan los gases generados debidos al proceso de combustión siendo la energía primaria más utilizada el gas natural. Presentan flexibilidad ante variaciones de carga.
- Turbina de gas: máquina térmica que tiene en su interior gas comprimido, que se mezcla con combustible para ser quemado a presión constante y produce trabajo con la expansión del gas.
- Residuos sólidos urbanos: se utilizan métodos que permitan su reciclado o eliminación de la gran cantidad de residuos que se producen. La incineración en hornos reduce el volumen de esta materia, además de generar energía térmica que puede ser aprovechada como tal o transformarla en energía eléctrica. Debe tratarse la emisión de gases de la combustión para evitar que salgan a la atmósfera.
- Biomasa: Aprovecha la energía química presente en la materia orgánica de dos formas posibles: o se utiliza como combustible, o se gasifica, y con esto se produce energía eléctrica.

- **Microturbinas:** son turbinas de pequeño tamaño, cuyo funcionamiento es similar al de la turbina de gas. Se encuentran incorporados los elementos necesarios para la generación de energía eléctrica en la propia turbina.
- **Pilas de combustible:** son dispositivos electroquímicos que transforman la energía química de un combustible en electricidad, calor y agua.

La generación de energía de manera renovable cada vez tiene más importancia, por lo que se desarrollan y mejoran distintas formas de obtenerla. El sol es la principal causa de todas las energías renovables, influyendo de distintas maneras sobre todas ellas.

2.3 Sistemas de almacenamiento

Para optimizar el aprovechamiento de la energía generada, es necesario disponer de sistemas de almacenamiento, de manera que en los periodos en los que se produzca más energía de la necesaria, se pueda almacenar el excedente para usarlo en otro periodo y se minimice el desperdicio.

En la actualidad existen distintos tipos de sistemas de almacenamiento. Se presenta a continuación una breve descripción de los equipos más utilizados:

- **Bombeo de agua:** simulan el funcionamiento de una central hidroeléctrica al estar compuesto por dos depósitos de agua que se encuentran a distinta altura, aprovechando la energía potencial para transformarla en eléctrica. En las horas de menor demanda, el agua es transportada al depósito que se encuentra a mayor altura para poder generar energía en los periodos de mayor demanda.
- **Volante de inercia:** permiten almacenar energía cinética, debida a la permanente rotación de una masa o volante. Esta energía aumenta al incrementar la masa giratoria, obteniéndose la energía eléctrica al conectar estos volantes a un motor generador.
- **Aire a presión:** El aire comprimido se almacena bajo tierra, con el fin de aprovechar su expansión para poner en marcha un turbogenerador.
- **Baterías:** constituyen el sistema de almacenamiento en forma de corriente continua más tradicional, existiendo variaciones en función del material del que se compongan los electrodos. El funcionamiento se debe a las

reacciones de oxidación-reducción producidas en estos electrodos, que convierten la energía química acumulada en corriente continua.

Para el problema que nos ocupa, el sistema de almacenamiento elegido son las baterías. Las más frecuentes son las de plomo-ácido, y dentro de este grupo, las de plomo-antimonio, plomo-selenio y plomo-calcio. El electrolito que separa los electrodos está compuesto por una disolución de ácido sulfúrico en agua. Esto implica la necesidad de un mantenimiento periódico, debido a los gases generados.

Además del mantenimiento, las baterías de plomo presentan otros inconvenientes como el corto ciclo de vida, la corrosión en las pletinas o su baja energía específica. Frente a estas desventajas, se presentan alternativas, como serían las de Níquel-Cadmio, a pesar de su alta toxicidad y precio, o las baterías que combinan el litio con otro ión o polímero.

Pero si el objetivo es almacenar energía producida por paneles solares, las baterías de gel son una buena alternativa, presentadas en el apartado siguiente.

3 Descripción del problema

El proyecto se desarrolla sobre un edificio en el que hay un sistema de generación distribuida, en el que se produce energía eléctrica a través de placas fotovoltaicas. La energía obtenida por la radiación solar se almacena en baterías, que complementan el sistema.

A continuación, se presentan los equipos existentes en el inmueble, las baterías, las placas fotovoltaicas y los inversores necesarios para transformar la energía producida y almacenada y así poder suministrarla al edificio.

3.1 Acumuladores

Debido a la intermitencia de la energía recibida del sol se hace imprescindible disponer de equipos de almacenamiento, que permitan acumular la energía producida en exceso en los intervalos de mayor radiación solar, evitando así cuantiosas pérdidas.

Esta energía almacenada se utiliza para compensar los periodos en los que la demanda no se puede satisfacer únicamente con el aporte de la energía producida en las placas solares. En estos periodos el aporte de electricidad se realiza tanto con la red eléctrica como con la energía de las baterías, cargadas en los periodos valle, donde la relación entre la producción y la demanda de electricidad permite almacenar energía. La fuente que se encargará de suministrar esta energía dependerá de las condiciones de cada momento y del nivel de almacenamiento que tengan las baterías.

En el problema presentado, existe la posibilidad de almacenar energía proveniente de la red eléctrica y no solamente de los generadores fotovoltaicos, como se muestra en la figura 2. Esto ocurrirá en los periodos en los que el precio de la electricidad sea lo suficientemente bajo. Se establece un límite para el precio por debajo del cual se compra para almacenar, siempre que haya capacidad para cargar

energía en las baterías. Este umbral es variable y fluctúa de la misma manera que lo hace la tarifa horaria de la red eléctrica, es decir, en función de la demanda.

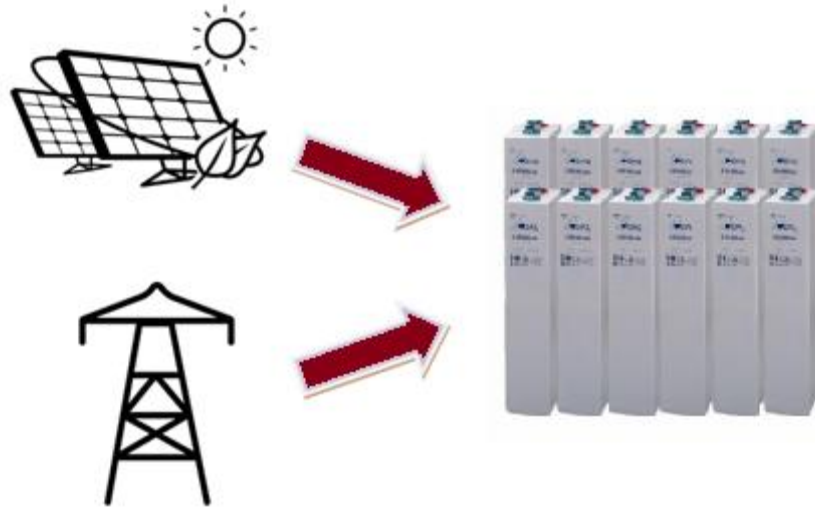


Figura 2 - Fuentes de energía para cargar las baterías
Fuente: Elaboración propia

El equipo de almacenamiento instalado en el edificio tiene suficiente capacidad tanto para albergar el exceso de energía proporcionado por las placas solares como para la que se compra de la red eléctrica. Los precios más baratos de la electricidad se sitúan en las primeras horas del día. En estos periodos, dependiendo de la estación del año, puede haber igualmente generación por parte de las placas fotovoltaicas. En los periodos estivales, esto ocasiona superposición al recibir electricidad en las baterías de ambas fuentes, por lo que el modelo considera esta posibilidad, dando prioridad a la energía obtenida de manera renovable.

Para almacenar la energía generada en instalaciones solares las baterías de gel son una buena alternativa, ya que integran calidad y seguridad. Están compuestas de un electrolito gelificado por lo que, aunque se volcase la batería, no habría derrames, a diferencia de lo que puede ocurrir con una batería de plomo. Además, este tipo de baterías viene en un envase sellado que no precisa mantenimiento.

Las baterías de gel permiten un alto número de ciclos de carga y descarga, lo que, acompañado de su baja autodescarga, las hace muy apropiadas para instalaciones solares. Están compuestas por grupos de vasos de 2V que, conectándose en serie, forman conjuntos de 12 o 24 V por lo general. Para alcanzar la capacidad deseada se instalan en paralelo los bloques que sean necesarios.

Este tipo de baterías tienen una vida útil de unos 12 años, superior a otros tipos de baterías usadas en instalaciones solares. Esto se debe a la alta densidad de su material, el gel, que permite un mayor rendimiento. Las características del gel también presentan una mayor resistencia a la corrosión, por lo que mantienen un funcionamiento óptimo con el paso de los años.

3.2 Generación solar

Gracias al desarrollo de la tecnología, a lo largo de los años se han ido diseñando y mejorando las técnicas para obtener energía de las fuentes renovables, que tienen un componente geográfico muy importante. Por tanto, en función de las características de la región, será más favorable la explotación de unas fuentes u otras.

De todas las posibles fuentes de producción de energía de manera renovable expuestas en el capítulo anterior, en el edificio objeto de este proyecto, únicamente hay paneles fotovoltaicos. Aprovechando la energía del sol se obtiene electricidad, teniendo como limitación que esto solamente ocurre mientras la radiación solar llegue a la superficie terrestre. Por tanto, ni en las horas nocturnas ni en los días tan nublados en los que no lleguen los rayos de luz, se producirá electricidad de esta manera.

Se aprovecha la situación geográfica en la que se encuentra el edificio, que es en la sierra norte de Sevilla. Esta característica, así como la existencia de equipos de almacenamiento y la conexión a la red eléctrica, convierten la instalación solar en una buena combinación a la hora de producir energía. De esta manera se reduce significativamente el coste de abastecimiento del edificio en comparación con utilizar únicamente la energía comprada a la red eléctrica.

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por un conjunto de células fotovoltaicas, sobre las que incide la radiación solar. Estas células, mediante el efecto fotoeléctrico, transforman la energía que reciben en electricidad.

La electricidad que se obtiene del conjunto de placas fotovoltaicas no puede suministrarse directamente al edificio, ya que no tiene las características adecuadas para que los electrodomésticos puedan funcionar. Se hace imprescindible el uso de inversores, que conviertan esta energía tanto si va a destinarse directamente al consumo del edificio como si va a almacenarse en las baterías para ser consumida posteriormente.

3.3 Equipos auxiliares

La energía eléctrica que se genera en las placas fotovoltaicas, así como la que se encuentra almacenada en las baterías, no tiene las características adecuadas de tensión e intensidad para ser consumida en el edificio. Por tanto, son necesarios unos equipos auxiliares que conviertan esta energía y permitan así su consumo.

La energía obtenida por las placas pasa por un regulador tras ser producida. Este regulador se encarga de controlar el paso de la energía de las placas fotovoltaicas a las baterías, en el caso en el que no vaya directamente a consumirse en el inmueble. En las baterías, la electricidad se almacena en corriente continua, por lo que es imprescindible un inversor para transformarla en alterna y así poder suministrarla al edificio.

De igual forma, la electricidad generada por las placas fotovoltaicas y que va directamente a consumirse en el edificio y no a ser almacenada, necesita pasar por un inversor. Éste transforma la corriente continua que se genera en corriente alterna, con la tensión y frecuencia de 230 V y 50 Hz, igual a la que proviene de la red eléctrica, para poder consumirla en el edificio.

La figura 3 recoge el esquema general del paso de la energía desde que se recibe del sol en las placas fotovoltaicas, existiendo dos alternativas posibles dependiendo de si esta energía va directamente al edificio o, por el contrario, primero se almacena.

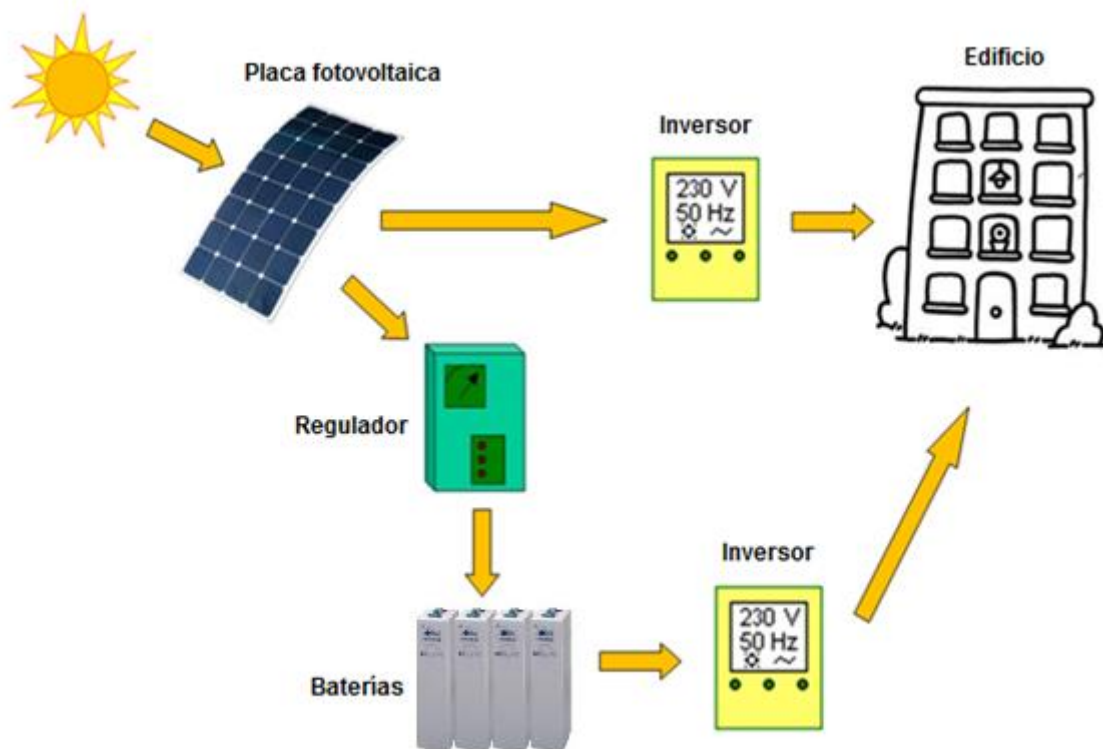


Figura 3 - Esquema del paso de la energía recibida del sol
Fuente: Elaboración propia

Cuando se almacena en las baterías la energía suministrada por la red eléctrica, también deben adaptarse sus características y pasarla a corriente continua.

3.4 Conexiones entre equipos

A continuación, en la figura 4 se muestra el flujo que puede seguir la electricidad según los equipos que componen la instalación del edificio.

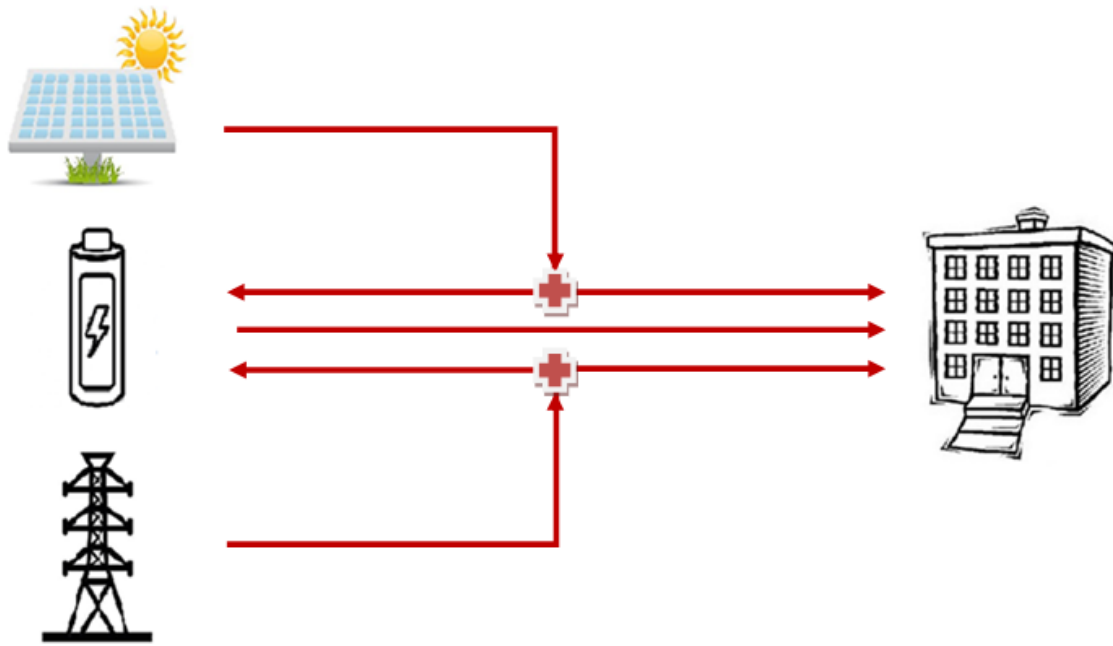


Figura 4 - Flujo de electricidad
Fuente: Elaboración propia

Como se ha comentado anteriormente y se recoge en la figura, el edificio cuenta con un sistema de generación distribuida, formado por placas fotovoltaicas. La electricidad generada en ellas puede consumirse en el edificio directamente o ser almacenada en las baterías. Así mismo, se puede comprar electricidad a la red eléctrica tanto para satisfacer la demanda del edificio como para almacenarla en las baterías.

Se garantiza un suministro completo de la energía necesaria en cada momento del día, ya que independientemente del estado de carga de las baterías y de la energía que se produzca en las placas, la conexión a la red eléctrica asegura el abastecimiento.

Ciertos parámetros y variables son decisivos a la hora de actuar en cada situación. Se tienen los datos de la **radiación solar** prevista para cada día, la **demand**a estimada del edificio y el **precio** de la red eléctrica. Estos tres datos, junto con la variable que indica en cada momento el **nivel de almacenamiento** de las baterías, son cruciales para tomar las decisiones sobre qué hacer con la energía en cada situación.

Algunas situaciones que se dan bajo ciertos datos de entrada tienen carácter determinista. Si con la energía generada en un periodo se puede satisfacer la demanda completa del edificio, se destina a ello la electricidad, y el excedente se almacena en las baterías siempre que sea posible.

Cuando el precio de la red eléctrica baje de un límite previamente establecido y haya capacidad de almacenamiento en las baterías, se adquiere electricidad de la red eléctrica para aumentar la carga de las baterías y poder usarla posteriormente. Esto ocurre independientemente de si ya estaba previsto comprar para suministrar al edificio.

Las baterías no se cargarán por encima de su capacidad de almacenamiento, pues esto supondría derrochar esta energía. Cuando se toma la decisión de cargar las baterías, se comprueba primero su estado, y o bien se confirma la orden, o bien se almacena la cantidad que se pueda y se destina el resto de la energía al consumo del edificio si no está ya cubierta su demanda.

4 Modelado

A continuación, se presentan los equipos instalados en el edificio, así como la definición de las variables utilizadas para modelar y diseñar el programa principal. Este programa es una heurística en la que se incluyen las restricciones técnicas en forma de ecuaciones y posteriormente el balance de energía que debe satisfacerse para garantizar el suministro completo del edificio. Para terminar, se incluyen las ecuaciones que determinan los costes de operación.

4.1 Equipos energéticos de la instalación

Los equipos que pueden generar o proveer energía son tres en el caso de este edificio:

1. **Placas fotovoltaicas:** utilizan una fuente de energía renovable aprovechando la radiación recibida por el sol para generar energía. Es necesario combinarlo con sistemas de almacenamiento de energía, para que, tras cubrir la demanda, no se pierda la energía excedente.
2. **Baterías:** Dispositivos acumuladores de energía, permitiendo al sistema de gestión un uso más eficiente de las energías renovables, ya que se almacena la energía producida cuando interese para su posterior utilización.
3. **Red eléctrica:** generación de energía eléctrica por su conexión al grid. Es fundamental para garantizar el aporte de energía al edificio durante todo el año y ante todas las posibles fluctuaciones de la demanda.

4.2 Datos y variables

Los datos son los valores específicos y técnicos tanto de los equipos presentes, como de la instalación. Los datos técnicos hacen referencia a los parámetros que caracterizan los equipos y el problema en cuestión. Los datos económicos determinan el gasto monetario que supondrá la utilización de cada equipo en el coste final de operación.

Las previsiones de consumo energético, irradiación solar y precio de la red eléctrica son conocidas de antemano, y aunque varían para cada día, son considerados datos técnicos.

Las variables son los parámetros que cambian de valor durante el transcurso del algoritmo. En cada iteración van proporcionando información sobre el estado del problema y determinan la solución final.

Las variables se clasifican en principales o auxiliares, siendo las auxiliares unas variables intermedias utilizadas como nexo entre lo que realmente se necesita y lo que se ha de producir. Las variables principales nos dan información sobre el estado del sistema en cada iteración.

4.2.1 Placas fotovoltaicas

En las tablas siguientes, Tabla 1, Tabla 2, y Tabla 3, se recogen los nombres, las descripciones y las unidades en que se miden los datos técnicos, económicos y las variables, utilizados para modelar el funcionamiento de las placas fotovoltaicas.

Tabla 1 - Datos técnicos de las placas fotovoltaicas

Datos técnicos	Descripción	Unidades
Fotov_rto	Rendimiento de las placas fotovoltaicas.	%
Fotov_prevision_t	Previsión de irradiación solar para el periodo t, es dato de entrada.	Wh/m ²
Fotov_capac_max	Máxima capacidad de generación de electricidad por cada panel fotovoltaico.	Wh
Fotov_num_placas	Número de placas instaladas en el edificio.	ud

Tabla 2 - Datos económicos de las placas fotovoltaicas

Datos Económicos	Descripción	Unidades
Fotov_costefijo	Coste fijo que supone tener en funcionamiento los paneles fotovoltaicos en un periodo.	€
Fotov_costevar	Coste por kWh generado por los paneles fotovoltaicos, es un valor fijo.	€/kWh

Tabla 3 - Variables de las placas fotovoltaicas

Variables	Descripción	Unidades
δ_{fotov_t}	Variable binaria que indica si las placas fotovoltaicas están en funcionamiento en ese periodo o no. Toma el valor 1 en caso de que estén activas y 0 en el contrario.	1 ó 0
Fotov_generada_t	Energía generada por las placas fotovoltaicas a partir de la radiación solar.	kWh
Fotov_efectiva_t	Energía eléctrica efectiva que genera el conjunto de placas fotovoltaicas ese periodo.	kWh
Fotov_demanda_t	Energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos y destinada directamente al consumo del edificio.	kWh
Coste_variable_fotov_t	Coste variable total que supone el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos en el periodo.	€

4.2.2 Baterías

En las tablas siguientes, Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, se recogen los nombres, las descripciones y las unidades en que se miden los datos técnicos, económicos y las variables, utilizadas para modelar el funcionamiento de las placas fotovoltaicas.

Tabla 4 - Datos técnicos del equipo de baterías

Datos técnicos	Descripción	Unidades
Bat_almac_inicial	Nivel de almacenamiento inicial de las baterías.	kWh
Bat_rto_carga	Rendimiento de carga del sistema de almacenamiento de las baterías.	%
Bat_rto_desc	Rendimiento de descarga del sistema de almacenamiento de las baterías.	%
Bat_capac_max	Capacidad máxima de almacenamiento de las baterías.	kWh
Bat_capac_min	Capacidad mínima de almacenamiento de las baterías.	kWh
Bat_desc_max	Capacidad máxima de descarga del sistema de almacenamiento de las baterías.	kWh
Bat_carga_max	Capacidad máxima de carga del sistema de almacenamiento de las baterías.	kWh

Tabla 5 - Datos económicos del equipo de baterías

Datos económicos	Descripción	Unidades
Bat_costefijo	Coste fijo que supone tener en funcionamiento el sistema de baterías en un periodo.	€
Bat_costevar	Coste variable por kWh cargado o descargado por el sistema de baterías, es un valor fijo.	€/kWh

Tabla 6 - Variables principales del equipo de baterías

Variables principales	Descripción	Unidades
δ_{Carga_t}	Variable binaria que indica si las baterías están en proceso de carga o no. Toma el valor 1 en el caso de que estén cargando y 0 si no lo están.	1 ó 0
$\delta_{\text{Descarga}_t}$	Variable binaria que indica si las baterías están en proceso de descarga o no. Toma el valor 1 en el caso de que estén descargando y 0 si no lo están.	1 ó 0
δ_{bat_t}	Variable binaria que indica si las baterías están funcionando o no, ya sea cargando o descargando energía. Toma el valor 1 en el caso de que estén activas y 0 en el contrario.	1 ó 0
Bat_carga_efectiva_excedente_t	Energía excedente generada por las placas fotovoltaicas y que se destina a cargar las baterías.	kWh
Bat_carga_efectiva_t	Energía eléctrica efectiva que se ordena cargar en las baterías.	kWh
Bat_desc_efectiva_t	Energía eléctrica efectiva que se ordena descargar de las baterías.	kWh
Bat_carga_max_restante_t	Capacidad de carga restante que se encuentra disponible.	kWh
Bat_almac_t	Estado de carga de las baterías actualizado en cada iteración.	kWh
Bat_carga_grid_t	Energía real que se carga en las baterías proveniente de la red eléctrica cuando su precio es bajo.	kWh
Coste_variable_bat_t	Coste variable total que supone el funcionamiento del sistema de baterías, ya sea en carga o descarga.	€

Tabla 7 - Variables auxiliares del equipo de baterías

Variables auxiliares	Descripción	Unidades
Bat_desc_necesaria_t	Energía que es necesaria descargar de las baterías para producir Bat_desc_efectiva_t.	kWh
Bat_carga_necesaria_t	Energía que se tiene que generar para cargar las baterías.	kWh
Bat_carga_preciobajo_t	Energía que se destina a cargar las baterías para producir Bat_carga_grid_t, proveniente de la red eléctrica cuando su precio es bajo.	kWh

4.2.3 Generales

En las tablas siguientes, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se recogen los nombres, las descripciones y las unidades en que se miden los datos técnicos, económicos y las variables referidos a la red eléctrica, demanda del edificio y el coste total de operación.

Tabla 8 - Datos técnicos del sistema

Datos técnicos	Descripción	Unidades
Grid_precio_t	Precio de la energía de la red eléctrica en el periodo, es dato de entrada.	€/kWh
Tper	Longitud del periodo.	h
Demanda_instalación_t	Previsión de la demanda de energía eléctrica que tiene el edificio ese periodo, es dato de entrada.	kWh
Bat_almac_inicial	Energía eléctrica almacenada en las baterías al inicio de la implementación, es dato.	kWh

Tabla 9 - Datos económicos totales y de la red eléctrica

Datos económicos	Descripción	Unidades
Coste_red_t	Coste total de la energía adquirida de la red eléctrica.	€
Coste_total_t	Coste total que supone la utilización de los equipos durante ese periodo.	€
Coste_final	Coste final que supone la utilización de los equipos para el conjunto de los periodos. Es el coste de operación.	€

Tabla 10 - Variables de la red eléctrica

Variables	Descripción	Unidades
Grid_instalacion_t	Energía que se compra a la red eléctrica para satisfacer la demanda del edificio.	kWh
Grid_red_t	Energía total adquirida de la red eléctrica, tanto para satisfacer la demanda del edificio como para cargar el sistema de baterías.	kWh

A continuación, en la figura 5, se presenta el diagrama en el que se encuentran reflejados los distintos equipos y conexiones presentes en el edificio. De esta manera queda recogido el flujo de la energía efectiva existente entre ellos, desde que se recibe radiación del sol o se obtiene de la red eléctrica, pasando por las baterías si es necesario y terminando en el edificio.

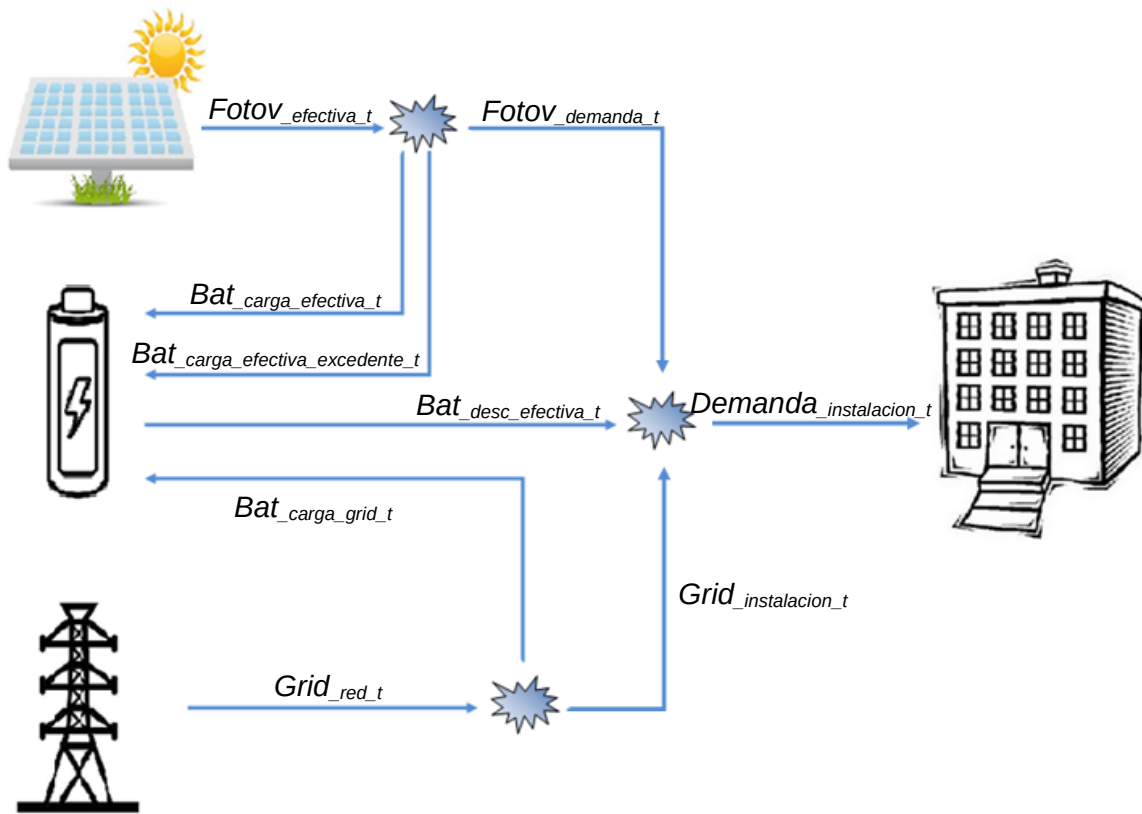


Figura 5 - Diagrama energía eléctrica
Fuente: Elaboración propia

4.3 Restricciones técnicas

Las restricciones técnicas son aquellas inherentes a los equipos del edificio. Marcan los límites de actuación del problema debido a las características específicas de los dispositivos presentes.

4.3.1 Restricciones técnicas de placas fotovoltaicas

La irradiación solar recibida en cada periodo va a determinar la generación de energía eléctrica por parte de los paneles fotovoltaicos, y su posterior utilización. Dada la previsión realizada, el número de placas y su capacidad, se determina la electricidad que se va a producir en cada periodo, $Fotov_generada_t$.

$$Fotov_efectiva_t \leq Fotov_prevision_t \leq Fotov_capac_max \quad \forall t=1 \dots T \quad (1)$$

La energía efectiva que se obtiene mediante las placas solares es menor a la irradiación prevista para el periodo, que a su vez es menor a la máxima capacidad de generación de energía eléctrica por parte de los paneles fotovoltaicos.

$$Fotov_generada_t \leq Fotov_prevision_t \times \delta_fotov_t \quad \forall t=1\dots T \quad (2)$$

La variable binaria δ_fotov_t está asociada al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos. Se activa y pasa a valer 1 cuando éstos funcionan, y 0 en caso contrario. La condición de activación es que los paneles reciban irradiación solar, y sólo cuando esto ocurre se pone en funcionamiento y se genera energía eléctrica.

$$Fotov_efectiva_t = Fotov_generada_t \times Fotov_rto \quad \forall t=1\dots T \quad (3)$$

Por mediación del rendimiento, se relaciona la energía eléctrica generada en los paneles con la energía realmente efectiva que se extrae de ellos.

4.3.2 Restricciones técnicas de baterías

El conjunto de baterías instaladas tiene una capacidad de carga máxima y mínima. Para evitar niveles de carga que excedan estos límites y que podrían incrementar la degradación de las baterías se establecen unos límites tanto para la carga como la descarga, evitando que esta última sea inferior al 20% de la capacidad de almacenamiento total.

$$Bat_capac_min \leq Bat_almac_t \leq Bat_capac_max \quad \forall t=1\dots T \quad (4)$$

De esta manera, mediante la ecuación (4), se garantiza que el estado de carga en todo momento esté comprendido entre los valores máximos y mínimos previamente establecidos.

$$Bat_carga_necesaria_t \leq Bat_carga_max \quad \forall t=1\dots T \quad (5)$$

$$Bat_carga_grid_t \leq Bat_carga_max \quad \forall t=1\dots T \quad (6)$$

$$Bat_desc_necesaria_t \leq Bat_desc_max \quad \forall t=1\dots T \quad (7)$$

La capacidad máxima y mínima de carga y descarga del sistema de almacenamiento de las baterías está restringida por un valor máximo. Con las ecuaciones (5), (6) y (7) se garantiza que para cada periodo la energía eléctrica que es necesaria cargar o descargar no sea superior al límite que le corresponde.

$$Bat_carga_efectiva_t = Bat_carga_necesaria_t \times Bat_rto_carga \quad \forall t=1\dots T \quad (8)$$

$$Bat_carga_grid_t = Bat_carga_preciobajo_t \times Bat_rto_carga \quad \forall t=1\dots T \quad (9)$$

$$Bat_desc_efectiva_t = Bat_desc_necesaria_t \times Bat_rto_desc \quad \forall t=1\dots T \quad (10)$$

La energía efectiva se obtiene a partir de la necesaria, teniendo en cuenta las pérdidas ocasionadas por el rendimiento de carga y descarga de las baterías. Igual ocurre con la variable que carga las baterías con la energía comprada de la red eléctrica cuando su precio es suficientemente bajo. Cualquier carga o descarga de las baterías debe tener en cuenta estas pérdidas.

$$Bat_carga_necesaria_t \leq Bat_carga_max \times \delta_carga_t \quad \forall t=1\dots T \quad (11)$$

$$Bat_carga_grid_t \leq Bat_carga_max \times \delta_carga_t \quad \forall t=1\dots T \quad (12)$$

$$Bat_desc_necesaria_t \leq Bat_desc_max \times \delta_descarga_t \quad \forall t=1\dots T \quad (13)$$

Las variables binarias δ dan información sobre el estado de activación de las baterías. Cuando están en funcionamiento, la variable correspondiente según estén en un estado de carga o descarga pasa a valer 1 y por tanto se podrán realizar las acciones pertinentes. Mientras estas variables valgan 0 no será posible aumentar ni reducir el nivel de carga.

Existe una variable binaria δ_{bat_t} que se activa cuando las baterías estén en funcionamiento, ya sea en estado de carga o descarga y vale 0 cuando las baterías no realizan ninguna de estas acciones.

4.4 Balances de energía

Se cumple la conservación de energía eléctrica en los nodos, coincidiendo la energía que entra y sale de cada sistema. En la figura 6 se muestra el diagrama en el que se aprecian los distintos nodos e interacciones existentes en este problema. Los rectángulos de color azul con línea discontinua representan cambios en el flujo de la energía, debidos a una bifurcación o a pérdidas por rendimiento.

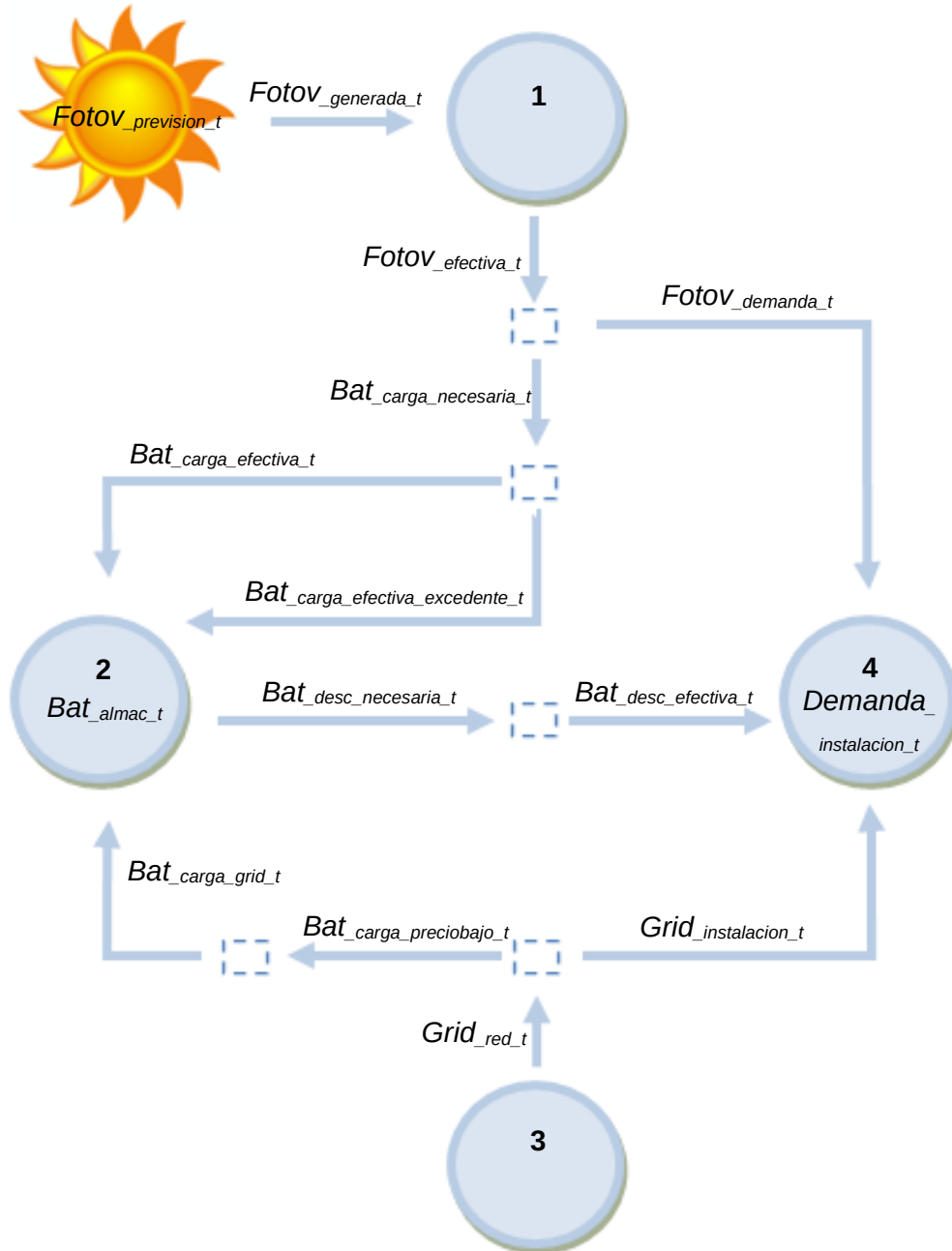


Figura 6 - Flujo de energía eléctrica
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se analiza cada nodo presente en el diagrama y sus ecuaciones de balance de energía.

Nodo 1

La energía entrante en este nodo proviene únicamente de la radiación solar, que es un dato conocido, $Fotov_prevision_t$. Con esta previsión se ordena generar una cantidad de energía con las placas fotovoltaicas, $Fotov_generada_t$ que, tras considerar las pérdidas por rendimiento, da lugar a la energía eléctrica efectiva generada por la radiación solar $Fotov_efectiva_t$. Una vez la energía se encuentra en este primer nodo, tiene dos posibles alternativas:

- ❖ Si esta energía se destina directamente a satisfacer la demanda del edificio, lo hace por mediación de la variable $Fotov_demanda_t$. Puede hacerlo el total de la energía $Fotov_efectiva_t$, si no se cargan las baterías ese periodo, o únicamente una parte de esta energía.
- ❖ La energía $Fotov_efectiva_t$ también puede utilizarse para cargar las baterías. En este caso, saldría de los paneles fotovoltaicos como $Bat_carga_necesaria_t$, pero que imputaría en la carga de las baterías como energía efectiva tras asumir las pérdidas por rendimiento de dos posibles maneras:
 - Cuando la energía eléctrica recogida por las placas fotovoltaicas es mayor a la demanda del edificio, se satisface esta demanda directamente y se destina el exceso de energía producida a aumentar el nivel de carga de las baterías, $Bat_carga_efectiva_excedente_t$.
 - Si la orden recibida del modelo difuso en esa interacción es cargar las baterías con la energía obtenida del sol, se realiza mediante la variable $Bat_carga_efectiva_t$.

$$Fotov_efectiva_t = Fotov_demanda_t + Bat_carga_necesaria_t \quad \forall t=1\dots T \quad (14)$$

La ecuación (14) es el balance energético de este primer nodo, en el que se presenta la energía efectiva generada a partir de la radiación solar, que será igual a la suma de la energía que se destine directamente al edificio y a almacenamiento.

Nodo 2

Las baterías pueden ser cargadas tanto por la energía procedente de las placas fotovoltaicas como de la red eléctrica, en función de las condiciones de ese periodo. La energía efectiva que se acumula en las baterías no es la misma cantidad que se compra a la red eléctrica, o que se obtiene de los paneles fotovoltaicos, debido a que esta energía sufre unas pérdidas por el rendimiento de carga del equipo de las baterías.

Al activar la descarga de las baterías, esta energía se destina a satisfacer la demanda del edificio, y de igual forma sufre unas pérdidas debidas al rendimiento de la batería.

$$\begin{aligned} Bat_{almac_t} = Bat_{almac_t-1} + Bat_{carga_efectiva_t} + Bat_{carga_grid_t} + \\ + Bat_{carga_efectiva_excedente_t} - Bat_{desc_necesaria_t} \quad \forall t=1...T \end{aligned} \quad (15)$$

En la ecuación (15) queda reflejado el balance de energía que tiene lugar en el sistema de almacenamiento. Para actualizar el estado de carga del equipo de almacenamiento, al nivel de energía del periodo anterior se le añade la carga efectiva que se realice de las baterías, ya que es la energía que realmente llega a cargar, una vez asumidas las pérdidas por rendimiento. Por otra parte, se resta la energía que se ordena descargar de los acumuladores, que es la necesaria, aunque luego sufrirá las pérdidas asociadas al rendimiento de descarga y al final la energía que realmente llegue al edificio será la efectiva.

Nodo 3

La red eléctrica es una fuente de energía que siempre estará disponible, a diferencia de las otras formas de obtener energía. Por ello es imprescindible para garantizar el suministro completo de energía al edificio en todos los periodos. En cuanto al precio de la red eléctrica, se establece un valor como límite, por debajo del cual, siempre que las baterías no se encuentren al máximo de su capacidad, se comprará energía a la red eléctrica y es la que va destinada a almacenarse en las baterías. La energía comprada con este fin es $Bat_{carga_preciobajo_t}$, pero debido a las pérdidas por rendimiento la energía efectiva almacenada es $Bat_{carga_grid_t}$.

$$Grid_{red_t} = Bat_{carga_preciobajo_t} + Grid_{instalacion_t} \quad \forall t=1...T \quad (16)$$

En la ecuación (16) se muestra el balance de energía eléctrica que tiene lugar en el tercer nodo. La electricidad comprada a la red eléctrica ($Grid_{red_t}$) puede ir destinada a cargar las baterías ($Bat_{carga_preciobajo_t}$) o a satisfacer la demanda del edificio ($Grid_{instalacion_t}$), y, por tanto, estas dos conforman el total de la energía adquirida a la red eléctrica.

Nodo 4

Mediante la ecuación de balance de este nodo, se garantiza el aporte completo de la energía demandada por el edificio en cada periodo.

$$Demanda_{instalacion_t} = Fotov_{demanda_t} + Bat_{desc_efectiva_t} + Grid_{instalacion_t} \quad \forall t=1\dots T \quad (17)$$

La ecuación (17) es la ecuación de balance de energía del edificio. La demanda tiene que ser igual a la suma de la energía que se le aporta desde las distintas fuentes presentes en la instalación.

4.5 Función de costes

La función de costes incluye tanto los costes fijos como los variables de cada equipo. Los valores fijos representan el coste de utilización y amortización de los equipos por el mero hecho de tenerlos, independientemente de que en ese periodo se estén utilizando o no. Los costes variables únicamente se incluyen en los periodos en que el equipo en cuestión participe en el suministro de energía.

$$Coste_{variable_bat_t} = Bat_{coste_variable} \times (Bat_{carga_necesaria_t} + Bat_{carga_preciobajo_t} + Bat_{desc_necesaria_t}) \times \delta_{bat_t} \quad \forall t=1\dots T \quad (18)$$

La ecuación anterior calcula el coste variable que supondrá el uso de las baterías en ese periodo, ya sea cargando o descargando energía. Únicamente habrá coste cuando la variable binaria valga 1, y la energía que se considera es la que se ordena generar, ya que las pérdidas por rendimiento tienen lugar durante el uso de los equipos. Por esto, en la ecuación (18) se imputan las cargas y descargas necesarias y no las efectivas.

$$Coste_variable_fotov_t = Fotov_coste_variable \times Fotov_generada_t \times \delta_fotov_t \quad \forall t=1\dots T \quad (19)$$

Mediante la ecuación (19) se calcula de forma similar el coste variable que tiene el uso de los paneles fotovoltaicos en un periodo, que tendrán un valor distinto de cero siempre que los paneles estén funcionando en ese periodo, y por tanto la variable binaria correspondiente esté activa. La cantidad de energía eléctrica que se considera para dicho cálculo es la generada, ya que las pérdidas por rendimiento se producen durante la generación de esta energía y por tanto se imputan en el coste.

$$Coste_total_t = Coste_red_t + Coste_fijo_bat + Coste_variable_bat_t + Coste_fijo_fotov + \\ + Coste_variable_fotov_t \quad \forall t=1\dots T \quad (20)$$

La ecuación (20) muestra el sumatorio del coste total que supone producir la energía necesaria para el edificio en ese periodo. Es la ecuación final de la implementación de cada periodo, y en ella la variable $Coste_total_t$, que representa el coste de operación, interesa que sea lo menor posible.

5 Descripción de la instalación

En este apartado se describen las características del edificio sobre el que se ha desarrollado el trabajo. Se realiza una presentación de su situación geográfica y de las características técnicas de los equipos generadores de energía instalados en el edificio. Además, se realizan los cálculos de la demanda que tendrá el hotel en diferentes situaciones según el nivel de ocupación y los electrodomésticos que estén en funcionamiento.

5.1 Situación geográfica

El edificio es un hotel rural que se encuentra situado en la sierra norte de Sevilla. Debido a las condiciones meteorológicas de esta ciudad, y la cantidad de radiación solar que recibe a lo largo del año, se instaló un sistema de generación distribuida, compuesto por paneles fotovoltaicos como fuente de producción de energía renovable.



Figura 7 - Panel solar fotovoltaico

España y en especial Sevilla o Andalucía, tienen una ventajosa situación geográfica para aprovechar la radiación solar, y por ello llegó a ser referente mundial en el desarrollo de este sector. Actualmente, continúan desarrollándose las energías renovables no sólo la fotovoltaica, que en el año 2016 ya representaban más del 45% de la potencia total instalada, siendo la producción de la energía en torno al 39% de la generación a nivel nacional.

La fuente de energía más importante ha sido la eólica, seguida por la hidráulica y a continuación la solar. El uso de estas tecnologías para producir electricidad reduce el uso de combustibles usados con el mismo fin, disminuyendo así el nivel de emisiones contaminantes que estas plantaciones generan. España se encuentra en cuarta posición de Europa en cuanto a generación de energía renovable.

5.2 Características de la instalación

El trabajo se desarrolla sobre un hotel pequeño, que cuenta con un total de seis habitaciones y la recepción, y cuyo consumo de electricidad puede ser calculado a partir de los electrodomésticos presentes en el inmueble.

El edificio está conectado a la red de distribución de energía eléctrica, e internamente dispone de un sistema de generación distribuida de energía, compuesto por paneles fotovoltaicos, que convierten la radiación proveniente del sol en energía eléctrica. La instalación cuenta también con un equipo de almacenamiento compuesto por baterías, donde se acumula la energía para ser utilizada posteriormente.

5.3 Consumo del inmueble

Las habitaciones del hotel son de pequeño tamaño y están equipadas como apartamentos independientes. Todas cuentan con los mismos electrodomésticos, entre los que se encuentra un microondas y un frigorífico ya que no se dispone de servicio de cocina para los huéspedes.

La recepción está compuesta por un ordenador, un equipo de música que aporta un ambiente relajado con música clásica y la iluminación general de la entrada y pasillo hasta las habitaciones.

Estudiando el gasto real de los electrodomésticos de las habitaciones se estima de forma más exacta la demanda energética del edificio. A continuación, se muestran las

potencias de cada elemento de consumo considerado:

Por habitación:

- Nevera: 80W.
- Calefacción/aire acondicionado: 560W.
- Televisión: 120W.
- Microondas: 1200W.
- Iluminación: 15W.
- Secador de pelo: 1000W
- Cargador de móvil: 5W.

General:

- Recepción:
 - Ordenador: 65W.
 - Equipo de música: 25W.
 - Iluminación general: 20W.
- Calentador de agua: 2000W.

La nevera de la habitación que se encuentre ocupada permanecerá en funcionamiento durante todo el día, mientras que la recepción lo hará con horario de diez de la mañana a diez de la noche. El calentador de agua es un único aparato que abastece a todo el edificio, por lo que independientemente al número de habitaciones que se encuentren ocupadas, estará en funcionamiento con que una de ellas lo demande.

Se exponen a continuación las tablas con los datos de la demanda eléctrica en tres situaciones de ocupación diferentes, para tres habitaciones, para una única habitación y para ocupación total del hotel. Se establece el consumo para periodos de dos horas, dividiendo el horizonte temporal de un día en doce periodos.

En primer lugar, se presenta la tabla con los datos de la demanda para una ocupación de tres habitaciones. En las columnas están los nombres de los aparatos que se encuentran en cada una de ellas, y se van rellenando por filas y en función del periodo del día, el número de habitaciones que se encuentran haciendo uso de estos electrodomésticos.

En la fila correspondiente a la recepción y al calentador de agua se indica únicamente si están funcionando o no, y cuando se considera que la recepción está trabajando, se aplican los 110W que suman el total de los equipos que se encuentran encendidos.

Tabla 11 - Consumo eléctrico de tres habitaciones

Periodo		1	2	3	4	5	6
Hora		0:00-2:00	2:00-4:00	4:00-6:00	6:00-8:00	8:00-10:00	10:00-12:00
A P A R A T O S	Nevera	3	3	3	3	3	3
	Calefacción	1	0	0	0	0	0
	Televisión	1	0	0	0	0	0
	Microondas	0	0	0	1	2	0
	Iluminación	2	0	0	1	1	1
	Secador	0	0	0	0	1	0
	Móvil	2	2	2	2	2	2
	Recepción	No	No	No	No	No	Si
	Calentador agua	No	No	No	No	Si	Si
Consumo (kWh)		1.92	0.5	0.5	2.93	11.33	4.75

Periodo		7	8	9	10	11	12
Hora		12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00	20:00-22:00	22:00-0:00
A P A R A T O S	Nevera	3	3	3	3	3	3
	Calefacción	0	2	1	0	2	3
	Televisión	0	2	0	0	2	2
	Microondas	0	2	0	0	1	2
	Iluminación	0	0	0	0	2	3
	Secador	0	0	0	0	2	1
	Móvil	0	0	0	0	3	3
	Recepción	Si	Si	Si	Si	Si	No
	Calentador agua	No	No	No	No	Si	Si
Consumo (kWh)		0.7	8.22	1.82	0.7	13.91	15.24

El cálculo del consumo se realiza multiplicando el número de elementos que están en funcionamiento cada periodo por su potencia correspondiente y el número de horas que componen cada periodo, dos en este caso. Si la recepción está abierta, se le añade el consumo que tendrá en las dos horas de ese periodo, y se procede de igual forma con el calentador de agua. En la tabla 12 se muestra el cálculo correspondiente al periodo 11.

Tabla 12 - Cálculo del consumo para un periodo

	Elementos	Potencia (kW)	Consumo (kWh)
Nevera	3	0.08	0.48
Calefacción	2	0.56	2.24
Televisión	2	0.12	0.48
Microondas	1	1.2	2.4
Iluminación	2	0.015	0.06
Secador	2	1	4
Móvil	3	0.005	0.03
Recepción	Si	2	4
Calentador agua	Si	0.11	0.22
	Total (kWh)		13.91

Para dimensionar la demanda de energía eléctrica del hotel se consideran otras dos situaciones de demanda, el caso en que esté ocupada una única habitación o el total del edificio. En las tablas 13 y 14 se detalla el consumo para los 12 periodos de estos dos escenarios.

Tabla 13 - Consumo eléctrico de una habitación

Periodo		1	2	3	4	5	6
Hora		0:00-2:00	2:00-4:00	4:00-6:00	6:00-8:00	8:00-10:00	10:00-12:00
A P A R A T O S	Nevera	1	1	1	1	1	1
	Calefacción	1	0	0	0	0	0
	Televisión	1	0	0	0	0	0
	Microondas	0	0	0	0	1	0
	Iluminación	1	0	0	1	1	0
	Secador	0	0	0	0	1	0
	Móvil	0	0	0	0	1	1
	Recepción	No	No	No	No	No	Si
	Calentador agua	No	No	No	No	Si	No
Consumo (kWh)		1.55	0.16	0.16	0.19	8.6	0.39

Periodo		7	8	9	10	11	12
Hora		12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00	20:00-22:00	22:00-0:00
A P A R A T O S	Nevera	1	1	1	1	1	1
	Calefacción	0	0	0	0	1	1
	Televisión	0	1	1	0	1	1
	Microondas	0	1	0	0	0	1
	Iluminación	0	0	0	0	1	1
	Secador	0	0	0	0	0	1
	Móvil	0	0	0	0	1	1
	Recepción	Si	Si	Si	Si	Si	No
	Calentador agua	No	No	No	No	Si	Si
Consumo (kWh)		0.38	3.02	0.62	0.38	5.78	9.96

Tabla 14 - Consumo eléctrico de seis habitaciones

Periodo		1	2	3	4	5	6
Hora		0:00-2:00	2:00-4:00	4:00-6:00	6:00-8:00	8:00-10:00	10:00-12:00
A P A R A T O S	Nevera	6	6	6	6	6	6
	Calefacción	2	0	0	0	0	0
	Televisión	1	0	0	0	0	0
	Microondas	0	0	0	2	3	0
	Iluminación	2	0	0	3	5	0
	Secador	0	0	0	0	2	0
	Móvil	4	2	4	4	5	5
	Recepción	No	No	No	No	No	Si
	Calentador agua	No	No	No	No	Si	Si
Consumo (kWh)		3.54	0.98	1	5.89	14.36	3.12

Periodo		7	8	9	10	11	12
Hora		12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00	20:00-22:00	22:00-0:00
A P A R A T O S	Nevera	6	6	6	6	6	6
	Calefacción	0	2	2	0	4	5
	Televisión	0	4	3	0	3	4
	Microondas	0	2	0	0	1	2
	Iluminación	0	0	0	0	5	6
	Secador	0	0	0	0	3	2
	Móvil	0	0	0	0	5	6
	Recepción	Si	Si	Si	Si	Si	No
	Calentador agua	No	No	No	No	Si	Si
Consumo (kWh)		1.07	9.07	4.03	1.07	16.87	18.56

Una vez se tienen los datos del consumo para los tres casos de demanda y en los doce periodos, se escalan para calcular el consumo correspondiente a 96 periodos. Para ello se halla el consumo para cada intervalo de 15 minutos de manera proporcional a partir de las tablas anteriores. En la tabla 15 se indican estos valores para las tres demandas consideradas. Los periodos están agrupados por grupos de ocho intervalos, ya que tienen el mismo valor de consumo, es decir, todos los periodos de cada intervalo tienen el consumo indicado.

Tabla 15 - Consumo (kWh) de energía eléctrica para 96 periodos

Periodo	1-8	9-16	17-24	25-32	33-40	41-48
Hora	0:00-2:00	2:00-4:00	4:00-6:00	6:00-8:00	8:00-10:00	10:00-12:00
1 habitación	0.194	0.020	0.020	0.024	1.075	0.049
3 habitaciones	0.240	0.063	0.063	0.366	1.416	0.594
6 habitaciones	0.443	0.123	0.125	0.736	1.795	0.390

Periodo	49-56	57-64	65-72	73-80	81-88	89-96
Hora	12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00	20:00-22:00	22:00-0:00
1 habitación	0.048	0.378	0.078	0.048	0.723	1.245
3 habitaciones	0.088	1.028	0.228	0.088	1.739	1.905
6 habitaciones	0.134	1.134	0.504	0.134	2.109	2.320

5.4 Características de los equipos

A continuación, se muestran en la tabla 16 las características técnicas de los equipos presentes en la instalación. Las baterías de gel se utilizan para aplicaciones de generación de energías renovables en isla, y para sistemas que combinan la generación de energía con el consumo de la red eléctrica, como es el caso.

Tabla 16 - Características técnicas de los equipos

Equipo	Cantidad	Potencia	Tensión	Características
Placas fotovoltaicas	40	290 Wp		Dimensión 1675 x 1001 x 33 mm
Inversor placas	2 en serie	6000 W	120A 24V	
Baterías	1	38.4 kW	24 V 1600Ah	Baterías de gel
Inversor baterías	1	12 kW		Funciona con cambios de frecuencia, transforma a 230V

Las placas fotovoltaicas tienen un ángulo de 30° respecto al suelo, y en dirección sur, teniendo suficiente distancia entre cada panel de manera que no den sombra unos a otros.

Los equipos presentes en la instalación tienen unos costes fijos asociados debido a la amortización de los mismos. Estos costes fijos se imputan en el análisis de cada periodo de tiempo, y dependen de la longitud del mismo, y son independientes de si el equipo en cuestión está funcionando durante ese intervalo de tiempo. Los costes variables dependen únicamente de la cantidad de energía eléctrica que produzca el equipo, siendo cero su valor si no está en funcionamiento.

6 Lógica difusa

El ser humano posee grandes habilidades para comunicarse empleando reglas lingüísticas poco precisas, que podrían ser seguidas sin problema por otro humano, ya que es capaz de interpretar estas instrucciones rápidamente. Sin embargo, la lógica convencional no es adecuada para procesar este tipo de reglas.

A lo largo de este capítulo se presenta el desarrollo teórico necesario para conocer e implementar la lógica difusa. Tras una breve introducción teórica, se desarrollan las variables y el método por el que se resuelve este problema en cuestión.

6.1 Marco teórico

El concepto de Lógica difusa (Fuzzy Logic) fue desarrollado por Lotfi Zadeh, catedrático de la Universidad de Berkeley en California. No fue presentado como una metodología de control sino como una manera de procesar información, considerando que los datos pueden tener asociados un grado de pertenencia parcial a conjuntos. Esto significa que la propiedad de que un elemento pertenezca a un conjunto puede ser cierta con un determinado grado de verdad. Esta metodología no pudo ser aplicada a sistemas de control hasta los años 70, ya que la capacidad de los ordenadores era insuficiente hasta entonces.

El profesor Zadeh razonó que, aunque las personas no reciban información numérica precisa, son capaces de obtener un control bastante adaptable de esta información. Si los controladores de retroalimentación pudieran ser programados para aceptar ruido y cierta imprecisión como entrada, serían mucho más efectivos y quizás más sencillos de implementar.

6.2 Características de la Lógica Difusa

En este contexto, la lógica difusa es una metodología de resolución de problemas que se puede implementar en sistemas que van desde pequeños microcontroladores hasta multicanales. Puede ser implementada en hardware, software o una combinación de ambos. La lógica difusa proporciona una manera sencilla de alcanzar una conclusión teniendo como entrada una información ambigua, imprecisa o incompleta. En definitiva, se trata de controlar problemas tomando decisiones como lo haría una persona, únicamente que de una manera más rápida.

La lógica difusa tiene unas características que hacen de ella una técnica recomendable para muchos problemas de control:

1. Es muy robusta, no son necesarios valores de entrada exactos, y suele funcionar siempre sin necesidad de ajustar los valores en la primera iteración. La salida es una función suave a pesar del amplio rango de variaciones en la entrada.
2. El controlador procesa reglas definidas por el usuario que gobiernan el comportamiento del sistema de control, que pueden ser modificadas y ajustadas fácilmente para incrementar o alterar el comportamiento del sistema. Se pueden incorporar nuevos sensores en el sistema únicamente generando las reglas apropiadas.
3. La lógica difusa no se limita por unas cuantas entradas y una o dos salidas de control, cualquier sensor que aporte alguna indicación sobre las acciones y reacciones del sistema es suficiente. Esto permite que los sensores no sean caros ni precisos.
4. Debido a que está cimentado en operaciones basadas en reglas, cualquier número razonable de entradas y salidas pueden ser procesadas, aunque definir las reglas puede convertirse rápidamente en algo complejo si demasiadas entradas y salidas han sido elegidas para una sola implementación, ya que también deben ser definidas sus interrelaciones. Sería una buena alternativa dividir el sistema de control en problemas más pequeños.

5. La lógica difusa puede controlar sistemas no lineales que serían difíciles o imposibles de modelar matemáticamente. Esto supone una alternativa para sistemas de control que normalmente se considerarían inviables para la automatización.

En 1973, Lofti Zadeh propuso el concepto de **variables difusas**, pensando en ellas como palabras en vez de números. De esta manera, las entradas podrían ser “temperatura”, “posición”, “velocidad” etc. Las variables difusas son adjetivos que modifican las variables (por ejemplo: “incrementar”, “sin cambios”, “decrementar”). Como mínimo, se podría simplemente tener como adjetivos las variables “positivo”, “nada” y “negativo”. Se puede añadir variedad de adjetivos a las entradas para extender la capacidad de respuesta a condiciones excepcionales o condiciones no lineales, pero no es realmente necesario para sistemas básicos.

6.3 Metodología de resolución

Para implementar la lógica difusa hay que seguir una serie de pasos, que se comentan a continuación.

1. Definir el objetivo que se quiere controlar y el criterio.

En primer lugar, se debe determinar de qué manera se puede controlar el sistema, el tipo de respuesta que se necesita y las posibles maneras existentes de que falle el sistema.

2. Determinar las relaciones entre entradas y salidas.

Una vez definidas las variables del sistema se elige el mínimo número de variables para la entrada del motor de la lógica difusa.

3. Definir reglas lingüísticas.

Solucionar el problema de control usando las reglas “Si X e Y entonces Z”, que definen la salida que se desea obtener ante las entradas que se dan como condiciones iniciales. El número y la complejidad de estas reglas depende de la cantidad de parámetros de entrada que van a ser procesados y del número de variables difusas asociadas a cada parámetro.

La lógica difusa incorpora reglas simples basadas en “Si X e Y entonces Z” en lugar de modelar un sistema matemático. El modelo obtenido mediante esta metodología se basa en la experiencia del operador, y no en la comprensión técnica del sistema. Por ejemplo, si se quiere controlar la temperatura, en lugar de utilizar intervalos numéricos de las temperaturas medidas para tomar las decisiones, se emplearían términos como “Si (proceso demasiado frío) Y (proceso se está enfriando) ENTONCES (añadir calor al proceso)” o “Si (proceso demasiado caliente) Y (proceso se está calentando) ENTONCES (añadir frío al proceso)”. El ejemplo comentado sintetiza lo que cualquier persona hace en la ducha, pero controlado a gran velocidad. Los términos utilizados son muy imprecisos, pero a la vez muy descriptivos de lo que debe ocurrir en cada situación.

4. Funciones de membresía.

Crear funciones de membresía definen el significado de los términos utilizados en las reglas. Hay diferentes funciones de membresía asociadas a cada entrada y salida. Algunas características de ellas son:

- Forma: la triangular es bastante común, pero también se pueden usar en forma de campana, trapezoidal, exponencial... En este ejemplo se eligen triangulares y trapezoidales para los extremos.
- Altura: normalizada a 1.
- Anchura: depende de cada variable, pero recorre el rango de valores que lleva asociado cada una.

5. Defuzzificación

Las reglas utilizan los valores de pertenencia de las entradas como ponderación para determinar su influencia en la salida. Una vez que las funciones son inferidas, escaladas y combinadas, son defuzzificadas en una salida nítida que activa el sistema.

Defuzzificar es concluir el proceso para obtener la salida nítida, existiendo varios métodos para ello:

- MAX-MIN: evalúa la dimensión de cada una de las reglas y elige la mayor. Aunque no combina el efecto de todas las reglas, produce una función de salida continua y fácil de implementar.
- MAX-DOT o MAX-PRODUCT: escala cada miembro de la función para ajustarse bajo su respectivo máximo, y escoge como salida la coordenada horizontal del centro de

gravidad del área bajo la función compuesta de salida. Este método combina la influencia de todas las reglas que participan, produciendo una salida continua y suave.

- **PROMEDIO:** hace un promedio de cada una de las reglas. Pero no da una mayor ponderación a las reglas que tengan mayor peso, por lo que en ocasiones no funciona del todo como se desea.
- **SUMA DE RAICES CUADRADAS:** combina el efecto de todas las reglas, escala las funciones con respecto a sus magnitudes y calcula el centroide del área compuesta. Es más complicado matemáticamente, pero da la ponderación adecuada a cada regla.

6. Comprobar el sistema

Para dar por finalizada la resolución del problema, hay que comprobar el sistema que se ha desarrollado y hacer una evaluación de los resultados obtenidos. Tras esto, si es necesario, se ajustan las reglas lingüísticas y las funciones de membresía, y a continuación se vuelve a comprobar después de implementar estas modificaciones, hasta que se consigan resultados satisfactorios.

6.4 Lógica Difusa aplicada al problema

Una vez expuestos los puntos básicos y fundamentales de la lógica difusa, se presenta a continuación la aplicación de dicha metodología de resolución a este problema concreto. Para ello, en cada uno de los siguientes apartados se desarrollan los pasos a seguir comentados anteriormente.

6.4.1 Objetivo

El primer paso para la implementación de la lógica difusa es definir qué se quiere controlar y el criterio para hacerlo. En este caso, se quiere controlar el funcionamiento de un sistema de almacenamiento de baterías, siendo las tres opciones posibles de actuación: descargar, no hacer nada o cargar.

Es necesario tener unos datos iniciales que aporten información sobre la situación y por tanto sobre el que debería ser el funcionamiento de las baterías en ese periodo. Dadas unas condiciones iniciales de radiación recibida, precio de la red eléctrica y demanda de energía por parte del edificio, se realizan las instrucciones correspondientes para obtener la respuesta del sistema. Ésta debe ser una de las tres opciones de estado

de las baterías, y una vez obtenida, se ejecuta esa orden para que actúe de ese modo el sistema de almacenamiento, mientras duren esas condiciones iniciales.

6.4.2 Variables

El sistema recibe unas variables de entrada, y tras implementar la lógica difusa, se obtiene una única salida. Estas variables de entrada son las que determinan la respuesta del sistema y cómo actúan los equipos en su conjunto. A continuación, se definen las variables de entrada y salida:

➤ Variables de entrada:

El rango de valores que puede tomar cada variable está acotado superior e inferiormente, ya que son datos conocidos de antemano y se sabe el máximo valor que pueden alcanzar. Cada variable tiene su propio rango de valores, que se divide en tres secciones correspondientes a cada variable difusa: bajo, medio y alto.

El dato de entrada es un valor numérico, que se encasilla en una de las tres variables difusas según corresponda. De esta manera, del valor que va asociado a la variable de entrada, se obtiene una variable difusa, que son puramente adjetivos que acompañan a la variable de entrada.

- Potencia fotovoltaica (*potFV*): es la previsión de la energía eléctrica generada por las placas fotovoltaicas.
- Precio de la red eléctrica (*precioGrid*): precio que tiene un kWh de la red eléctrica.
- Demanda (*demanda*): cantidad de energía eléctrica que se debe satisfacer en el edificio.

➤ Salida del sistema:

La salida del sistema es la orden de actuación del equipo de almacenamiento, cuya variable asociada se llama *batería*. Como ya se ha comentado, se tienen tres opciones de funcionamiento, por lo que *batería* puede tener estas tres variables difusas:

- Descargar: utilizar una cantidad de energía almacenada en las baterías para satisfacer la demanda del edificio, disminuyendo así el nivel de carga. Normalmente esta descarga no será la única fuente de energía que se destine al

edificio, y se complementará con energía obtenida de los paneles fotovoltaicos y utilizada directamente en el edificio, o con energía proveniente de la red eléctrica.

- Nada: mantener la batería en el mismo nivel de carga, ni entra ni sale energía.
- Cargar: aumentar el nivel de carga de las baterías, con la energía recogida por las placas fotovoltaicas o con energía proveniente de la red eléctrica.

Para garantizar el correcto funcionamiento de las baterías se deben respetar los límites de máxima capacidad de carga y descarga. Por otro lado, para eliminar pérdidas de energía, se debe comprobar que la batería no esté completamente cargada cuando la orden sea cargar. En el caso de la descarga, igualmente se debe comprobar cuánta energía hay para poder hacer uso de ella.

6.4.3 Reglas lingüísticas

Una vez establecidas las variables de entradas y salida, se soluciona el problema utilizando las reglas lingüísticas, “Si X e Y entonces Z”. De esta manera, en función de los datos de entrada, se define para cada situación “X e Y” la salida “Z” que se quiere obtener.

Según el número de variables de entrada, que en este caso concreto son tres, se define el número mínimo de combinaciones entre ellas. Cada variable de entrada viene definida por una de las tres posibles variables difusas, lo que forma las distintas combinaciones. Al tener cada una tres estados, se obtiene una matriz de tres por nueve, en la que habrá que definir las 27 reglas que se generan.

Se representan primero estas reglas en forma de matriz, para a continuación desarrollar cada sentencia. Cada una se enumera según la posición que ocupa dentro de esta matriz, siendo el orden descendente y de izquierda a derecha. La matriz quedaría por tanto de la forma establecida en la Tabla 17, siendo las salidas de *batería*: descargar (D), nada (-) y cargar (C).

Tabla 17 - Matriz reglas lingüísticas

	POTENCIA FV	alta			media			baja		
	PRECIO GRID	alto	medio	bajo	alto	medio	bajo	alto	medio	bajo
D E M A N D A	alta	D ¹	D ⁴	C ⁷	D ¹⁰	D ¹³	D ¹⁶	D ¹⁹	D ²²	C ²⁵
	media	C ²	C ⁵	C ⁸	- ¹¹	- ¹⁴	C ¹⁷	D ²⁰	D ²³	C ²⁶
	baja	C ³	C ⁶	C ⁹	C ¹²	C ¹⁵	C ¹⁸	- ²¹	- ²⁴	C ²⁷

Las reglas lingüísticas constan de dos partes: un bloque antecedente (Si ... Y...) y un bloque consecuente (entonces...). No es necesario analizar situaciones que no vayan a ocurrir; aunque en este caso no existe ninguna imposibilidad de este tipo. A continuación, se detallan todas las reglas, siguiendo la numeración establecida en la Tabla 17.

- 1) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 2) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es cargar)
- 3) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)
- 4) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 5) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es cargar)
- 6) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)
- 7) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es cargar)
- 8) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es cargar)
- 9) Si (*potFV* es Alta) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)

- 10) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 11) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es nada)
- 12) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)
- 13) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 14) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es nada)
- 15) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)
- 16) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 17) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es cargar)
- 18) Si (*potFV* es Media) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)
- 19) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 20) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es descargar)
- 21) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Alto) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es nada)
- 22) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es descargar)
- 23) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es descargar)
- 24) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Medio) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es nada)
- 25) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Alta) entonces (*batería* es

cargar)

26) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Media) entonces (*batería* es cargar)

27) Si (*potFV* es Baja) y (*precioGrid* es Bajo) y (*demanda* es Baja) entonces (*batería* es cargar)

6.4.4 Funciones de membresía

Una vez establecidas las reglas lingüísticas, el siguiente paso es crear las funciones de membresía. Estas definen el significado de las variables de entrada y salida utilizadas para definir las reglas. Las funciones de membresía son una representación gráfica de la magnitud de participación de cada entrada, asociando un peso a cada entrada procesada, definiendo la interacción entre ellas y determinando una respuesta.

En la figura 8 se incluye la función de membresía perteneciente a la variable de salida *batería*. En el eje vertical es donde se mide el grado de pertenencia, que va desde 0 hasta 1. En el eje horizontal se mide la anchura de los triángulos de estas funciones, en unidades ingenieriles dependiendo del problema en cuestión.

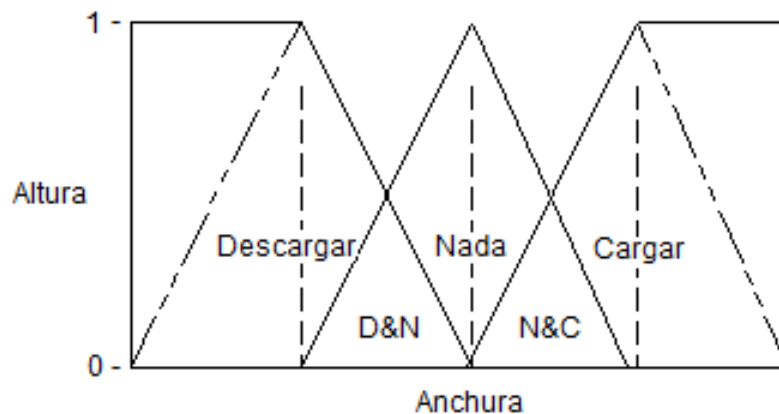


Figura 8 - Función de membresía
Fuente: Elaboración propia

El grado de pertenencia se halla colocando el parámetro de entrada en el eje horizontal y proyectándolo verticalmente al límite superior de la función de membresía. El punto de intersección es llevado horizontalmente al eje de altura, y el valor que se obtiene es el grado de pertenencia que tiene la variable con ese parámetro de entrada.

Los triángulos que se forman debido a la intersección de las funciones de pertenencia son zonas donde hay que calcular cuidadosamente el grado de pertenencia, pues hay interacción de dos posibles variables y por tanto no es un cálculo inmediato.

6.4.5 Defuzzificación

En este problema, se defuzzifica usando la suma de raíces cuadradas, debido a su buen funcionamiento y que a pesar de ser ligeramente más complejo que el resto, su implementación es relativamente rápida.

La defuzzificación se consigue combinando los resultados del proceso con el área del centroide, que es la salida nítida (crisp). Cuando se obtienen los números crisp para cada salida, se procede a la defuzzificación. Nuevamente existen varios métodos para ello, en este caso se desarrollará por el método del centroide. Este consiste en calcular el área bajo la curva que se forma, y establecer estos números crisp obtenidos como límites superiores en cada función de pertenencia de la salida. El resultado de calcular el área será lo que indique qué acción debe llevar a cabo el sistema: descargar, nada o cargar.

6.4.6 Comprobar el sistema

Para comprobar los resultados obtenidos mediante este sistema de resolución se implementa la lógica difusa en Matlab. De esta manera se pueden crear unos ficheros que muestren los resultados obtenidos tras la resolución del problema, y se pueden realizar las modificaciones pertinentes para mejorar la respuesta del sistema.

7 Implementación de la lógica difusa

A lo largo de este capítulo se incluye una explicación detallada del modelo de programación, y los pasos seguidos para su implementación en Matlab. En primer lugar, se desarrolla la función en la que se resuelve el problema mediante lógica difusa, usando el comando llamado “fuzzy”. A continuación, se muestra la salida que se obtiene de las implementaciones del modelo difuso y, por último, las diferentes funciones creadas para el fichero principal.

7.1 Lógica difusa en Matlab

Al escribir la función “fuzzy” en Command Window, se abre el editor que permite la implementación. En la figura 9 se observa la pantalla principal desplegada, en la que se establecen las características del problema en cuestión.

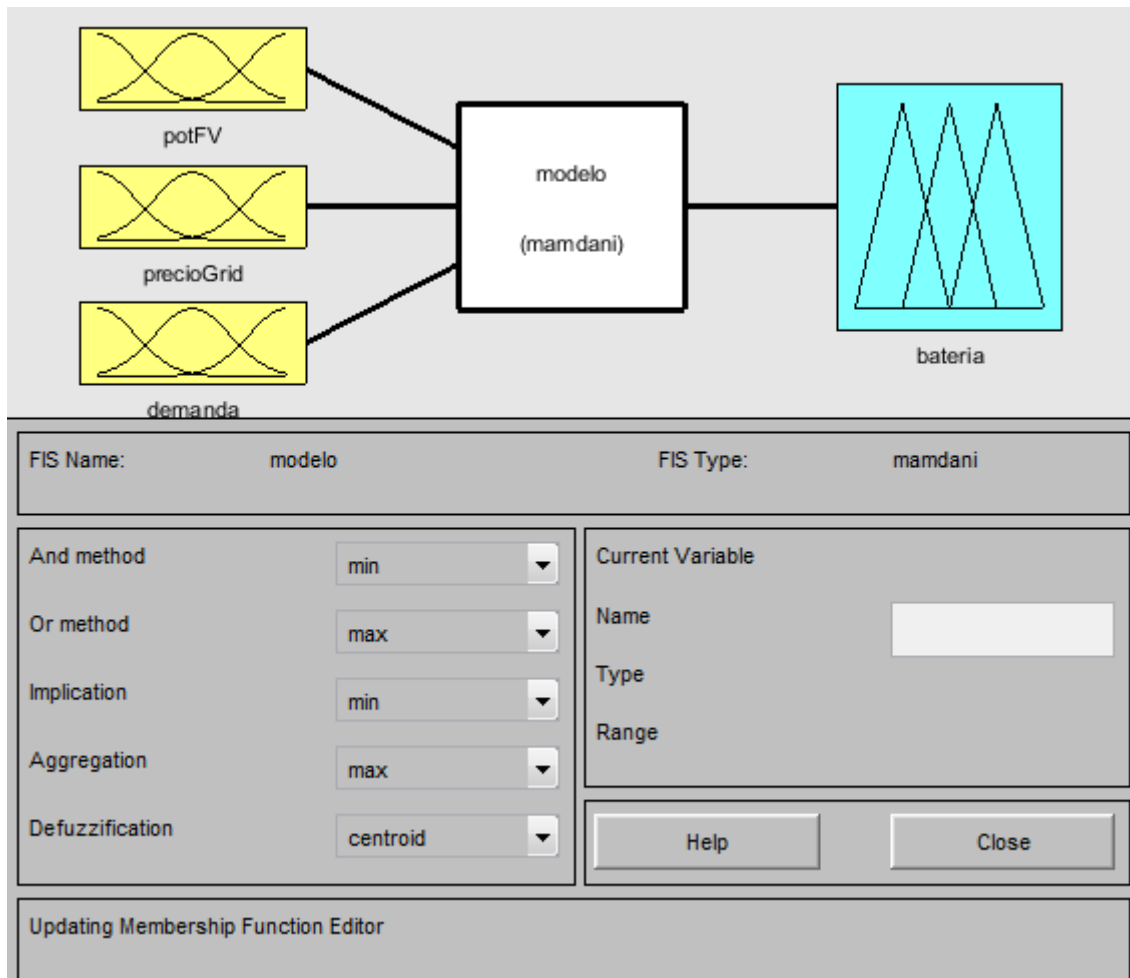


Figura 9 - Comando Fuzzy en Matlab
Fuente: Elaboración propia

En la mitad superior de la figura viene representado un diagrama con las variables del sistema. Se selecciona el número de entradas y salidas asociándoles el nombre que les corresponda. Haciendo doble clic sobre la variable en el diagrama de la parte superior, se selecciona el rango de valores de cada una, así como el tipo de función de pertenencia.

Entre las entradas y la salida hay un cuadrado representando la interacción del modelo del problema, compuesto por las reglas lingüísticas y resto de parámetros. Las características y condiciones establecidas definen la salida del sistema.

La mitad inferior de la figura se divide en dos partes. En la derecha, aparece la información general de la variable que se seleccione, como su nombre, el tipo de variable y el rango de valores que comprende. En la parte izquierda hay un menú emergente que permite especificar las funciones que se usarán en el modelo difuso.

7.2 Variables de entrada del sistema

Al comenzar la programación se determinan los valores iniciales que hagan que el modelo funcione razonablemente bien, para luego realizar las modificaciones que se estimen oportunas.

Se establecen unos intervalos para los valores de cada entrada, que engloban a todos los posibles valores que se podrían alcanzar en un intervalo de tiempo. Estos intervalos han de recoger todas las variantes que pueden darse a lo largo de un día cualquiera del año, aunque sin olvidar que la modificación de estos límites no requiere gran complejidad, lo que supone una ventaja de este sistema de resolución. En la primera implementación se divide un día en 12 periodos de dos horas cada uno, y posteriormente se realiza la implementación para 96 periodos de 15 minutos cada uno. A continuación, se describen los rangos elegidos para cada entrada.

➤ Potencia fotovoltaica

Naturalmente dependerá del tipo de instalación que tenga el edificio, el número de placas y las características de las mismas. Así mismo, la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos depende directamente de la radiación recibida del sol. Esta radiación varía a lo largo de las horas del día y entre los días, y es por ello por lo que el uso de las baterías es imprescindible.

Los valores de entrada que se tienen para la ejecución del programa son previsiones, y aunque pueda existir una ligera variación con los datos reales que se registren, será una desviación mínima pues son unas previsiones muy precisas.

En la figura 10 se pueden ver los valores de radiación global de cada hora en el día 16 de Julio, en Sevilla, donde se encuentra el edificio. Esta radiación se mide en Wh/m^2 , siendo 0 el mínimo valor que se alcanza cuando no inciden los rayos de sol sobre la superficie terrestre y 934 Wh/m^2 el máximo valor registrado ese día.

Radiación Global (Wh/m²)

[Generar gráfico]

Día del año	Media
JULIO	
197 (16 de Julio) a las 5:00	18.8
197 (16 de Julio) a las 6:00	154
197 (16 de Julio) a las 7:00	316.7
197 (16 de Julio) a las 8:00	492.9
197 (16 de Julio) a las 9:00	663.2
197 (16 de Julio) a las 10:00	805.9
197 (16 de Julio) a las 11:00	900.8
197 (16 de Julio) a las 12:00	934.1
197 (16 de Julio) a las 13:00	900.8
197 (16 de Julio) a las 14:00	805.9
197 (16 de Julio) a las 15:00	663.2
197 (16 de Julio) a las 16:00	492.9
197 (16 de Julio) a las 17:00	316.7
197 (16 de Julio) a las 18:00	154
197 (16 de Julio) a las 19:00	18.8

Radiación Global (Wh/m²) Resumen diario

Día del año	Media
JULIO	
197 (16 de Julio)	7638.7

Figura 10 - Radiación global por horas
Fuente: Agencia andaluza de la energía

➤ Precio de la energía obtenida de la red eléctrica

Es el coste por kWh que va a tener la energía proveniente de la red eléctrica durante ese periodo de una hora. El precio fluctúa a lo largo del día, al igual que la demanda energética de la población. En los periodos de mayor demanda, aumenta el precio de la energía. La demanda es mayor durante las horas solares y especialmente al final del día, cuando acaba la tarde y comienza la noche. Como ni en los periodos de menor coste éste llega a ser cero, el rango de valores en el que se mueve esta variable tiene un valor mínimo.

Se muestran en la figura 11 las tarifas horarias que se registraron del 11 al 17 de julio de 2017:



Figura 11 - Tarifas horarias julio
Fuente: Endesa

➤ Demanda de energía eléctrica

Se mostraron en el capítulo 5 los datos de la demanda del hotel, considerando tres situaciones para distinta ocupación del mismo. En la primera implementación se considera el caso en el que se encuentren tres habitaciones ocupadas.

Existen ciertas diferencias en el consumo de energía eléctrica de una vivienda habitual a un hotel rural en el que se está de descanso. En ambos casos la menor demanda de energía se registra en las horas nocturnas, pero en el hotel rural, durante las horas centrales de la mañana y de la tarde, el consumo suele ser igualmente bajo,

incrementado por el funcionamiento de la recepción. Esto se debe a que los ocupantes suelen dejar las habitaciones, y salvo el frigorífico, no se dejan conectados otros electrodomésticos como podría ser lavadora, lavavajillas etc. Aún en las horas de menor actividad siempre queda un consumo residual.

7.3 Funciones de membresía

Las funciones de membresía son una representación gráfica que definen el significado de las variables de entrada y salida. Una vez expuestas las variables de entrada, y definidas en el programa de Matlab las reglas lingüísticas, se presentan a continuación las funciones de membresía para cada variable. En el eje horizontal viene representada la unidad en que se mida cada una de las variables.

En las funciones de membresía se establece el rango de datos que puede alcanzar cada variable del sistema. Éstas se dividen en tres variables difusas, que son: *bajo*, *medio*, *alto*; y sus funciones correspondientes tienen forma triangular y trapezoidal. De esta manera, el vértice del triángulo asociado a la variable difusa *medio* se encuentra en el centro del intervalo.

Los triángulos de estas funciones tienen la misma dimensión en cada variable, y son proporcionales entre cada una de ellas, de manera que todos siguen la misma distribución. A continuación, se muestran gráficamente las funciones de pertenencia para cada una de las variables de entrada.

➤ Potencia fotovoltaica

La radiación máxima recibida desde el sol no coincide con el límite superior del rango de posibles valores que alcanza esta variable de entrada, ya que las características técnicas de las placas fotovoltaicas son más limitantes.

Las características técnicas del conjunto de paneles fotovoltaicos que se encuentran instalados en el edificio sitúan en 11.252 kW el máximo valor de potencia eléctrica que se produce utilizando esta fuente de energía renovable, una vez consideradas las pérdidas debido al rendimiento.

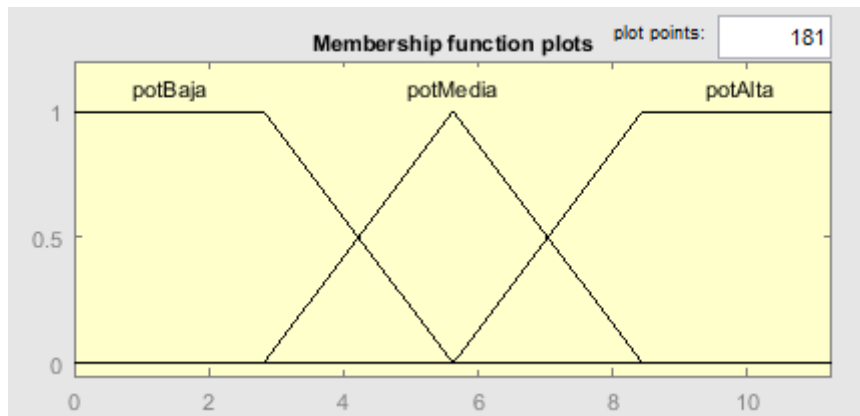


Figura 12 - Función de membresía de la variable potencia fotovoltaica
Fuente: Elaboración propia

En la figura 12 se observa gráficamente la función de membresía asociada a esta variable de entrada. El eje horizontal representa los valores de la potencia que se pueden alcanzar en cada momento, medidos en kW. El límite inferior del intervalo es cero, y el superior se establece en 11.252 kW, ya que, aunque cambien los datos de la demanda del edificio, mientras no se aumente el número de placas fotovoltaicas o las características de éstas, no se podrá obtener mayor potencia eléctrica a través del sol.

➤ Precio red eléctrica

Analizando el coste que alcanza el kWh en los periodos más demandados, se concluye que establecer el valor máximo en 0.13 €/kWh contempla todas las posibles fluctuaciones de esta entrada. Es razonable establecer el valor de 0.1 €/kWh como límite inferior del rango de valores ya que el precio de la energía no alcanzará ningún valor por debajo de este. En la figura 13 se presenta la función de membresía de esta entrada, encontrándose en el eje horizontal el precio de la energía, medido en €/kWh.

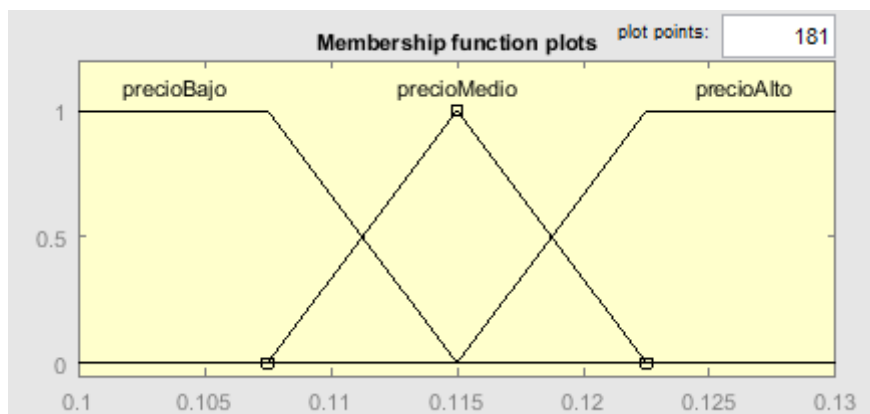


Figura 13 - Función membresía de la variable precio
Fuente: Elaboración propia

➤ Demanda

Se establece el máximo valor previsto en 10 kWh para la demanda energética. Esto ocurre cuando en el hotel se registra una ocupación total, y en los periodos del final de la tarde. En la figura 14 está representada gráficamente la función de membresía de esta entrada, cuyo intervalo toma como mínimo valor 0. Aunque siempre hay un consumo residual aún en el caso más desfavorable para el empresario, que es que ninguna o una única habitación está ocupada, este consumo es tan bajo que el límite queda muy cercano al cero. En el eje horizontal se representan los niveles de demanda energética que se pueden alcanzar, medidos en kWh.

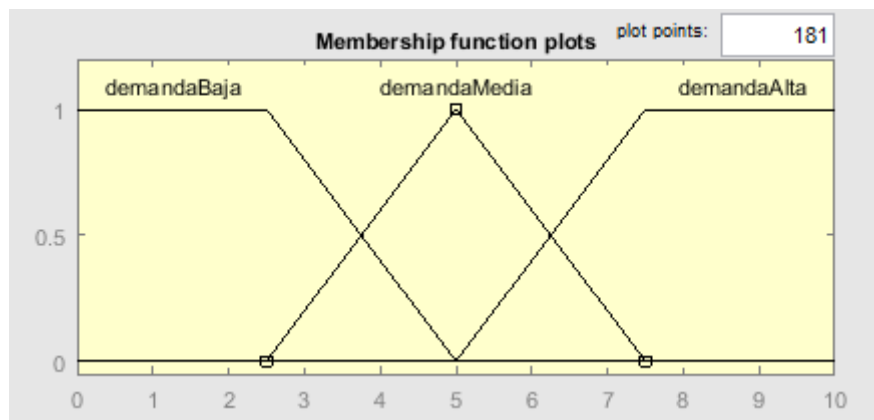


Figura 14 - Función de membresía de la variable demanda
Fuente: Elaboración propia

➤ Variable de salida

La variable de salida del sistema es *batería*. Las variables difusas asociadas son: *descargar*, *nada* y *cargar*; que indican el funcionamiento que debe tener el sistema de almacenamiento durante ese periodo.

La función de membresía de la variable de salida se distribuye de forma triangular, siendo el intervalo establecido entre -100 y 100 de la siguiente manera, según se muestra en la figura 15. En este caso, se obtiene el valor de la implementación en primer lugar, y dependiendo de a qué variable difusa le corresponda el valor obtenido, así actuará el equipo de las baterías durante el intervalo de tiempo correspondiente.

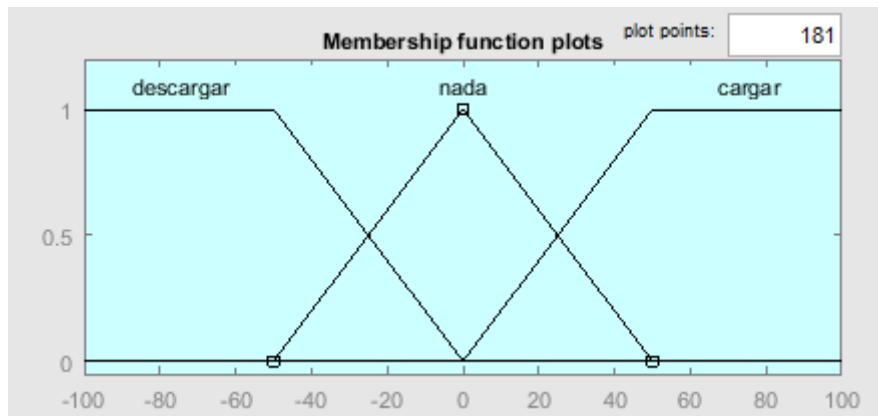


Figura 15 - Función de membresía de la variable de salida
Fuente: Elaboración propia

7.4 Salida del sistema fuzzy

En el apartado anterior, tras establecer las funciones de membresía para las variables de entrada, se presentó igualmente la distribución que seguirá la salida *batería*.

La información que se obtiene con el fichero fuzzy es una pantalla como la que se muestra en la figura 16, en la que se encuentran representadas gráficamente las funciones de membresía de las cuatro variables del sistema.

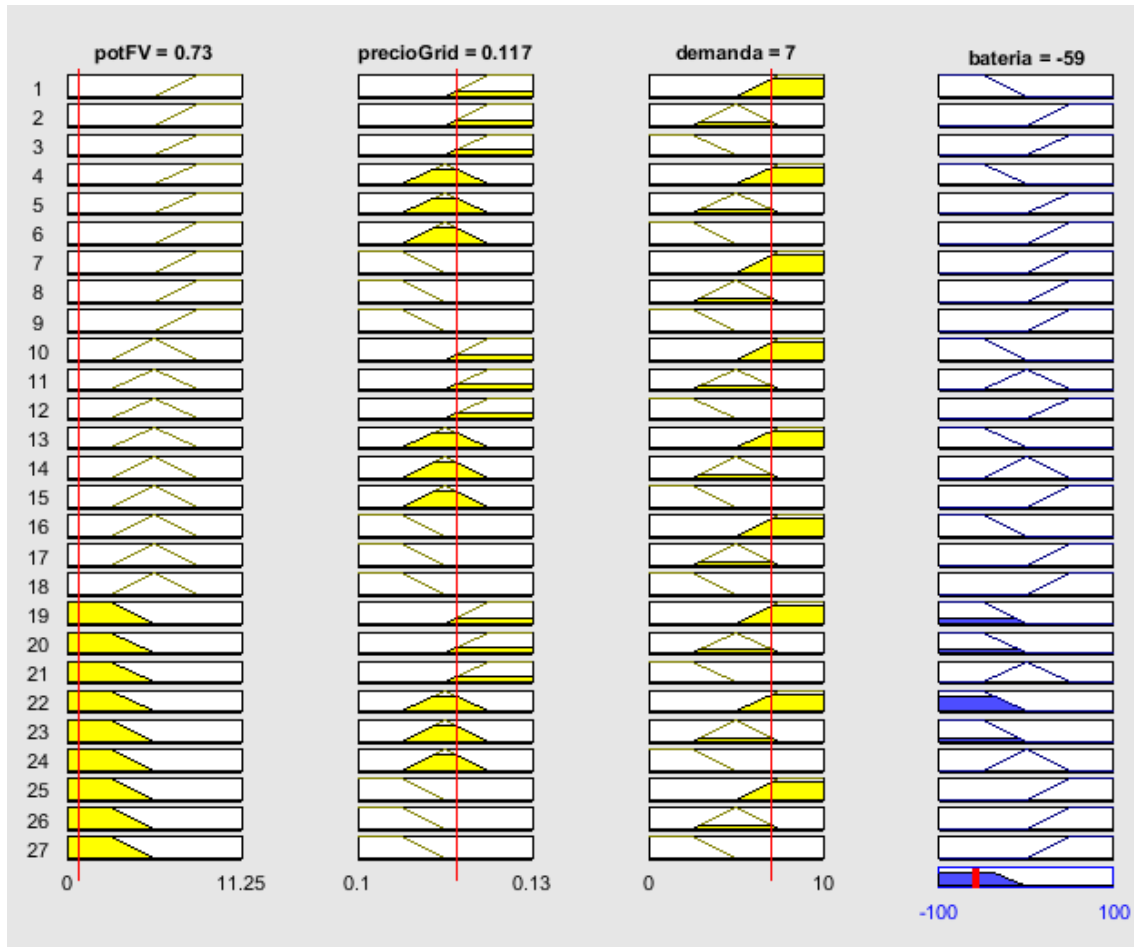


Figura 16 - Salida fuzzy
Fuente: Elaboración propia

Está compuesto por cuatro columnas, correspondientes a las tres variables de entrada y a la salida, mientras que las filas indican cada una de las reglas lingüísticas establecidas en el problema. Con las reglas se examinan todas las combinaciones posibles que existen entre las tres variables de entrada, y se establece la salida para cada combinación.

En cada una de las filas vienen representadas las funciones de membresía de cada una de las variables, y para indicar la combinación establecida en esa línea se señala el triángulo correspondiente a las variables difusas que forman la combinación. Si la variable difusa de la variable en esa regla es *bajo*, se marca la parte más a la izquierda de la función de membresía, si es *medio* viene señalado el triángulo central, y si es *alto*, lo está la parte derecha.

Los datos de entrada aparecen indicados en la parte superior, al lado del nombre de las variables y se marcan gráficamente con una línea roja vertical que representa un valor numérico en el intervalo correspondiente a cada variable.

Cuando la línea roja pasa por encima de uno de los triángulos que se encuentran señalados, el triángulo en cuestión se marca de color amarillo de forma total o parcial. Lo hará de forma total si solamente lo atraviesa a él, es decir, a una de las variables difusas.

Por el contrario, si la línea roja está en una zona de valores perteneciente a la intersección de dos triángulos, ambos tomarán el color amarillo en la fila que les corresponda. Pero en este caso lo harán de forma proporcional a lo cerca que se encuentre el dato de entrada al centro del triángulo en cuestión. En la variable *precioGrid* ocurre esto, marcándose los triángulos correspondientes a la variable difusa *alto* únicamente en su base, mientras que los correspondientes a *medio* se marcan casi completos, excepto la parte superior de los mismos.

Si se activan las tres variables de entrada de una de las reglas lingüísticas, ésta se evalúa obteniéndose su salida particular. Todas las reglas lingüísticas que participen a lo largo del periodo darán conjuntamente la salida del sistema para ese intervalo de tiempo.

La salida obtenida es un número, que viene marcado en la función de membresía de la variable de salida que se encuentra debajo de la última fila, indicando su variable difusa asociada *descargar*, *nada* o *cargar*. Esto da la información requerida para que actúen el conjunto de baterías en ese periodo.

8 Heurística de solución

En el apartado anterior se ha explicado la salida que se obtiene al implementar el archivo de lógica difusa, pero para la resolución del problema son necesarios desarrollar otros archivos en Matlab. A continuación, se comentan los aspectos más importantes de cada uno de ellos, que se pueden encontrar en el Anexo correspondiente. Para su desarrollo se han tenido en cuenta las características de los equipos descritas en el apartado 3, y usado las variables y restricciones técnicas del apartado 4.

8.1 Modelo difuso

Es el fichero en el que se desarrolla el sistema de lógica difusa adaptado a este problema, comentado en los apartados anteriores. En este fichero, llamado *modelodifuso* se ejecuta el comando fuzzy en el que se han guardado los datos y características para la resolución, usando la siguiente sentencia:

```
fuzzy modelo
```

8.2 Salida del modelo difuso

Para evaluar la salida en función de unos datos de entrada establecidos, se utiliza una función que envía al modelo difuso estos datos para el periodo en cuestión, y obtiene el valor de la salida. Se definen igualmente las variables que indican si se activa la opción de cargar o descargar las baterías.

```
function [DeltaCarga,DeltaDescarga]=salidafuzzy(Fotov_efectiva,  
Grid_precio, Demanda_instalacion)  
leemodelo = readfis('modelo');  
DeltaCarga=0;  
DeltaDescarga=0;
```

```
out = evalfis([Fotov_efectiva Grid_precio  
Demanda_instalacion],leemodelo);
```

Con este valor y una vez establecidos los límites de actuación de la salida, se le asignan valor 1 ó 0 a las variables binarias asociadas a las acciones de cargar y descargar los equipos de almacenamiento, que son la salida de este fichero.

Como se comentó anteriormente, la salida del modelo difuso es un valor numérico que, mediante la ejecución de este fichero llamado *salidafuzzy*, convierte esa información en una de las tres opciones posibles a realizar por el conjunto de las baterías. Para ello se establecen unos rangos que definen a partir de qué valores de la salida se referirá a cada una de las tres opciones.

De este modo, queda que para valores inferiores a -35 las baterías realizan la orden *descargar*, si el resultado obtenido es mayor a 35, se ejecuta la orden *cargar* las baterías, y si la salida se encuentra entre -35 y 35 no se activan ninguna de las dos variables binarias, lo que corresponde a *nada*, mantener las baterías en standby.

```
if out>35  
    DeltaCarga=1;  
    DeltaDescarga=0;  
end  
if out<-35 & out>35  
    DeltaCarga=0;  
    DeltaDescarga=0;  
end  
if out<-35  
    DeltaCarga=0;  
    DeltaDescarga=1;  
end
```

8.3 Resolución para un periodo

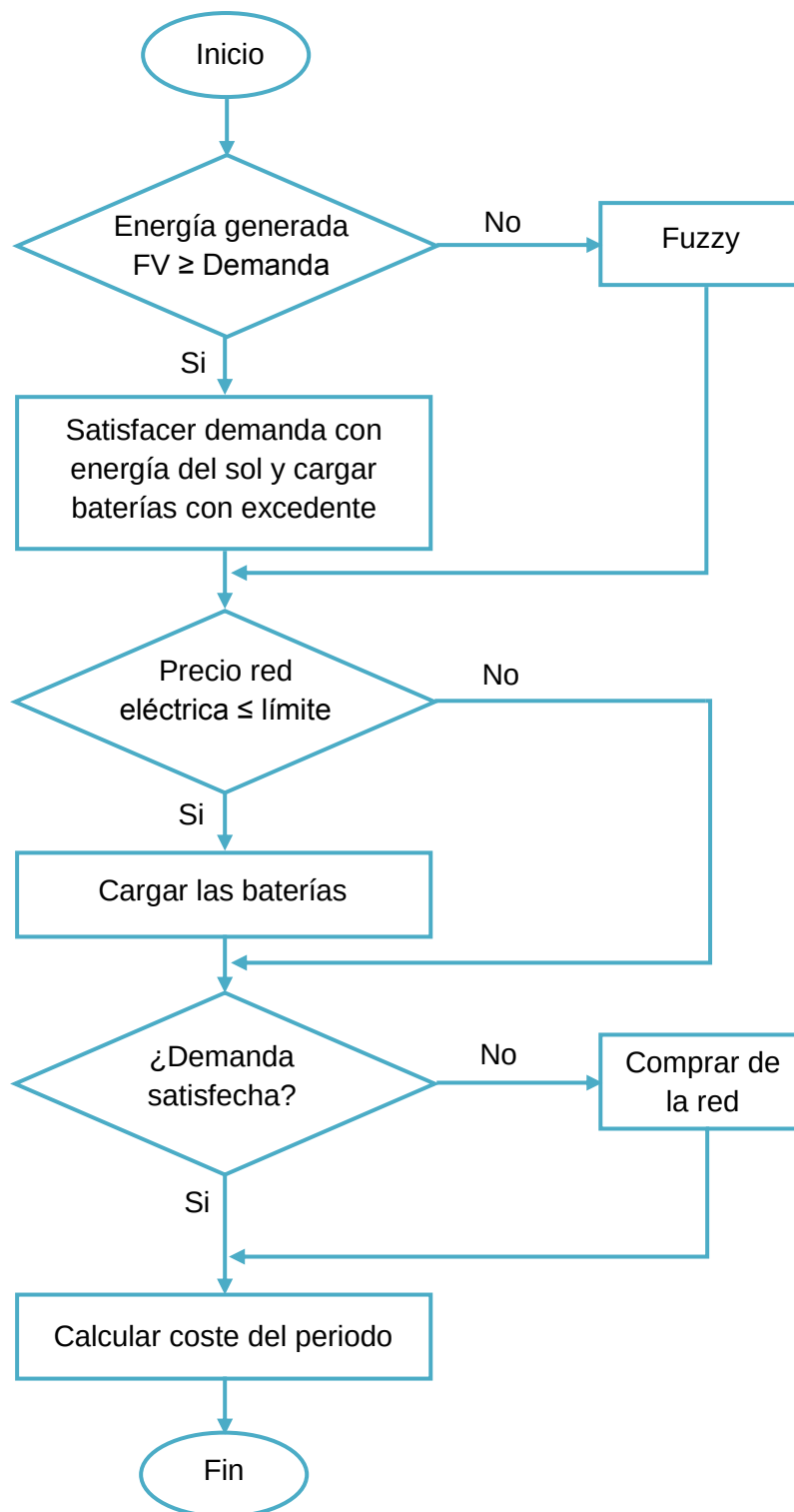
Se diseña este fichero llamado *unperiodo* para obtener la información deseada al evaluar un único periodo. Recibe unas variables de entrada y como resultado se obtiene el valor de unas variables de salida.

```
function [Bat_almac, Coste_total]=unperiodo(Fotov_prevision,  
Grid_precio, Demanda_instalacion, Bat_almac_inicial)
```

Como entrada se pasan las variables asociadas a la previsión de radiación solar, el precio de la red eléctrica, la demanda estimada para el hotel y el estado de almacenamiento inicial del conjunto de las baterías.

La salida que se obtiene de la implementación son dos variables que representan el estado de almacenamiento de las baterías con el que finaliza el periodo tras realizar las operaciones necesarias para cumplir la demanda y el coste total que supone ejecutar las operaciones, todas ellas calculadas para ese periodo.

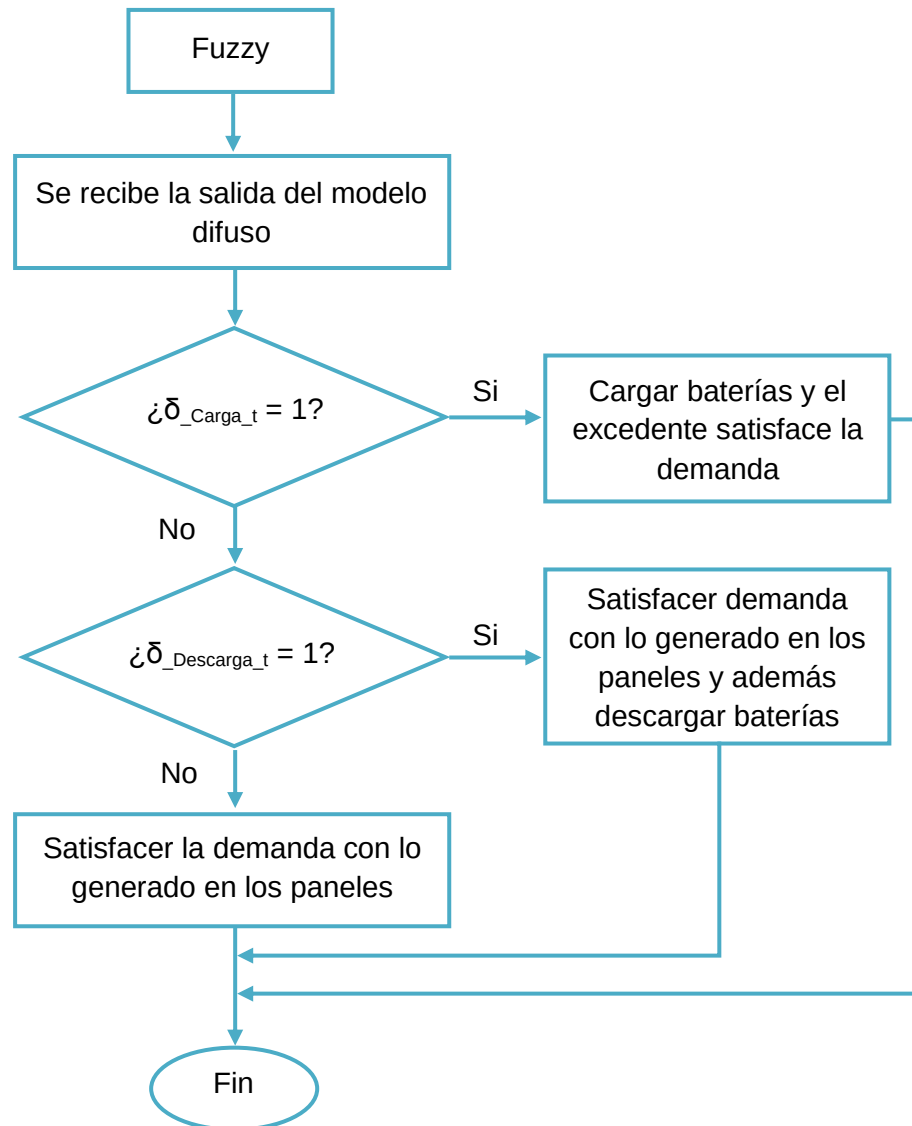
A continuación, se presenta el diagrama de bloques con los pasos que sigue el fichero, analizando las distintas situaciones que se pueden dar.



El límite con el que se compara el precio de la energía de la red eléctrica es el valor que se establece por debajo del cual se compra energía para almacenar en el equipo de baterías, siempre que haya capacidad de almacenamiento disponible.

Cuando la energía recogida por las placas fotovoltaicas no supera a la cantidad demandada por el hotel en ese periodo, se resuelve el problema mediante lógica difusa, lo que se representa en el diagrama anterior con el bloque fuzzy.

En el punto anterior se explicó el funcionamiento del fichero en el que se desarrolla la lógica difusa. Este fichero se ejecuta cuando las condiciones del periodo hacen que se active el bloque fuzzy, y a continuación se muestra el diagrama de flujo que se desarrolla dentro de este bloque al recibir la salida del modelo difuso. La salida es el valor que toma la variable binaria que indica cargar o descargar las baterías, y las variables binarias δ_{Carga_t} y $\delta_{Descarga_t}$ indican si las baterías reciben la orden de cargar o descargar energía, dependiendo de cuál de ellas tome valor 1.



Tras mostrar el diagrama de flujo sobre el que se construyó el fichero, se muestra a continuación un pseudocódigo que refleja el procedimiento que sigue el programa implementado.

Tabla 18 - Pseudocódigo

```
1  Inicio
2  if Fotov_efectiva >= Demanda_instalacion then
3      Satisfacer Demanda_instalacion con Fotov_efectiva
4      Cargar baterías con el excedente
5  else se obtiene la salida del modelo difuso
6      if  $\delta_{Carga\_t}$  = 1 then
7          Se cargan las baterías con Fotov_efectiva
8          Si hay energía que no se pueda cargar se destina a Demanda_instalacion
9      end if
10     if  $\delta_{Carga\_t}$  = 0 and  $\delta_{Descarga\_t}$  = 0 then
11         Satisfacer Demanda_instalacion con Fotov_efectiva
12     end if
13     if  $\delta_{Descarga\_t}$  = 1 then
14         Satisfacer Demanda_instalacion con Fotov_efectiva
15         Descargar energía de las baterías para Demanda_instalacion
16     end if
17 end if
18 if Grid_precio <= límite & (Bat_capac_max - Bat_almac) > 0 & Bat_carga_necesaria < Bat_carga_max
19     Cargar baterías con la red eléctrica
20 end if
21 Adquirir energía de Grid_instalacion para completar Demanda_instalacion
22 Calcular Coste_total
23 End
```

Una vez descrito el pseudocódigo, se presenta el desarrollo del programa, explicando cada acción realizada.

Se tienen **dos casos principales** cuya programación se detalla a continuación, teniendo siempre en cuenta las pérdidas energéticas debido a los rendimientos de los equipos:

1. El **primero** es en el que la energía generada por las placas fotovoltaicas supere la demanda energética del edificio, que es un caso determinista dentro del cual se distinguen diferentes opciones.

En primer lugar, se satisface la demanda energética del edificio con la energía generada en los paneles fotovoltaicos.

```
if Fotov_efectiva>=Demanda_instalacion
    Fotov_demanda=Demanda_instalacion;
```

- a. Si la energía excedente que resulta tras suministrar al hotel es mayor que la capacidad máxima de carga que tiene el equipo de baterías para un periodo:

```
if (Fotov_efectiva-Demanda_instalacion)>=Bat_carga_max
```

- I. Se analiza el estado de almacenamiento en ese instante, calculando la diferencia entre la capacidad de almacenamiento máximo y el almacenamiento actual, y comparándolo con la capacidad máxima de carga. Si la limitación de carga no es la capacidad de almacenamiento restante de las baterías sino la cantidad de energía que se puede almacenar en un periodo debido a las restricciones técnicas de las baterías (carga máxima), la energía que se ordene almacenar es este valor de carga máxima.

```
if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max
    Bat_carga_necesaria=Bat_carga_max;
    Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_
    carga;
```

- II. Si, por el contrario, la limitación en cuanto a la cantidad de energía que se carga en las baterías está en que el nivel de almacenamiento actual no permite que se cargue el máximo permitido en cada periodo, se ordena almacenar únicamente la energía que eleva el nivel de almacenamiento hasta la máxima capacidad de las baterías.

```
else
    Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
    Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_
    carga;
```

end

- b. Si la energía excedente que resulta tras suministrar al hotel no es mayor que la capacidad máxima de carga que tiene el equipo de baterías para un periodo.

else

- I. Se distinguen nuevamente dos posibles casos, el primero es en el que, a pesar de que la energía disponible para almacenar en las baterías sea menor a la carga máxima, la capacidad de almacenamiento del equipo de baterías y el nivel de carga actual, permiten almacenar la totalidad de la energía excedente que se ha obtenido.

```
if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Fotov_efectiva-Demanda_
instalacion)
    Bat_carga_necesaria=Fotov_efectiva-Demanda_instalacion;
    Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_
carga;
```

- II. La otra alternativa es que no sea posible almacenar todo el excedente del periodo, por lo que se ordena almacenar hasta completar el nivel máximo de almacenamiento de las baterías.

else

```
Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_
carga;
```

end

end

2. El **segundo** caso es el que se resuelve mediante lógica difusa al ser la energía producida por las placas fotovoltaicas menor a la demanda energética del hotel. De esta manera, se obtiene para cada periodo, en función de los datos de entrada, cuál debe ser el funcionamiento de las baterías durante el mismo, si almacenar energía, mantenerse en standby o descargar energía, mediante la activación de las variables binarias correspondientes.

```
else  
[DeltaCarga, DeltaDescarga]=salidafuzzy(Fotov_efectiva, Grid_precio,  
Demanda_instalacion)
```

Una vez obtenidas las variables `DeltaCarga` y `DeltaDescarga`, en función del valor que tengan, se analizan los distintos casos por separado, dentro de este **segundo** caso.

En primer lugar, se desarrolla el caso en el que la alternativa elegida sea cargar las baterías, en el que la variable binaria correspondiente toma valor 1.

```
if DeltaCarga==1
```

- a. Se divide en dos posibles situaciones, la primera es que la energía generada por las placas sea mayor a la capacidad máxima de carga para un periodo.

```
if Fotov_efectiva>=Bat_carga_max
```

- I. En esta situación, la restricción técnica de capacidad de carga para un periodo limita la cantidad de energía que se ordena almacenar durante el mismo. Además, hay que considerar si el nivel de almacenamiento actual permite almacenar el máximo permitido para un periodo. En caso de que así sea, se envía la orden de almacenar la máxima cantidad de energía que permiten las baterías.

```
if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max  
Bat_carga_necesaria=Bat_carga_max;  
Fotov_demanda=Fotov_efectiva-Bat_carga_max;  
Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
```

- II. Si el nivel de almacenamiento de ese periodo restringe más que la capacidad máxima de carga, se ordena almacenar la cantidad de energía necesaria para completar el nivel de carga al máximo.

```
else  
Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);  
Fotov_demanda=Fotov_efectiva-Bat_carga_necesaria;  
Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;  
end
```

- b. La otra posible situación es que la energía generada mediante los paneles fotovoltaicos sea menor a la capacidad máxima de carga para un periodo. En este caso, es la cantidad de energía producida lo que restringe, más que la capacidad de carga.

else

- I. Si al calcular la cantidad de energía que puede almacenarse en las baterías, resulta que es mayor a la energía generada, se ordena almacenarla en su totalidad.

```
if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Fotov_efectiva
    Bat_carga_necesaria=Fotov_efectiva;
    Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
```

- II. Si por el contrario no pudiese almacenarse toda la energía producida, se cargan las baterías hasta completar el máximo nivel de almacenamiento, y el excedente se destina a satisfacer la demanda del hotel, para no ser desperdiciado.

```
else
    Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
    Fotov_demanda=Fotov_efectiva-Bat_carga_necesaria;
    Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
end
end
end
```

En segundo lugar, se presenta el caso en el que ambas variables binarias tomen valor 0. Esto significa que las baterías permanecen en standby durante ese periodo de tiempo.

```
if DeltaCarga==0 & DeltaDescarga==0
    Fotov_demanda=Fotov_efectiva;
end
```

Cuando las baterías permanecen en standby, toda la energía eléctrica generada por medio de los paneles fotovoltaicos se destina a satisfacer la demanda del hotel. No es

necesario considerar casos alternativos, ya que, si la energía producida fuese mayor que la demanda del edificio se habría resuelto por el caso determinista, sin necesidad de utilizar el modelo difuso.

En tercer lugar, la última combinación posible en cuanto a los valores que adquieren las variables binarias es que se active la correspondiente a la descarga de energía de las baterías.

```
if DeltaDescarga==1
```

Primero, se destina toda la energía obtenida de manera renovable a satisfacer la demanda del hotel. Como esta energía no es suficiente para completar la cantidad necesaria para ese periodo, se procede a la descarga de energía de las baterías considerando distintas situaciones.

```
Fotov_demanda=Fotov_efectiva;
```

- a. Se calcula la energía restante que hay que suministrar, siendo esta la diferencia entre la demanda y la energía producida por los paneles, que ya se ha destinado al hotel. Si esta diferencia es mayor a la capacidad máxima de descarga, no se podrá completar la demanda únicamente con el aporte energético de las baterías, pero se descarga lo máximo que se puede, distinguiendo dos casos.

```
if (Demanda_instalacion-Fotov_demanda)>=Bat_desc_max
```

- I. Si la cantidad de energía almacenada en el equipo de las baterías en ese periodo es mayor a la capacidad máxima de descarga se ordena enviar al hotel la cantidad máxima que se puede descargar en un periodo.

```
if (Bat_almac-Bat_capac_min)>=Bat_desc_max  
    Bat_desc_necesaria=Bat_desc_max;  
    Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;
```

- II. Si la cantidad de energía almacenada no es superior a la máxima que se puede descargar en un intervalo, se descarga la totalidad de

energía almacenada, respetando el nivel mínimo que debe mantenerse.

```
else
    Bat_desc_necesaria=(Bat_almac-Bat_capac_min);
    Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;
end
```

- b. La otra situación se da cuando la energía restante que hay que suministrar, es decir, la diferencia entre la demanda y la energía producida por los paneles es menor a la capacidad máxima de descarga. Cuando esto ocurre, la restricción técnica de las baterías en cuanto a capacidad de descarga no restringe el problema, por lo que se analiza el estado de almacenamiento de las baterías para ver si se completa la demanda energética únicamente con el aporte de las baterías, distinguiendo dos casos.

```
else
```

- I. Si el nivel de carga de las baterías es superior a la energía requerida para completar la demanda del hotel en ese periodo, se descarga la energía necesaria.

```
if (Bat_almac-Bat_capac_min)>=(Demanda_instalacion-
    Fotov_demanda)
    Bat_desc_necesaria=Demanda_instalacion-Fotov_demanda;
    Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;
```

- II. Si el nivel de carga de las baterías es inferior a la energía necesaria para completar la demanda del intervalo, se ordena descargar toda la energía posible de las baterías y destinarla a suministrar al hotel.

```
else
    Bat_desc_necesaria=(Bat_almac-Bat_capac_min);
    Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

Una vez analizados el caso determinista y de lógica difusa que dan la información sobre cómo ha de actuar el equipo de baterías para solucionar el problema, se presenta a continuación el último caso presente en la implementación.

Este caso determinista se corresponde con la situación en la que el precio de la red eléctrica sea suficientemente bajo como para que se decida comprar energía para almacenarla en las baterías.

En primer lugar, se actualiza el nivel de almacenamiento de las baterías, teniendo en cuenta que se asumen las pérdidas por rendimiento. Esto significa que la energía que entra es energía efectiva, que es la que se almacena tras aplicarle el rendimiento de carga, mientras que se considera que la energía descargada es la necesaria, a la que se le aplicará posteriormente las pérdidas por rendimiento de descarga.

```
Bat_almac=Bat_almac+Bat_carga_efectiva+Bat_carga_efectiva_excedente-  
Bat_desc_necesaria;
```

Se han de cumplir tres condiciones para entrar en el siguiente módulo:

- El precio de la energía de la red eléctrica sea menor a 0.1069 €/kWh.
- El nivel de carga de las baterías no sea el máximo, es decir, haya posibilidad de almacenar más energía.
- La energía que ya se ha ordenado cargar en las baterías debe ser menor a la máxima capacidad de carga para un periodo. Se considera la energía necesaria, antes de aplicarle las pérdidas por rendimiento de carga.

```
if Grid_precio<=0.1069 & (Bat_capac_max-Bat_almac)>0 & Bat_carga_  
necesaria<Bat_carga_max
```

Ahora se tienen dos opciones:

- a. La primera es en la que aún no se ha cargado nada en las baterías y por tanto se dispone de toda la capacidad máxima de carga.

```
if Bat_carga_efectiva+Bat_carga_efectiva_excedente==0
```

- I. Si el nivel de carga en ese instante permite que se almacene el máximo establecido para un periodo, se ejecuta esta acción.

```
if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max
```



```
Bat_carga_preciobajo=Bat_carga_max;  
Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
```

- II. Si no resulta posible cargar la cantidad máxima para un periodo debido a que se excede la capacidad de almacenamiento de las baterías, se ordena almacenar lo que corresponda hasta completar el nivel de almacenamiento.

```
else  
    Bat_carga_preciobajo=(Bat_capac_max-Bat_almac);  
    Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;  
end
```

- b. Si ya se han realizado cargas en el equipo de las baterías, no se dispone de la totalidad de capacidad de carga para ese periodo. Por tanto, se calcula cuál es la cantidad de energía restante que se puede ordenar almacenar en el periodo.

```
else  
    Bat_carga_max_restante=Bat_carga_max-Bat_carga_necesaria;
```

- I. Ahora se calcula el espacio disponible para almacenar energía que hay en las baterías en este periodo y tras actualizar las cargas y descargas energéticas que se hayan hecho a lo largo de la implementación. Si se dispone de espacio suficiente para almacenar la máxima cantidad que permite la capacidad de almacenamiento restante, se ordena cargar esta cantidad.

```
if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max_restante  
    Bat_carga_preciobajo=Bat_carga_max_restante;  
    Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
```

- II. Si, por el contrario, el espacio disponible para cargar las baterías es limitante, se ordena almacenar la cantidad de energía que completa la capacidad de almacenamiento de las baterías.

```
else  
    Bat_carga_preciobajo=(Bat_capac_max-Bat_almac);  
    Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
```

```
end  
end  
end
```

Tras la posible compra de energía a la red eléctrica, se actualiza el nivel de carga de las baterías:

```
Bat_almac=Bat_almac+Bat_carga_grid;
```

Para garantizar que se satisface completamente la demanda del hotel, se tiene que cumplir el balance de energía. La energía que se aporta al edificio proveniente de las baterías es la efectiva, pues ya se le han aplicado las pérdidas por el rendimiento de descarga. En la sentencia siguiente se calcula la energía total que se compra a la red eléctrica, tanto para cargar las baterías como para suministrarla al hotel.

```
Grid_instalacion= Demanda_instalacion-Bat_desc_efectiva-Fotov_demanda;  
Grid_red=Bat_carga_preciobajo+Grid_instalacion;
```

Con este dato de la energía consumida de la red eléctrica, se calcula el coste que esto supone para el periodo. A continuación, se realizan los cálculos para los costes variables debidos al uso de la batería y de los paneles fotovoltaicos. Estos únicamente se imputan en los periodos en los que estos equipos estén funcionando, y se considera la energía necesaria y la generada, antes de aplicarles las pérdidas por rendimiento que tiene cada uno de los equipos.

```
Coste_red=Grid_red*Grid_precio;  
Coste_variable_bat=Bat_costevar*(Bat_carga_necesaria+Bat_desc_  
necesaria+Bat_carga_preciobajo)*Delta_bat;  
Coste_variable_fotov=Fotov_costevar*Delta_fotov*Fotov_generada;
```

En último lugar, se suman los costes fijos y variables correspondientes, para así obtener el coste total de operación del periodo.

```
Coste_total=Coste_red+Bat_costefijo+Coste_variable_bat+Fotov_costefijo  
+Coste_variable_fotov;
```

Con esto se obtienen todas las variables que se entregan como salida, que son el estado de almacenamiento de las baterías al final del periodo y el coste total que supone satisfacer la demanda para el periodo.

8.4 Resolución para un día completo

La información de qué hacer con las baterías en cada intervalo se obtiene en el fichero comentado en el apartado anterior. Dependiendo de la decisión tomada, se ejecutan los comandos asociados a esa situación, y se garantiza cubrir la demanda en todos los periodos, ya que siempre se puede consumir energía de la red eléctrica.

Al ejecutar este fichero, llamado *diacompleto*, se entregan los datos de entrada para cada intervalo de tiempo que necesita el fichero *unperiodo*, y va almacenando el coste de cada periodo, calculando la suma total.

Los datos los obtiene a partir de la lectura de un fichero que los contiene, y los almacena en una matriz. Se define la variable en la que se va sumando el coste que se obtiene al satisfacer energéticamente cada periodo, y que al finalizar la implementación dará el coste de operación del día completo. Se establece el nivel de almacenamiento inicial que tiene el equipo de las baterías.

```
fid=fopen('datos6.txt','r');
cont=288;
A=zeros(3,96);
[A,cont]=fscanf(fid,'%f',[3,96]);
Coste_final=0;
Bat_almac_inicial=10;
```

Mediante un bucle, se van leyendo los datos de la matriz y se entregan como entrada a la función *unperiodo*. La salida que se obtiene al ejecutar esta función es el nivel actualizado de carga de las baterías y el coste total que supuso el periodo.

Con la variable del coste del periodo se va incrementando el coste de operación total, y se actualiza el nivel de almacenamiento de las baterías, dato que se vuelve a pasar como entrada en la siguiente implementación del bucle.

Al terminar la ejecución de este fichero, se muestra por pantalla el coste total de operación que tiene satisfacer la demanda del hotel con los datos dados para un día completo.

```
for j=1:96
    Fotov_prevision=A(1,j)
    Grid_precio=A(2,j)
    Demanda_instalacion=(A(3,j))
```

```
[Bat_almac, Coste_total]=unperiodo(Fotov_prevision, Grid_precio,  
Demanda_instalacion, Bat_almac_inicial)  
Coste_final=Coste_final+Coste_total;  
Bat_almac_inicial=Bat_almac;  
end  
Coste_final
```

9 Resolución para distintos escenarios

La salida obtenida en la ejecución del programa es el coste de operación del sistema. En este punto se exponen los resultados que se obtienen para los tres casos de demanda estudiados, comenzando con el análisis para los 12 periodos, y posteriormente con los 96 intervalos de 15 minutos.

Cada escenario tiene distintos datos de entrada, que varían entre ellos únicamente en cuanto a los valores de demanda energética se refiere. Estos distintos datos de entrada se resuelven bajo el mismo método para así poder realizar comparaciones entre ellos.

9.1 Escenarios de 12 periodos

Se analizan tres escenarios distintos para los que se realizan variaciones en los datos de la demanda. Son los correspondientes a que el hotel tenga una ocupación de una única habitación, tres o seis, y siempre la recepción.

Los datos de la demanda energética de cada uno de estos niveles de ocupación se presentan en la gráfica de la figura 17.

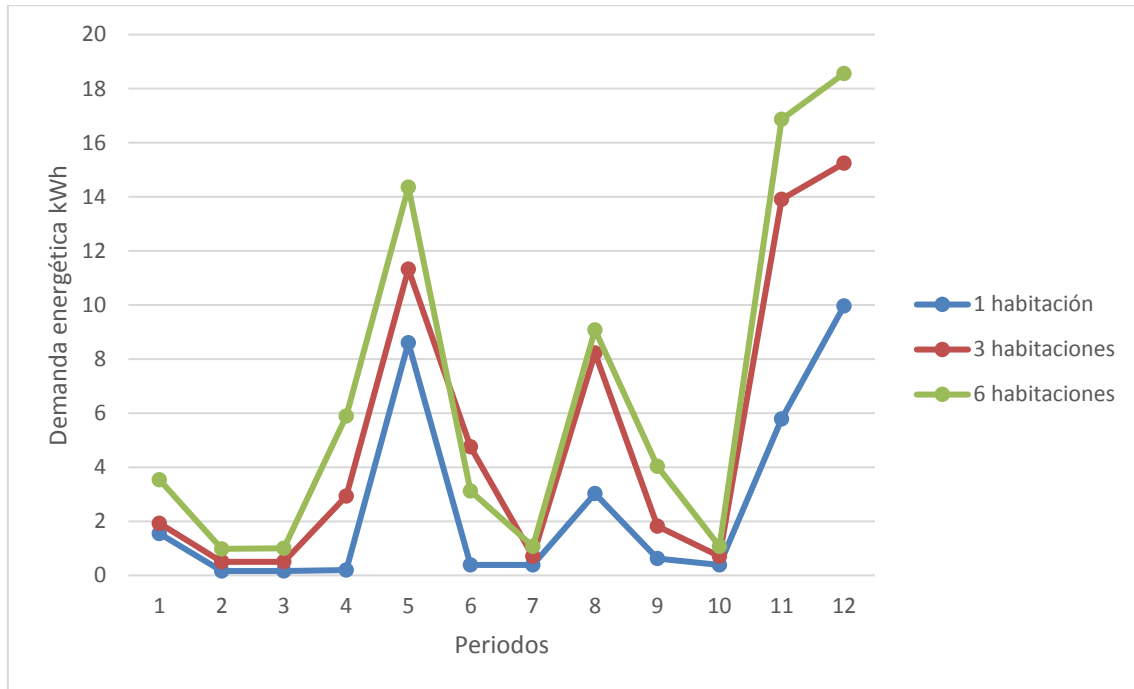


Figura 17 - Demanda energética para los tres escenarios
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la gráfica, los periodos de mayor gasto de energía eléctrica coinciden con las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde, debido al uso del calentador de agua y demás electrodomésticos necesarios para el aseo y para preparar desayuno y cena.

El periodo 4 se corresponde con las 8:00h, hora estimada en que los huéspedes comienzan a levantarse. En el periodo 7 que corresponde a las 14:00h también hay un aumento considerable del gasto energético, ante la posible vuelta al hotel tras el almuerzo o para almorzar en la habitación. El intervalo de tiempo en el que la demanda es mayor es el que se corresponde con el periodo 11 y 12, que equivalen a las 22:00h y 0:00h respectivamente.

En los apartados siguientes, se presentan los resultados obtenidos en cuanto al almacenamiento por los equipos de baterías y costes de operación. Los paneles fotovoltaicos y los acumuladores tienen asociado un coste fijo independientemente de que se utilice en el intervalo.

9.1.1 Primer escenario

La primera situación es aquella en la que únicamente hay ocupada una de las habitaciones del hotel. En la figura 18 se muestra la evolución del nivel de almacenamiento de las baterías a lo largo del día.

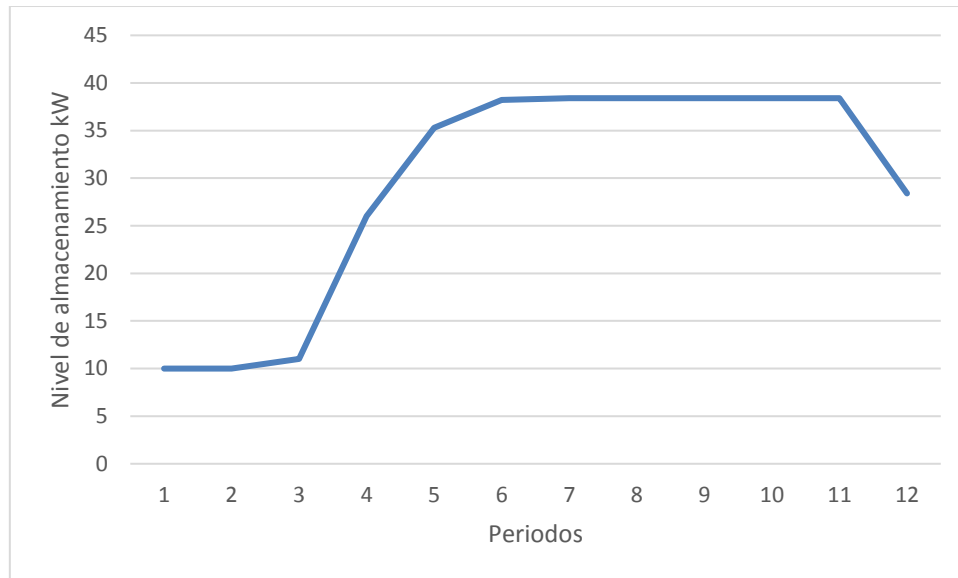


Figura 18 - Nivel de almacenamiento primer escenario
Fuente: Elaboración propia

El nivel de almacenamiento va aumentando en las primeras horas de luz del día, cuando empieza a generarse energía eléctrica por parte de los paneles fotovoltaicos. En las horas centrales del día se mantiene constante y en su máxima capacidad, para disminuir posteriormente en las últimas horas en las que ya no llega radiación solar y la demanda eléctrica es mayor.

Se observa un salto entre el nivel de almacenamiento inicial y el que se registra al final del día. Esto se debe a que la demanda energética del edificio con una única habitación ocupada y con alta radiación solar hace que se almacene más energía de la que se consume a lo largo de un día completo.

En la figura 19 se representa el coste que se obtiene en cada intervalo.

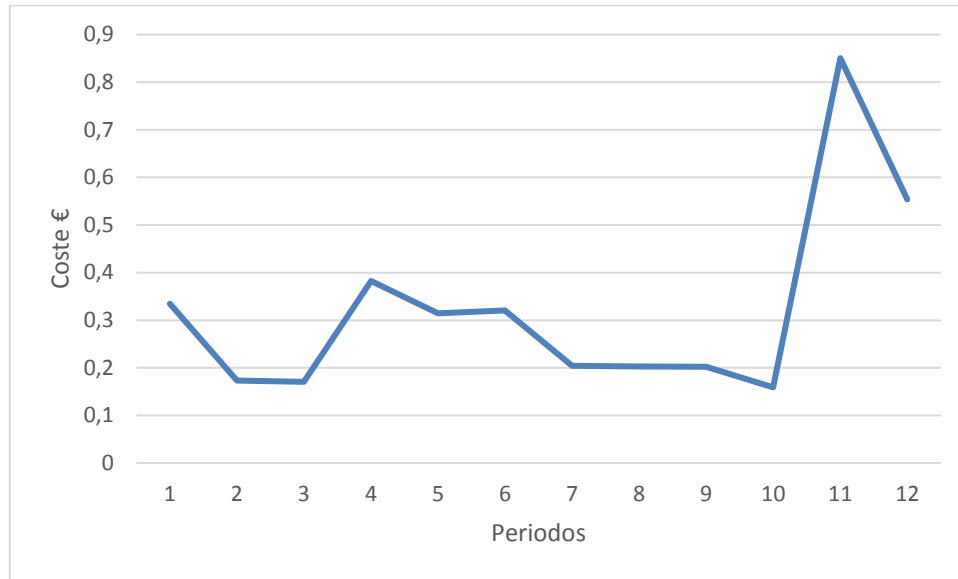


Figura 19 - Coste primer escenario
Fuente: Elaboración propia

El coste presenta ciertos picos durante los diez primeros periodos, pero sin superar los 0.4€, y observándose cierta estabilidad entre el 7 y el 10, debido a que las baterías se encuentran completamente cargadas y la demanda se satisface con la energía generada de manera renovable.

A partir del décimo periodo hay un gran incremento del coste, correspondiéndose con los periodos en los que la demanda eléctrica es mayor. La descarga de energía de las baterías reduce el coste, pero al no tener generación fotovoltaica, se tiene que hacer frente mediante la energía almacenada y la adquirida de la red eléctrica.

En la figura 20 se muestra para cada periodo, la distribución del coste de cada uno de los equipos que suministran energía. Estos son: el consumo de la red eléctrica; el funcionamiento de la batería, ya sea cargando o descargando energía; y la producción por parte de los paneles fotovoltaicos.

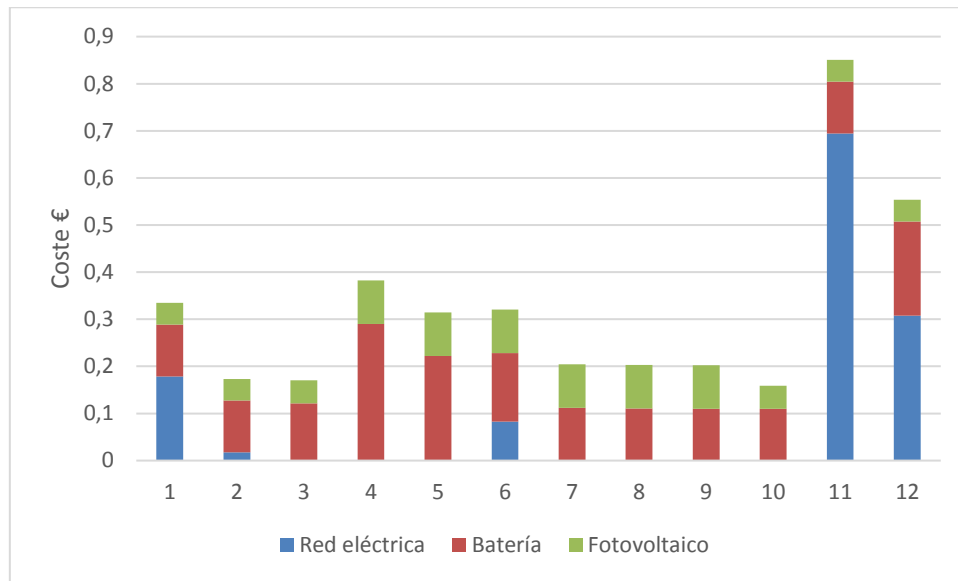


Figura 20 - Distribución de costes por equipo del primer escenario
Fuente: Elaboración propia

La gráfica de columnas muestra cómo en el undécimo periodo una gran parte del coste va asociado a la compra a la red eléctrica.

El coste total de operación que se obtiene tras la ejecución de este escenario es 3.87€. Este valor es la suma del coste que supone abastecer eléctricamente al hotel en cada periodo del día.

En la figura 21 se muestra la proporción en la que cada uno de los equipos participa del coste total, siendo predominante el coste asociado a la batería, que incluye tanto el fijo como el variable.

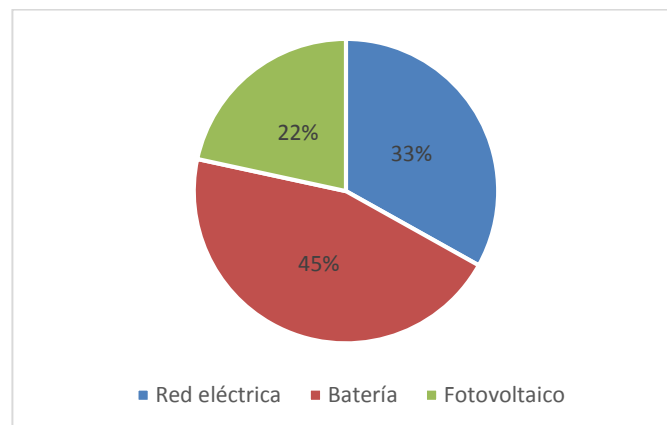


Figura 21 - Proporción de costes por equipo del primer escenario
Fuente: Elaboración propia

En la figura 22 se muestra qué proporción de la energía eléctrica generada a lo largo del día pertenece a la obtenida de la red eléctrica o a la producida por los paneles fotovoltaicos.

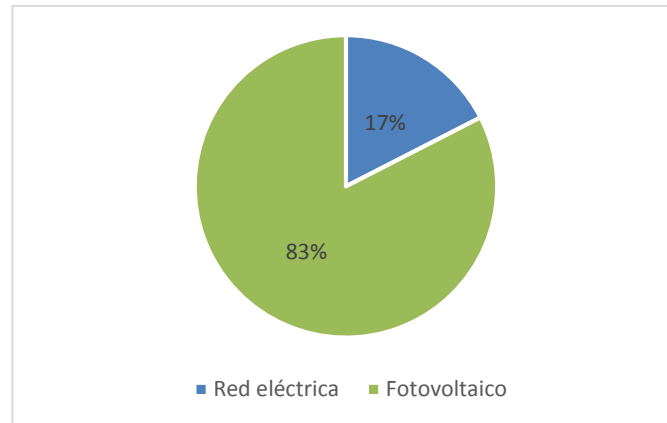


Figura 22 - Generación energía en el primer escenario
Fuente: Elaboración propia

9.1.2 Segundo escenario

En este escenario los datos se corresponden con la ocupación de tres de las habitaciones del hotel. En la figura 23 se muestra el nivel de almacenamiento de las baterías para este escenario.

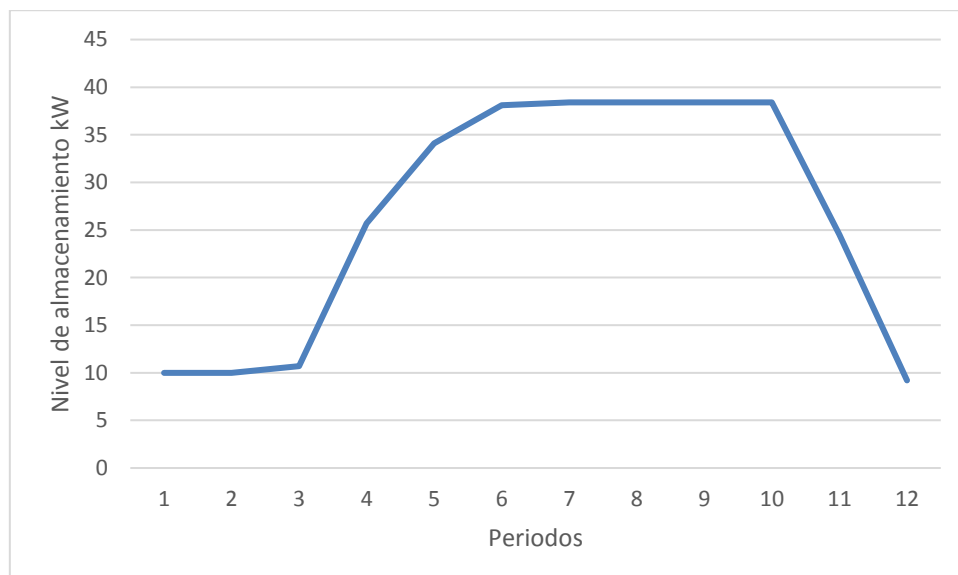


Figura 23 - Nivel de almacenamiento segundo escenario
Fuente: Elaboración propia

La gráfica tiene una forma similar a la del escenario anterior, produciéndose un incremento del nivel de almacenamiento con las primeras horas de radiación solar y manteniéndose constante el nivel de carga en las horas centrales del día.

Sin embargo, en este caso el descenso del nivel de almacenamiento de los últimos periodos del día coincidentes con la llegada de la noche, llevan el estado de carga de las baterías a valores ligeramente inferiores al inicial.

El coste sigue la misma evolución que en el primer escenario, aunque con valores ligeramente superiores en los primeros intervalos, tal y como se muestra en la figura 24.

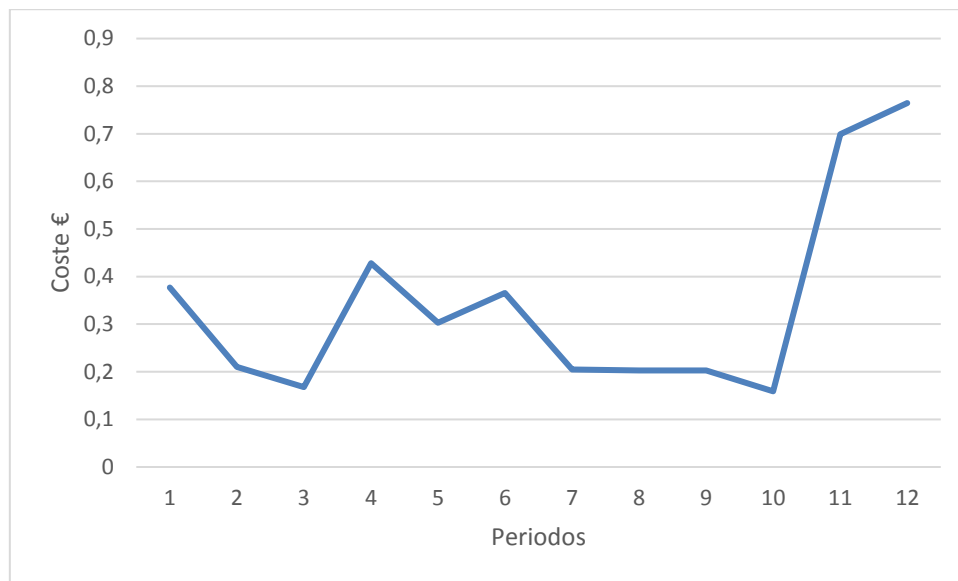


Figura 24 - Coste segundo escenario
Fuente: Elaboración propia

El coste de operación total es 4.08€, a pesar de que el valor máximo de coste de un periodo a lo largo del segundo escenario no supera el del primer escenario.

Esto ocurre debido a que en el periodo 10, en el que se registra un mayor incremento del consumo de energía eléctrica, en el primer escenario se considera que con la red eléctrica se puede suministrar sin necesidad de descargar la energía almacenada. Por el contrario, al ser la demanda mucho mayor, se descargan las baterías para este escenario.

Con esto se concluye que, a pesar de tener mayor necesidad energética, el hecho de que se obtenga la energía descargando de las baterías reduce el coste por debajo del que se obtiene para el mismo periodo del escenario anterior.

En la figura 25 se muestra la distribución del coste de cada uno de los equipos, para cada periodo.

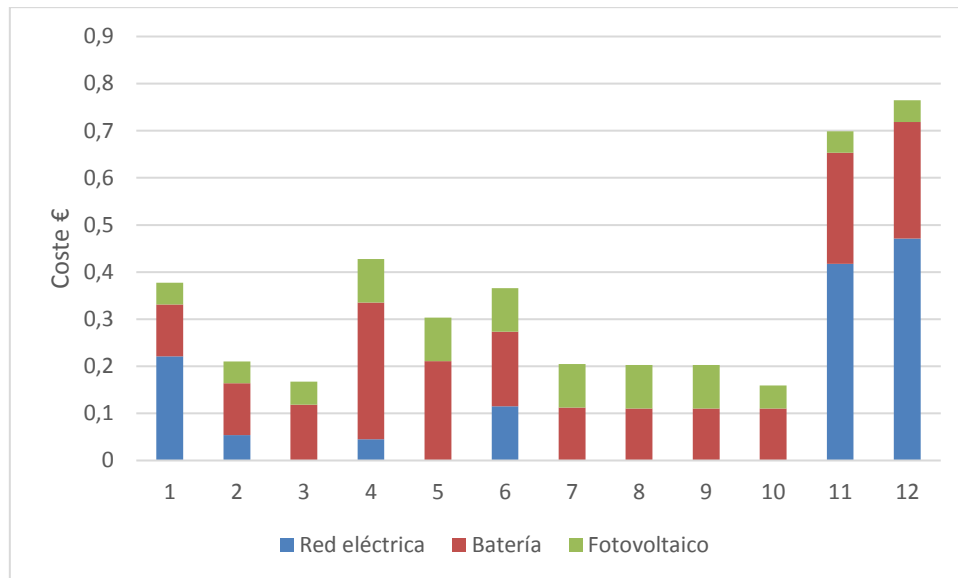


Figura 25 - Distribución de costes por equipo del segundo escenario
Fuente: Elaboración propia

Se comprueba lo comentado anteriormente respecto a los últimos periodos del día, en los que se reduce el coste de operación debido a la obtención de la energía descargándola en lugar de comprándola a la red eléctrica.

En la figura 26 se muestra la proporción en la que cada uno de los equipos participa del coste total, siendo predominante el coste asociado a la batería, que incluye tanto el fijo como el variable.

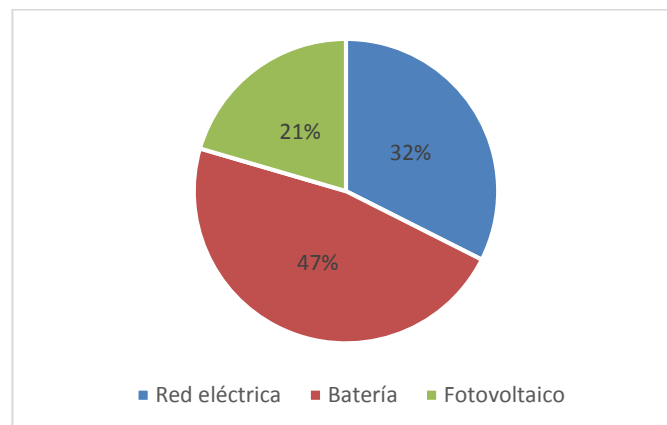


Figura 26 - Proporción de costes por equipo del segundo escenario
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra en la figura 27 el porcentaje de la energía total generada en este escenario que corresponde a generación solar o a la compra de energía a la red eléctrica.

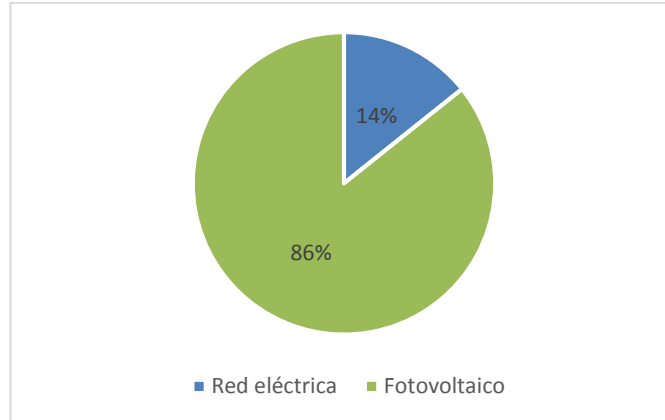


Figura 27 - Generación energía en el segundo escenario
Fuente: Elaboración propia

En este escenario el porcentaje de producción de energía por los paneles fotovoltaicos es superior al caso anterior, en el que la demanda eléctrica es menor. Esto se debe a que, aunque la radiación recibida del sol es la misma, se considera la energía que se destina a cargar las baterías o a satisfacer la demanda del edificio.

La energía que no se aprovecha porque las baterías no se puedan cargar más durante ese periodo y ya se haya suministrado la energía requerida, se pierde y no se considera en este diagrama.

9.1.3 Tercer escenario

En el tercer escenario los datos de la demanda energética que tiene el hotel se corresponden con la ocupación de sus seis habitaciones. En la figura 28 se muestra la gráfica de la evolución que tiene el nivel de almacenamiento de las baterías a lo largo del día.

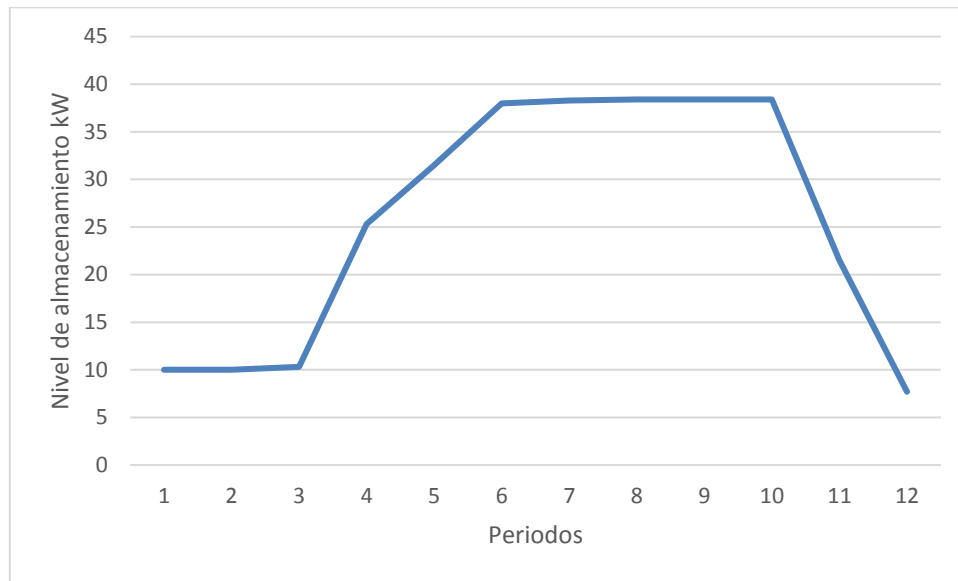


Figura 28 - Nivel de almacenamiento tercer escenario
Fuente: Elaboración propia

La gráfica sigue una evolución similar a la de los casos anteriores, aumentando el nivel de almacenamiento al comenzar a recibir radiación proveniente del sol hasta llegar al máximo de la capacidad.

La descarga de energía en los últimos periodos es mayor que en los escenarios anteriores, debido a la mayor demanda existente. El nivel de almacenamiento al finalizar la implementación se corresponde con el mínimo que permiten las restricciones técnicas de las baterías, quedando por debajo del nivel inicial.

Esta pequeña diferencia entre el nivel de carga inicial y el final no supone un problema de continuidad en régimen permanente ya que, a pesar de que para el siguiente intervalo el nivel inicial es ligeramente inferior, el equipo de baterías alcanzará el máximo de carga a lo largo del día. Esto se refleja cuando a partir del periodo 6 la capacidad de las baterías no permite almacenar más energía y es entonces cuando se salva la diferencia por el estado de carga inicial.

Debido a la proximidad entre el valor que se establece como nivel de carga inicial con el mínimo nivel de almacenamiento que puede tener el equipo de almacenamiento, se concluye que no hay problema por este pequeño desfase en el nivel de carga. En este escenario en el que la radiación solar es alta, esta diferencia se supera en la implementación de cada día, pero aún en los escenarios en que la radiación solar sea baja, al ser poca la diferencia que se produce se puede asumir a lo largo de las

implementaciones y las combinaciones con diferentes escenarios en los que se reduzca la demanda.

A continuación, se muestra la figura 29, en la que se representa el coste por cada periodo que se obtiene al ejecutar el programa.

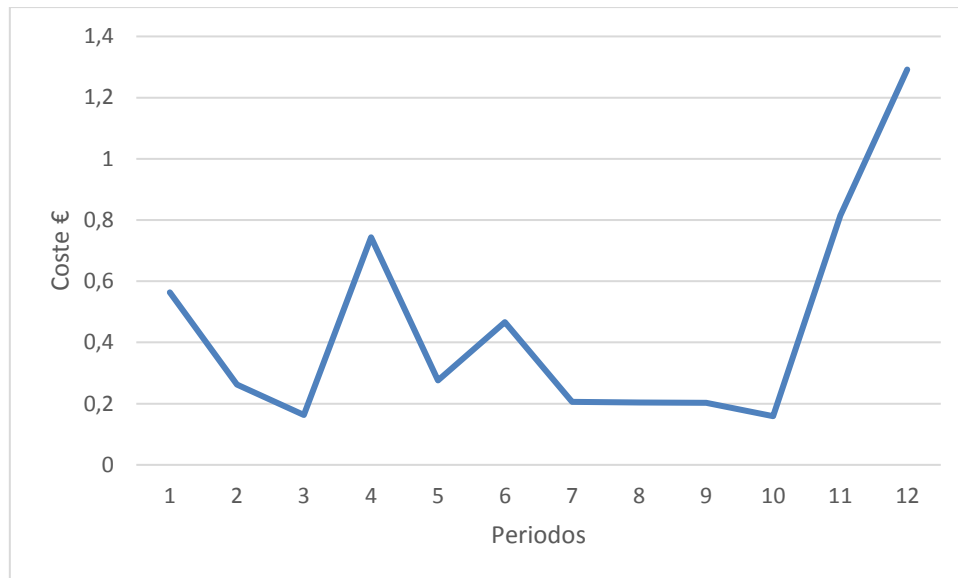


Figura 29 - Coste tercer escenario
Fuente: Elaboración propia

La evolución de la gráfica sigue los patrones anteriores, aunque con valores superiores durante los primeros intervalos. El ascenso que se registra al final es superior a los obtenidos en los escenarios anteriores, debido a que los datos de demanda en este caso son muy superiores. El coste total de operación asciende a 5.35€.

En la figura 30 se muestra la distribución del coste de cada uno de los equipos, para cada periodo.

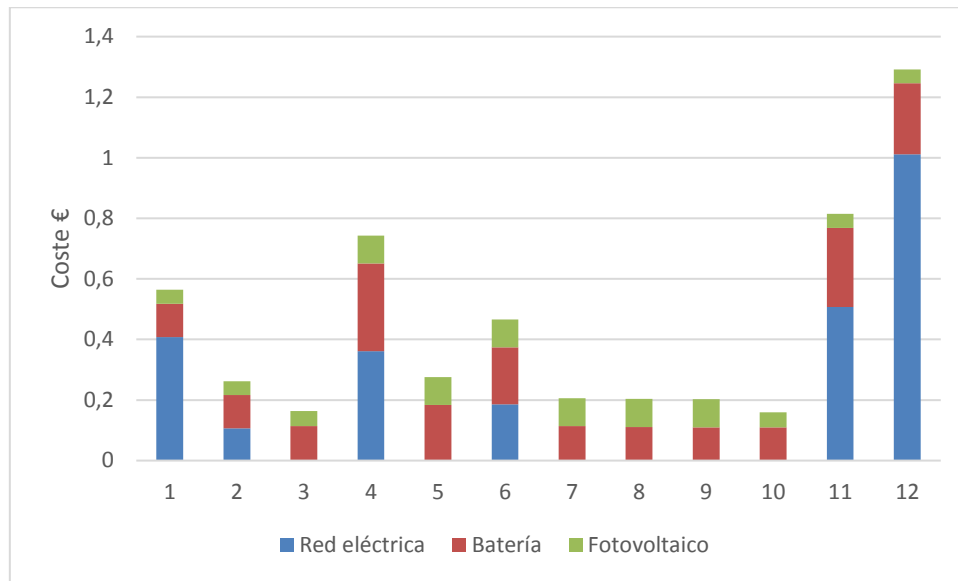


Figura 30 - Distribución de costes por equipo del tercer escenario
Fuente: Elaboración propia

En los dos últimos intervalos del día, la descarga de energía eléctrica de las baterías es la máxima permitida, pero la demanda es tal que eleva el coste de la red eléctrica, situándolo en el coste más representativo para este escenario.

En la figura 31 se muestra la proporción en la que cada uno de los equipos participa del coste total, siendo este el único escenario en el que es predominante el coste asociado a la red eléctrica.

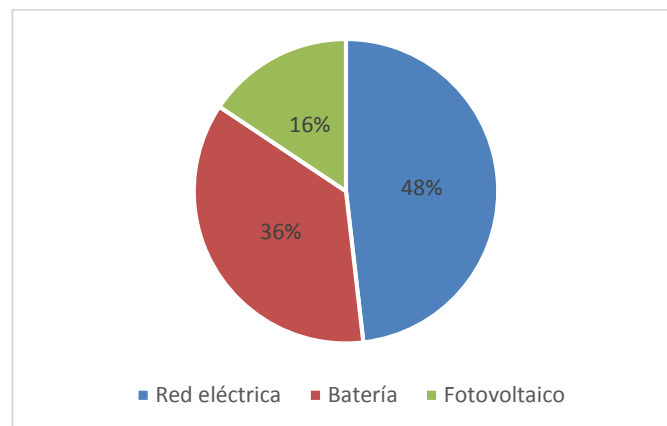


Figura 31 - Proporción de costes por equipo del tercer escenario
Fuente: Elaboración propia

Se muestra en la figura 32 la proporción de energía producida en este escenario que corresponde a comprar a la red eléctrica o a la generación fotovoltaica.

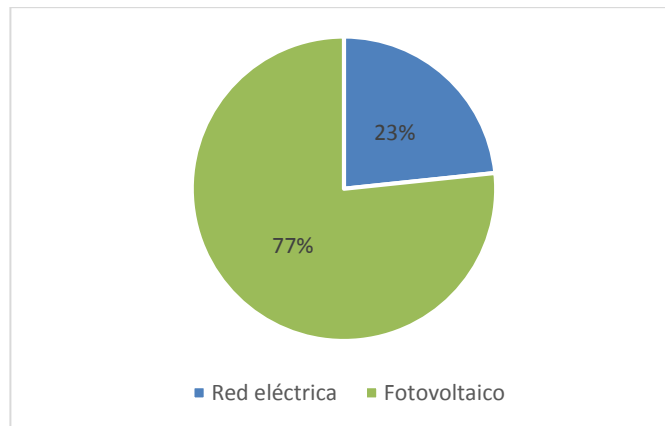


Figura 32 - Generación energía en el tercer escenario
Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de energía obtenida por generación solar es menor a los anteriores debido a que la demanda en este escenario es bastante mayor, lo que obliga a suministrar al hotel con la red eléctrica en más ocasiones y con mayor energía que en las otras situaciones.

9.2 Escenarios de 96 periodos

Una vez expuestos los escenarios para intervalos de dos horas de duración, se presenta a continuación el análisis realizado en periodos de quince minutos, siendo un total de 96 periodos a lo largo del día. Se realizó en primer lugar la implementación con menos periodos para así poder detectar errores ya que el análisis es menos complejo al tener menos iteraciones.

Se tienen datos para tres situaciones diferentes, en las que la ocupación del hotel varía, al igual que en el apartado anterior, entre una habitación, tres y en último lugar seis habitaciones, contando siempre con la presencia de la recepción. Se considera para cada una de estas ocupaciones que la demanda es baja, media y alta respectivamente.

En la figura 33 se muestra la evolución de la demanda eléctrica de cada uno de los escenarios analizados.

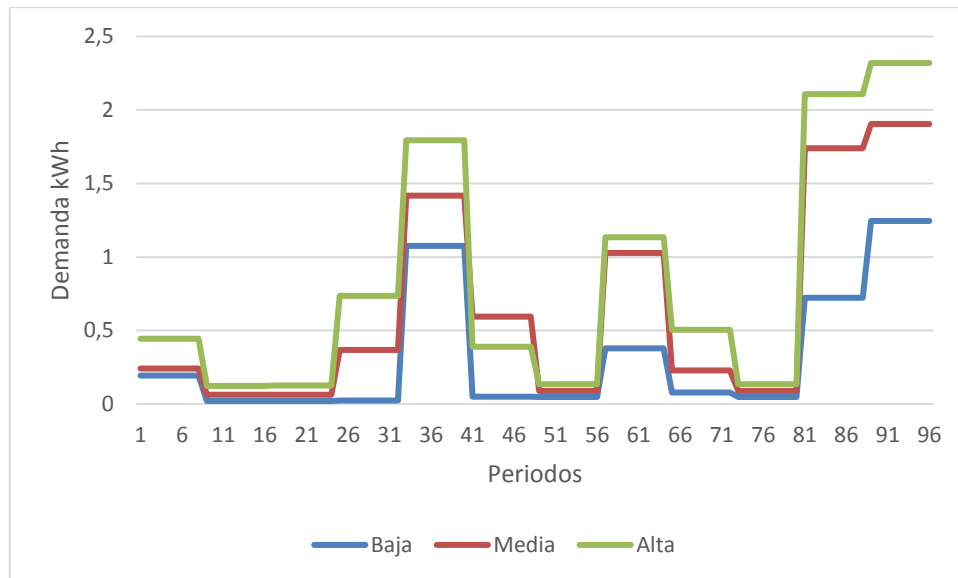


Figura 33 - Distribución de la demanda para los tres escenarios de 96 periodos
Fuente: Elaboración propia

9.2.1 Demanda baja

El escenario de demanda baja se corresponde con el caso en el que hay una única habitación ocupada. En la figura 34 se muestra la evolución del nivel de almacenamiento de las baterías a lo largo del día.

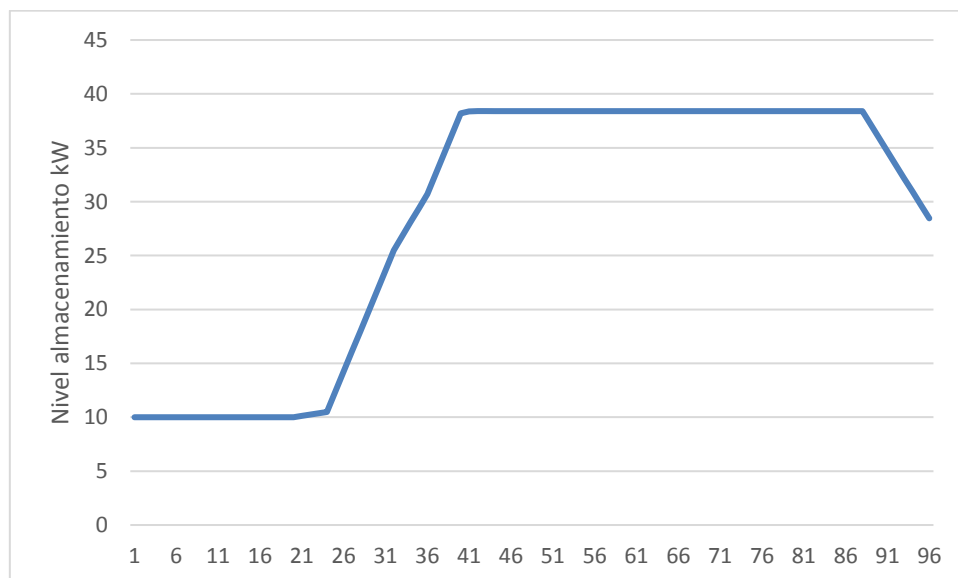


Figura 34 - Nivel de almacenamiento demanda baja
Fuente: Elaboración propia

Durante los primeros periodos del día en que se produce energía en los paneles fotovoltaicos, se produce el aumento del nivel de almacenamiento en las baterías. Este incremento se vuelve menor a partir del periodo 32, en el que cambia ligeramente la pendiente de la gráfica. El periodo 32 se corresponde con las 8:00, hora en que comienza la actividad de los clientes y aumenta la demanda energética del edificio. A partir de este momento, la energía obtenida de manera renovable ya no se destina únicamente a las baterías.

Al analizarse el día en periodos de menor duración, y por tanto poder adaptar las decisiones a lo que va ocurriendo a lo largo del día, se reduce el pico de coste que se tenía en el apartado anterior para el mismo nivel de ocupación. En la figura 35 se muestra la evolución del coste a lo largo del día.

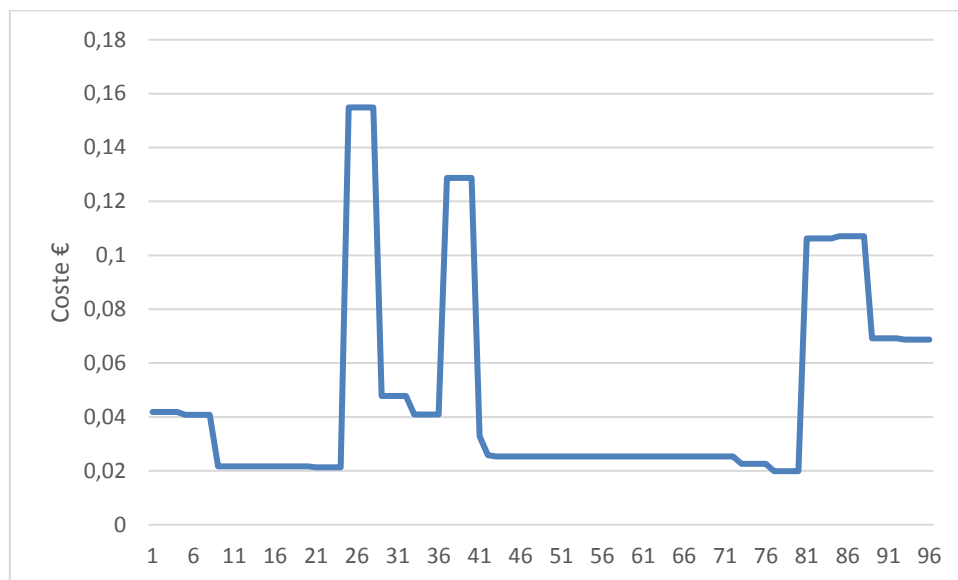


Figura 35 - Coste demanda baja
Fuente: Elaboración propia

Los dos grandes aumentos del coste registrados en la primera mitad del día se corresponden con la compra de energía a la red eléctrica para almacenarla en el equipo de baterías. Esto viene motivado por el bajo precio que tiene el kWh en esos periodos, lo que, sumado al aumento de las necesidades energéticas del hotel al comenzar la actividad matutina, tienen como resultado la gráfica presentada.

De la mitad del día hacia delante se observan unos intervalos en los que el coste se mantiene constante, que son en los que el nivel de almacenamiento de las baterías está en el máximo y la demanda se satisface con la energía generada por los paneles fotovoltaicos.

El aumento del coste que se registraba en los últimos periodos del día se ve reducido en comparación al escenario de 12 periodos, ya que ahora la decisión de descargar las baterías se toma antes, debido a la menor longitud de los periodos.

En la figura 36 se representa la distribución de los costes por los equipos que participan en cada periodo, y teniendo en cuenta los costes fijos que siempre acompañan.

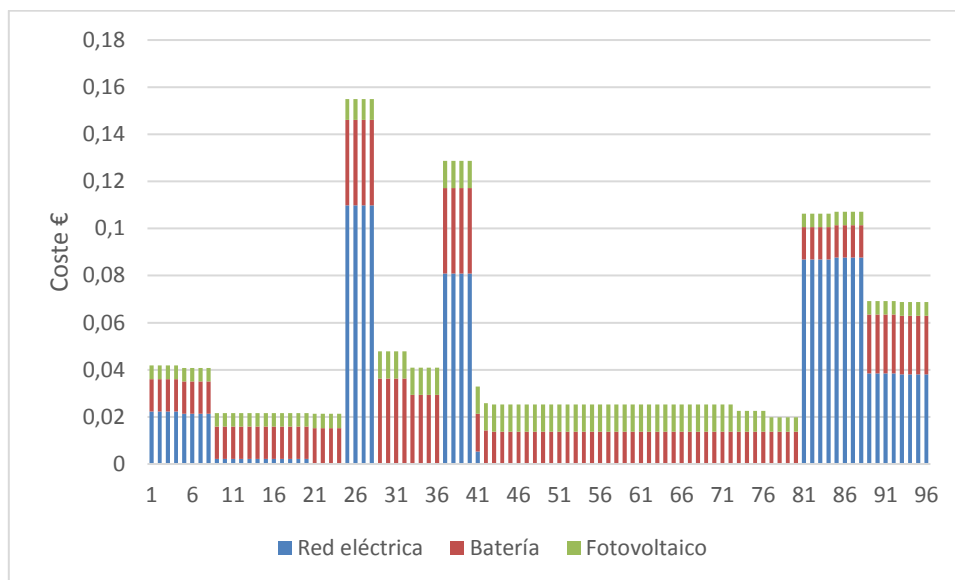


Figura 36 - Distribución de costes por equipo demanda baja
Fuente: Elaboración propia

En la figura 37 se muestra la proporción en que cada equipo participa del coste total de operación para el día. Este coste es de 4.56 €, siendo el gasto de la red eléctrica el más representativo, aunque sin mucha diferencia con el que supone el uso de las baterías.

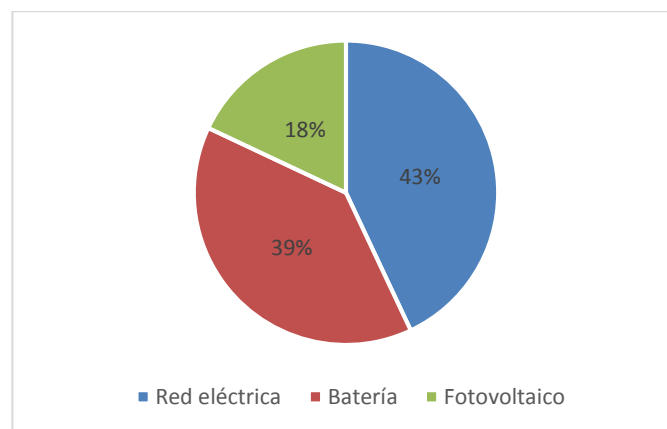


Figura 37 - Proporción de costes demanda baja
Fuente: Elaboración propia

Se presenta en la figura 38 la proporción en la que las dos fuentes de suministro de energía eléctrica participan en este escenario.

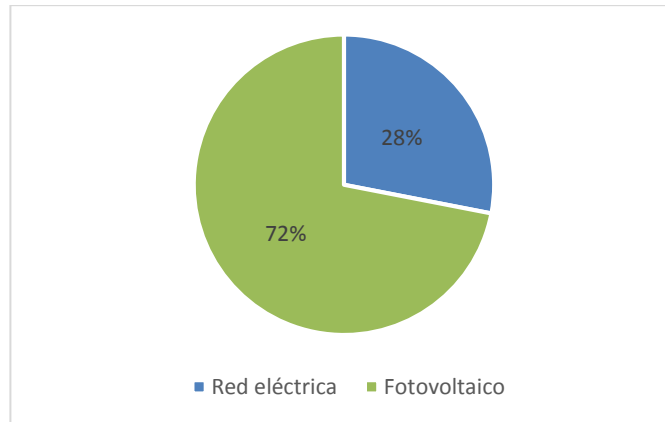


Figura 38 - Generación energía con demanda baja
Fuente: Elaboración propia

En estas dos últimas figuras se observa que a pesar de que el 72% de la energía se genera en las placas fotovoltaicas, a la red eléctrica le corresponde el mayor porcentaje de gasto del periodo, un 43%. Por ello, se intenta reducir en la medida de lo posible el consumo de energía de esta fuente y así disminuir el coste de operación.

9.2.2 Demanda media

Este escenario se corresponde con la ocupación de tres de las habitaciones del hotel. En la figura 39 se muestra la evolución del nivel de almacenamiento para cada periodo.

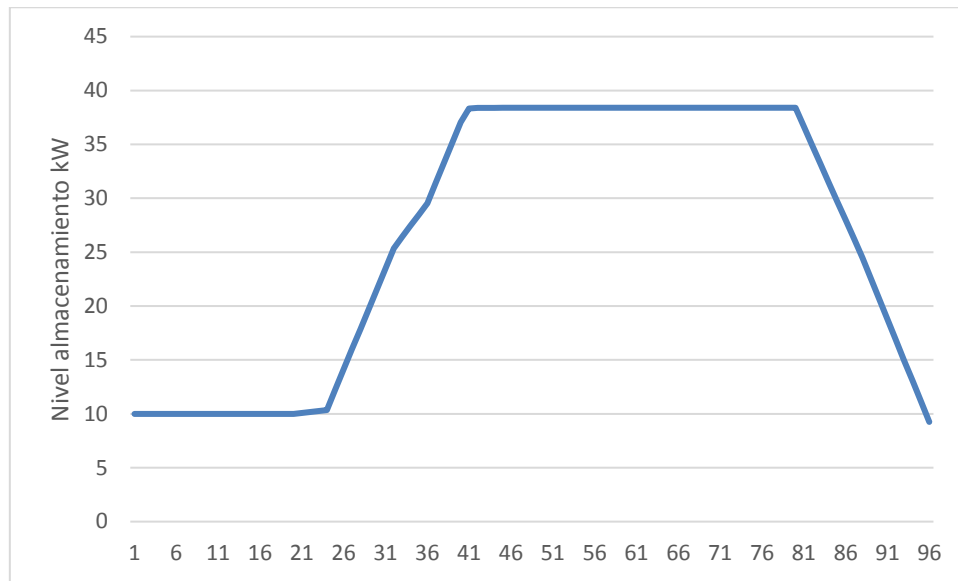


Figura 39 - Nivel de almacenamiento demanda media
Fuente: Elaboración propia

Al ser la demanda superior al caso anterior, el descenso del crecimiento en el nivel de almacenamiento en el periodo 32 es más acusado, al destinar más energía al hotel.

En la figura 40 se muestra la gráfica del coste de cada periodo de tiempo, en el que se observa una evolución similar a la obtenida en el escenario anterior.

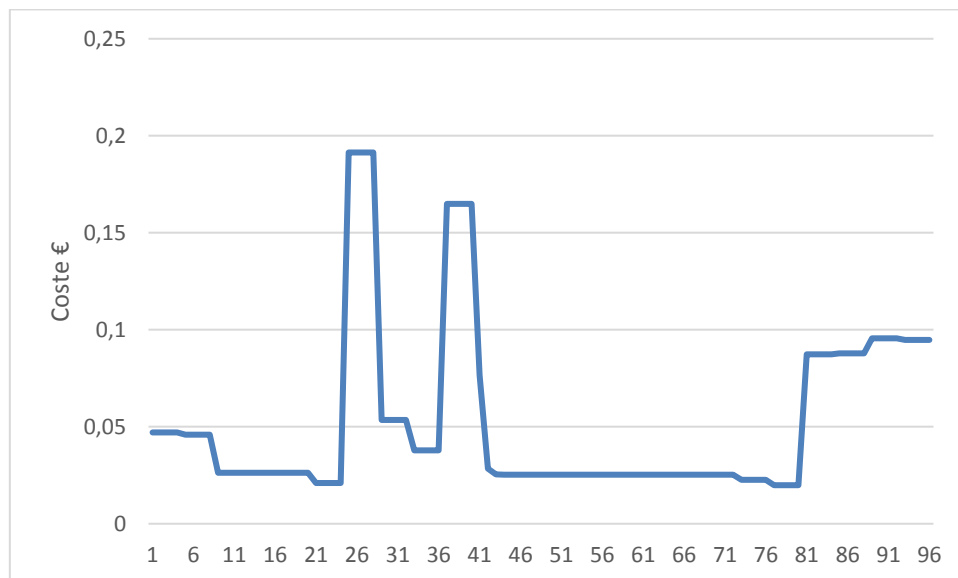


Figura 40 - Coste demanda media
Fuente: Elaboración propia

En la figura 41 se muestra la distribución de los costes entre los tres equipos que toman parte en el suministro de la energía.

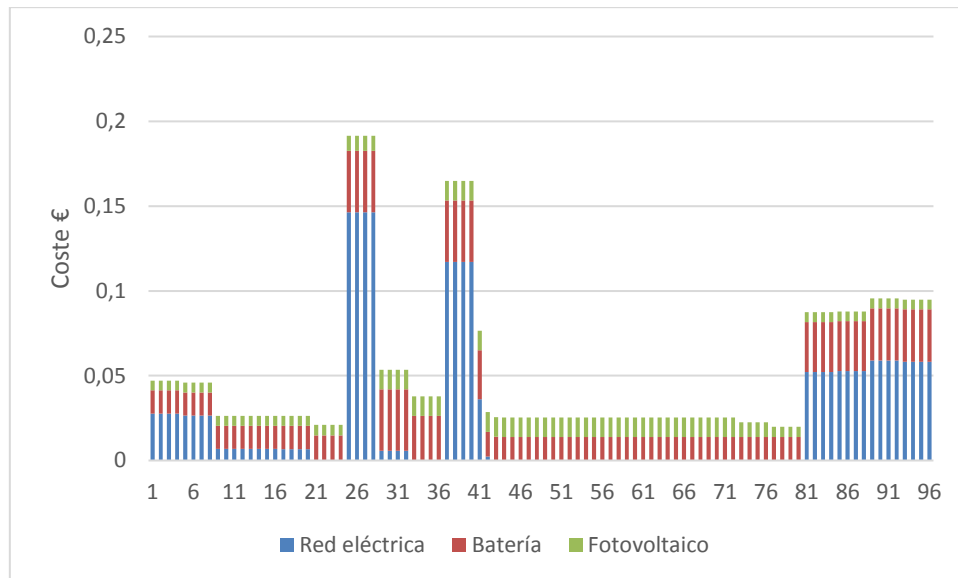


Figura 41 - Distribución de costes por equipo demanda media
Fuente: Elaboración propia

Se muestran a continuación en la figura 42 la proporción en la que cada equipo participa del coste total de operación, que para este escenario es 5.06€.

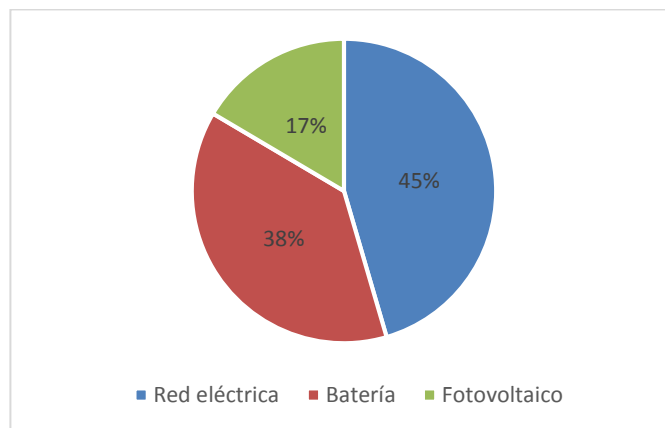


Figura 42 - Proporción de costes demanda media
Fuente: Elaboración propia

En la figura 43 se muestra el porcentaje de generación de energía eléctrica que corresponde a la red eléctrica y a la generación por paneles fotovoltaicos.

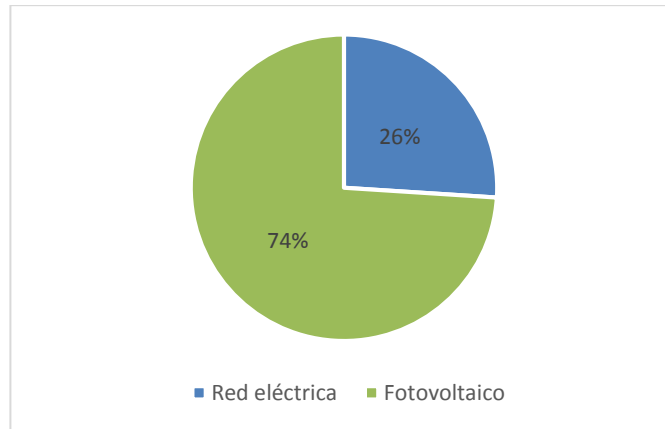


Figura 43 - Generación energía con demanda media
Fuente: Elaboración propia

Al igual que ocurre en el análisis para 12 periodos, en el caso de demanda media la generación de energía de manera renovable es superior a la correspondiente a la red eléctrica. Casi la mitad del coste de operación de este escenario le corresponde a la utilización de la red eléctrica, mientras que la producción que se le asocia es del 26%.

9.2.3 Demanda alta

Se analiza en este apartado la situación en la que el hotel se encuentre completo, es decir, estén ocupadas las seis habitaciones. En la figura 44 se muestra la distribución que sigue el nivel de almacenamiento de las baterías a lo largo del día.

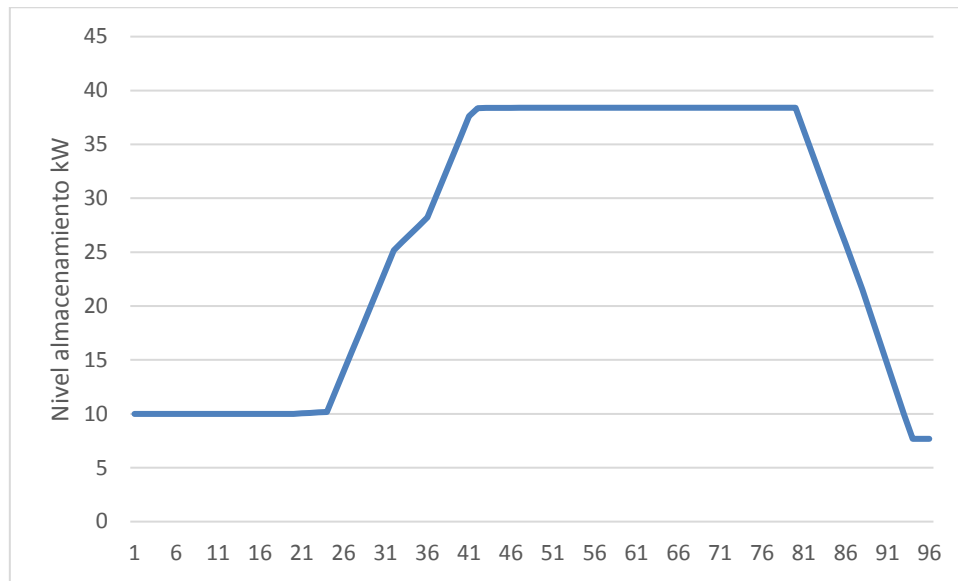


Figura 44 - Nivel de almacenamiento demanda alta
Fuente: Elaboración propia

Durante los periodos en que aumenta la curva de la gráfica se produce el cambio en la pendiente que se comentó en los casos anteriores. Al ser mayor la demanda, este cambio es más acusado que los registrados en las otras dos situaciones.

El nivel final de almacenamiento se encuentra en el mínimo permitido por las restricciones técnicas del equipo de las baterías. En los últimos periodos no se puede descargar más energía, lo que aumenta el coste del periodo debido a la necesidad de comprar a la red eléctrica, pues son horas nocturnas en las que no hay generación solar. Esto se observa en la figura 45, en la que viene representado el coste que tiene cada periodo.

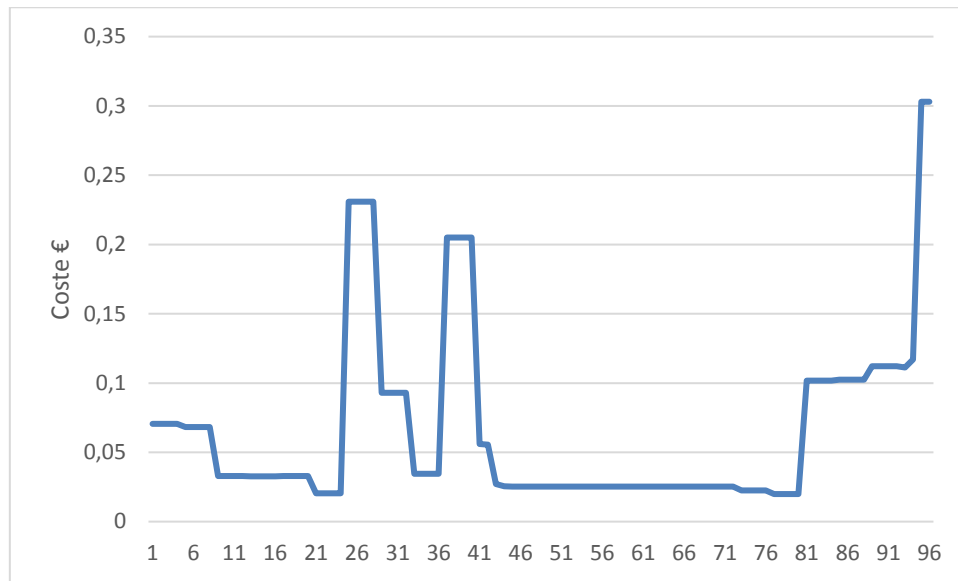


Figura 45 - Coste demanda alta
Fuente: Elaboración propia

Se tiene una evolución similar a los casos de menor demanda de la gráfica anterior, excepto en los últimos periodos del día en que el coste se eleva por encima de los 0.3€. En la figura 46 se observa lo comentado anteriormente acerca del aumento del coste en los últimos periodos, debido al suministro de la red eléctrica.

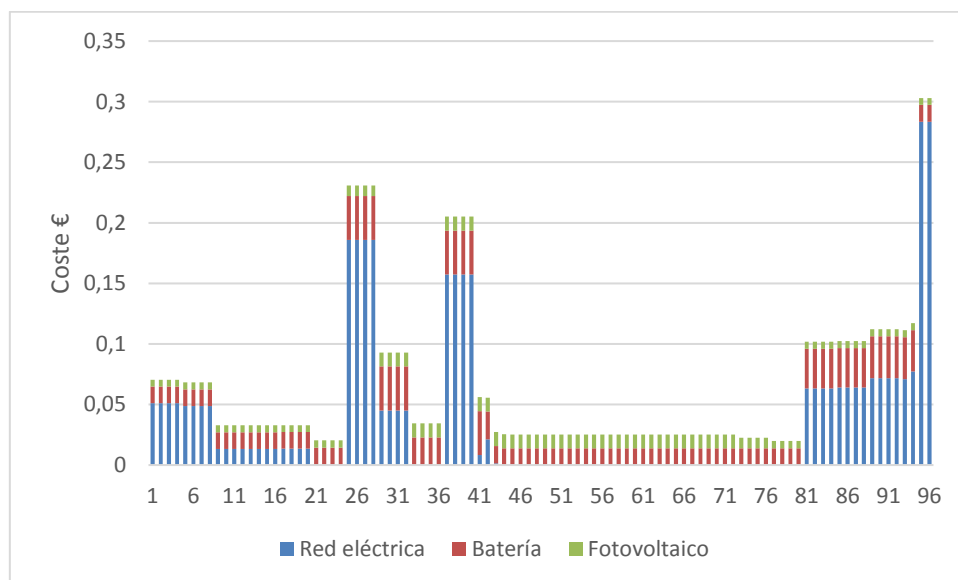


Figura 46 - Distribución de costes por equipo demanda alta
Fuente: Elaboración propia

En la figura 47 se muestra la proporción en que cada equipo participa del coste total de operación, el cual asciende en este escenario a un total de 6.43€. La red eléctrica es el equipo cuyo coste es el más representativo, suponiendo más de la mitad de este gasto.

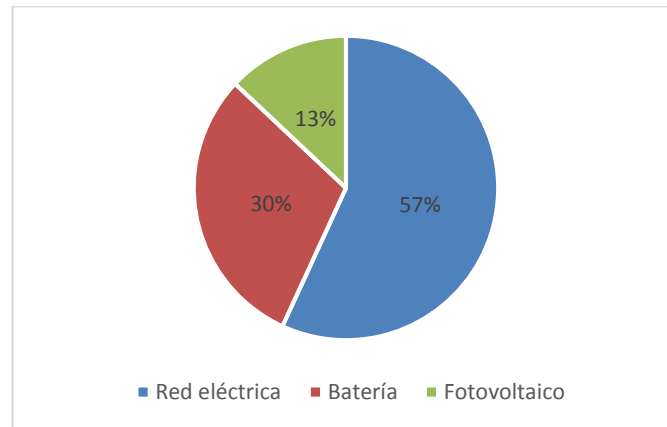


Figura 47 - Proporción de costes demanda media
Fuente: Elaboración propia

En el diagrama presentado a continuación en la figura 48 se muestra el porcentaje de generación de energía que corresponde a la red eléctrica y a los paneles fotovoltaicos.

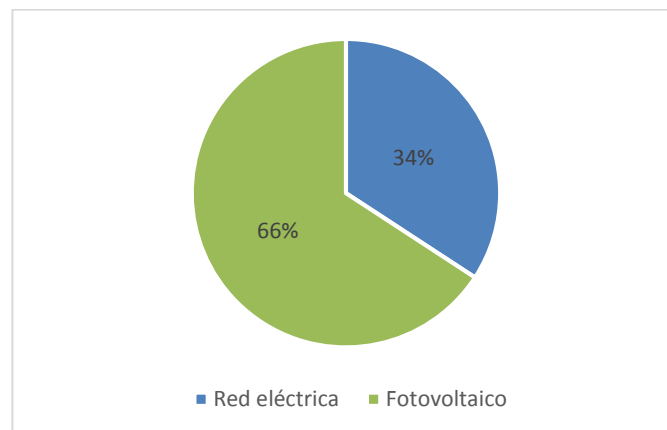


Figura 48 - Generación energía con demanda alta
Fuente: Elaboración propia

Es el escenario en el que la generación fotovoltaica supone el menor porcentaje de los casos estudiados, debido al aumento de la demanda para esta situación, que obliga a abastecer el edificio con la red eléctrica para garantizar un suministro completo. Aun así, el 66% de la energía proviene de las placas fotovoltaicas, y como se observa en la figura de distribución de los costes, es al consumo de la red eléctrica al equipo que mayor porcentaje de gasto le corresponde.

A continuación, se muestra en la figura 49 una gráfica comparativa en tres dimensiones de los costes de operación de cada una de las tres situaciones analizadas.

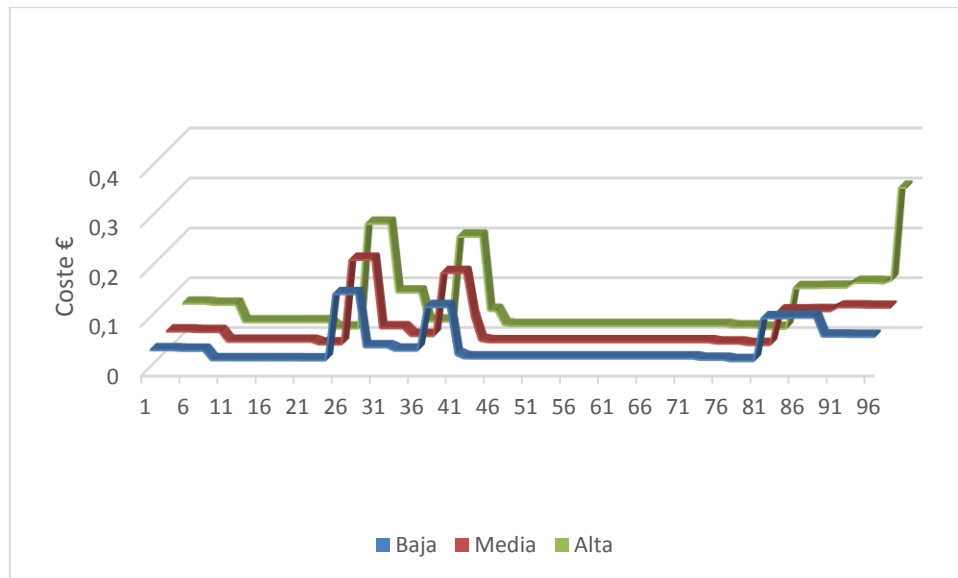


Figura 49 - Comparación costes de operación para las tres demandas
Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa que en todas las situaciones se obtiene unos resultados bastante similares, siendo mayores los picos cuanto mayor es la demanda. Sin embargo, la demanda alta se diferencia respecto a las otras dos en los últimos periodos del día. Esto viene originado por ser mayor el consumo energético y no poder satisfacerlo utilizando únicamente la energía almacenada en las baterías, pues ya se ha descargado, lo que hace imprescindible utilizar la red eléctrica. De esta manera se produce el pico final que se observa en la gráfica.

Para finalizar el estudio de estos escenarios de 96 periodos, se calcula el coste de operación que se tiene al satisfacer la demanda del edificio sin tener generación distribuida. Para ello se elimina la generación por parte de los paneles fotovoltaicos y la existencia de las baterías de almacenamiento, así como sus costes fijos y variables.

En la tabla 19 se muestra el coste que tendrá cada escenario si cuenta con el sistema de generación distribuida o no, analizado con los mismos datos de demanda y precio de la red eléctrica.

Tabla 19 - Costes de operación

Costes de operación (€)	Sin generación distribuida	Con generación distribuida
Demanda baja	3.62	4.56
Demanda media	7.24	5.06
Demanda alta	9.18	6.43

Se observa que el aumento del coste en situaciones de demanda alta y media es bastante significativo sin generación distribuida, mientras que en situaciones de poca ocupación es menor. Esto se debe a los costes fijos de los equipos, que para situaciones de baja necesidad energética hacen que aumente el importe. El gasto de más que supondría tener un sistema de generación distribuida para este escenario es mucho menor que lo que se ahorra en el resto de situaciones gracias a su presencia.

9.3 Nuevo escenario de resolución

Una vez analizados los escenarios anteriores, se resuelve de nuevo el problema utilizando ahora los datos de radiación solar obtenidos para el 28 de diciembre de 2017 según los datos de la agencia andaluza de la energía, mostrados en la figura 50.



Figura 50 - Radiación global
Fuente: Agencia andaluza de la energía

En esta nueva situación, se resuelve el mismo problema para un día de invierno, en el que la radiación solar es mucho menor que en el caso presentado anteriormente, en el que se analizaba un día de verano.

La implementación se realiza para los tres casos de demanda en los que la ocupación del hotel varía, al igual que en el apartado anterior, entre una habitación, tres y en último lugar seis habitaciones, contando siempre con la presencia de la recepción. Se considera para cada una de estas ocupaciones que la demanda es baja, media y alta respectivamente. En la figura 51 se muestra la evolución de la demanda eléctrica del hotel para cada una de las situaciones.

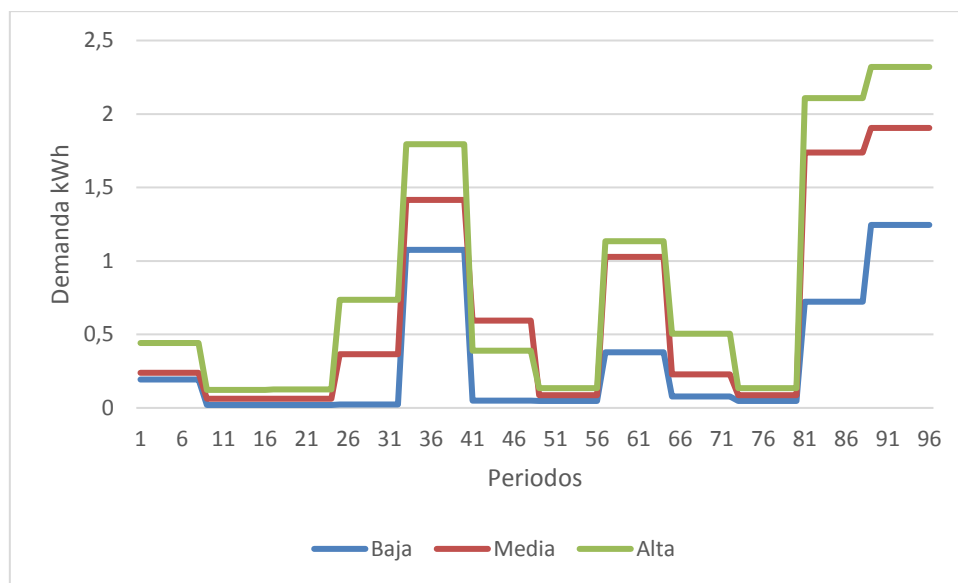


Figura 51 - Demanda eléctrica para las tres situaciones
Fuente: Elaboración propia

9.3.1 Demanda Baja

En la figura 52 se muestra la evolución del nivel de almacenamiento del equipo de baterías correspondiente al caso de que una única habitación esté ocupada.

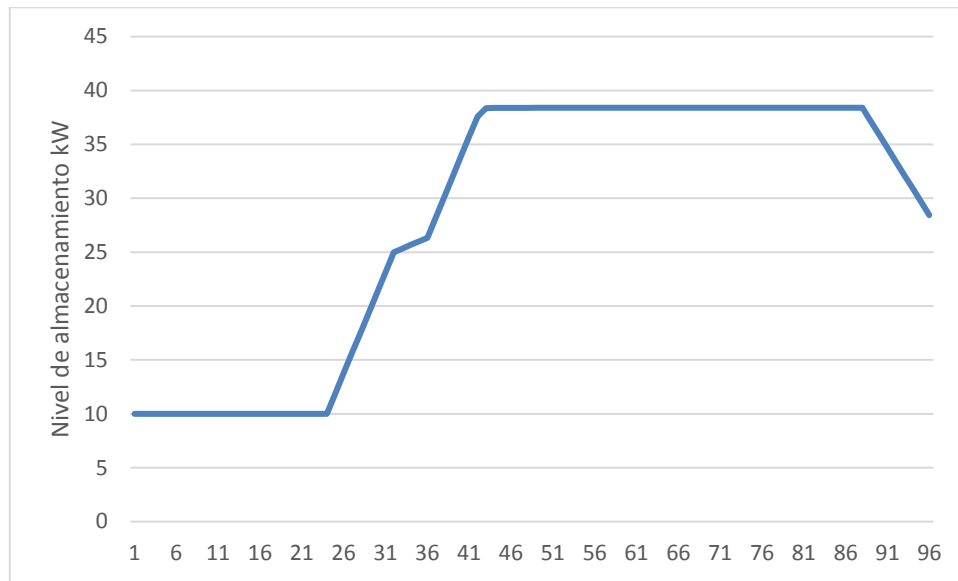


Figura 52 - Nivel de almacenamiento demanda baja
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se observa un descenso en el crecimiento del nivel de almacenamiento a partir del periodo 32 y hasta el 36, que se corresponde con las horas del día en que comienza la actividad de los clientes. En el escenario anterior, también había un ligero descenso en la pendiente del crecimiento, pero en este caso es mucho más acusado, debido a que la energía obtenida por las placas fotovoltaicas es menor al caso anterior.

A continuación, se presenta en la figura 53 la evolución del coste a lo largo del día.

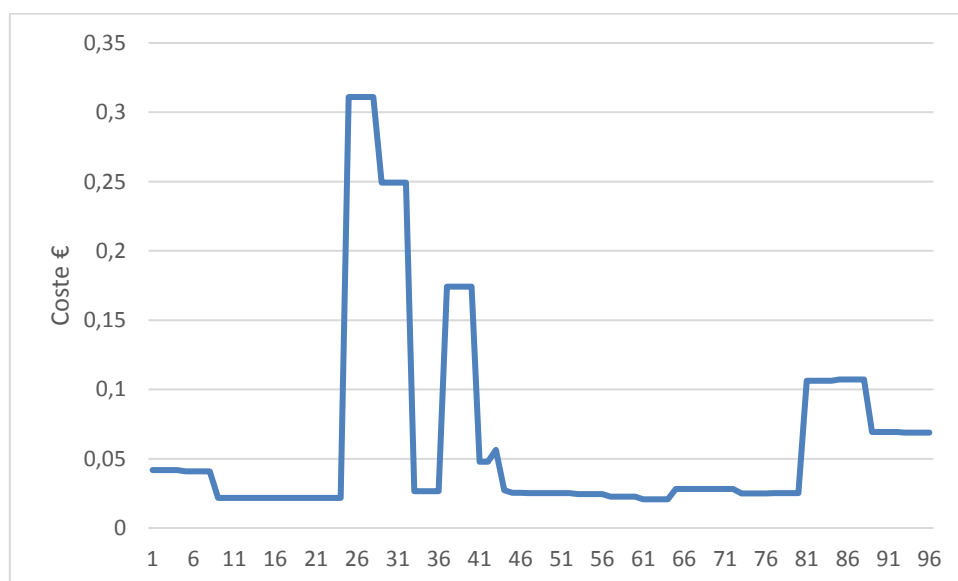


Figura 53 - Evolución del coste con demanda baja
Fuente: Elaboración propia

Se observan diferencias con la gráfica obtenida para demanda baja en un día de verano, debido a que en este caso se utiliza más el abastecimiento de la red eléctrica al no ser suficiente la generación de energía de manera renovable. El coste máximo supera los 0.3€ frente a los 0.16€ que se registran en el escenario anterior. Esto viene ocasionado por el hecho de que se produce menos energía en las placas y que además hay que comprar a la red eléctrica para satisfacer la demanda del edificio y cargar las baterías, ya que son los periodos en que el precio de la energía se encuentra por debajo del límite establecido.

En la figura 54 se muestra la distribución de costes por equipos que se registra a lo largo del día.

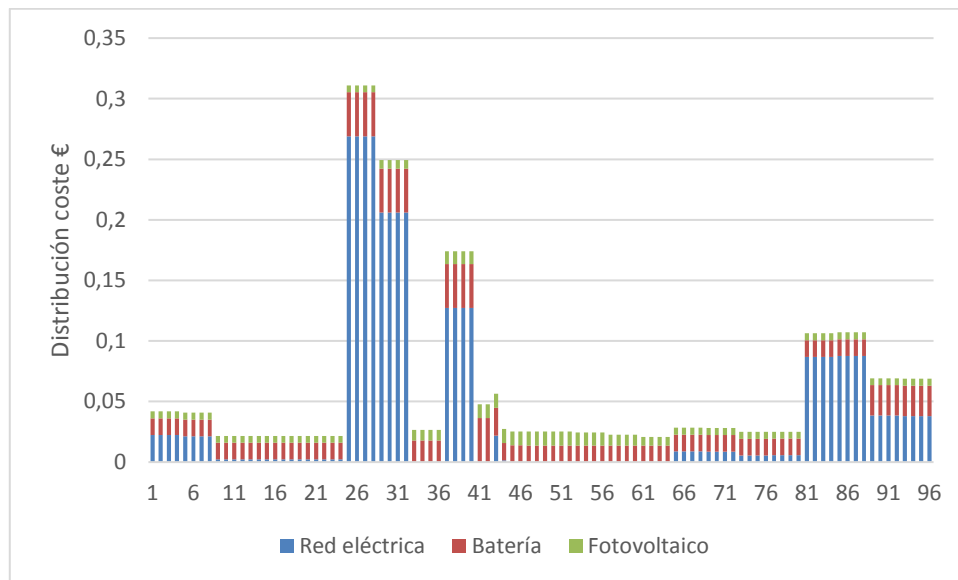


Figura 54 - Distribución de costes por equipo con demanda baja
Fuente: Elaboración propia

En la figura 55 se muestra la proporción en que cada equipo participa del coste total de operación obtenido para este día. El coste total asciende en este caso a 6.21€, perteneciendo el 61% de este importe a la red eléctrica mientras que en el escenario anterior lo era un 43%.

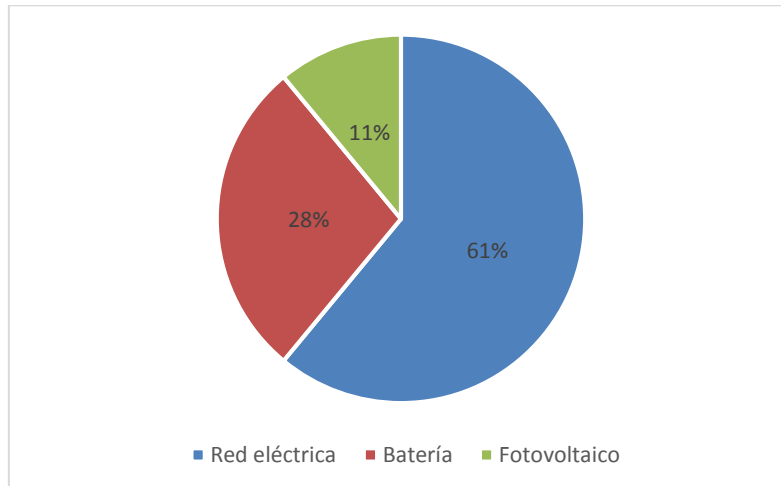


Figura 55 - Proporción de costes demanda baja
Fuente: Elaboración propia

Se presenta la figura 56, en la que se muestra en qué proporción produce cada equipo la energía eléctrica necesaria para el abastecimiento. En este caso la producción fotovoltaica no supone ni la mitad de la energía total, mientras que en el escenario anterior se registraba un 72%.

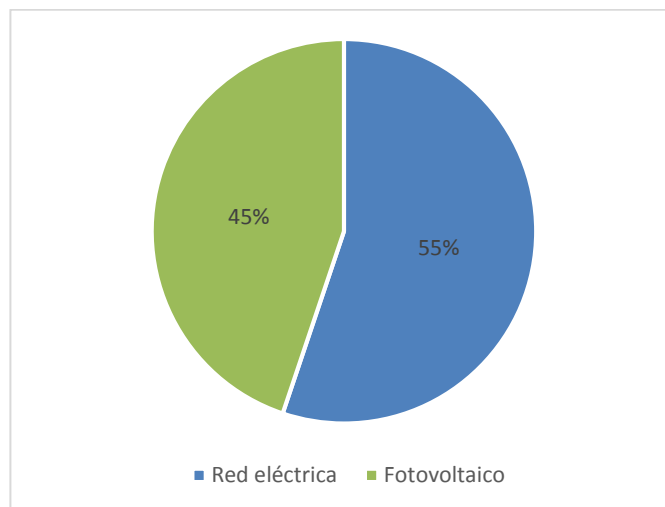


Figura 56 - Generación energía con demanda baja
Fuente: Elaboración propia

9.3.2 Demanda Media

En este caso se analiza el escenario en que se encuentran ocupadas tres de las habitaciones durante un día de invierno, donde la radiación solar es muy inferior al caso presentado inicialmente. En la figura 57 se observa la evolución del nivel de almacenamiento de las baterías.

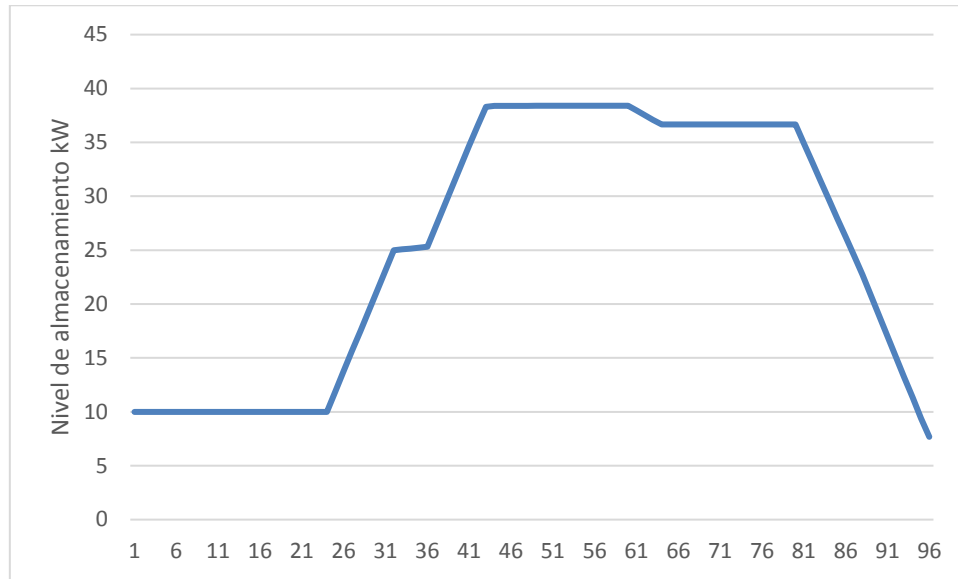


Figura 57 - Nivel de almacenamiento demanda media
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa una parada en el crecimiento del nivel de la batería en los mismos periodos en los que en el caso de demanda baja presentado anteriormente se producía un cambio en la pendiente de la curva de crecimiento. Esto viene ocasionado por el primer pico de demanda eléctrica ocurrido al inicio de la mañana, en el que se cambia el destino de la energía obtenida de las placas.

Cuando el nivel de almacenamiento llega a su máximo nivel, sufre un ligero descenso en el periodo 61 y hasta el 65, a partir del cual continúa estable. Esto se debe al aumento del consumo energético registrado después de la hora de comer, en torno a las cuatro de la tarde. No vuelve a producirse una carga total del equipo de baterías ya que la cantidad de energía obtenida por las placas y el coste de la red eléctrica no lo permiten.

En la figura 58 se muestra la evolución del coste a lo largo del periodo en cuestión.

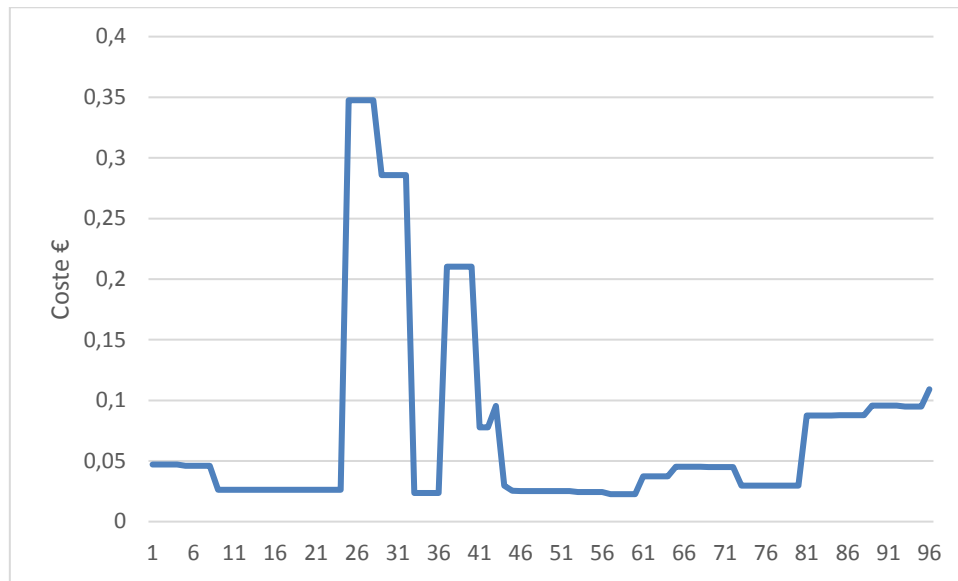


Figura 58 - Evolución del coste con demanda media
Fuente: Elaboración propia

La gráfica del coste registra más picos e irregularidades que en el caso anterior en el que se analizaba un día de verano con la misma demanda. Además, los costes alcanzados también son superiores en este caso, todo ello motivado por la menor producción energética obtenida por las placas fotovoltaicas.

En la figura 59 se muestra la distribución de costes por equipo energético a lo largo del día.

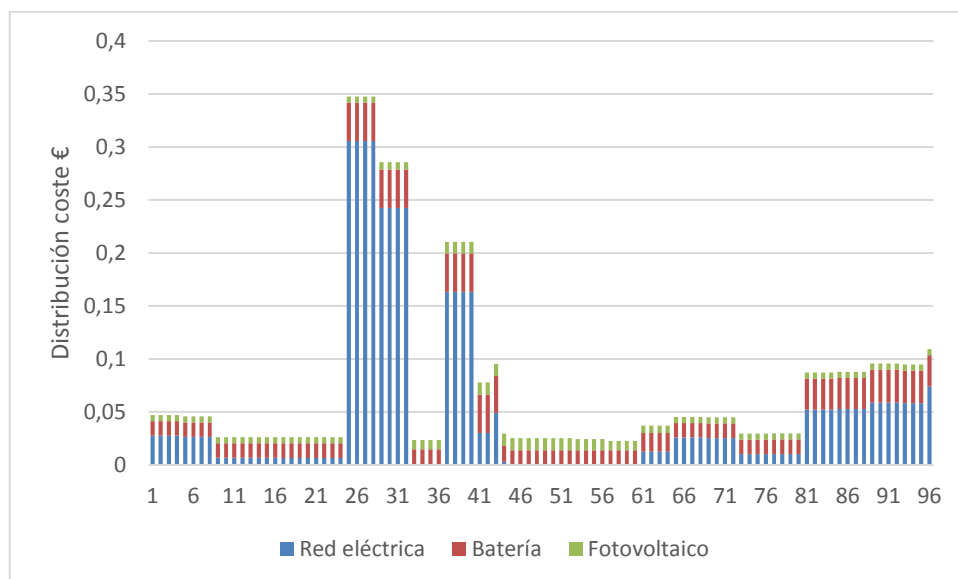


Figura 59 - Distribución de costes por equipo con demanda media
Fuente: Elaboración propia

Se registra el máximo valor para el coste en los primeros periodos del día, ya que es en los que se produce el almacenamiento en los equipos de baterías, obteniendo la energía tanto de la generación renovable como de la red eléctrica, con el coste que esto conlleva.

El coste total de operación obtenido en este periodo es de 7.16€. En la figura 60 se muestra la proporción en que cada equipo participa del coste total, siendo ligeramente superior el porcentaje correspondiente a la red eléctrica comparado con el caso de demanda baja en un día de invierno, presentado anteriormente.

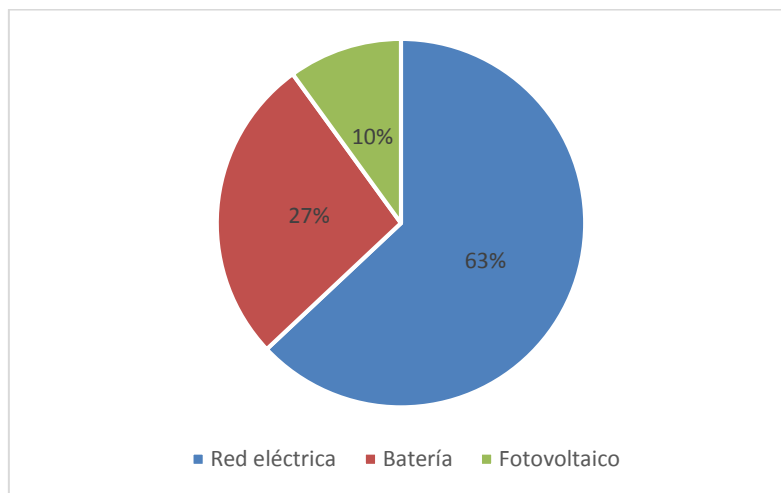


Figura 60 - Proporción de costes demanda media
Fuente: Elaboración propia

Se muestra en la figura 61 la proporción en que la energía eléctrica es obtenida de cada una de las dos fuentes posibles de generación.

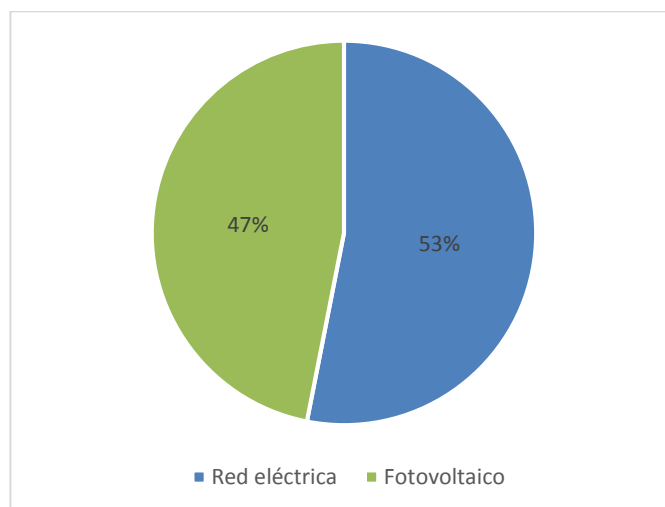


Figura 61 - Generación energía con demanda media
Fuente: Elaboración propia

Se obtienen unos datos similares a los registrados en el caso anterior en que una única habitación se encontraba ocupada.

9.3.3 Demanda Alta

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al analizar el caso en que la ocupación del hotel es máxima, presentándose la evolución del nivel de almacenamiento del equipo de baterías en la figura 62.

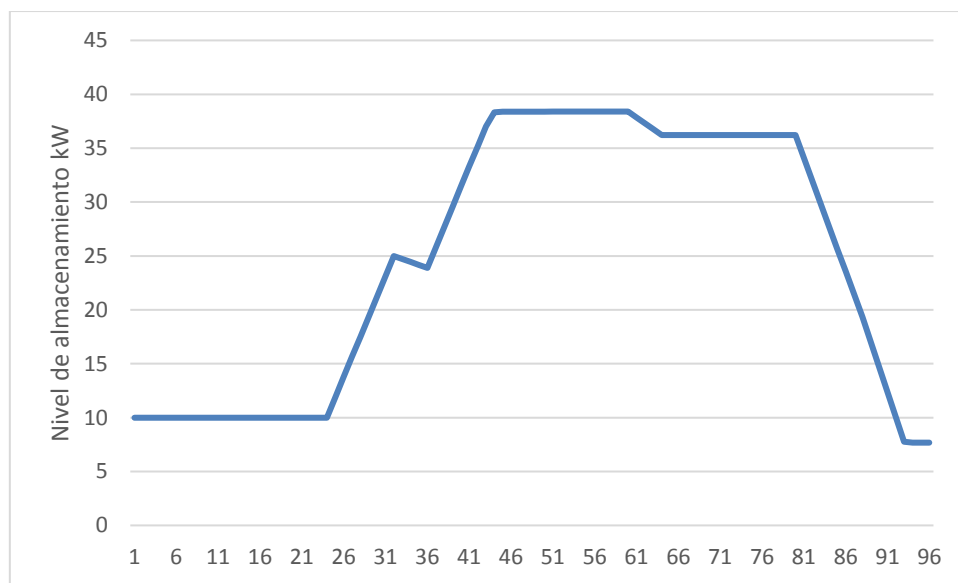


Figura 62 - Evolución del nivel de almacenamiento con demanda alta
Fuente: Elaboración propia

Se tienen algunas diferencias frente a la evolución registrada en los escenarios anteriores. Cuando comienza a producirse energía en los paneles fotovoltaicos y a cargarla en el equipo de baterías, se observan unos periodos en los que se produce descarga. Estos periodos coinciden con un aumento considerable en la demanda del hotel, que se corresponden con las primeras horas del día en que comienza la actividad.

En este caso en que la demanda es alta resulta necesario realizar descargas de energía, mientras que en los casos de demanda baja y media únicamente se producía un descenso y parada respectivamente en el crecimiento del nivel de almacenamiento.

En los periodos centrales del día en que el nivel de almacenamiento se encuentra en su máximo y manteniéndose este valor constante, también se aprecia una descarga, para luego continuar con un valor constante. Este comportamiento se debe igualmente a

un aumento en la demanda del hotel para esos periodos del inicio de la tarde, y debido al precio de la red eléctrica, se suministra al hotel descargando de las baterías.

En la figura 63 se muestra la evolución del coste que tiene para cada periodo abastecer eléctricamente el hotel.

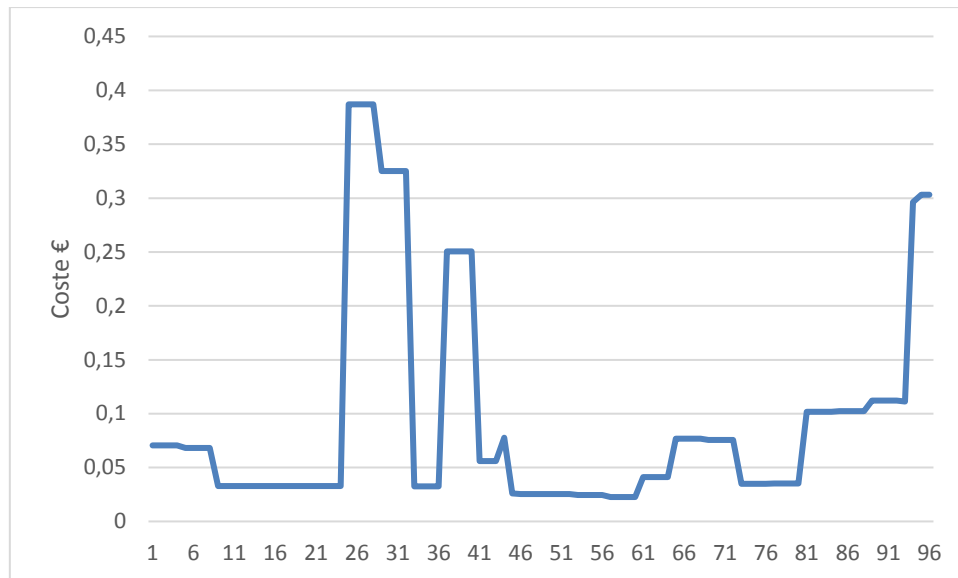


Figura 63 - Coste por periodo demanda alta
Fuente: Elaboración propia

El motivo por el que se registran costes tan altos a partir del periodo número 25 es la compra a la red eléctrica para almacenar energía, dado su bajo precio. Aunque esto aumenta el coste en estos periodos, luego se ve reducido notablemente cuando se realizan las descargas de las baterías en lugar de tener que adquirir esa energía de la red eléctrica y a un coste superior.

En este escenario la gráfica de costes presenta pequeños picos donde en los escenarios anteriores se mantenía constante. Esto se debe a que en esos periodos el abastecimiento de energía únicamente por la generación fotovoltaica no es suficiente, y se hace necesario el suministro de la red eléctrica.

En los primeros periodos del día en que se produce la primera subida importante del coste, se registran valores que duplican los del escenario anterior con misma demanda. Esto se debe a que la cantidad de energía generada de manera renovable es mucho menor, y entonces el sistema tiene que hacer frente tanto a la demanda como a la carga de las baterías utilizando en su mayoría, energía adquirida de la red eléctrica.

En la figura 64 se muestra la distribución de los costes por equipo y periodo.

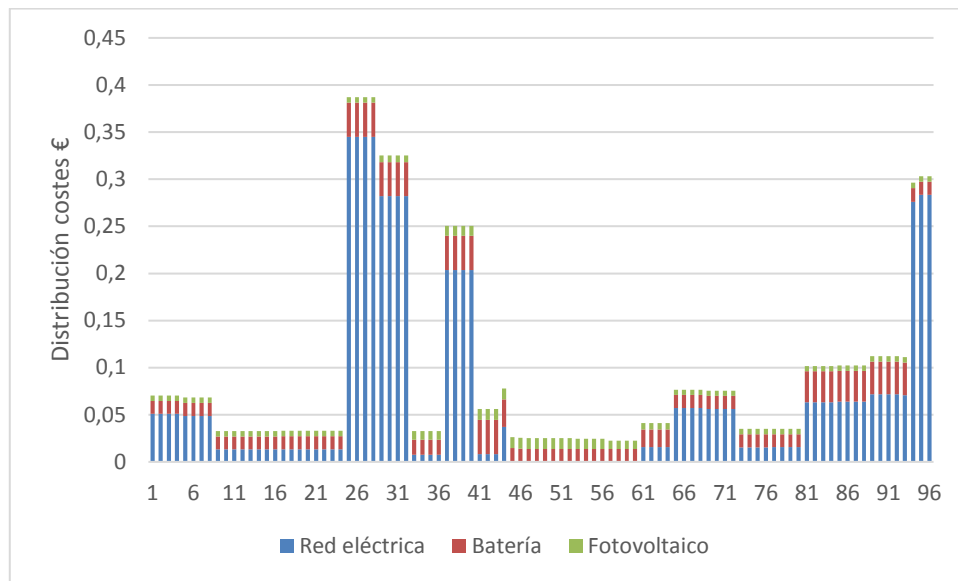


Figura 64 - Distribución de costes por equipos en demanda alta
Fuente: Elaboración propia

El coste total de operación de este escenario se eleva a 9.03 €, correspondiendo el 70% de este coste al consumo de la red eléctrica, como muestra la figura 65.

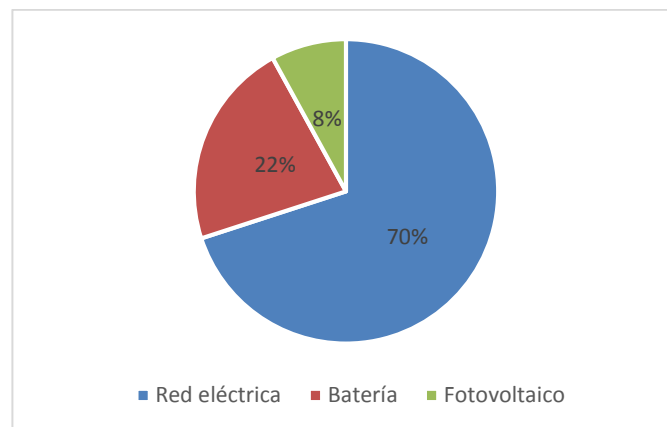


Figura 65 - Proporción de costes por equipo en demanda alta
Fuente: Elaboración propia

Las proporciones de costes varían significativamente respecto a los escenarios considerados en el apartado anterior. En el escenario con demanda alta el coste asociado a la red eléctrica era un 57%, observándose en esta situación un gran aumento. Esto viene motivado por la diferencia en cuanto a la generación de energía por los paneles fotovoltaicos que tienen ambas situaciones, correspondiéndole un 13% de los costes en el escenario anterior.

Disponer de una menor producción de energía de manera renovable aumenta los costes en general, pues la demanda se satisface en su mayor parte por la energía de la red eléctrica. Además, el equipo de almacenamiento también se carga en su mayoría con la energía proveniente de la red cuando tiene el precio más bajo, para así reducir los costes en los periodos en que este precio asciende.

De la misma manera, como se muestra en la figura 66, la producción de energía por los paneles fotovoltaicos supone el 40% de la producción frente al 66% registrado en el escenario anterior.

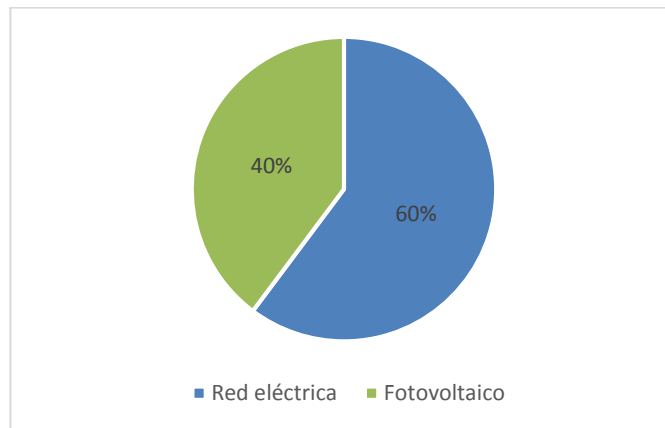


Figura 66 - Generación energía en demanda alta
Fuente: Elaboración propia

El aumento del coste de satisfacer energéticamente al edificio en este escenario se debe a la menor producción de energía por los paneles fotovoltaicos. Esta diferencia, sumado a que la demanda es la más alta registrada para el hotel, llevan a alcanzar el máximo coste de todos los escenarios estudiados.

En la figura 67 se muestra una gráfica comparativa en tres dimensiones de los costes de operación que tiene cada una de las tres situaciones analizadas.

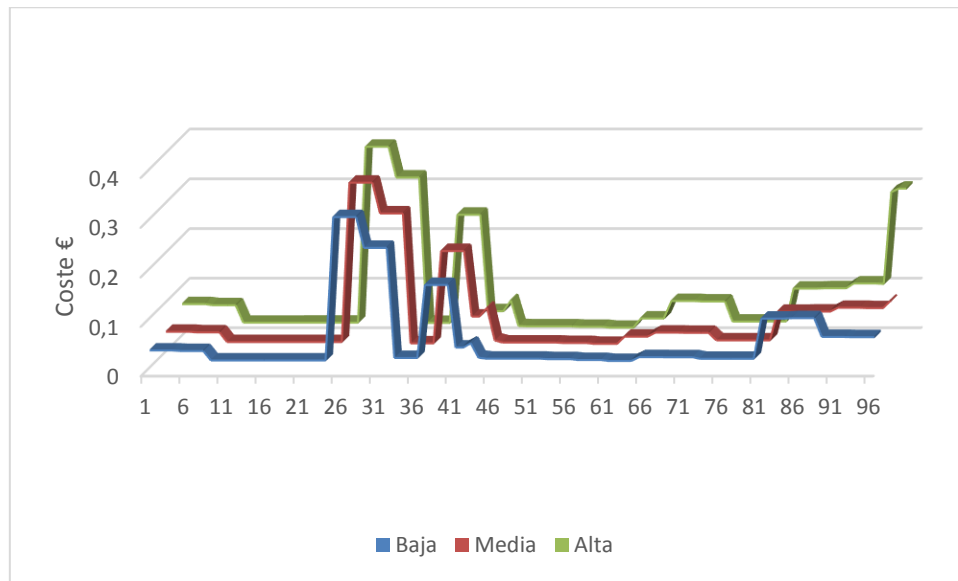


Figura 67 - Comparación de los costes de operación para las tres demandas
Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se obtiene un resultado similar para todas las situaciones, observándose picos en los mismos periodos, aunque en la demanda alta estos sean de mayor magnitud. La diferencia más notoria tiene lugar en los últimos periodos, en los que se produce un pico final en el caso de demanda alta. Esto se debe al aumento del consumo energético respecto a las otras dos situaciones, y a la imposibilidad de satisfacer este aumento con la energía almacenada en las baterías. Por este motivo, aumenta considerablemente el consumo de energía de la red eléctrica, lo que provoca el aumento del coste de operación en estas últimas horas.

9.4 Comparación entre escenarios

Una vez analizados los escenarios y presentadas las gráficas con los datos obtenidos de las implementaciones, se muestran a continuación una comparativa entre los costes de operación. En ella se muestran los resultados del primer escenario en el que se considera un día de verano, cuya radiación solar es alta, y un día de invierno, en el que los datos recogidos sobre la radiación son menores.

Esta diferencia en cuanto a la radiación recibida en las placas fotovoltaicas provoca grandes diferencias en el coste que supone satisfacer el hotel energéticamente. En primer lugar, se muestra la figura 68 en la que se presentan estos resultados para el caso de que la ocupación del hotel sea de una única habitación.

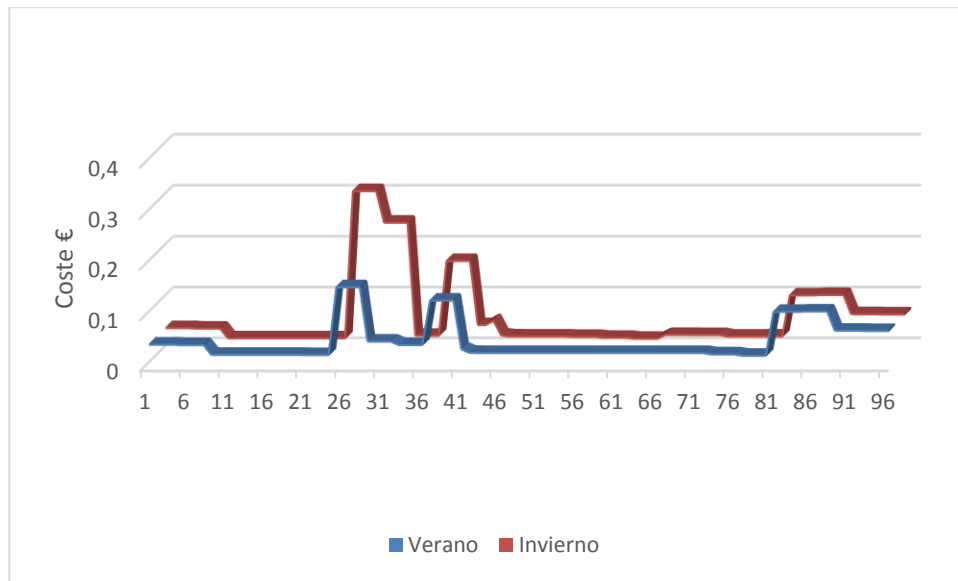


Figura 68 - Comparación del coste de operación con demanda baja
Fuente: Elaboración propia

A continuación, la figura 69 recoge la comparación de los dos escenarios con demanda media.

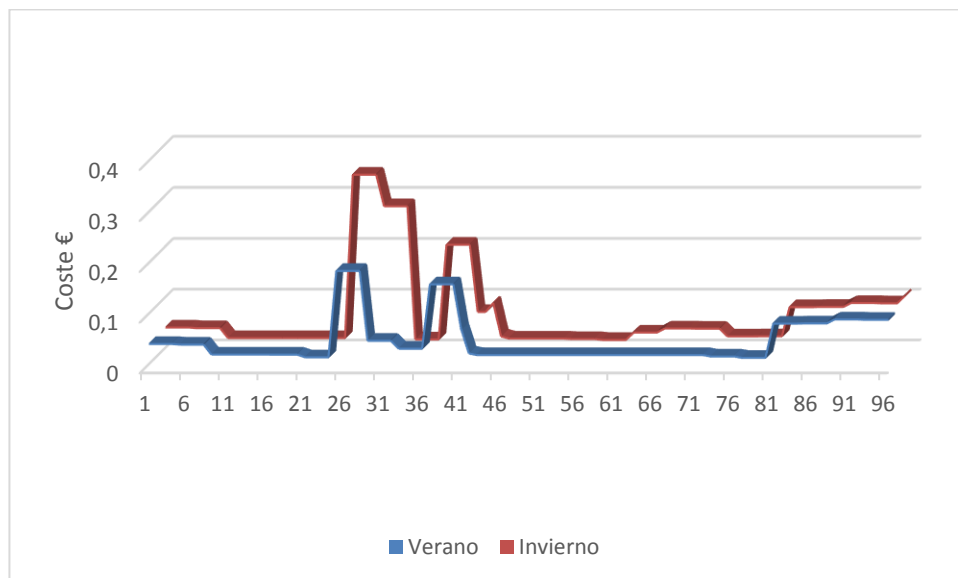


Figura 69 - Comparación del coste de operación con demanda media
Fuente: Elaboración propia

Por último, se muestra la figura 70 en la que se establece la comparación de los dos escenarios en los que la demanda es alta.

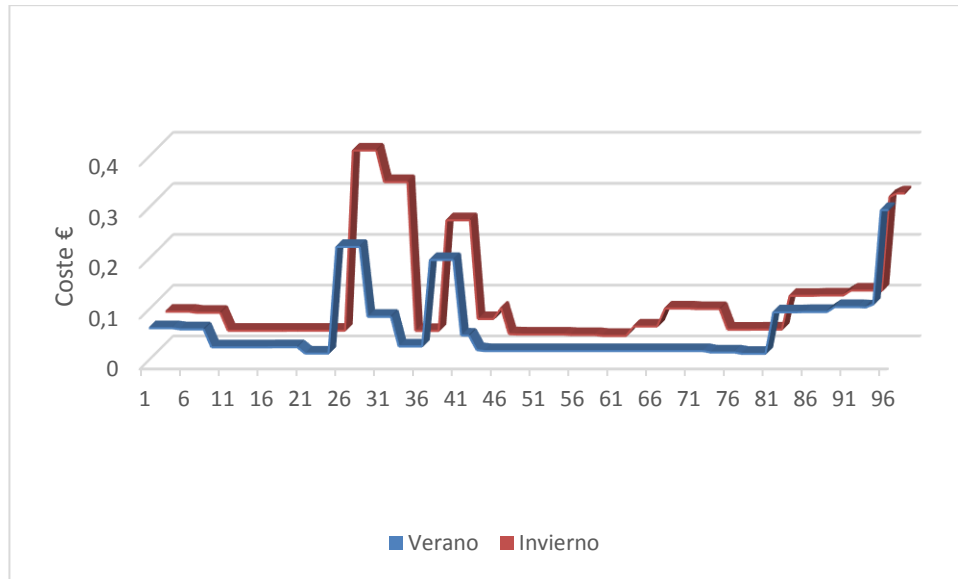


Figura 70 - Comparación del coste de operación con demanda alta

Fuente: Elaboración propia

En las gráficas comparativas se tiene una evolución similar de la curva de costes para cada nivel de demanda, observándose una notable diferencia entre el coste que llega a alcanzar para un día de invierno y uno de verano.

En los intervalos correspondientes a las primeras horas del día en que comienza la actividad de los clientes, esta diferencia entre estaciones es más acusada. Esto se debe a que en estas horas en las que ya hay radiación solar, en el caso del verano se puede satisfacer gran parte de la demanda con esta energía obtenida en las placas fotovoltaicas. De esta manera, se reduce el consumo de energía de la red eléctrica que es lo que más incrementa el coste.

En el caso de que la radiación solar sea menor, no solo influye el hecho de que no se pueda satisfacer toda la demanda del hotel con energía renovable, si no que en las primeras horas del día, cuando comienza la actividad de los clientes, el precio de la red es más barato. Esto hace necesario consumir energía de la red eléctrica cuando la obtenida por las placas no es suficiente para satisfacer el edificio y además cargar las baterías.

A pesar de que en estos periodos aumenta el coste, se utiliza esta energía almacenada para abastecer al edificio en periodos donde no hay generación fotovoltaica y el precio de la red eléctrica es muy superior. Esto pasa en los últimos periodos del día,

reduciendo notablemente el coste que suponen estos periodos, y observando como en el caso de que la demanda sea alta, el coste de operación tiene un importante aumento en estas horas finales. Este aumento sería constante en los últimos periodos de no ser por la presencia de los equipos de generación distribuida.

10 Conclusiones

Este trabajo tenía como objetivo diseñar un sistema para la optimización de los procesos de carga y descarga de las baterías en un sistema con generación energética distribuida. Para llevarlo a cabo, se ha desarrollado una heurística que considera las características y restricciones técnicas de los equipos y del edificio. Esta heurística se implementa en un algoritmo que, al ejecutarlo, proporciona las consignas de funcionamiento de la batería a tiempo real.

Al inicio, se presenta la situación actual de demanda de energía eléctrica, la cuál va aumentando a lo largo de los años y de la que dependen todos los sectores de la sociedad. Debido a su constante aumento se desarrollan diferentes formas de producirla de manera renovable, apareciendo los sistemas de generación distribuida. De esta manera, se consigue el autoabastecimiento, diseñando instalaciones que funcionen en isla, es decir, sin disponer de la conexión a la red eléctrica.

Los sistemas de generación energética distribuida motivan el desarrollo de este trabajo, con el fin de proponer un optimizador para el rendimiento de los equipos de almacenamiento presentes en estas instalaciones.

Para poder desarrollar el objetivo, se lleva a cabo una descripción del problema, de los equipos instalados en el edificio y su situación. Posteriormente, se presentan las restricciones técnicas y las relaciones existentes entre los equipos. Tras conocer las características de la instalación, se obtienen los datos para tres escenarios de demanda, calculado en base a los electrodomésticos presentes en el edificio y el uso que se hace de ellos.

Una vez mostrada toda la información, se presenta la lógica difusa como metodología para la resolución de este problema. Con la lógica difusa se alcanza una solución de manera sencilla, y teniendo como entrada una información imprecisa o incompleta. Esto es lo que ocurre con los datos de entrada que, aunque se consideran bastante fieles a la realidad, son previsiones. La ejecución del algoritmo que resuelve el problema mediante lógica difusa obtiene la solución de forma inmediata.

Se resuelve el problema para los tres escenarios presentados, en los que la demanda varía y contempla tanto la mínima como la máxima posible para el edificio. De igual forma, se desarrolla para un día de verano con radiación solar muy alta y uno de invierno, en el que la radiación es de las menores registradas a lo largo del año.

Los escenarios de demanda se analizaron en primer lugar dividiendo el horizonte temporal de un día en 12 periodos de dos horas, y posteriormente en 96 periodos de quince minutos. De esta manera, se obtiene una decisión de manera casi instantánea, que permite ajustar el funcionamiento de los equipos en función de la situación que se da en cada momento.

Para ambas estaciones se obtiene un comportamiento similar en la evolución de los costes, registrándose unos picos en las primeras horas del día en que comienza la actividad de los clientes. Estos primeros periodos en los que aumenta la demanda coinciden con ser en los que el precio de la energía de la red eléctrica es el más bajo y se encuentra por debajo del límite, por lo que al coste de satisfacer la demanda se le añade el de adquirir energía de la red eléctrica para cargar las baterías.

En los periodos iniciales en que se registran los grandes incrementos en el coste, se observa la primera gran diferencia entre ambas estaciones. En verano la energía obtenida de manera renovable satisface la demanda del edificio y al mismo tiempo se produce un excedente. Esta energía se destina a cargar las baterías, por lo que el consumo de la red eléctrica con el mismo fin se reduce. Por su parte, en un día de invierno es necesario el suministro de la red eléctrica incluso para satisfacer la demanda del edificio en alguno de los periodos al no ser suficiente el aporte recibido por las placas fotovoltaicas. Por tanto, aunque en ambas estaciones se produce un aumento del coste en los primeros periodos de luz, es notablemente superior el coste al que hay que hacer frente cuando la radiación es menor.

La evolución de las gráficas indica un coste estable a partir de estos periodos, en los que la demanda energética es satisfecha con la energía procedente de los paneles fotovoltaicos. El aumento del consumo energético que tiene lugar a primera hora de la tarde se compensa de igual forma, aunque en las situaciones de demanda media y alta para un día de invierno se produce una descarga de las baterías para satisfacer esta demanda.

También se registran pequeños incrementos en el coste a lo largo del día en el escenario de invierno y en las tres demandas, originados en periodos en los que el aporte

de energía procedente del sol no es suficiente para abastecer el consumo energético del hotel, y se precisa el apoyo de la red eléctrica.

En las horas finales del día se produce el último aumento de la demanda por parte del hotel. Para abastecerlo se descargan las baterías, pero al no tener aporte energético de las placas fotovoltaicas durante estos periodos, es necesario el consumo de la red eléctrica, especialmente en las situaciones donde se registra una demanda alta.

Cuando la ocupación del hotel es media o alta, el nivel de almacenamiento final de las baterías es ligeramente inferior al inicial. Al comenzar la siguiente iteración, aunque parta de un nivel menor, se completa al máximo la capacidad de almacenamiento a lo largo de los primeros periodos del día. Por otra parte, cuando la demanda es baja, el nivel final es superior al establecido inicialmente.

Al funcionar en régimen permanente se intercalan los distintos niveles de ocupación a lo largo del año, no siendo un problema el nivel de almacenamiento inicial, pues en todos los días se llegará al máximo de la capacidad. Esto se debe tanto a la radiación solar como a la adquisición de energía que se realiza en los periodos en que el precio se encuentra por debajo del límite establecido.

Una vez implementados los datos y obtenidos los resultados, se concluye que no es posible el funcionamiento en isla de este edificio con los equipos energéticos que tiene actualmente, y teniendo en cuenta su previsión de consumo. En los meses con alta radiación solar, el apoyo recibido por la red eléctrica se encuentra en torno al 35% de la generación eléctrica para los casos de ocupación total del hotel. Pero en las épocas del año de menor producción de electricidad por los paneles fotovoltaicos y mayor demanda, el consumo de la red eléctrica supone el 60% de la energía suministrada al hotel.

A pesar de la necesidad de conexión con la red eléctrica, los equipos que componen el sistema de generación distribuida, placas fotovoltaicas y baterías, reducen notablemente el coste de operación cada día. Sin ellos, el coste sería superior, especialmente en días de alta radiación solar, donde el ahorro energético reside en reducir la cantidad de energía adquirida de la red eléctrica.

Bibliografía

Agencia Andaluza de la Energía, disponible en: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion3.php> Visitado en octubre 2017.

Belinchón Rodríguez, Irene (2016). *Optimización de sistemas de generación distribuida de energía eléctrica con almacenamiento para pequeños consumidores mediante algoritmo PSO*. Trabajo fin de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

Endesa, disponible en: <https://www.endesaclientes.com/precio-luz-pvpc.html> Visitado en noviembre 2017.

González Morcillo, Carlos. *Lógica Difusa – Una introducción práctica* http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf Visitado en septiembre 2017.

Kaehler, Steven. *Fuzzy Logic Tutorial* <http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/flindex.html> Visitado en septiembre 2017.

Labein Tecnalia. *Guía básica de la generación distribuida* <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-basica-de-la-generacion-distribuida-fenercom.pdf> Visitado en enero 2018.

Madrid Solar: *Guía de la Energía Solar*, disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-solar-fenercom.pdf> Visitado en enero 2018

Red eléctrica de España: “Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2016”, disponible en: <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2017/07/>

[red-electrica-publica-informe-energias-renovables-en-sistema-electrico-espa%C3%B1ol-2016](#) Visitado en octubre 2017.

Anexo A: Lógica Difusa para un periodo

Para la implementación de la heurística se utiliza la herramienta Matlab. En este anexo se muestra el código para el análisis de un único periodo del horizonte temporal.

```
function [Bat_almac, Coste_total]=unperiodo(Fotov_prevision,  
Grid_precio, Demanda_instalacion, Bat_almac_inicial)  
  
%Datos  
Tper=0.25;%Longitud del periodo, 0.25 para 96 periodos  
Bat_costefijo=0.055*Tper;  
Fotov_costefijo=0.023*Tper;  
Bat_costevar=0.009;  
Fotov_costevar=0.002;  
Delta_bat=0;  
Delta_fotov=0;  
Bat_carga_efectiva=0;  
Bat_carga_efectiva_excedente=0;  
Bat_desc_efectiva=0;  
Bat_desc_necesaria=0;  
Bat_carga_necesaria=0;  
Fotov_rto=0.97;  
Bat_capac_max=38.4;  
Bat_capac_min=7.68;  
Bat_almac=Bat_almac_inicial;  
Bat_desc_max=10*Tper;  
Bat_carga_max=10*Tper;  
Bat_carga_max_restante=0;  
Bat_rto_carga=0.75;  
Bat_rto_desc=0.75;  
Bat_carga_grid=0;  
Bat_carga_preciobajo=0;
```

```
Fotov_capac_max=290;
Fotov_num_placas=40;
Fotov_generada=0;
Fotov_demanda=0;

if Fotov_prevision>Fotov_capac_max
    Fotov_prevision=Fotov_capac_max;
end
Fotov_generada=(Fotov_prevision*Fotov_num_placas/1000)*Tper;

Fotov_efectiva=Fotov_generada*Fotov_rto;

%Si la energía generada por las placas es mayor que la demanda se va a
cargar

if Fotov_efectiva>=Demanda_instalacion
    Fotov_demanda=Demanda_instalacion;

    if (Fotov_efectiva-Demanda_instalacion)>=Bat_carga_max

        if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max
            Bat_carga_necesaria=Bat_carga_max;

            Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;

        else
            Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
            Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;

        end
    else

        if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=(Fotov_efectiva-
            Demanda_instalacion)

            Bat_carga_necesaria=Fotov_efectiva-Demanda_instalacion;
            Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;

        else
            Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
```

```
Bat_carga_efectiva_excedente=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;

    end
end

else %si la energía producida por las placas fotovoltaicas es menor
que la demanda del hotel, entonces se utiliza el modelo difuso

Fotov_efectiva=Fotov_efectiva/Tper;
Demanda_instalacion=Demanda_instalacion/Tper;

[DeltaCarga, DeltaDescarga]=salidafuzzy(Fotov_efectiva, Grid_precio,
Demanda_instalacion)

Fotov_efectiva=Fotov_efectiva*Tper;
Demanda_instalacion=Demanda_instalacion*Tper;

if DeltaCarga==1

    if Fotov_efectiva>=Bat_carga_max

        if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max
            Bat_carga_necesaria=Bat_carga_max;
            Fotov_demanda=Fotov_efectiva-Bat_carga_max;
            Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
        else
            Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
            Fotov_demanda=Fotov_efectiva-Bat_carga_necesaria;
            Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
        end
    end

else

    if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Fotov_efectiva
        Bat_carga_necesaria=Fotov_efectiva;
        Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
    else
        Bat_carga_necesaria=(Bat_capac_max-Bat_almac);
        Fotov_demanda=Fotov_efectiva-Bat_carga_necesaria;
        Bat_carga_efectiva=Bat_carga_necesaria*Bat_rto_carga;
```

```
        end
    end
end

if DeltaCarga==0 & DeltaDescarga==0

    Fotov_demanda=Fotov_efectiva;

end

if DeltaDescarga==1
    Fotov_demanda=Fotov_efectiva;
    %Compruebo si puedo descargar todo lo necesario de las
    baterias
    if (Demanda_instalacion-Fotov_demanda)>=Bat_desc_max
        if (Bat_almac-Bat_capac_min)>=Bat_desc_max
            Bat_desc_necesaria=Bat_desc_max;
            Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;

        else
            Bat_desc_necesaria=(Bat_almac-Bat_capac_min);
            Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;
        end

    else
        if (Bat_almac-Bat_capac_min)>=(Demanda_instalacion-
            Fotov_demanda)
            Bat_desc_necesaria=(Demanda_instalacion-
                Fotov_demanda);
            Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;

        else
            Bat_desc_necesaria=(Bat_almac-Bat_capac_min);
            Bat_desc_efectiva=Bat_desc_necesaria*Bat_rto_desc;
        end
    end
end
end
end
```

```
%Actualizo estado almacenamiento baterias
Bat_almac=Bat_almac+Bat_carga_efectiva+Bat_carga_efectiva_excedente-
Bat_desc_necesaria;

%cargar las baterias si el precio de la red fuese suficientemente bajo

if Grid_precio<=0.1069 & (Bat_capac_max-Bat_almac)>0 &
Bat_carga_necesaria<Bat_carga_max

    if Bat_carga_efectiva+Bat_carga_efectiva_excedente==0 %Si aun no
se ha cargado nada, tengo toda la capacidad de carga
        if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max %Si cabe mas de lo
que puedo cargar, cargo lo maximo
            Bat_carga_preciobajo=Bat_carga_max;
            Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
        else %si no, cargo lo que quepa
            Bat_carga_preciobajo=(Bat_capac_max-Bat_almac);
            Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
        end
    else %si ya se ha cargado algo, no tengo toda la capacidad de
carga

        Bat_carga_max_restante=Bat_carga_max-Bat_carga_necesaria;

        if (Bat_capac_max-Bat_almac)>=Bat_carga_max_restante
            Bat_carga_preciobajo=Bat_carga_max_restante;
            Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
        else
            Bat_carga_preciobajo=(Bat_capac_max-Bat_almac);
            Bat_carga_grid=Bat_carga_preciobajo*Bat_rto_carga;
        end
    end
end
```

```
Bat_almac=Bat_almac+Bat_carga_grid;

if
(Bat_carga_efectiva+Bat_desc_efectiva+Bat_carga_efectiva_excedente+Bat
_carga_grid)>0
    Delta_bat=1;
else
    Delta_bat=0;
end

if Fotov_efectiva>0
    Delta_fotov=1;
else
    Delta_fotov=0;
end

%Balance de energia que se tiene que cumplir para satisfacer la
demanda

Grid_instalacion= Demanda_instalacion-Bat_desc_efectiva-Fotov_demanda;
Grid_red=Bat_carga_preciobajo+Grid_instalacion;

%CALCULAR EL COSTE TOTAL

Coste_red=Grid_red*Grid_precio;

Coste_variable_bat=Bat_costevar*(Bat_carga_necesaria+
    Bat_desc_necesaria+Bat_carga_preciobajo)*Delta_bat;
Coste_variable_fotov=Fotov_costevar*Delta_fotov*Fotov_generada;

Coste_total=Coste_red+Bat_costefijo+Coste_variable_bat+Fotov_costefijo
+Coste_variable_fotov;
```


Anexo B: Lógica Difusa para un día completo

En este anexo se muestra el código correspondiente al análisis de un día completo. Para llevar a cabo esta implementación, es necesario conocer la correspondiente a un solo periodo, presentado en el anexo anterior.

```
fid=fopen('datos1.txt','r');
cont=288;%numero de elementos que lee
A=zeros(3,96);%tamaño de la matriz en que se guardan
[A,cont]=fscanf(fid,'%f',[3,96]);
A
Coste_final=0;
Bat_almac_inicial=10;

for j=1:96
    Fotov_prevision=A(1,j)
    Grid_precio=A(2,j)
    Demanda_instalacion=(A(3,j))
    [Bat_almac, Coste_total]=unperiodo(Fotov_prevision, Grid_precio,
    Demanda_instalacion, Bat_almac_inicial)
    Coste_final=Coste_final+Coste_total;
    Bat_almac_inicial=Bat_almac;

end
Coste_final
```