

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Modelo de optimización para la gestión eficiente de
flujos de energías eléctrica y térmica: resolución
mediante la aplicación GUROBI

Autor: Maria Teresa Hidalgo Velástegui

Tutor: Pablo Cortés Achedad

Dep. Organización Industrial y Gestión de
Empresas II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

**Modelo de optimización para la gestión
eficiente de flujos de energías eléctrica y
térmica: resolución mediante la aplicación
GUROBI**

Autor:

Maria Teresa Hidalgo Velástegui

Tutor:

Pablo Cortés Achedad

Catedrático de la Universidad

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Modelo de optimización para la gestión eficiente de flujos de energías eléctrica y térmica: resolución mediante la aplicación GUROBI

Autor: Maria Teresa Hidalgo Velástegui
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

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional y estímulo continuo durante toda mi formación académica.

A mi tutor del proyecto, el profesor Pablo Cortés Achedad, que ha sido decisivo, con su orientación y dedicación, en el desarrollo y culminación de este trabajo.

A todos los compañeros y profesores que, de alguna forma, me han ayudado en la consecución del proyecto.

A mis amigos, por compartir conmigo la etapa de estudiante de Ingeniería Industrial en la ETSI de Sevilla y crear momentos únicos que siempre recordaré.

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se va a desarrollar un modelo matemático de optimización para la gestión eficiente de los flujos de energías eléctrica y térmica existentes en un sistema energético descentralizado, donde se requiere que toda la demanda sea satisfecha.

En primer lugar, se va a presentar la situación energética actual, así como algunos datos concretos sobre el uso de las fuentes de energía disponibles o la creciente demanda energética.

En segundo lugar, se van a mostrar nuevos enfoques para la mejora de la eficiencia energética, los cuales se están desarrollando y potenciando en los últimos años. Se va a incorporar el concepto de generación distribuida o modelo descentralizado al sistema energético que va a ser considerado para el desarrollo del modelo matemático.

A continuación, se desarrollará el modelo de optimización, que trasladará los requisitos de la instalación en una serie de ecuaciones matemáticas. Este modelo proporcionará el mínimo coste de satisfacer toda la demanda de energía eléctrica y térmica, teniendo en cuenta todas las restricciones técnicas y ecuaciones de balance existentes.

Posteriormente, se ‘traducirá’ este modelo matemático al lenguaje de programación Python y se utilizará el software comercial Gurobi para resolverlo.

Finalmente, se aplicará dicho modelo a una serie de escenarios en los que se analizarán distintos aspectos del sistema energético considerado.

ABSTRACT

In the current Final Degree Project, a mathematical optimization model Will be developed for the efficient management of the electrical and thermal energy flows existing in a decentralized energy system, where all the demand is required to be satisfied.

On the one hand, the current energy situation will be presented, as well as some data related to the use of available energy sources or the increasing energy demand.

On the other hand, new approaches to improve energy efficiency will be shown, which are being developed in recent years. The concept of distributed generation or decentralized model will be incorporated to the system that will be considered for the development of the mathematical model.

Then, the optimization model will be developed, and it will translate the requirements of the installation into several mathematical equations. This model will provide the minimum cost of satisfying the amount of electrical and termal energy, taking into account all the technocal constraints and balance equations.

Subsequently, this mathematical model will be translated into Python programming language, and Gurobi comercial software will be used to solve it.

Finally, the model will be applied to several scenarios in which different aspects of the energy system that has been considered will be analyzed.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	VII
RESUMEN.....	XIX
ABSTRACT.....	XI
ÍNDICE.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
1.OBJETO DEL PROYECTO	1
2.INTRODUCCIÓN.....	3
3.PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA EXISTENTES.....	7
3.1.Fuentes de energía no renovables.....	7
3.2.Fuentes de energía renovables.....	12
4.SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL	17
4.1.Dependencia energética.....	19
4.2.Creciente demanda energética.....	22
4.3.Fuentes primarias de energía.....	23
4.4.Situación energética en España	25
5.NUEVOS ENFOQUES PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	
33	
5.1.Cogeneración.....	33
5.2.Generación distribuida de energía.....	36
5.3.Smart Grid.....	42
5.4.Otras mejoras.....	44

6.MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	47
6.1.Sistemas considerados.....	49
6.2.Nomenclatura utilizada	51
6.3.Consideraciones previas.....	56
6.4.Restricciones técnicas y balances energéticos	58
6.5.Función objetivo.....	62
6.6.Modelo completo.....	64
7.RESOLUCIÓN DEL MODELO MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN GUROBI.....	67
8.PRESENTACIÓN DE LOS ESCENARIOS.....	77
8.1.Presentación del escenario inicial de 10 períodos.....	82
8.2.Presentación de batería de escenarios de 96 períodos.....	86
9.ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS	95
9.1.Estudio del escenario inicial de 10 periodos	95
9.2.Estudio de la batería de escenarios de 96 periodos	100
9.2.1.Escenario 1.....	101
9.2.2.Escenario 2.....	104
9.2.3.Escenario 3.....	108
9.2.4.Escenario 4.....	112
9.2.5.Escenario 5.....	116
9.2.6.Escenario 6.....	121
9.2.7.Escenario 7.....	127
9.2.8.Escenario 8.....	132
9.3.Análisis global de resultados de la batería de escenarios de 96 periodos	136
10.CONCLUSIONES.....	141
11.REFERENCIAS	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables del modelo.....	52
Tabla 2: Datos económicos del modelo.....	54
Tabla 3: Datos técnicos del modelo.....	54
Tabla 4: Datos de demanda eléctrica y térmica del modelo	55
Tabla 5: Cota superior energética de los equipos generadores y almacenadores	78
Tabla 6: Datos técnicos del gas natural y el equipo de cogeneración	80
Tabla 7: Rendimientos de los equipos de generación y acumulación energética.....	80
Tabla 8: Coste variable de los generadores y acumuladores energéticos.....	81
Tabla 9: Coste fijo de los generadores y acumuladores energéticos	82
Tabla 10: Carga inicial de los dispositivos de almacenamiento en el escenario inicial de 10 periodos	85
Tabla 11: Carga máxima de los dispositivos de almacenamiento en el escenario inicial de 10 periodos.....	85
Tabla 12: Datos del Grid en la batería de problemas de 96 periodos	88
Tabla 13: Cuadro-resumen de los equipos presentes en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos	88
Tabla 14: Previsión de energía solar eléctrica en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos	90
Tabla 15: Previsión de energía eólica en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos	91
Tabla 16: Previsión de energía solar térmica en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos.....	92
Tabla 17: Carga inicial y carga máxima de los dispositivos de almacenamiento en la batería de escenarios de 96 periodos	94
Tabla 18: Salidas del modelo para el Escenario inicial de 10 periodos	96

Tabla 19: Equipos presentes en el Escenario 1.....	101
Tabla 20: Salidas del modelo para el Escenario 1	102
Tabla 21: Equipos presentes en el Escenario 2.....	104
Tabla 22: Salidas del modelo para el Escenario 2	106
Tabla 23: Equipos presentes en el Escenario 3.....	108
Tabla 24: Salidas del modelo para el Escenario 3	110
Tabla 25: Equipos presentes en el Escenario 1.....	112
Tabla 26: Salidas del modelo para el Escenario 4	114
Tabla 27: Equipos presentes en el Escenario 5.....	116
Tabla 28: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 5	116
Tabla 29: Salidas del modelo para el Escenario 5	117
Tabla 30: Equipos presentes en el Escenario 6.....	121
Tabla 31: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 6	122
Tabla 32: Salidas del modelo para el Escenario 6	122
Tabla 33: Equipos presentes en el Escenario 7.....	127
Tabla 34: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 7	127
Tabla 35: Salidas del modelo para el Escenario 7	128
Tabla 36: Equipos presentes en el Escenario 8.....	132
Tabla 37: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 8	133
Tabla 38: Salidas del modelo para el Escenario 8.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: OPEP.....	10
Figura 2: Planta solar fotovoltaica.....	14
Figura 3: Esquema del sistema de generación, transporte y distribución de la electricidad.....	18
Figura 4: Dependencia energética de la Unión Europea, 1990, 1998, 2006 y 2014	20
Figura 5: Incremento de población y del consumo de energía primaria mundiales en millones de personas y millones de Tn de petróleo equivalentes (escala izquierda) y consumo de energía en Tn/habitante (escala derecha)	23
Figura 6: Consumo de energía primaria mundial 2015	24
Figura 7: Evolución de la demanda eléctrica en España (TWh-Tera-Vatio hora)	26
Figura 8: Evolución del consumo energético en España 2000-2014	27
Figura 9: Consumo de energía primaria en porcentajes por tipo de fuente.....	28
Figura 10: Evolución anual de la estructura de la producción energética en el sistema eléctrico peninsular en los años 2013-2017.....	29
Figura 11: Evolución del porcentaje de importación de energía y el consumo de energía de combustibles fósiles desde el año 1960 hasta el 2014	30
Figura 12: Diferencias entre la cogeneración y la generación convencional	35
Figura 13: Ejemplo de un volante de inercia.....	40
Figura 14: Esquema de una Smart Grid o Red Eléctrica Inteligente.....	42
Figura 15: Gráfico de flujos de energía eléctrica y térmica	48
Figura 16: Datos técnicos del documento Excel de lectura.....	70
Figura 17: Datos económicos del documento Excel de lectura.....	70
Figura 18: Datos de demanda, coste y precio de venta en el grid y previsión de las fuentes renovables de energía.....	71

Figura 19: Ejemplo de variables cuyo valor se quiere extraer de los resultados del modelo	71
Figura 20: Código. Apertura del documento Excel	72
Figura 21: Código. Ejemplo de lectura de datos	73
Figura 22: Código. Creación de un modelo vacío	73
Figura 23: Código. Ejemplo de declaración de variables	74
Figura 24: Actualización de variables	74
Figura 25: Código. Ejemplos de restricciones técnicas y balances energéticos	75
Figura 26: Código. Optimización	76
Figura 27: Código. Escritura de los valores que toman las variables de interés	76
Figura 28: Demanda energética en el sistema en el escenario inicial de 10 periodos	83
Figura 29: Previsión de energía solar fotovoltaica en el escenario inicial de 10 periodos	83
Figura 30: Previsión de energía eólica en el escenario inicial de 10 periodos	84
Figura 31: Previsión de energía solar térmica en el escenario inicial de 10 periodos	84
Figura 32: Precio de compra del Grid y precio de venta en el escenario inicial de 10 periodos	84
Figura 33: Demanda energética en el sistema en la batería de escenarios de 96 periodos	87
Figura 34: Precio de compra del Grid y precio de venta en la batería de escenarios de 96 periodos	87
Figura 35: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario inicial	97
Figura 36: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario inicial	97
Figura 37: Nivel de carga de la batería en el Escenario inicial	99
Figura 38: Nivel de carga del acumulador en el Escenario inicial	99
Figura 39: Excesos eléctricos y térmicos en el Escenario inicial	100
Figura 40: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 1	102
Figura 41: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 1	103
Figura 42: Previsión de energía solar fotovoltaica del Escenario 2	105
Figura 43: Previsión de energía eólica del Escenario 2	105
Figura 44: previsión de energía solar térmica del Escenario 2	105
Figura 45: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 2	106
Figura 46: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 2	107
Figura 47: Previsión de energía solar fotovoltaica del Escenario 3	109

Figura 48: Previsión de energía eólica del Escenario 3.....	109
Figura 49: Previsión de energía solar térmica del Escenario 3.....	109
Figura 50: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 3.....	111
Figura 51: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 3	111
Figura 52: Previsión de energía solar fotovoltaica del Escenario 4	112
Figura 53: Previsión de energía eólica del Escenario 4.....	113
Figura 54: Previsión de energía solar térmica del Escenario 4.....	113
Figura 55: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 4.....	114
Figura 56: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 4	115
Figura 57: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 5.....	118
Figura 58: Nivel de carga de la batería en el Escenario 5	119
Figura 59: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 5	120
Figura 60: Nivel de carga del acumulador en el Escenario 5	121
Figura 61: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 6.....	123
Figura 62: Nivel de carga de la batería en el Escenario 6	124
Figura 63: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 6	125
Figura 64: Nivel de carga del acumulador en el Escenario 6	126
Figura 65: Excesos eléctricos y térmicos en el Escenario 6	126
Figura 66: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 7.....	129
Figura 67: Nivel de carga de la batería en el Escenario 7	130
Figura 68: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 7	130
Figura 69: Nivel de carga del acumulador en el Escenario 7	131
Figura 70: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 8.....	134
Figura 71: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 8	134
Figura 72: Nivel de carga de la batería en el Escenario 8	135
Figura 73: Nivel de carga de la batería en el Escenario 8	135
Figura 74: Coste total de cada uno de los escenarios de la batería de problemas con horizonte temporal de 96 periodos	137
Figura 75: Tiempo de resolución de los escenarios de la batería de problemas con horizonte temporal de 96 periodos	139

1. OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente Trabajo Fin de Grado es el desarrollo de un modelo de optimización que en cada instante proporcione la configuración óptima de un sistema de generación distribuida de energía. Se va a considerar un horizonte temporal de 1 día que va a ser analizado en 96 periodos de 15 minutos.

El tema del este trabajo resulta de gran interés hoy en día, ya que se están llevando a cabo diversos proyectos con el objetivo común de lograr una mayor eficiencia energética en el proceso de satisfacer la demanda de los consumidores.

En la actualidad, el modelo energético es de carácter centralizado: grandes cantidades de energía son producidas en grandes instalaciones. Esto conlleva relevantes problemas como la alta dependencia de la red central, la difícil incorporación de formas alternativas de producción energética, el uso de combustibles fósiles como fuentes primarias de energía y, sobre todo, la baja eficiencia energética.

En consecuencia, se plantea la implantación de un nuevo modelo energético: la generación distribuida de energía, un modelo de carácter centralizado que, a través de la integración de distintos equipos y nuevas tecnologías, permite alcanzar una eficiencia energética muy superior. Esto se traduce directamente en un coste de producción mucho más pequeño.

El presente trabajo trata de abordar esta nueva propuesta. Para ello, el documento se estructura de la siguiente forma:

- En los primeros capítulos, se detallan: las principales fuentes de energía existentes, la situación energética actual, así como los principales inconvenientes que presenta. A continuación, se describen nuevos enfoques para la mejora de la

eficiencia energética que surgen en la actualidad, como la generación distribuida de energía, objeto de análisis del proyecto.

- Posteriormente, se desarrolla el modelo matemático de optimización que va a permitir gestionar de forma eficiente los flujos de energía en la instalación, minimizando los costes de producir energía.
- A continuación, en otro capítulo se detalla el proceso de transcripción del modelo matemático al lenguaje Python y la resolución con el software de optimización Gurobi. Con ello, se pretende dar una solución óptima al modelo para cada instante.
- Finalmente, se comprobará el funcionamiento del modelo desarrollado a través del análisis de una serie de escenarios, que permitirán alcanzar conclusiones acerca del trabajo realizado.

Lo que se pretende lograr con este estudio es comprobar la eficiencia de un modelo descentralizado de energía, junto con la incorporación de formas alternativas de producción y de almacenamiento energético. Se va a tratar de minimizar los costes de satisfacer la demanda eléctrica y térmica de la instalación, lo que lleva asociado una mayor eficiencia energética y, con ello, una reducción de los gases nocivos que se liberan a la atmósfera.

2. INTRODUCCIÓN

Ante el continuo crecimiento de la demanda energética mundial y la incesante búsqueda de nuevas formas de producción energética que supere los importantes inconvenientes presentes en el sistema energético actual, surgen nuevas formas de abastecimiento de energía mediante la integración de nuevos equipos y la implantación de nuevos modelos energéticos.

Los modelos energéticos más extendidos en la actualidad son de carácter centralizado: sistemas energéticos caracterizados por la producción de energía en lugares muy lejanos a los consumidores, lo que conlleva la necesidad de un robusto sistema de distribución de la energía y una alta dependencia de la red central.

Por otra parte, hay que indicar que la forma principal de producción de energía en la actualidad de basa en los combustibles fósiles: recursos que, por un lado, constituyen una fuente no renovable o finita de recursos y cuya combustión para la generación energética resulta muy perjudicial para el medio ambiente. Actualmente, surgen nuevas formas de producción energética que resultan menos nocivas para el medio ambiente y favorecen la eficiencia energética, de la que carece el sistema energético actual.

En este contexto, se plantea un nuevo sistema de producción energética: la generación distribuida de energía, que se va a considerar para el desarrollo de la instalación energética y el modelo matemático del presente trabajo.

Este sistema de producción permite la integración de equipos que resultan de gran interés desde el punto de vista económico y medioambiental: fuentes de energía renovables y dispositivos de almacenamiento de energía.

Así, se trata de un campo de actuación, donde se intentan aprovechar nuevas tecnologías para lograr un acercamiento de la producción energética, calor y electricidad, al

consumidor. De esta forma, es posible competir con la tradicional red de distribución, haciendo rentable las inversiones requeridas para la instalación de un sistema energético con estas características. Por otro lado, el coste derivado de la distribución de energía a los consumidores disminuye considerablemente, ya que las distancias de transporte que este modelo plantea son muy inferiores.

En el sistema energético descentralizado objeto de estudio, se van a integrar distintas fuentes que permiten satisfacer la demanda:

-Equipos de generación eléctrica y térmica: en este primer grupo hay que destacar la introducción de la cogeneración como nueva forma de obtención simultánea de energía eléctrica y térmica, alcanzando así una mayor eficiencia de los dispositivos. Por otro lado, también se optará por la incorporación de fuentes de energía renovables, fácilmente adaptables a modelos de generación distribuida como el que se plantea.

-Equipos de almacenamiento energético: se va a considerar la participación de baterías (equipos de almacenamiento eléctrico) y de acumuladores térmicos (dispositivos de almacenamiento térmico). Gracias a la presencia de estos equipos, no será estrictamente necesario que la demanda existente en un determinado periodo sea satisfecha con la energía producida en ese mismo periodo, sino que va a ser posible almacenar energía en los dispositivos acumuladores en periodos donde la generación de la misma resulte más económica, y utilizarla para cubrir la demanda de un periodo posterior.

-La red central o Grid, de la que va a ser posible obtener la energía eléctrica necesaria.

Mediante la integración de estos equipos, se busca alcanzar una mayor eficiencia energética que la existente en la mayor parte de instalaciones actuales.

Se va a disponer de una serie de datos de demanda térmica y eléctrica, así como de los costes de los distintos equipos que intervienen en el modelo y otros datos técnicos.

Considerando el objetivo de lograr una mayor eficiencia energética mediante la implantación de un sistema de generación distribuida de energía e integrando, en este sistema, elementos como la cogeneración, fuentes renovables de energía y elementos de almacenamiento, se va a desarrollar un modelo de optimización para garantizar el mínimo coste que resulta de satisfacer la demanda de energía eléctrica y térmica de la instalación. Dicho modelo de optimización servirá para el análisis de los beneficios derivados de la introducción de estos equipos en el sistema energético actual.

3. PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA EXISTENTES

En la actualidad, existen numerosas formas de obtener la energía necesaria para satisfacer la creciente demanda procedente tanto de grandes consumidores como de particulares.

Se pueden distinguir dos tipos de fuentes de energía: no renovables y renovables o energías limpias. A continuación, se procede a detallar cada uno de estos dos amplios grupos.

3.1. Fuentes de energía no renovables

Las fuentes de energía no renovables son aquellas que se presentan en la naturaleza de forma limitada. Su velocidad de consumo es muy superior a la de regeneración, de forma que llegará un día en que fuentes primarias de energía como el petróleo o el carbón se agoten o, al menos, no puedan volver a ser usadas para crear energía a gran escala. De ahí, la necesidad de potenciar otras formas alternativas de producción energética.

Actualmente, la demanda mundial de energía se satisface, en su mayor parte, con este tipo de fuentes. Debido a las razones expuestas anteriormente, dicho modelo de desarrollo está abocado al agotamiento de los recursos fósiles, ya que su regeneración requeriría períodos de millones de años.

Entre las fuentes de energía no renovables se pueden distinguir las siguientes:

- Combustibles fósiles
 - Carbón
 - Petróleo

➤ Gas natural

- Energía nuclear (fisión y fusión nuclear)

A continuación, se explica brevemente en qué consisten estas fuentes de energía, sus principales ventajas e inconvenientes.

Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles se han formado naturalmente y provienen de residuos fermentados de seres vivos que se han desarrollado bajo condiciones especiales durante millones de años. Es este proceso de millones de años el que hace de los combustibles fósiles una fuente de energía no renovable.

Están constituidos por una mezcla de diferentes elementos que, principalmente, son: carbono, hidrógeno y azufre. Estos residuos son combustibles, es decir, tienen la capacidad de combinarse rápidamente con oxígeno y producir una cantidad elevada de calor que se utiliza para transformar el agua en vapor de agua, el cual mueve unas turbinas que están conectadas a un generador.

Los combustibles fósiles se pueden utilizar en forma sólida (carbón), líquida (petróleo) o gaseosa (gas natural).

Las formas de obtención de estos recursos consisten principalmente en la perforación y la minería superficial

Carbón

El carbón es una roca sedimentaria de origen orgánico y, gracias a sus propiedades termodinámicas, se puede obtener una gran cantidad de energía calorífica durante el proceso de combustión.

Su extracción se realiza mediante explotaciones minerales.

Se utiliza principalmente para la producción de electricidad en las cámaras de combustión de carbón y como fuente primaria de calor en calderas industriales.

Petróleo

El petróleo consiste en una mezcla no homogénea de hidrocarburos.

Se localiza en yacimientos cerrados durante miles de años bajo tierra en diversos puntos de la corteza terrestre. Una vez extraído del yacimiento, el petróleo crudo no se comercializa, sino que se somete a un proceso de destilación en refinerías y se separan los componentes químicos del mismo según el punto de ebullición.

Gas natural

El gas natural está compuesto por una mezcla de hidrocarburos y su poder calorífico es muy variable según su composición.

Se encuentra en grandes depósitos de gas natural, generalmente en yacimientos bajo tierra junto con el petróleo.

Es ampliamente reconocida como la energía fósil más limpia, ya que es la que produce menos residuos y emisiones a la atmósfera.

Los combustibles fósiles presentan una serie de ventajas que han provocado que sean la fuente primaria de energía en el mundo; entre ellas, cabe destacar:

- Son fáciles de obtener.
- Son fáciles de acumular y de transportar.
- El coste de obtención de energía a partir de los combustibles fósiles es relativamente bajo en comparación con otras fuentes de producción alternativas.
- Permiten obtener cantidades de energía a gran escala y abastecer tanto a grandes consumidores como a viviendas y particulares.

Sin embargo, su elevado uso provoca una serie de problemas:

- Los combustibles fósiles se regeneran muy lentamente, a una velocidad muy inferior a la de consumo, por lo que son recursos que se agotarán a medio o corto plazo.

- Hasta el momento, se ha considerado que son las fuentes de energía más económicas, pero su precio fluctúa en función de la disponibilidad; la escasez de estos recursos provoca la subida de precio de estos, por lo que se prevé que el precio se incremente de forma notable en los próximos años.
- Ha sido y es fuente de conflicto entre distintos países, debido a su limitada presencia en la naturaleza, sólo existente en algunos países.

Así, por ejemplo, la Figura 1 muestra La Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), cuya acción determina, en gran medida, el curso de los acontecimientos económicos de los países de Occidente y confiere a los países exportadores un poderoso instrumento de defensa de intereses.



Figura 1: OPEP

Fuente: Instituto Español de Estudios Estratégicos (2010). Artículo: Fuentes Energéticas

- Impacto ambiental: en muchas ocasiones, una mala gestión y control sobre los procesos de extracción y uso de estos recursos ha repercutido negativamente en el medio ambiente; desde vertidos de petróleo en el agua que queda totalmente contaminada hasta explosiones e incendios de gas natural.
- La combustión de estos recursos libera a la atmósfera una gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂), que favorece el efecto invernadero y, con ello, el incesante cambio climático.
- Asimismo, son fuentes emisoras de gases tóxicos y de residuos tóxicos, los cuales contaminan el medio ambiente.

- Lluvia ácida, provocada por la precipitación de ácidos, formados a partir de la combinación de óxidos de azufre y nitrógeno emitidos en el proceso de combustión junto con otros gases presentes en la atmósfera. Esto provoca la acidificación del agua y, con ello, daños en la vegetación y otros efectos negativos.

Por todas estas razones, la búsqueda de fuentes de energía alternativas se plantea como un claro objetivo para sustituir, en la medida de lo posible, a los combustibles fósiles como fuente primaria.

Energía nuclear

La energía nuclear es aquella que se libera como consecuencia de una reacción nuclear, que puede ser de dos tipos:

1. Fisión nuclear: división del núcleo
2. Fusión nuclear: unión de dos átomos

La energía liberada en este proceso, que se obtiene en forma de calor, se utiliza para convertir agua en vapor, el cual mueve una turbina que genera electricidad en las centrales nucleares.

Para llevar a cabo estas reacciones de fisión y de fusión se utiliza el isótopo 235 del uranio (U-235), que tiene un poder calorífico muy superior a cualquier otro tipo de energía fósil. El mineral de uranio se encuentra en la naturaleza en cantidades limitadas; de ahí, que se considere una fuente de energía no renovable.

La variación de los precios de las materias primas energéticas y la concentración de uranio en el mineral determinan la viabilidad y rentabilidad de las reservas de uranio a nivel mundial.

Ventajas que presenta esta energía nuclear:

- Emite menos sustancias contaminantes a la atmósfera que las generadas en la utilización de combustibles fósiles.

- Permite garantizar el suministro eléctrico, al ser capaz de generar enormes cantidades de energía.
- Los vertidos de las centrales nucleares al exterior son mínimos.

Por otro lado, posee los siguientes inconvenientes:

- Se producen desechos radioactivos, los cuales son muy difíciles de eliminar.
- Es cierto que el coste de producción es inferior que el de otras fuentes energéticas, pero si se consideran también los costes fijos de las instalaciones y mantenimiento de las mismas, es probable que no sea la forma de producción energética más rentable económicamente.
- Las consecuencias que acarrearían cualquier fallo en una central nuclear podrían ser catastróficas.

Así, se observa que este tipo de fuente de energía también presente importantes inconvenientes que pueden llevar a la búsqueda de otras fuentes de energía alternativas, como son las fuentes de energía renovables, que siguen a continuación.

3.2. Fuentes de energía renovables

Las fuentes de energía renovables, también llamadas energías limpias, fuentes no convencionales de energía o fuentes alternativas, son aquellas que no provienen de fósiles e incluyen el viento, el sol, la energía almacenada como energía interna en el aire (aerotérmica), debajo de la superficie de la tierra (geotérmica) y en el agua (hidrotérmica), la energía de los océanos, la hidráulica, la biomasa, los gases producidos en rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales, y los biogases.

Son fuentes de energía inagotables, ya que su potencial proviene de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, por lo que pueden ser repuestas a corto o mediano plazo por medios naturales y permiten una explotación ilimitada.

La importancia de estas fuentes de energía va en aumento y, a día de hoy, representan una parte considerable de la energía total producida en el mundo.

A continuación, se presentan las fuentes de energía renovables más relevantes en el panorama energético actual.

Energía solar

La energía solar es la energía contenida en la radiación solar que procede del Sol. Esta radiación es transformada en energía eléctrica o térmica mediante unos dispositivos conocidos como paneles solares, que pueden ser distintos según el uso final que se le quiera dar a la energía. Así, se distinguen dos tipos:

- Captadores solares térmicos, para producir energía solar térmica a partir de la radiación solar.
- Módulos fotovoltaicos, para producir energía solar fotovoltaica

Algunas de las tecnologías que utiliza son modulares, por lo que pueden ser utilizadas tanto en sistemas de energía centralizados como descentralizados; así, será una de las fuentes de energía renovable que se podrá incorporar en el modelo que posteriormente se va a desarrollar.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de una planta solar fotovoltaica.



Figura 2: Planta solar fotovoltaica

Fuente: Diario económico Expansión (2015). Noticia: 'Solarpack vende a SunEdison su proyecto de planta solar fotovoltaica en Uruguay'

Energía eólica

La energía eólica explota la energía cinética del aire en movimiento. Su aplicación más extendida consiste en producir electricidad a partir de unos equipos llamados aerogeneradores, compuestos por una turbina eólica situada en la parte superior de una torre de soporte y un generador eléctrico. Dichos aerogeneradores pueden ser instalados en tierra firme o aguas adentro. Los primeros están siendo ya comercializados y adoptados a gran escala, mientras que los segundos no están tan desarrollados y ofrecen más posibilidades de conseguir avances técnicos.

La integración de este tipo de energía suele ser viable en la mayor parte de los sistemas eléctricos actuales, por lo que se considera una de las principales fuentes de energía renovables.

La energía eólica presenta una serie de ventajas de relevancia:

- ✓ Es una fuente inagotable, como fuente de energía renovable que es.
- ✓ Un parque eólico ocupa un espacio reducido, en comparación con el área requerida por los paneles solares.
- ✓ No produce gases tóxicos y el costo de las turbinas eólicas y mantenimiento es relativamente bajo.

Asimismo, presenta una serie de inconvenientes: el viento no está garantizado, provocan un impacto en el paisaje y afectan a las aves rapaces, que impactan contra los equipos.

Energía geotérmica

Proviene del aprovechamiento del calor del interior de la Tierra, el cual es liberado naturalmente en el interior del núcleo en los procesos de descomposición nuclear de los elementos radiactivos. Este calor se utiliza para convertir agua en vapor, que se encarga de mover una serie de turbinas y que, conectadas a un generador, producen energía eléctrica o calorífica.

Como ventajas se puede señalar que es una energía limpia, apenas produce residuos y tiene unos costes de producción bajos.

Sin embargo, su implantación es limitada debido a que las plantas de energía geotérmica deben instalarse en zonas donde el calor del subsuelo sea elevado y la energía generada debe ser consumida en el punto de producción, ya que no se puede transportar.

Energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica se obtiene al aprovechar la energía del agua en movimiento y se utiliza generalmente para producir electricidad. La lluvia o el agua en deshielo originan arroyos y ríos que desembocan en el océano, generando una cantidad de energía considerable mediante el movimiento de una serie de turbinas conectadas a un generador.

Los proyectos de energía hidroeléctrica pueden abarcar todo tipo de escalas, lo que hace que sea una fuente de energía capaz de responder tanto a necesidades urbanas centralizadas y a gran escala, como a necesidades rurales descentralizadas.

Además, es un tipo de energía fácilmente accesible, ya que se puede controlar la cantidad de agua que pasa a través de las turbinas para producir la electricidad requerida.

Biomasa

La biomasa está compuesta por todos aquellos residuos orgánicos que pueden ser utilizados para producir energía útil. Éstos, suelen ser residuos forestales, agrarios o pecuarios, así como componentes orgánicos de residuos sólidos urbanos y otras fuentes de desechos orgánicos.

La combustión de estos residuos genera calor, el cual convierte el agua en vapor de agua, que genera electricidad al mover una serie de turbinas conectadas a un generador.

Energía de ondas o undimotriz

El continuo movimiento ondulatorio de las masas de agua puede ser aprovechado para generar electricidad mediante el movimiento de turbinas conectadas a generadores.

Energía mareomotriz

Es obtenida gracias a las corrientes de agua del mar, que provocan el movimiento de turbinas conectadas a un generador que produce electricidad.

Como rasgos comunes a las fuentes de energía renovables, destacan las siguientes: no producen emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera, no generan residuos de difícil tratamiento (como ocurría en la energía nuclear) y son energías inagotables.

Sin embargo, la irregularidad en la producción de energía de estas fuentes, así como la dependencia geográfica de su eficiencia, hacen que no se pueda depender exclusivamente de ellas y que tengamos que ser complementadas con otro tipo de fuentes energéticas, así como con acumuladores de energía que permitan almacenarla en caso de disponer de materia prima pero no necesitar esa energía en ese instante concreto.

4. SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL

En el capítulo anterior, se han desarrollado las distintas formas de obtención de energía de las que actualmente se dispone.

En este capítulo, se procede a describir cómo dichas fuentes energéticas son adoptadas y en qué medida, así como otros aspectos relacionados con la situación energética actual y se particularizará en la situación concreta en España.

Un sistema energético es un método por el cual se garantiza el suministro de la demanda energética requerida en un punto de consumo determinado de forma inmediata.

El modelo energético actual se presenta como un modelo centralizado: la generación de energía tiene lugar en centrales, que pueden ser fósiles, nucleares o renovables. Una vez producida, esta energía ha de transportarse desde los centros de generación hasta las redes de distribución, desde las cuales se satisface la demanda del usuario final.

Este sistema energético provoca una fuerte dependencia de la red central por parte de los consumidores, que deben obtener toda la energía que necesitan de esta red central. Este proceso de gestión y distribución lo llevan a cabo las grandes empresas energéticas de cada país.

El principal inconveniente del modelo de generación centralizado son las grandes pérdidas que se producen desde los centros de generación hasta los puntos de consumo; dado que estos centros de generación suelen encontrarse bastante alejados de los puntos de consumo, se requiere de una compleja red de transporte de energía que logre satisfacer la demanda de los consumidores en cada instante temporal concreto.

El transporte en largas distancias requiere voltajes elevados para alcanzar eficiencias razonables pese al efecto Joule.

La utilización de estos voltajes en la red de transporte implica la necesidad de estaciones transformadoras, tanto desde los centros de generación hasta la red de transporte, como de ésta a la red de distribución, que es la que utilizan los usuarios finales (media o baja tensión). En la Figura 3, se muestra un esquema del sistema de generación, transporte y distribución de la electricidad, así como los voltajes de trabajo correspondientes.

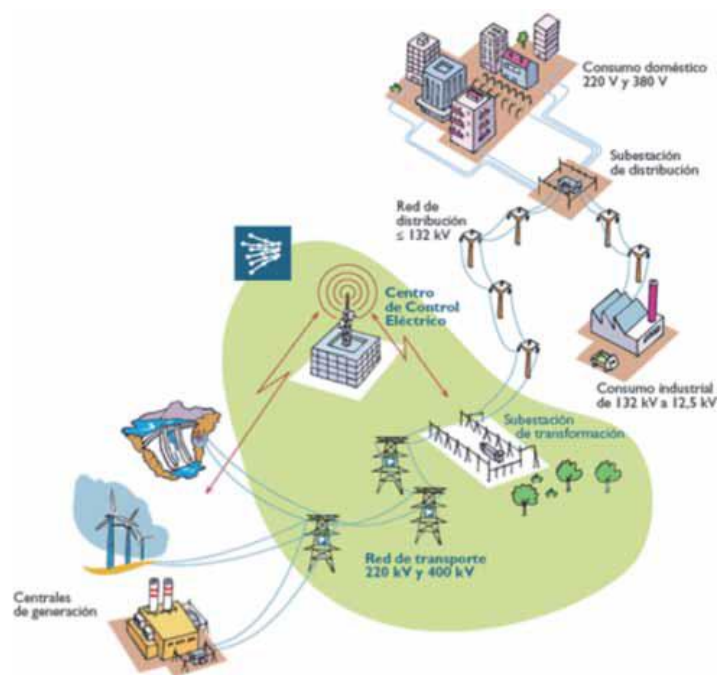


Figura 3: Esquema del sistema de generación, transporte y distribución de la electricidad

Fuente: REE (Red Eléctrica de España)

Además de este gran inconveniente que conlleva el modelo energético centralizado actual, es posible destacar una serie de problemas que van implícitos en el mismo:

- La instalación de la compleja red de distribución y estaciones de transformación requieren de grandes inversiones.
- Ciertos puntos de la geografía terrestre no pueden acceder a la red central por encontrarse en lugares alejados o difícilmente accesibles.

- No es posible almacenar la energía en grandes cantidades, lo que provoca una producción de energía igual a la demanda y, con ello, unos precios inestables, al ser inestable la demanda recibida en los centros de generación.
- En las centrales de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles, no se puede reciclar el calor producido en la combustión de los mismos.

Todos estos inconvenientes hacen del modelo actual un punto de partida para mejorar, investigar nuevas formas de satisfacer la demanda energética mediante la generación distribuida de energía, que posteriormente se comentará.

Además, existen otros aspectos que favorecen esta búsqueda de optimizar el sistema energético actual y que se muestran a continuación.

4.1. Dependencia energética

Se pueden señalar varios conceptos de dependencia que existen en el sistema energético actual:

Dependencia de otros países

Uno de los grandes retos para cualquier país, su economía y su desarrollo es la energía y todos los factores que le afectan: dependencia energética, precio, estabilidad, contaminación y fiabilidad del suministro. Las oportunidades de crecimiento y competitividad de un país dependerán, en gran medida, del correcto equilibrio entre todos esos factores.

El sistema energético actual utiliza como fuente primaria de energía los combustibles fósiles. Además de los daños ambientales que implica, este hecho crea una alta dependencia de los países que cuentan con estos recursos. Así, el precio de adquisición

de estas materias primas puede fluctuar de forma considerable y acarrear problemas de financiación a los países no portadores.

En la Figura 4, aparece reflejada en tonos oscuros la producción de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) por parte de los países de la Unión Europea y, en tonos claros, las importaciones netas requeridas de los distintos combustibles en los períodos temporales señalados (medidas en Mtoe: Million tonnes of oil equivalent).

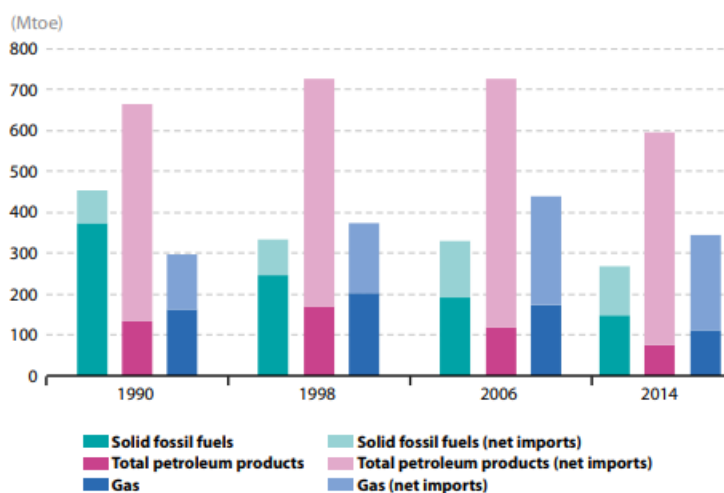


Figura 4: Dependencia energética de la Unión Europea, 1990, 1998, 2006 y 2014

Fuente: Eurostat (2016). Artículo: Energy, transport and environment indicators

Como se puede observar, la decadencia en la producción primaria de combustibles fósiles ha conducido a una situación en la que la Unión Europea ha ido incrementando su dependencia en las importaciones para satisfacer la demanda.

Entre los miembros de la Unión Europea, en 2004 Dinamarca fue el único país que en términos netos exportó al exterior; sin embargo, en 2013 las importaciones superaron a las exportaciones, de forma que ya no había ningún país de la Unión Europea que fuera exportador neto de energía. Teniendo en cuenta el tamaño de la población, los importadores netos más relevantes en el año 2014 fueron Malta, Luxemburgo y Bélgica (Eurostat, 2016).

Si se potencia el uso de otras fuentes de energía alternativas, se conseguirá, por un lado, una disminución de la dependencia energética del exterior y, por otro, una reducción de los gases nocivos que se emiten a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles.

Dependencia en el uso de energía renovables

Como bien es sabido, las fuentes de energía renovables ofrecen potenciales ventajas con respecto a las no renovables; a pesar de ello, uno de los principales inconvenientes que presentan es la irregularidad con la que es posible obtener energía de las mismas, ya que dependen de factores meteorológicos, como es el sol en caso de la energía solar o la existencia de viento en el caso de la energía eólica.

Este hecho conlleva que en un sistema energético centralizado como el actual no pueda satisfacer en muchas ocasiones la demanda de distintos puntos de consumo únicamente con fuentes de energía renovables, y que éste tenga que ser complementado con fuentes de energía no renovables.

Dado que la energía no se puede almacenar en grandes cantidades en este modelo centralizado, donde es la red central la que satisface grandes comunidades, no es viable utilizar elementos de almacenamiento de energía.

En caso de fomentar modelos de generación distribuida de energía en lugares más cercanos a los puntos de consumo y que, por tanto, tuvieran que proveer cantidades de energía menores, sería posible el uso de elementos de almacenamiento, como baterías para energía eléctrica o acumuladores térmicos para energía térmica. Con ello, se conseguiría un mejor aprovechamiento de estas fuentes de energía renovables y una menor dependencia de los factores externos anteriormente comentados, de los que depende su rendimiento.

Dependencia de una red central

Como ya se ha explicado, el modelo energético actual provoca una alta dependencia de la red central, desde donde se tiene que satisfacer toda la demanda energética de un elevado número de consumidores.

Este hecho hace que, durante las horas pico y valle, el precio de la energía varíe considerablemente y que los efectos negativos de la práctica de este modelo se refuercen ante el incesante incremento de la demanda energética.

4.2. Creciente demanda energética

El consumo energético mundial aumenta sin cesar. Este hecho viene impulsado, tanto por el crecimiento socioeconómico de los distintos países, sobre todo los países en desarrollo (como Brasil, India o China), como por el aumento de la población en el mundo.

Encontrar soluciones energéticas que posibiliten mantener el ritmo de crecimiento mundial, sin repercutir en el medio ambiente, depende del compromiso de todas las naciones, en especial de aquellas que sean responsables, en mayor medida, del crecimiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera.

En la Figura 5, se observa cómo el crecimiento de la población mundial ha implicado un mayor consumo de recursos naturales. También se observa que la velocidad de utilización de los mismos ha aumentado de manera más rápida que la población, consecuencia del cada vez mayor nivel de vida; es decir, el consumo per cápita de energía se ha ido incrementando con el paso de los años.

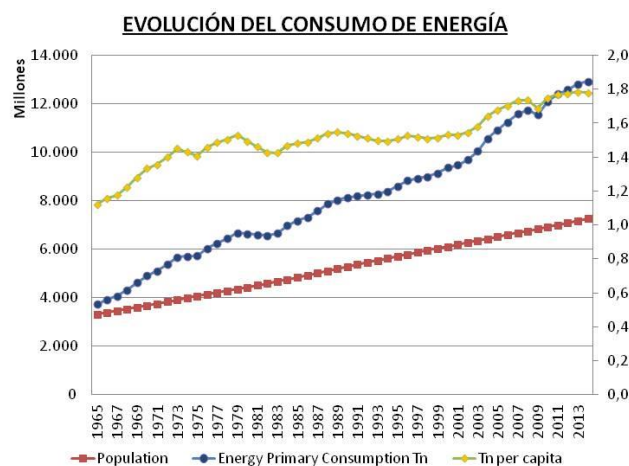


Figura 5: Incremento de población y del consumo de energía primaria mundiales en millones de personas y millones de Tn de petróleo equivalentes (escala izquierda) y consumo de energía en Tn/habitante (escala derecha)

Fuente: Datos de población de Banco Mundial y de consumo de energía primaria de Bristish Petroleum: Statistical Review of World Energy 2015

Este incremento de energía a nivel mundial es consecuencia, en gran medida, de la industrialización de los países en vías de desarrollo. Es más, los países europeos consumen menos energía en comparación con diez años atrás gracias al aumento de la eficiencia energética.

4.3. Fuentes primarias de energía

A pesar de que la concienciación sobre la necesidad de potenciar el uso de las energías renovables es un hecho, son muchos los pasos que quedan por dar para darle a estas fuentes de producción energética el lugar y la importancia que tienen.

Actualmente, las energías renovables no pueden competir económicamente con los precios de los combustibles fósiles. Además, estas energías requieren importantes cambios de infraestructura de almacenamiento, distribución y transporte para sustituir gran parte de los recursos fósiles.

La actual infraestructura energética está preparada para los combustibles fósiles como fuente primaria de energía. Reemplazarlos, implicaría también modificar el sistema de producción, transporte y distribución a los usuarios, lo que lleva asociado un alto coste económico.

En la Figura 6, se observa el consumo de energía en el mundo durante el año 2015, según las distintas fuentes de producción. El mix energético quedó configurado como sigue: petróleo (32,9%), gas natural (23,8%), carbón (29,2%), energía hidroeléctrica (6,8%), nuclear (4,4%), y renovables (2,8%). Hay que destacar el crecimiento del consumo de energías renovables en este año, que fue del 15,2% con respecto al año anterior (BP (BritishPetroleum), 2016).

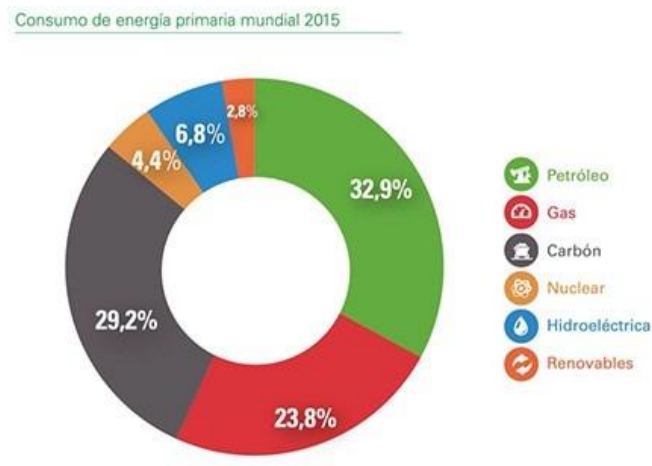


Figura 6: Consumo de energía primaria mundial 2015

Fuente: Statistical Review of World Energy 2016

En concreto, Europa depende menos de los combustibles fósiles, gracias al ahorro de energía y el uso de fuentes renovables. Durante la década de 2005-2015, la proporción de renovables en el consumo de energía de la UE se duplicó, pasando del 9% al 17%. (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017). Sin embargo, los combustibles fósiles continúan siendo la fuente de energía que predomina en Europa.

Esta búsqueda de fuentes de energía limpias viene propiciada en gran medida por el deseo de mitigar el conocido cambio climático, acelerado por las emisiones de CO₂ que se liberan a la atmósfera en grandes cantidades con la quema de los combustibles fósiles.

Para alcanzar los objetivos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que permitan impedir mayores aumentos de temperatura, es necesario que se adopten compromisos ambiciosos y grandes cambios por parte de los actores implicados.

La Unión Europea considera necesaria la puesta en marcha de una política integrada de cambio climático y energía para dar paso a una economía sostenible y que respete el clima, con la integración de tecnologías y fuentes energéticas que conlleven bajos niveles de emisión de CO₂, incrementen la competitividad y refuercen la seguridad del suministro.

Con este propósito, en el año 2008 se aprobaron una serie de medidas sobre clima y energía, donde se fijaron los objetivos para 2020. Posteriormente, en el año 2014, se estableció el ‘Marco de Políticas de Energía y Cambio Climático 2021-2030’, con los siguientes objetivos: ‘40% de reducción de emisiones, 27% de energías renovables y 27% de mejora de la eficiencia energética’ (Red Eléctrica de España, 2017a).

4.4. Situación energética en España

Una vez descrita la situación energética mundial y en la Unión Europea, en este apartado se procede a detallar la situación concreta en España.

Al igual que lo que ha ocurrido en términos generales a nivel mundial, la demanda eléctrica ha crecido de forma considerable en las últimas décadas. En 1985, la demanda eléctrica anual en España se encontraba por debajo de 120 TWh. Desde entonces, con la mejora de la calidad de vida y el aumento de consumo de energía per cápita, la demanda ha experimentado un incremento sustancial hasta alcanzar, en 2008, el valor máximo histórico (281,2 TWh), como se puede observar en la Figura 7. En 2009, se produce una

disminución de la demanda anual, lo que se explica por la situación de crisis económica (Folch et al., 2013).

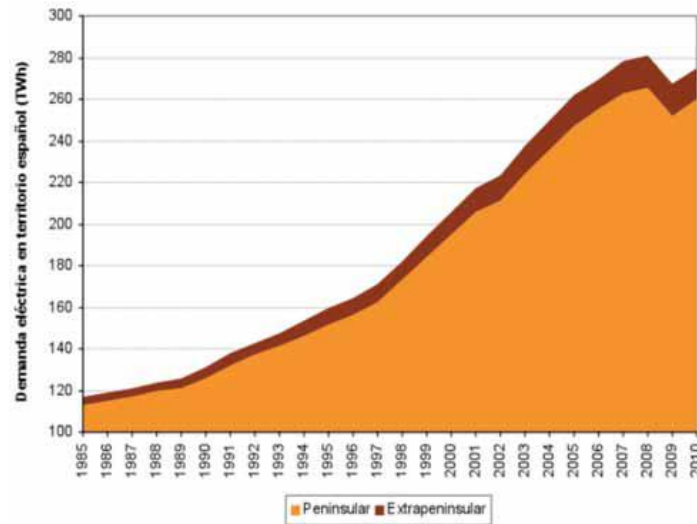


Figura 7: Evolución de la demanda eléctrica en España (TWh-Tera-Vatio hora)

Fuente: REE (Red Eléctrica de España)

En la Figura 8, se representa la evolución del consumo energético en España en el periodo temporal 2000-2014, expresado en ktep (miles de toneladas equivalentes de petróleo). Se aprecia un comportamiento similar durante los años coincidentes con la ilustración anterior y, a partir del año 2010 y hasta el 2014, se observa una tendencia descendente, motivada por dos aspectos: por un lado, la contracción de la actividad económica provocada por la crisis económica, y por otro lado, la mejora de la intensidad y eficiencia energéticas (Costa Campi, 2016).

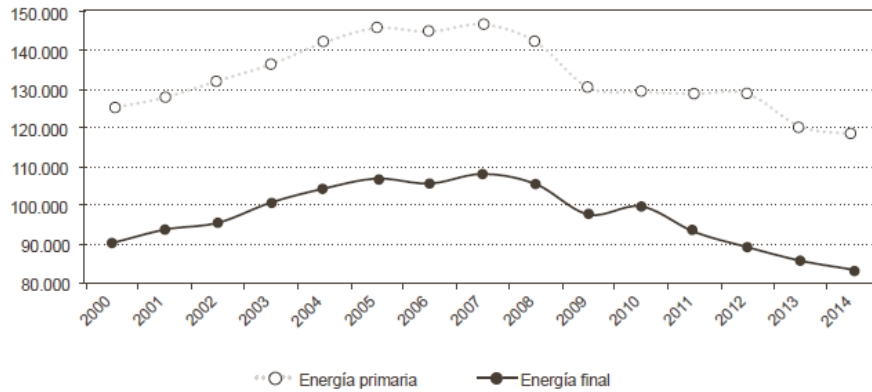


Figura 8: Evolución del consumo energético en España 2000-2014

Fuente: Elaboración a partir de balances energéticos MINETUR (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo).
Revistas ICE (2016). Artículo: Evolución del sector eléctrico español

Desde el año 2015, la demanda de energía eléctrica en España presenta una senda continua de crecimiento, aunque se sitúa todavía por debajo del nivel máximo de la demanda alcanzada en 2008. En concreto, la demanda en España en 2017 creció un 1,1% respecto al año anterior, superando la tasa del crecimiento del 0,7% registrada en 2016, aunque un 4,6% inferior a la demanda del 2008.

En el sistema peninsular, que representa algo más del 94% de la demanda total española, el consumo anual de electricidad ha sido igualmente un 1,1% superior a 2016. Una vez ajustados los efectos de temperatura y laboralidad, el crecimiento de la demanda eléctrica atribuible principalmente a la actividad económica aumentó hasta el 1,6% respecto a 2016.

Esta demanda energética tiene que ser cubierta a partir de la producción de las distintas fuentes de energía existentes.

En la Figura 9 se observa cómo el gas natural pasa de prácticamente ser una fuente energética residual en 1990 a convertirse en la segunda fuente de producción energética más usada, algo que vuelve a implicar un aumento de la dependencia energética española. También se observa un aumento en el consumo de energías renovables en los últimos años.

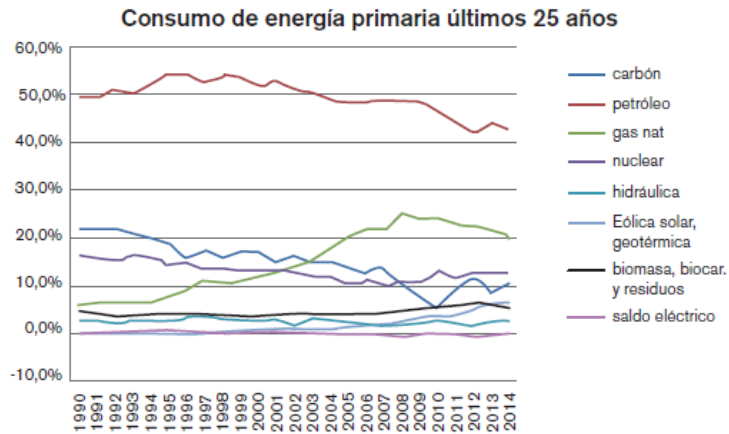


Figura 9: Consumo de energía primaria en porcentajes por tipo de fuente

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2016). Artículo: La dependencia energética en España por sectores y su impacto económico

Sin embargo, también hay que destacar que España es referente mundial en la integración de las energías renovables. En los últimos años, en torno a un 40% de la demanda eléctrica anual ha sido cubierta con generación renovable y, en algún caso, alcanzando valores de cobertura horaria superiores al 80%. Esto contribuye a una mejora de la sostenibilidad y la eficiencia del sistema eléctrico (Red Eléctrica de España, 2017b).

Por otro lado, hay que destacar que, en los últimos años, se ha continuado esta tendencia ascendente en el uso de fuentes alternativas de producción energética. Así, a finales del año 2017, el uso del petróleo como fuente primaria de energía se redujo hasta un 40%, a la vez que el uso de fuentes renovables de energía no ha parado de aumentar.

En la Figura 10 se muestra la evolución de la estructura de producción energética en el sistema eléctrico peninsular desde el año 2013 al 2017. Se observa un aumento progresivo en el uso de las fuentes de energía renovables y de la cogeneración, así como una reducción de la producción energética a partir del carbón.

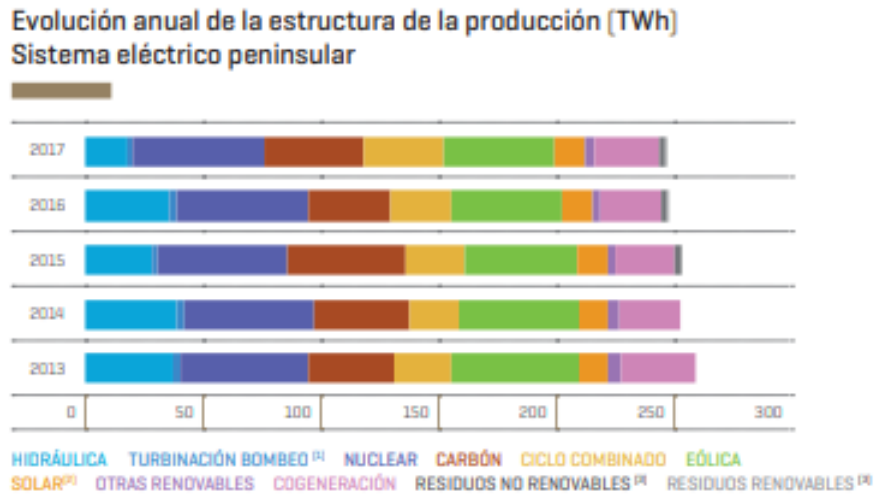


Figura 10: Evolución anual de la estructura de la producción energética en el sistema eléctrico peninsular en los años 2013-2017

Fuente: Informe del Sistema Eléctrico Español 2017, Red Eléctrica de España

Otro de los grandes problemas que presenta el sistema energético español es la gran dependencia energética que presenta y que, conforme a los datos extraídos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, se encontraba en el año 2014 en el 70,61%, frente a la media de la UE, que está en el 53% (Galdón Ruiz et al., 2016). Este hecho presenta una influencia muy negativa en nuestra balanza de pagos con el exterior y un alto coste económico para financiar esas importaciones. La Figura 11 muestra esta evolución de la dependencia energética en España, donde se observan las importaciones de energía con respecto al total de la energía consumida.

Evolución de la dependencia energética

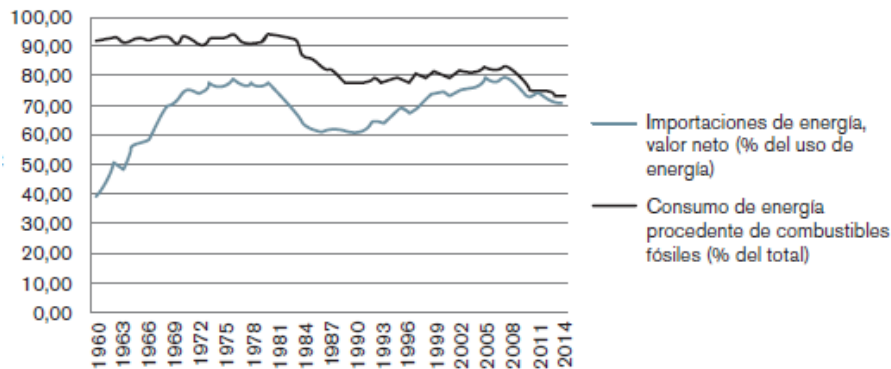


Figura 11: Evolución del porcentaje de importación de energía y el consumo de energía de combustibles fósiles desde el año 1960 hasta el 2014

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2016). Artículo: La dependencia energética en España por sectores y su impacto económico

Como se puede apreciar en la Figura 11:

- En cuanto al consumo de combustibles fósiles, se observan dos descensos: uno en torno al año 1990, cuando comienzan a entrar en funcionamiento las centrales nucleares y otro hacia el 2007, cuando comienzan a introducirse las energías renovables en nuestro sistema.
- En cuanto a la dependencia energética del exterior, hay una etapa de crecimiento desde el 1960 hasta 1976, por la sustitución del carbón nacional por derivados del petróleo que es necesario importar; luego sigue un descenso por la incorporación de fuentes de energía nuclear, otro aumento motivado por la implementación del gas natural en nuestro sistema y, hacia el 2007, un descenso de la dependencia energética por la incorporación de fuentes de energía renovables.

Por otro lado, España también cuenta con un mayoritario sistema energético centralizado, donde la gestión de la actividad de distribución de la energía desde los centros de generación hasta los puntos de consumo está distribuida geográficamente: Iberdrola se encarga de la parte central de la Península; Endesa de Aragón, Cataluña y Andalucía; y Gas Natural Fenosa se ocupa de Galicia y la Costa Cantábrica.

Con el objetivo de reducir la dependencia de la red eléctrica central y del exterior para el abastecimiento de los recursos fósiles, deberá modificarse el modelo de consumo de energía en los diferentes sectores, donde se dé prioridad a la utilización de fuentes energéticas de las que sea posible autoabastecerse. Con ello, se conseguirá disminuir la dependencia energética y se obtendrán considerables beneficios económicos, así como beneficios medioambientales y de estabilidad para nuestro país.

Así, con una correcta planificación a medio-largo plazo, se podrá reducir la dependencia energética, reducir la contaminación, conseguir precios de energía estables o mejorar la garantía de suministro; todo ello, sin que suponga un coste añadido para la economía del país.

5. NUEVOS ENFOQUES PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Con el propósito de conseguir una mayor eficiencia y optimizar el modelo energético actual con el fin de satisfacer toda la demanda al mínimo coste, idea que será la base del modelo de optimización que posteriormente se desarrollará, es necesaria la implantación de una serie de mejoras que se desarrollan a continuación.

5.1. Cogeneración

La cogeneración es una técnica de eficiencia energética, utilizada para aumentar el rendimiento de una instalación industrial. Su uso tiene principalmente dos objetivos:

- Optimizar el consumo de energía primaria, aumentando el rendimiento de los procesos de optimización de ésta.
- Aprovechar las llamadas ‘pérdidas’, dándoles una utilidad paralela a la principal.

Cogeneración procede del término ‘cogenerar’, que significa ‘producir a la vez’. Es un sistema de producción de energía muy eficiente, ya que se obtienen simultáneamente energía eléctrica y energía térmica a partir de la energía primaria, que se suele obtener mediante la combustión de recursos fósiles como el gas o el petróleo.

El principal elemento de la cogeneración es el conocido motor de gas o turbina. Para realizar un estudio de la energía producida en la cogeneración, se calculan primero las necesidades de calor para determinar el tipo y tamaño de las máquinas requeridas.

Los elementos comunes de los que consta cualquier máquina de cogeneración son los siguientes:

- La fuente primaria de la que obtenemos energía. Suele usarse el gas natural.
- El motor, encargado de convertir la energía térmica en energía mecánica. En función del tipo de planta que vaya a ser instalada y el uso futuro de la misma, se diferencian motores como turbinas de gas o de vapor o motores alternativos.
- Sistema de aprovechamiento de energía mecánica, que suele ser un alternador que convierte la energía mecánica en eléctrica. Otros sistemas de aprovechamiento de esta energía son los compresores o bombas, donde la energía mecánica se utiliza directamente.
- Sistema de aprovechamiento del calor generado. Esta función la pueden desempeñar: calderas, que recuperan el calor procedente de los gases de escape; secaderos o intercambiadores de calor.
- Sistema de refrigeración. Aunque los sistemas de cogeneración alcanzan elevadas eficiencias, siempre existe parte de energía que no será aprovechada y que tendrá que ser evacuada mediante torres de refrigeración. Esta función la desempeñan: aerocondensadores del gas o intercambiadores de calor.
- Sistema de tratamiento de las aguas, requerido tanto por el sistema de refrigeración como por el aprovechamiento de calor generado.
- Sistema de control, encargado de las instalaciones.
- Sistema eléctrico, que permita la alimentación de equipos auxiliares de la planta; es decir, la importación o exportación de energía eléctrica necesaria para mantener el balance energético. Este sistema, permite alimentar a la planta en casos de deficiencia eléctrica de la red externa. Así, estará disponible en el instante en que se restablezcan las condiciones de servicio.

En la Figura 12, se observa que, para obtener la misma energía útil final, en el caso de la generación convencional se requiere casi un 50% más de materia prima que en el caso de la producción a partir de la cogeneración.



Figura 12: Diferencias entre la cogeneración y la generación convencional

Fuente: Renovables Verdes (2016)

Es posible señalar algunas de las ventajas que proporciona la generación de energía a partir de la cogeneración, en comparación con formas de producción tradicionales:

- Alta eficiencia energética: a partir de una menor cantidad de energía, se obtiene una mayor cantidad de energía final útil.
- Ahorro de energía primaria.
- Eliminación de las pérdidas por transmisión en la red.
- Reducción de emisiones: se reduce la cantidad de contaminantes generados por cada unidad de producción al aumentar la eficiencia de los procesos.
- Seguridad del abastecimiento energético.
- Competitividad del mercado, debido a la reducción de los costes de producción.
- Generación distribuida de electricidad: se dejará de depender, en parte, de la red central de electricidad y de sus precios.

Los beneficios de la cogeneración son indiscutibles. Es la forma de generación de energía más inteligente para producir electricidad y calor al mismo tiempo y contribuye positivamente a la gestión del sistema eléctrico (dado su carácter descentralizado),

ahorrando hasta un 10% de los costes de transmisión de energía eléctrica. Por otro lado, la cogeneración ayuda a reducir las emisiones de CO₂, logrando rendimientos energéticos un 50% superiores a los obtenidos mediante la generación de electricidad convencional (De la Fuente Ortiz, 2016).

Este tipo de técnicas, que buscan alcanzar una mayor eficiencia, deben ser potenciadas, ya que incrementan la competitividad económica, al aprovechar mejor los recursos, y suponen una medida de respeto medioambiental, al producir más cantidad de energía a partir de la misma cantidad de materia prima y al devolver menos ‘pérdidas’ al medio ambiente.

5.2. Generación distribuida de energía

La cogeneración juega un papel fundamental en la descentralización de la producción de energía.

Este concepto de descentralización viene determinado por la implantación de modelos de generación distribuida de energía. La generación distribuida es aquella que se produce en lugares próximos a los puntos de consumo, sustituyendo así al modelo centralizado tradicional, caracterizado por la producción energética en lugares muy lejanos a los consumidores, lo que conlleva la necesidad de un robusto sistema de distribución de la energía y una alta dependencia de la red central.

Así, se trata de un campo de actuación donde se intentan aprovechar nuevas tecnologías para lograr un acercamiento de la producción energética, calor y electricidad, al consumidor. La idea en la que se basa es la generación de energía en puntos cercanos a los lugares de consumo, no implica usar determinadas tecnologías concretas.

Cabe mencionar que existe cierta disparidad de criterios en cuanto a los límites de potencia instalada en estos modelos de generación distribuida. El Departamento de Energía (DOE) de EEUU establece como límite inferior 1 KW y superior varias decenas

de MW. En España, el Régimen Especial permite un límite máximo de potencia de 50 MW. Por otro lado, EscoVale Consultancy (una consultoría de Reino Unido) establece como límite superior una potencia de hasta 100 MW, siendo este límite reducido a 10 MW en caso de instalaciones con fuentes de energía renovable como fuentes primarias (Fernercom, 2007).

En los últimos años, las energías renovables han sustituido a las fuentes térmicas fósiles como opción primaria, dando paso a la transición hacia un modelo descentralizado de generación, que permite un mejor aprovechamiento de las energías renovables, ya que pueden generarse en los momentos en que se den las condiciones necesarias, almacenar esa energía si no es necesaria y luego proporcionar esa energía en los instantes en que sea requerida.

Así, en este nuevo modelo energético, el almacenamiento de energía juega un papel fundamental. Desarrollar el almacenamiento de energía tiene dos funciones: que los sistemas de generación sigan a la demanda sin incrementar los costes de la red y apoyar el mayor desarrollo de la generación renovable no gestionable.

El objetivo es transferir energía de un momento en que la demanda es menor y el precio bajo, a otro instante en que el precio sea superior porque la demanda sea mayor.

Existen tecnologías de almacenamiento centralizado, cuyo propósito es construir una demanda lo más uniforme posible para los equipos de generación, de forma que las horas pico y valle no creen una demanda demasiado irregular para los mismos. Sin embargo, las tecnologías de almacenamiento descentralizado ofrecen un potencial muy superior a nivel de producción y consumo local en edificios, con impacto directo en la reducción de los costes de la energía al consumidor.

Es posible señalar ventajas significativas de la generación distribuida frente al modelo energético tradicional: disminución de los costes de distribución, al producir la energía en lugares próximos a los puntos de consumo, lo que conlleva además una reducción considerable de las pérdidas de energía; reducción de la dependencia de la red central; incremento de la fiabilidad de suministro, así como posibilidad de suministro en lugares de difícil acceso para las redes de distribución; menor emisiones de gases nocivos como

el CO2 gracias a la fácil integración en este modelo energético de formas alternativas a la quema de combustibles fósiles, como es la cogeneración o fuentes de energía renovables; fiabilidad de suministro energético en periodos de gran demanda gracias a la posibilidad de integrar elementos de almacenamiento energético.

Por otra parte, es posible afirmar que el modelo de generación distribuida de energía también resulta interesante para la planificación mayorista. Este sistema baja los requerimientos en el transporte y optimiza su utilización. Por su modularidad, aumenta la capacidad para adaptar la potencia que se instala a los requisitos de cada estación de transformación e implica una reducción de pérdidas en toda la red, aumentando así la eficiencia del sistema.

La escala de las instalaciones podría tener impacto económico, pero no determina el rendimiento de los equipos, sobre los que la operación es mínima gracias a su autonomía en caso de las fuentes renovables. Como aspecto negativo hay que señalar que, al aumentar la variabilidad, son necesarios unos pronósticos de demanda más precisos.

En este nuevo sistema energético que se plantea, no son apropiadas todas las fuentes de energía existentes. A continuación, se exponen equipos de generación y acumulación energética que pueden ser integrados en el modelo descentralizado:

1. Sistemas de generación energética

- **Energías renovables:** los equipos necesarios para producir este tipo de energías suelen ser instalados en un elevado número en grandes parques de producción energética; sin embargo, existen modificaciones que se pueden realizar para adaptar algunas de estas fuentes de energía al modelo que se va a desarrollar posteriormente. Dentro de este campo, las energías renovables más fácilmente adaptables al modelo descentralizado son las siguientes:

-Energía eólica: este tipo de energía renovable, que permite obtener energía eléctrica, suele producirse en grandes parques eólicos, controlados por las grandes centrales eléctricas y asociados al modelo energético

centralizado tradicional. Para su adaptación al modelo de generación distribuida, se están desarrollando los microgeneradores, que son pequeños aerogeneradores instalados en lugares cercanos a los puntos de consumo y con una capacidad de generación inferior a la de los aerogeneradores habituales.

-Energía solar fotovoltaica: es un tipo de energía renovable que permite obtener energía eléctrica a partir de la radiación solar, que incide en unos dispositivos llamados células fotovoltaicas. Además de las centrales fotovoltaicas asociadas al sistema de generación convencional, donde la energía eléctrica generada se entrega directamente a la red eléctrica, existe otra modalidad: sistemas fotovoltaicos, que están instalados en edificios, industrias o viviendas aisladas y que están conectados a la red, de forma que parte de la energía generada se usa para el autoabastecimiento energético de estos edificios y la otra parte se vende a la red. Esta última modalidad será la que resulte interesante considerar a la hora de integrarlo en el modelo de optimización que se planteará.

-Energía solar térmica: es un tipo de energía renovable que permite obtener energía térmica a partir de unos dispositivos llamados paneles solares térmicos. Gracias a los avances en la tecnología, es posible también adaptar esta fuente de energía a la generación distribuida del modelo descentralizado.

- **Equipos de cogeneración de energía (CHP)**, que permite obtener simultáneamente energía eléctrica y térmica y cuyo funcionamiento se ha descrito anteriormente. Estos equipos permiten producir energía donde se consume, lo que implica menores pérdidas por distribución de la misma.
- **Otros sistemas de producción energética tradicionales**, como puede ser el uso de la caldera para la producción de energía térmica.

2. **Sistemas de acumulación energética:** para elegir un equipo de acumulación u otro, se tendrán en cuenta parámetros como la vida útil, la potencia que es capaz de intercambiar o la capacidad de la que dispone para el almacenamiento de energía.

- **Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica**

-Sistemas de almacenamiento mecánico: almacenamiento de energía mediante el uso de aire comprimido o CAES ('Compressed Air Energy Storage'), donde la compresión se realizará en las horas valle (horas de bajo consumo), para producir energía en las horas pico; Volante de inercia o batería mecánica, que almacena energía en forma de energía cinética por medio de una rotación, que será liberada en el momento que sea necesario. En la Figura 13, aparece representado un volante de inercia real.

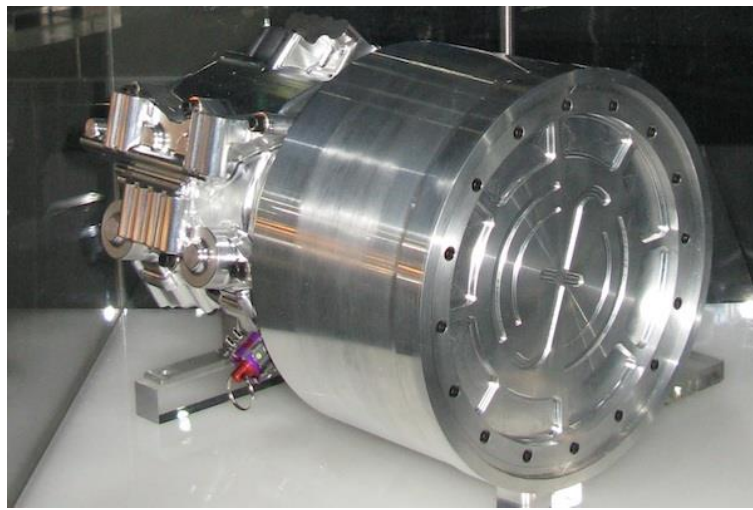


Figura 13: Ejemplo de un volante de inercia

-Sistemas de almacenamiento químico y electroquímico: pilas de combustible, sistemas de almacenamiento electroquímicos, que realizan la conversión energética química-eléctrica, como ocurre en las baterías, pero en este caso el combustible usado es reabastecido continuamente; las baterías, que suponen la principal forma de almacenamiento actual a pequeña escala y, cada vez más, también a gran escala, son células recargables que almacenan energía eléctrica gracias a reacciones químicas.

-Sistemas de almacenamiento eléctrico y electromagnético: supercondensadores o EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitors),

componentes electrónicos pasivos que permiten almacenar energía durante pequeños periodos de tiempo; SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), que se basa en cargar una bobina superconductora por completo, entonces la corriente se mantiene constante y la energía magnética permanece almacenada sin límite de tiempo.

- **Sistemas de almacenamiento de energía térmica:** se basan en métodos que incluyen desde refrigeración a través de acumulación de hielo hasta altas temperaturas. Consisten en la acumulación de energía en materiales que tengan esa propiedad y en la liberación de la misma de manera controlada.

-Almacenamientos térmicos superficiales: calor sensible, que consiste en el almacenamiento de energía mediante el aumento de temperatura de un sólido o líquido sin cambiar de fase y la energía almacenada es directamente proporcional a la temperatura del dispositivo; calor latente, que consiste en el almacenamiento de energía en un cambio de fase (fusión o vaporización) y con la solidificación o condensación se recupera esta energía, manteniendo siempre una temperatura constante.

-Almacenamiento térmico subterráneo o UTES (Underground Thermal Energy Storage), que permite almacenar energía durante largos periodos de tiempo, aunque es más habitual que se incorpore una de las dos formas previas de almacenamiento térmico en el modelo de generación distribuida.

Una vez descritos los equipos de generación y almacenamiento de energía que es posible incorporar en la implantación del modelo generalizado que se plantea, hay que estudiar la forma óptima de utilización de los mismos para hacer que estos dispositivos alcancen la eficiencia más alta posible y que permitan obtener retornos de las inversiones iniciales en periodos de tiempo suficientemente pequeños. Esto es lo que se pretende obtener a partir del modelo de optimización que se va a desarrollar.

Los avances en la generación distribuida van acompañados de la implantación de tecnologías de información y automatización en los niveles de distribución. Las Smart Grid o Redes Eléctricas Inteligentes, que se desarrollan a continuación, permiten el salto a una calidad de suministro superior.

5.3. Smart Grid

Las Smart Grid o Redes Eléctricas Inteligentes son redes de distribución eléctrica que permiten que la electricidad no vaya únicamente hacia un sentido, sino que es bidireccional. Se basa en la conjunción de las instalaciones, la monitorización de éstas y el envío y recepción de datos gracias a los sistemas de telecomunicaciones que existen en la actualidad. Además, en ellas se integran las acciones de generadores y consumidores de forma inteligente, de forma que se establece un servicio más económico, eficiente y sostenible.

En la Figura 14, se representa un esquema de una Smart Grid y se observa cómo este nuevo concepto de red eléctrica permite las conexiones entre todos los integrantes (generación, distribución y consumo) que forman parte del sistema eléctrico.

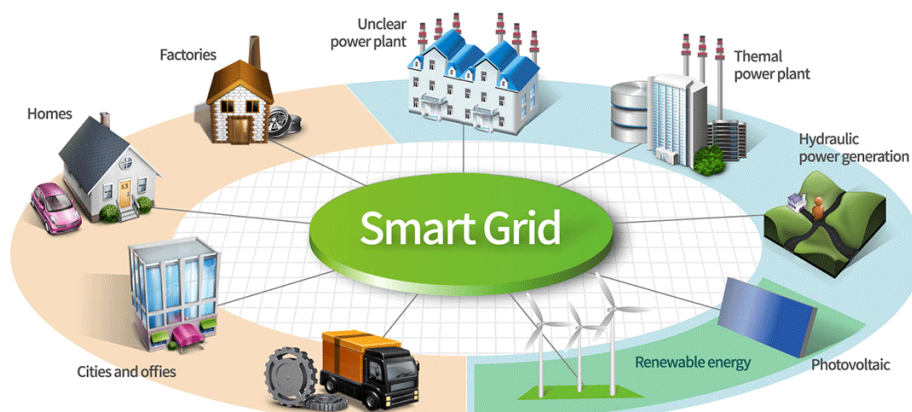


Figura 14: Esquema de una Smart Grid o Red Eléctrica Inteligente

Estas Redes Eléctricas Inteligentes colaboran en temas como la previsión de la demanda, la gestión inteligente de los consumos, la reducción de los tiempos sin servicio de suministro por fallos, una superior calidad de servicio, una medición automatizada de consumos, proporcionando información directa a clientes y prestadores, y la automatización de los procesos de facturación.

Las Smart Grid permiten la bidireccionalidad de energía, es decir, los consumidores tradicionales se convierten también en productores a pequeña escala, ya que pueden aportar el exceso de energía a la red, obteniendo beneficios económicos por ello.

Así, las redes de distribución de electricidad afrontan un fuerte cambio en su concepción en los últimos años. En el nuevo sistema eléctrico, sólo se generará la energía necesaria en cada instante, proviniendo de fuentes renovables en su mayor parte, y el usuario conocerá en cada momento lo que está consumiendo, así como lo que puede hacer para ahorrar en los consumos.

Por tanto, se comienza un proceso de transformación hacia un nuevo escenario en el que la red de distribución eléctrica se convierte en un actor importante, que se gestiona de forma activa; asimismo, el consumidor pasa a ser un integrante activo y racional, decidiendo cómo y cuándo consumir, atendiendo a criterios económicos y sostenibles.

Para lograr este cambio, es necesaria la implementación de Tecnologías de la Información y Comunicación, para que la red de distribución pase a ser también una red de transmisión de información, donde todos sus miembros podrán intercambiar información en tiempo real. Esto se lleva a cabo a través del uso de unos sensores, comunicaciones y control por computación, que permite un progreso en las funcionalidades de la red eléctrica.

Ante esta nueva propuesta, la Unión Europea está llevando a cabo estudios de I+D en Redes Eléctricas Inteligentes mediante el SET Plan, el cual engloba también las energías renovables (termosolar, fotovoltaica y eólica) que se van a incorporar posteriormente en nuestro modelo, así como la captura y almacenamiento de CO₂ (Barrantes, 2012).

5.4. Otras mejoras

Hasta el momento, se ha hablado de mejoras o nuevos enfoques que deben incorporarse en el modelo energético actual: el uso de sistemas como la cogeneración para incrementar la eficiencia de los equipos; la implantación de un nuevo modelo descentralizado de energía, como es la generación distribuida, para lograr una menor dependencia de la red central y obtener los potenciales beneficios anteriormente descritos; y finalmente, un nuevo concepto de red eléctrica, incorporando una transmisión de información entre todos los integrantes del sistema eléctrico.

Con todo ello, se lograría implantar un nuevo sistema eléctrico caracterizado por una alta eficiencia, una elevada fiabilidad y seguridad ante el consumidor y mucho más respetuoso con el medio ambiente.

Es posible destacar también algunas mejores que, aunque ya se han comentado de forma implícita, es importante señalar explícitamente.

Por un lado, hay que resaltar que resulta fundamental que se refuerce y se incentive la puesta en marcha de fuentes de energía que sean renovables. La implantación de las mismas requiere grandes inversiones iniciales. Por ello, es conveniente gestionar este tipo de energías renovables de forma óptima para recuperar estas inversiones en el menor tiempo posible. Con este objetivo, entran en escena los equipos de almacenamiento energético, que juegan un papel fundamental en el modelo energético que se plantea.

La importancia del almacenamiento energético radica en varios factores: la reducción de la variabilidad existente en la curva de demanda, el desarrollo de las Smart Grid y la incorporación de fuentes de energía renovables, obteniendo de éstas una eficiencia mucho mayor, al almacenar la energía excedente generada para que pueda ser usada cuando sea necesaria, ya que las fuentes de energía renovables tienen una producción imprevisible en muchas ocasiones. Aplanando la curva de demanda, se obtiene una mayor calidad de suministro, una mejor estabilidad del sistema, y se evita el sobredimensionamiento de éste, consiguiendo así un aumento de su eficiencia.

En definitiva, el almacenamiento de energía soluciona el problema del desfase existente entre la generación y el consumo de energía, debido principalmente a la aleatoriedad que existe en la producción de las fuentes de energía renovable y a los ciclos de consumo energético.

Además, como se ha mencionado, evita sobredimensionar el sistema por la existencia de los picos de consumo de energía que tienen lugar a lo largo del día y que tienen que ser cubiertos. Con ello, se consigue una mayor eficiencia de la producción.

6. MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

A continuación, se procede a describir detalladamente el modelo de optimización matemático desarrollado en el presente Trabajo Fin de Grado, cuyo objetivo es determinar de forma inteligente si lo óptimo es producir energía en cada uno de los dispositivos de generación y en cada instante o almacenar la energía producida en cada elemento de almacenamiento y en cada instante, partiendo de unos datos de demanda energética.

En este modelo, se van a integrar elementos de generación de energía, dispositivos de almacenamiento energético, así como la red central, de la que también va a ser posible obtener energía mediante su compra en los periodos donde el precio energético de la misma sea más bajo.

Se pretende cubrir toda la demanda de energía eléctrica y térmica con el menor coste total requerido para su producción en el sistema eléctrico que se maneja.

La Figura 15 muestra, en un grafo de dos *commodities* (o modos), los flujos de energía eléctrica y térmica en el sistema eléctrico que se va a plantear, así como los elementos de generación y almacenamiento energético presentes en el mismo.

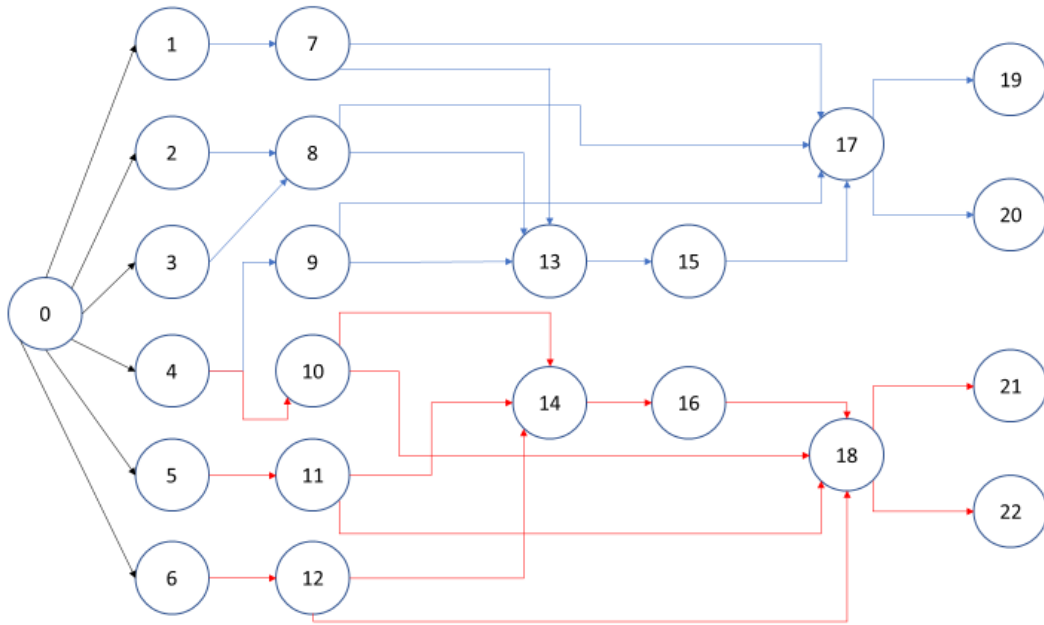


Figura 15: Gráfico de flujos de energía eléctrica y térmica

Nodo 0: Origen energético

Nodo 1: Red central

Nodo 2: Fuente renovable de energía eléctrica (fotovoltaica)

Nodo 3: Fuente renovable de energía eléctrica (eólica)

Nodo 4: Equipo de cogeneración (CHP)

Nodo 5: Fuente renovable de energía térmica

Nodo 6: Caldera

Nodo 7: Red eléctrica- Balance batería/instalación

Nodo 8: Sistemas de energía renovable eléctrica- Balance batería/instalación

Nodo 9: Producción eléctrica CHP- Balance batería/instalación

Nodo 10: Producción térmica CHP- Balance almacenamiento térmico/instalación

Nodo 11: Sistemas de energía renovable térmica- Balance almacenamiento térmico/instalación

Nodo 12: Caldera- Balance almacenamiento térmico/instalación

Nodo 13: Entradas a la batería

Nodo 14: Entradas al acumulador térmico

Nodo 15: Batería

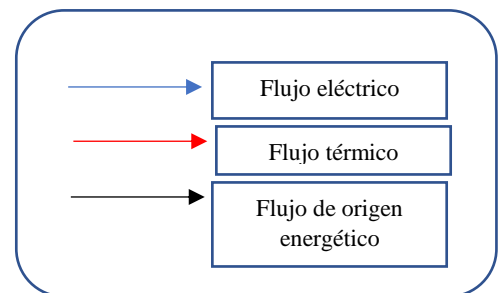
Nodo 16: Acumulador térmico

Nodo 17: Entradas a la instalación eléctrica

Nodo 18: Entradas a la instalación térmica

Nodo 19: Demanda eléctrica

Nodo 20: Exceso eléctrico



Nodo 21: Demanda térmica

Nodo 22: Exceso térmico

Se observa que las flechas de color azul indican flujos de energía eléctrica entre los distintos equipos, las de color rojo muestran flujos de energía térmica y las de color negro señalan flujos de origen de energía, cuyo significado será discutido en los próximos apartados.

6.1. Sistemas considerados

En este punto, se van a indicar los sistemas que forman parte del modelo energético que se propone. Se han elegido estos equipos por ser los más aptos para ser instalados en un modelo descentralizado de energía distribuida y por constituir un sistema energético bastante completo.

Este modelo energético es el resultado de la combinación de elementos de generación de energía eléctrica y térmica, elementos de almacenamiento de esta energía y la red central de energía eléctrica o grid.

Elementos de generación energética

- Fuente renovable de energía solar eléctrica: permitirá obtener energía eléctrica a partir de la energía solar recibida, que variará en cada periodo según la previsión de la misma para cada instante temporal.
- Fuente renovable de energía eólica eléctrica: permitirá obtener energía eléctrica a partir del movimiento de las aspas de los aerogeneradores (microgeneradores en el caso de la implantación de este tipo de energía en el modelo descentralizado). También serán necesarios unos datos de previsión en este caso.

- Fuente renovable de energía solar térmica: permitirá obtener energía térmica a partir de la radiación solar, por lo que serán necesarios unos datos de previsión acerca de qué cantidad de energía va a ser posible obtener a partir de esta fuente en cada instante temporal.
- Equipo de cogeneración (CHP): a partir de este dispositivo, se obtendrá simultáneamente energía eléctrica y térmica para satisfacer la demanda. También se dispondrá de una serie de datos técnicos relativos al funcionamiento de este equipo.
- Caldera: permitirá obtener energía térmica a partir del gas, un combustible fósil. Este es un elemento del sistema energético tradicional que ha sido incorporado al modelo de generación distribuida. En este caso, también serán necesarios unos datos técnicos que describan y caractericen el funcionamiento de este dispositivo.

Equipos de almacenamiento de energía

- Batería: elemento de almacenamiento de energía eléctrica. En el modelo se va a considerar una batería, por lo que serán necesarios datos técnicos relativos a cuánta energía es posible cargar o descargar en un periodo, así como cuál es la máxima cantidad de energía eléctrica que es capaz de almacenar.
- Acumulador térmico: elemento de almacenamiento de energía térmica. En el modelo se va a considerar un acumulador térmico, por lo que serán necesarios datos semejantes a los requeridos por parte de la batería.

Red central de energía eléctrica o grid

Como ya se ha comentado, en el modelo también participa la red central de energía eléctrica, de la que será posible comprar energía en los periodos tarifarios de menor coste, pudiendo adquirirla y almacenarla en la batería para un uso posterior o ser utilizada directamente para satisfacer la demanda. Por otra parte, también será posible vender el excedente de energía eléctrica a la red con un precio de venta que será inferior al de

compra; en caso de que no fuese así, se crearía un negocio con la compra y venta de energía eléctrica a la red.

En apartados posteriores se detallarán todos los datos técnicos y económicos requeridos para ejecutar el modelo de optimización del presente Trabajo Fin de Grado.

6.2. Nomenclatura utilizada

Se procede a detallar todos los datos y variables que van a ser utilizados en nuestro modelo.

- Por un lado, se definirán los datos, que son los parámetros de entrada del modelo y que determinarán el resultado obtenido. Algunos de estos parámetros irán cambiando en los diferentes escenarios que se van a estudiar.
- Por otro lado, se definirán las variables, que son las salidas resultado de la ejecución del modelo y que irán adquiriendo distintos valores, los cuales se irán analizando.

En primer lugar, se van a indicar los conjuntos que aparecen en el modelo:

- **J**: cada $j \in J$ se referirá a cada uno de los 22 nodos del grafo de flujos energéticos. $J=1,2,\dots,22$ (hay 22 nodos). Un grafo está compuesto por un conjunto de nodos y un conjunto de arcos, los cuales se definen a continuación.
- **A**: conjunto que hace referencia a los arcos existentes en el grafo conectando los nodos de la Figura 15 detallada anteriormente, donde aparecen reflejados todos los flujos de energía eléctrica y térmica existentes en el modelo. Por tratarse de arcos, este conjunto viene determinado por el uso de dos subíndices: el primero indica origen del flujo energético y el segundo, el nodo destino de ese flujo energético. Se usará el subíndice 'm' para referirse al flujo procedente de otro

nodo previo hacia 'j'; y el subíndice 'n', para referirse al flujo procedente de 'j' hacia un nodo posterior del grafo.

- **K**: conjunto integrado únicamente por dos componentes, que especifica si se trata de un flujo de energía eléctrica (k=1) o de energía térmica (k=2).
- **T**: conjunto de los periodos temporales considerados; $t=1,2,...T$. El horizonte temporal suele ser de un día y, considerando periodos de tiempo de 15 minutos, se obtiene que un día tiene 96 periodos de 15 minutos, por lo que T sería 96; no obstante, en el escenario de prueba inicial se considerará un horizonte temporal de 10 periodos de 15 minutos.

Una vez detallados los conjuntos asociados a determinados subíndices que van a ser usados en la nomenclatura de las variables y datos del modelo y que permiten describir el modelo de forma compacta, se procede a presentar estas variables y parámetros, acompañados de una breve definición de los mismos.

La Tabla 1 muestra las variables usadas en el modelo, así como una breve explicación y unidad de medida de cada una.

Tabla 1: Variables del modelo

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
$X_{0,j,t}$ (KWh) j $= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; $t = \{1 \dots T\}$	Flujo de energía entrante en el sistema en el periodo 't' y procedente de la red (j=1), de la cogeneración (j=4), de la caldera (j=6) o de fuentes renovables de energía (j=2,3,5).
$X_{i,j,k,t}$ (KWh), $(i, j) \in A$; $k = \{1, 2\}$; $t = \{1 \dots T\}$	Variable de flujo entre los nodos 'i' y 'j' del tipo de energía 'k' en el periodo 't'.

$I_{j,t}$ (KWh) $j = \{15, 16\};$ $t = \{0, 1 \dots T\}$	Energía almacenada en el acumulador energético 'j' en el periodo 't'. Podría ser considerada una variable auxiliar, ya que no influye de forma directa en el coste total de producción energética. Se define desde t=0, ya que en la restricción de balance energético en la batería y el acumulador interviene la variable $I_{j,t-1}$; dicha restricción para t=1 requiere del valor de la variable $I_{j,0}$ (carga inicial), que se igualará a una constante definida en una de las tablas que siguen a continuación.
$Exc_{k,t}$ (KWh) $k = \{1, 2\};$ $t = \{1 \dots T\}$	Variable de exceso de energía del tipo 'k' en el periodo 't'.
$\delta_{j,t}$ (Adimensional) $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 15, 16\};$ $t = \{1 \dots T\}$	Variable binaria que determina si el sistema 'j' está en funcionamiento en el periodo 't'.

Serán las variables $\delta_{j,t}$ y $X_{0,j,t}$ ($j=1,2,3,4,5,6$; como se ha definido en la tabla 1) las que estarán asociadas a un coste fijo de funcionamiento y a un coste variable por unidad producida respectivamente. Asimismo, también influirán en el coste total:

- Las variables de entrada de flujo energético ($X_{i,j,k,t}$) en la batería y acumulador, a las que se asociará un coste variable por unidad de energía.
- La variable $Exc_{k,t}$, en concreto para $k=1$ (energía eléctrica), ya que ese exceso de energía se podrá vender a la red, disminuyendo así el coste de la producción energética.

Por tanto, todos ellos determinarán el coste total de la energía producida por el modelo energético que se propone.

La Tabla 2 refleja los datos o parámetros económicos usados en el modelo, así como una breve explicación y unidad de medida de cada uno.

Tabla 2: Datos económicos del modelo

DATOS ECONÓMICOS	DESCRIPCIÓN
$c_{j,t}$ (€/KWh) j $= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 15, 16\}$; $t = \{1 \dots T\}$	Coste variable asociado a la energía recibida o proporcionada por la fuente o acumulador energético 'j' en el periodo 't'.
$f_{j,t}$ (€) $j = \{2, 3, 4, 5, 6, 15, 16\}$; $t = \{1 \dots T\}$	Coste fijo asociado al funcionamiento de la fuente de energía o acumulador energético 'j' en el periodo 't'.
pv_t (€/KWh) $t = \{1 \dots T\}$	Precio de venta de la energía eléctrica a la red en el periodo 't'.

En la Tabla 3, aparecen reflejados los datos técnicos relativos a las limitaciones y características de funcionamiento de los equipos presentes en el sistema energético.

Tabla 3: Datos técnicos del modelo

DATOS TÉCNICOS	DESCRIPCIÓN
CS_j (KWh) j $= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 15, 16\}$	Cota superior que limita la energía que se puede obtener de la red, de los equipos de generación y de los acumuladores energéticos, diferenciados por el subíndice 'j'. Este dato viene dado indirectamente, ya que se

	tendrán que multiplicar las potencias máximas permitidas en cada equipo por el periodo de tiempo considerado para obtener unidades de energía.
$I_{j,0}$ (KWh) $j = \{15, 16\}$	Energía almacenada por el acumulador energético 'j' en el instante inicial.
$I_{max j}$ (KWh) $j = \{15, 16\}$	Capacidad máxima de almacenamiento de energía del acumulador 'j'.
$PCS_4 = PCS_6$ (KWh/Nm3)	Poder calor superior del gas natural utilizado por el equipo de cogeneración y la caldera
$PCI_4 = PCI_6$ (KWh/Nm3)	Poder calorífico inferior del gas natural utilizado por el equipo de cogeneración y la caldera
ρ_4 (adimensional)	Ratio térmico/eléctrico del equipo de cogeneración
$\eta_{j,t}$ (adimensional) $j = \{2, 3, 4, 5, 6, 15, 16\};$ $t = \{1 \dots T\}$	Rendimiento del sistema 'j' en el instante 't'.

La Tabla 4 muestra los datos asociados a la previsión de las fuentes de energía renovables, así como la demanda eléctrica y térmica recibida de los consumidores dependientes de este sistema energético.

Tabla 4: Datos de demanda eléctrica y térmica del modelo

DATOS DE DEMANDA	DESCRIPCIÓN
$Prev_{j,t}$ (KWh) $j = \{2,3,5\};$ $t = \{1 \dots T\}$	Previsión de energía que se puede obtener de la fuente renovable de energía 'j' en el periodo 't'.

$d_{k,t}$ (KWh) $k = \{1, 2\};$ $t = \{1 \dots T\}$	Demanda de energía del tipo 'k' que tiene que ser satisfecha en el sistema en el instante 't'.
---	--

6.3. Consideraciones previas

Para diseñar y resolver el modelo que se plantea, se tendrán en cuenta una serie de consideraciones:

-La legislación española prohíbe la bidireccionalidad de la energía que sí existe en otros países de Europa; esta bidireccionalidad permite que, en horas en las que se produzca una cantidad de energía mayor que la consumida, se venda esta energía y pase a la red eléctrica. En España, sin embargo, este excedente de energía se regalaría al sistema eléctrico, lo que provoca que la instalación se amortice en períodos de tiempo muy superiores. No obstante, en el modelo de optimización que se plantea, se va a suponer que existe la posibilidad de esta bidireccionalidad de flujos de energía, como ocurre cada vez en más países de Europa. Por ello, los precios de venta de energía a la red serán distintos de cero. Los valores de estos precios de venta deben ser inferiores al precio de compra para que sea algo coherente.

-En el modelo de optimización únicamente se van a considerar los costes fijos de funcionamiento de los equipos y los costes variables de producción por cada KWh. No se van a considerar los siguientes costes:

- Costes de activación de los equipos en un periodo concreto.
- Costes de arranque y de parada de los dispositivos.
- Coste fijo de suministro de gas; es un coste 'hundido' que siempre existe y no es dependiente de que el equipo esté en funcionamiento o no.
- Coste de penalización por el exceso térmico. No se va a considerar, ya que esta penalización únicamente está asociada al exceso térmico en el ciclo combinado, no al de la caldera, por lo que es complicado tenerlo en cuenta de forma precisa.

-Las variables que reflejan los flujos de origen de energía ($X_{0,j,t}$) realmente son variables o datos según el caso concreto, ya que su significado no es el mismo en todas las ocasiones:

- $X_{0,2,t}$, $X_{0,3,t}$ y $X_{0,5,t}$: podrían haber sido consideradas datos directamente, ya que coinciden exactamente con la previsión de energía que se va a obtener de cada una de las tres fuentes de energía renovable que participan en el modelo; esto se expresará mediante unas restricciones de igualdad que se mostrarán posteriormente. El motivo por el que se han considerado variables es sencillamente la forma de declarar la función objetivo que interpreta el optimizador Gurobi: los coeficientes de la función objetivo se detallan al declarar en el código aquella variable a la que multiplican en esta función de minimización de costes; así, no sería posible incorporar el coste variable de las fuentes renovables de energía en caso de considerar $X_{0,2,t}$, $X_{0,3,t}$ y $X_{0,5,t}$ datos directamente.
- $X_{0,1,t}$, $X_{0,4,t}$ y $X_{0,6,t}$: son variables; en el primer caso, se trata de la energía que se compra a la red central o grid; en los casos segundo y tercero, se trata de la energía inicial que se tiene que producir y que no está afectada por el rendimiento de los equipos (cogeneración y caldera).

En cualquier caso, se tendrá en cuenta el valor de estas $X_{0,j,t}$ para obtener, a partir de estos flujos, el coste total de la producción energética requerida.

-Por último, señalar que la unidad que se va a usar en todas las restricciones del modelo es el KWh, una unidad de energía. Por ello, en algunos casos será necesario multiplicar ciertos datos, como la potencia máxima permitida de algún equipo, por el periodo de tiempo considerado para pasar unidades de potencia a unidades de energía.

6.4. Restricciones técnicas y balances energéticos

Se va a plantear un modelo lo más compacto posible, intentando agrupar en unas pocas restricciones toda esta información: ecuaciones de balances energéticos, restricciones en las que los flujos de energía se ven afectados por los rendimientos de los equipos, los límites superiores de los dispositivos de producción, así como la capacidad máxima de los equipos de almacenamiento de energía eléctrica (batería) y térmica (acumulador térmico).

Para el desarrollo de este modelo compacto, ha sido necesario el uso de subíndices que diferencien los distintos datos y variables.

A continuación, se procede a presentar las restricciones del modelo por separado, acompañadas de una breve explicación de su significado.

- Ecuaciones de balance de flujos de energía entre los nodos para los dos tipos de energía (k=1 eléctrica y k=2 térmica) en cada periodo de tiempo $t \in T$.

$$\sum_{m:(m,j) \in A} x_{mjk t} - \sum_{n:(j,n) \in A} x_{jnkt} = \quad (1)$$

$$= \begin{cases} d_{1t} & \text{si } j = 19; d_{2t} & \text{si } j = 21; Exc_{1t} & \text{si } j = 20; Exc_{2t} & \text{si } j = 22; \\ 0 & \text{if } j = 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18 \end{cases}$$

$$\forall j = 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22 ; \forall k = 1, 2 ; \forall t \in T$$

No se consideran los nodos $j= 2, 3, 4, 5, 6$, ya que resultarían unas ecuaciones de balance erróneas, al no tener en cuenta los rendimientos de los equipos de generación energética. Por el mismo motivo, tampoco se consideran los nodos $j=15, 16$, correspondientes a los equipos de almacenamiento energético (batería y acumulador térmico), cuyas ecuaciones de balance serán descritas en la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que pueden

almacenar distinta cantidad de energía en cada periodo (determinado por $I_{j,t}$), así como el rendimiento de estos dispositivos.

Por otro lado, en las ecuaciones de balance de los nodos $j=19, 20, 21, 22$, la parte izquierda de la ecuación sólo contará con el primer término (el segundo no existe o es '0', al no haber más nodos a continuación) y la parte derecha de la ecuación coincidirá con los datos de demanda o variables de exceso correspondientes, según sea el caso.

- Ecuaciones de igualdad donde se asigna a las variables $X_{0,2,t}, X_{0,3,t}$ y $X_{0,5,t}$ el valor de la previsión de cada una de las tres fuentes de energía renovable presentes en el modelo ($j=2$: solar fotovoltaica, $j=3$: eólica, $j=5$: solar térmica).

$$X_{0,j,t} = Prev_{j,t}, \forall j = 2, 3, 5; \forall t \in T \quad (2)$$

- Ecuaciones de balance de flujos de energía en los nodos correspondientes a la batería y el acumulador térmico en cada periodo de tiempo $t \in T$.

$$x_{j-2,j,k,t} \cdot \eta_{j,t} + I_{j,t-1} = x_{j,j+2,k,t} + I_{j,t}, \forall j = 15, 16; \forall k = 1, 2; \forall t \in T \quad (3)$$

$$\text{y con } I_{j,0} \text{ datos, } \forall j = 15, 16$$

Esta ecuación de balance afirma que el flujo energético del tipo 'k' recibido por el elemento de almacenamiento 'j' en el periodo $t \in T$, afectado por el rendimiento de estos equipos, más la cantidad de energía almacenada en el instante anterior, es igual al flujo energético que sale del dispositivo más la cantidad de energía que queda almacenada en ese mismo periodo.

- Restricciones que muestran la relación entre el flujo de energía entrante en las fuentes de energía renovables (que, como se ha comentado, va a coincidir exactamente con los datos de previsión energética disponibles) y la energía realmente producida a partir de estas fuentes, que viene afectada por los rendimientos de los equipos generadores de energía eléctrica y térmica.

$$x_{jnk t} = x_{0j t} \cdot \eta_{j t}, \forall j = 2, 3, 5; \forall k = 1, 2; \forall t \in T \quad (4)$$

- Las restricciones (5) y (6) que siguen a continuación reflejan las relaciones matemáticas existentes en el equipo de cogeneración para producir simultáneamente energía eléctrica y térmica.

$$x_{491 t} = x_{04 t} \cdot \frac{PCS_4}{PCI_4} \eta_{4 t}, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

La restricción (5) muestra cómo se obtiene la energía eléctrica efectiva en el equipo de cogeneración a partir del consumo del gas, que depende del flujo de combustible entrante, así como de sus valores de PCS y PCI y del rendimiento de este elemento de generación.

$$x_{4102 t} = x_{04 t} \cdot \rho_4, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

La restricción (6) refleja la energía térmica efectiva que se obtiene en cada periodo a partir del equipo de cogeneración.

- La ecuación (7) es semejante a la ecuación (5) y representa la cantidad de energía térmica efectiva que se produce en la caldera en cada periodo de tiempo 't'.

$$x_{6,12,2,t} = x_{06t} \cdot \frac{PCS_6}{PCI_6} \eta_{6t}, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

- Las restricciones compactas (8), (9) y (10) modelan la activación del sistema 'j' si dicho sistema está produciendo energía, activando la variable binaria δ_{jt} . Además, limitan la cantidad de energía que es posible obtener de cada equipo generador o de almacenamiento en cada periodo 't'.

$$x_{0jt} \leq CS_j \cdot \delta_{jt}, \quad \forall j = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \forall t \in T \quad (8)$$

En la restricción (8), la CS_j representa la energía máxima manejable por cada equipo de generación ($j=2, 3, 4, 5, 6$), obtenida mediante la multiplicación de la potencia máxima de estos equipos y el periodo temporal considerado. En el caso de la red central de energía eléctrica ($j=1$), para el cálculo de esta multiplicación se considerará la potencia máxima contratada.

En las restricciones (9) y (10) que vienen a continuación, esta CS_j es el resultado de la multiplicación de la potencia máxima de carga (o descarga; por el hecho de ser consideradas con el mismo valor, tanto el flujo de energía entrante en estos dispositivos, como el flujo de energía saliente, estarán limitados por la misma cota superior CS_j) y el periodo temporal considerado.

$$x_{j-2,j,k,t} \leq CS_j \cdot \delta_{jt}, \quad \forall j = 15, 16; \forall t \in T \quad (9)$$

$$x_{j,j+2,k,t} \leq CS_j \cdot \delta_{jt}, \quad \forall j = 15, 16; \forall t \in T \quad (10)$$

Es posible distinguir dos casos en el comportamiento de estas ecuaciones:

- Si el dispositivo generador o almacenador está en funcionamiento en un determinado periodo $t \in T$ ($\delta_{jt} = 1$), estas restricciones servirán para limitar la cantidad de energía que es posible obtener de ellos.
- Si el dispositivo generador o almacenador está parado, es decir, no está en funcionamiento en un determinado periodo $t \in T$ ($\delta_{jt} = 0$), estas restricciones servirán para indicar que los flujos entrantes a los mismos serán nulos.
- La restricción (11) limita la cantidad de energía que puede ser almacenada en los dispositivos acumuladores (batería y acumulador térmico) en cada periodo temporal.

$$I_{j,t} \leq I_{\max j}, \quad \forall j = 15, 16; \quad \forall t \in T \quad (11)$$

- En la restricción (12), se fijan a '0' las variables binarias que indican el funcionamiento de los equipos de generación o almacenamiento que se decida que no van a intervenir en cada escenario concreto.

$$\delta_{jt} = 0, \quad \forall j = \text{equipos que no intervienen en un escenario}; \quad \forall t \in T \quad (12)$$

6.5. Función objetivo

En este apartado, se va a presentar la función objetivo del modelo de optimización de este Trabajo Fin de Grado. Lo que se persigue obtener con este objetivo representado en la expresión matemática (13) es una minimización del coste total que resulta de satisfacer

toda la demanda eléctrica y térmica procedente de los usuarios del sistema eléctrico considerado.

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{\substack{j=2,3,4, \\ 5,6,15,16}} f_{jt} \delta_{jt} + \sum_{\substack{j=1,2,3,4, \\ 5,6}} c_{jt} x_{0jt} + \sum_{\substack{j= \\ 15,16}} c_{jt} x_{mjkt} - pv_t \cdot Exc_{1t} \right) \quad (13)$$

Como se observa, se pretende minimizar la función resultado de la suma, para cada periodo $t \in T$ de los siguientes términos:

- Primer término ($\sum_{\substack{j=2,3,4, \\ 5,6,15,16}} f_{jt} \delta_{jt}$): coste fijo de funcionamiento de cada equipo de generación o almacenamiento 'j'. Este coste será imputado en cada periodo temporal en caso de que el equipo correspondiente se encuentre en marcha en ese periodo.
- Segundo término ($\sum_{\substack{j=1,2,3,4, \\ 5,6}} c_{jt} x_{0jt}$): coste variable imputado por cada unidad de energía (1KWh) obtenida de la red (j=1) o producida por los distintos equipos de generación (j=2,3,4,5,6) en el periodo considerado.
- Tercer término ($\sum_{\substack{j= \\ 15,16}} c_{jt} x_{mjkt}$): coste variable imputado por cada unidad de energía (1 KWh) que pasa a ser almacenada en la batería (j=15) o en el acumulador térmico (j=16).
- Cuarto término ($pv_t \cdot Exc_{1t}$): este término aparece restando en la función objetivo, ya que disminuye el coste total del sistema eléctrico considerado mediante la venta a la red central del exceso de energía eléctrica en cada periodo 't'. Cada unidad de energía (1 KWh) será vendida a la red con el precio de venta pv_t , que dependerá del periodo tarifario concreto del día.

6.6. Modelo completo

Una vez detallados por separado todos sus elementos, se procede a mostrar el modelo matemático de optimización completo, compuesto por la función objetivo que se pretende minimizar, una serie de restricciones técnicas y de balance y las especificaciones de las variables.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{\substack{j=2,3,4, \\ 5,6,15,16}} f_{jt} \delta_{jt} + \sum_{\substack{j=1,2,3,4, \\ 5,6}} c_{jt} x_{0jt} + \sum_{\substack{j= \\ 15,16}} c_{jt} x_{mjkt} - p v_t \cdot Exc_{1t} \right)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{m:(m,j) \in A} x_{mjkt} - \sum_{n:(j,n) \in A} x_{jnkt} = & \quad (1) \\ = & \begin{cases} d_{1t} & \text{si } j = 19; d_{2t} & \text{si } j = 21; Exc_{1t} & \text{si } j = 20; Exc_{2t} & \text{si } j = 22; \\ 0 & \text{if } j = 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\forall j = 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22; \forall k = 1, 2; \forall t \in T$$

$$X_{0,j,t} = Prev_{j,t}, \forall j = 2, 3, 5; \forall t \in T \quad (2)$$

$$x_{j-2,j,k,t} \cdot \eta_{j,t} + I_{j,t-1} = x_{j,j+2,k,t} + I_{j,t}, \forall j = 15, 16; \forall k = 1, 2; \forall t \in T \quad (3)$$

y con $I_{j,0}$ datos, $\forall j = 15, 16$

$$x_{jnkt} = x_{0jt} \cdot \eta_{jt}, \forall j = 2, 3, 5; \forall k = 1, 2; \forall t \in T \quad (4)$$

$$x_{491t} = x_{04t} \cdot \frac{PCS_4}{PCI_4} \eta_{4t}, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$x_{4102t} = x_{04t} \cdot \rho_4, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$x_{6,12,2,t} = x_{06t} \cdot \frac{PCS_6}{PCI_6} \eta_{6t}, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$x_{0jt} \leq CS_j \cdot \delta_{jt} , \quad \forall j = 1,2,3,4,5,6 ; \forall t \in T \quad (8)$$

$$x_{j-2,j,k,t} \leq CS_j \cdot \delta_{jt} , \quad \forall j = 15,16 ; \forall t \in T \quad (9)$$

$$x_{j,j+2,k,t} \leq CS_j \cdot \delta_{jt} , \quad \forall j = 15,16 ; \forall t \in T \quad (10)$$

$$I_{j,t} \leq I_{\max j} , \quad \forall j = 15,16 ; \forall t \in T \quad (11)$$

$$\delta_{jt} = 0, \quad \forall j = \text{equipos que no intervienen en un escenario} ; \forall t \in T \quad (12)$$

Especificaciones de las variables:

$$x_{0jt}, x_{ijkt}, Exc_{kt}, I_{jt} \geq 0, \quad \forall j \in J ; \forall k = 1,2 ; \forall t \in T$$

$$\delta_{jt} = (0,1) \quad \forall j = 1,2,3,4,5,6,15,16 ; \forall t \in T$$

Mediante la resolución de este modelo, se intenta lograr una gestión óptima del proceso de producción, almacenamiento y consumo para satisfacer la demanda de energía eléctrica y térmica del sistema energético considerado, caracterizado por tratarse de un modelo descentralizado de generación distribuida de energía.

7. RESOLUCIÓN DEL MODELO MEDIANTE EL SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN GUROBI

Para la implementación del modelo matemático que se ha desarrollado anteriormente, se utiliza el lenguaje Python y se optimiza a través del software comercial Gurobi.

Python es un lenguaje de programación que funciona, entre otros, en Windows, MacOS o Linux, que utiliza un código sencillo y cuya filosofía de diseño se basa en la claridad de lectura de su código.

Los archivos de python tienen la extensión .py y son archivos de texto interpretados por el compilador. Para que sea posible ejecutar programas en Python, es necesario un intérprete de este lenguaje, así como el código que se desee ejecutar. Por ello, en primer lugar, hay que instalar una distribución de Python gratuita llamada Anaconda. Para la resolución del modelo del presente trabajo, se ha instalado Anaconda 5.2 para la versión de Python 2.7. Una vez instalada ‘Anaconda Distribution’, es posible encontrar varios intérpretes de este lenguaje de programación; para la implementación del modelo descrito ha utilizado Spyder (‘a Scientific Python Development Environment’, incluido en la distribución Anaconda).

Por otro lado, para resolver se ha usado el optimizador Gurobi, un software comercial del que se ha obtenido una licencia académica que permite su uso sin importantes limitaciones.

Se ha programado todo el código en Spyder utilizando el lenguaje Python y, posteriormente, se ha hecho una llamada a Gurobi para la optimización del modelo. Para ello, es necesario conectar Gurobi con Anaconda previamente. Así, desde un terminal de Anaconda se ejecutan los siguientes comandos:

- Para añadir el canal de Gurobi:

```
conda config --add channels http://conda.anaconda.org/gurobi
```

- Para instalar el paquete de Gurobi:

```
conda install gurobi
```

Finalmente, para terminar con los aspectos relativos a la instalación, hay que indicar que la distribución de Anaconda incluye una serie de paquetes que permiten desempeñar determinadas funciones; no obstante, en algunas ocasiones será necesario instalar determinados paquetes que no aparecen de forma predeterminada y que son útiles para realizar ciertas tareas. Por ejemplo, Python permite la lectura de archivos Excel y la escritura sobre ellos; para ello, son necesarios dos paquetes que no se instalan automáticamente al instalar la distribución Anaconda. Para instalarlos, se ejecuta en la ventana cmd de Windows el siguiente comando:

- Para la lectura de archivos Excel:

```
pip install xlrd
```

- Para la escritura sobre archivos Excel:

```
pip install xlwt
```

A continuación, se procede a detallar el proceso de implementación del modelo matemático en lenguaje Python a través del intérprete Spyder incluido en la distribución Anaconda.

Documento Excel con todos los valores de los parámetros y variables que va a ser utilizado desde Spyder

Con el fin de sistematizar el proceso de lectura de los datos del modelo, así como la escritura de los valores de las variables que optimizan la función objetivo y que permitirán hacer gráficas y analizar los resultados obtenidos, se ha creado un documento Excel.

Este documento contiene:

- Por un lado, los parámetros del modelo. Como se va a explicar a continuación, es posible escribir unas líneas de código que ejecutan la acción de leer los valores de estos datos. Así, preparando un Excel similar para cada escenario y cambiando únicamente el valor de los datos que varíen en cada caso en las celdas correspondientes, se simplificará significativamente el trabajo.
- Por otro lado, el nombre de las variables cuyo valor resulta de interés en el estudio particular de los distintos escenarios. Inicialmente, dispondrán de unas celdas vacías en dicho Excel de lectura de datos y, una vez que se ejecute el programa correspondiente a un escenario concreto, se creará otro documento Excel con los datos iniciales, pero también con los valores de las variables en las celdas que corresponda. Esto se llevará a cabo media unas líneas de código sencillas, como se verá a continuación.

Las Figura 16, Figura 17 y Figura 18 muestran los datos disponibles en una misma hoja del documento Excel del que se parte inicialmente. Se van a mostrar los datos correspondientes a un escenario con horizonte de análisis de 10 periodos, el cual se va a corresponder con el primer caso sencillo que se va a estudiar en el siguiente apartado.

Grid	Ren. Sol. Foto.	Ren. Eol.	CHP	Ren. Sol. Term.	Caldera	Batería	Acumulador
SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

CS_J	CS_1	CS_2	CS_3	CS_4	CS_5	CS_6	CS_15	CS_16
	100	125	125	137,5	125	375	150	150

PCS_4	PCS_6	PCI_4	PCI_6	p_4
11,986	11,986	10,81	10,81	0,5

n_{i,j,t}	n_{i,2,t}	n_{i,3,t}	n_{i,4,t}	n_{i,5,t}	n_{i,6,t}	n_{i,15,t}	n_{i,16,t}
	0,15	0,4	0,406	0,4	0,9	0,9	0,9

I_{j,0}	I_{15,0}	I_{16,0}
	5000	2500

I_{max,j}	I_{max,15}	I_{max,16}
	5000	2500

Figura 16: Datos técnicos del documento Excel de lectura

c_{j,t}	c_{2,t}	c_{3,t}	c_{4,t}	c_{5,t}	c_{6,t}	c_{15,t}	c_{16,t}
	0,000002	0,000002	0,05	0,000003	0,07	0,01	0,01

f_{j,t}	f_{2,t}	f_{3,t}	f_{4,t}	f_{5,t}	f_{6,t}	f_{15,t}	f_{16,t}
	0,2	0,4	1,75	0,3	1	0,4	0,4

Figura 17: Datos económicos del documento Excel de lectura

	DATOS						
PERIODOS	d_(1,t)	d_(2,t)	c_(1,t)(grid)	pv_t	X_(0,2,t)	X_(0,3,t)	X_(0,5,t)
1	155	100	0,063615	0,03	0	5	0
2	150	100	0,063615	0,03	0	5	0
3	152	100	0,063615	0,03	0	10	0
4	155	105	0,132674	0,06	10	10	10
5	160	105	0,132674	0,06	20	15	20
6	162	105	0,132674	0,06	20	15	20
7	162	105	0,132674	0,06	20	15	20
8	160	100	0,132674	0,06	10	10	10
9	158	100	0,063615	0,03	0	5	0
10	154	100	0,063615	0,03	0	5	0

Figura 18: Datos de demanda, coste y precio de venta en el grid y previsión de las fuentes renovables de energía

La Figura 19 refleja una parte de las variables cuyos valores van a ser trasladados desde el programa, tras ser ejecutado, al documento Excel para el posterior estudio de los mismos.

VARIABLE: $\delta_{(j,t)}$							
$\delta_{(1,t)}$	$\delta_{(2,t)}$	$\delta_{(3,t)}$	$\delta_{(4,t)}$	$\delta_{(5,t)}$	$\delta_{(6,t)}$	$\delta_{(15,t)}$	$\delta_{(16,t)}$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Figura 19: Ejemplo de variables cuyo valor se quiere extraer de los resultados del modelo

Además de los valores de las variables binarias $\delta_{j,t}$, con $j = \{1,2,3,4,5, 6, 15, 16\}$, que indican si el equipo ‘j’ está o no participando en cada periodo ‘t’, también se va a analizar:

-El valor de las variables que indican el flujo de energía efectiva saliente de los distintos equipos de generación ($x_{1,7,1t}$, $x_{2,8,1t}$, $x_{3,8,1t}$, $x_{4,9,1t}$ (flujos de energía eléctrica) y $x_{4,10,2t}$, $x_{5,11,2t}$ y $x_{6,12,2t}$ (flujos de energía térmica)).

-Flujo de energía que proporcionan los elementos almacenadores en cada instante temporal ($x_{15,17,1t}$ y $x_{16,18,2t}$), así como el nivel de carga de los mismos ($I_{15,t}$ y $I_{16,t}$).

Programa que implementa el modelo matemático de optimización

Una vez detallado cómo se va a proporcionar al programa desarrollado el conjunto de datos de entrada, así como la forma en que se va a proceder al análisis de resultados, se muestra el código que permite alcanzar las soluciones óptimas del modelo; dicho código, correspondiente al escenario inicial con horizonte de análisis de 10 periodos, es prácticamente común a todos los escenarios.

Lectura de los parámetros de entrada disponibles en el documento Excel

La Figura 20 presenta las líneas de código requeridas para iniciar el proceso de lectura de datos del documento Excel explicado anteriormente.

```
7
8
9 from gurobipy import *
10 import xlrd
11 import xlwt
12 from xlutils.copy import copy
13
14
15 book = xlrd.open_workbook("Escenario.xlsx")
16 sheet = book.sheet_by_name("Datos") #Leo la hoja
17
```

Figura 20: Código. Apertura del documento Excel

En primer lugar, se abre el documento Excel, escribiendo el nombre del mismo entre comillas y, en segundo lugar, se accede a la pestaña que se desee dentro de ese mismo documento, en este caso, la pestaña “Datos”.

Declaración de los parámetros

A continuación, hay que crear un tipo de estructura de datos que contiene Python llamada diccionario. Un diccionario es una secuencia de ítems y cada ítem es un par (clave: valor).

Así, a cada ‘clave’ se le asigna un valor que se encuentra en el Excel de datos, tal como muestra el ejemplo de la Figura 21, donde se presentan los datos de la demandan eléctrica y térmica para cada periodo, así como la cota superior de cada equipo de generación de energía, la cual coincide con la máxima capacidad de cada uno de estos dispositivos.

```
30 d={}
31 CS={}
32 for t in range (1,11):
33     d[1,t]=sheet.cell(t+34,2).value
34     d[2,t]=sheet.cell(t+34,3).value

55 for j in range (1,7):
56     CS[j]= sheet.cell(9,2+(j-1)).value
57
```

Figura 21: Código. Ejemplo de lectura de datos

Creación del modelo

Tras incorporar todos los datos disponibles al código que implementa el modelo matemático desarrollado, se procede a la creación de un modelo vacío, representado en la Figura 22.

```
##Creacion del modelo
m= Model("Escenario inicial")
```

Figura 22: Código. Creación de un modelo vacío

Todas las variables y restricciones que se vayan escribiendo se guardarán en este modelo creado.

Declaración de las variables y Función objetivo

Para declarar las variables en Python haciendo uso del optimizador Gurobi, hay que indicar principalmente tres valores:

- “vtype”: especifica el tipo de variable. Todas las variables del modelo han sido definidas como continuas (‘GRB.CONTINUOUS’), a excepción de las variables binarias que indican si un equipo está o no en funcionamiento en un instante ‘t’ (‘GRB.BINARY’).
- “obj”: indica el coeficiente de esas variables en la función objetivo. En caso de no intervenir en ella, se iguala ‘obj’ a ‘0.0’.
- “name”: indica el nombre de la variable.

La Figura 23 presenta la declaración de la variable de flujo de energía entrante en el sistema para cada equipo ‘i’ y para cada instante ‘t’.

```
for t in range (1,11):
    for i in range (1,7):
        x0[i,t]= m.addVar(vtype=GRB.CONTINUOUS, obj=C[i,t], name="X0_%%s_%%s" %(i,t))
```

Figura 23: Código. Ejemplo de declaración de variables

Una vez introducidas todas las variables, se actualiza mediante la línea de código que aparece en la Figura 24, para poder usarlas posteriormente.

```
Integrar las nuevas variables
m.update()
```

Figura 24: Actualización de variables

Restricciones técnicas y balances energéticos

Tras definir todas las variables implicadas en el modelo de optimización desarrollado, se procede a implementar todas las restricciones técnicas de los equipos y las ecuaciones de balance energético. Estas últimas se extraen fácilmente del grafo de flujos de energía eléctrica y térmica que se explicó en el apartado anterior.

```

#Añadimos restricciones
for t in range (1,11):

    m.addConstr(X13[15,1,t]*Rto[15,t]+I[15,t-1]==X15[17,1,t]+I[15,t], "c2.1_%s" %t)
    m.addConstr(I[15,0]==Io[15], "c2.2_%s" %t)
    m.addConstr(X14[16,2,t]*Rto[16,t]+I[16,t-1]==X16[18,2,t]+I[16,t], "c2.3_%s" %t)
    m.addConstr(I[16,0]==Io[16], "c2.4_%s" %t)

for i in range (1,7):
    m.addConstr(X0[i,t]<=CS[i]*B[i,t], "c9_%s_%s" %(i,t))

```

Figura 25: Código. Ejemplos de restricciones técnicas y balances energéticos

En la Figura 25, se presentan dos grupos de restricciones:

- Las primeras se corresponden con las ecuaciones de balance energético en la batería y en el acumulador térmico.
- Las segundas hacen referencia al límite de producción energética de cada equipo de generación y se encargan de activar las variables binarias oportunas en cada caso, imputando así el coste fijo correspondiente en la función objetivo de minimización de costes.

Como se observa, la estructura de las restricciones en el lenguaje de programación utilizado es prácticamente igual a la de las ecuaciones que definieron al modelo matemático.

Optimización

La Figura 26 muestra varias líneas de código:

1. Indica que la función objetivo es de minimizar.
2. `m.optimize()` sirve para resolver el modelo.
3. Indica el valor de la función objetivo tras la optimización.
4. Especifica el estado de la solución, que puede ser: óptimo, no admisible, no acotado, óptimo hasta alcanzar el tiempo límite fijado.

```

m.modelSense = GRB.MINIMIZE
m.optimize()
print('Obj: %g' %m.objVal)

print("El estado es %g" %m.Status)

```

Figura 26: Código. Optimización

Escritura de las variables de salida en el documento Excel

Por último, se escribe el valor que toman las variables en la solución óptima del modelo. Para ello, se abre una copia del Excel que contiene los datos del modelo y se accede a la primera pestaña del mismo.

A continuación, se guarda en un diccionario llamado 'VARIABLES' el valor de todas las variables del modelo y, posteriormente, se escribe en las celdas correspondientes del Excel el valor de aquellas variables que resulten de interés para el análisis de resultados.

Finalmente, se guarda con otro nombre y el efecto es el mismo que si se hubiera editado sobre el documento Excel original.

```

223
224 ##      #Preparación de resultados
225 rb = xlrd.open_workbook("Escenario.xlsx")
226 wb = copy(rb)
227 ws = wb.get_sheet(0)
228
229 VARIABLES={}
230 for v in m.getVars():
231     VARIABLES[v.varName]=v.x
232
233 for t in range(1,11):
234     ws.write(35+(t-1),16, VARIABLES['X1_7_1_%s'%t])
235     ws.write(35+(t-1),17, VARIABLES['X2_8_1_%s'%t])
236     ws.write(35+(t-1),18, VARIABLES['X3_8_1_%s'%t])
237     ws.write(35+(t-1),19, VARIABLES['X4_9_1_%s'%t])
238     ws.write(35+(t-1),20, VARIABLES['X4_10_2_%s'%t])
239     ws.write(35+(t-1),21, VARIABLES['X5_11_2_%s'%t])
240     ws.write(35+(t-1),22, VARIABLES['X6_12_2_%s'%t])
241     ws.write(35+(t-1),37, VARIABLES['X15_17_1_%s'%t])
242     ws.write(35+(t-1),38, VARIABLES['X16_18_2_%s'%t])
243     for k in range(1,3):
244         ws.write(35+(t-1),43+(k-1), VARIABLES['Exc_%s_%s'%(k,t)])
245     for g in range(15,17):
246         ws.write(35+(t-1),45+(g-15), VARIABLES['I_%s_%s'%(g,t)])
247     for c in range(1,7):
248         ws.write(35+(t-1),47+(c-1), VARIABLES['B_%s_%s'%(c,t)])
249     for h in range(15,17):
250         ws.write(35+(t-1),53+(h-15), VARIABLES['B_%s_%s'%(h,t)])
251
252
253 wb.save('Resultados.xls')
254
255

```

Figura 27: Código. Escritura de los valores que toman las variables de interés

La Figura 27 refleja el código que ejecutan las acciones detalladas anteriormente.

8. PRESENTACIÓN DE LOS ESCENARIOS

En el apartado anterior se ha explicado de forma detallada cómo se ha implementado el modelo matemático de optimización mediante el lenguaje de programación Python.

El objetivo del presente apartado es comprobar que el algoritmo desarrollado funciona correctamente. Para ello, se van a analizar una serie de escenarios; en todos ellos, el horizonte temporal es de un día, dividido en periodos de análisis de 15 minutos (o 0,25 horas), por lo que el horizonte de un día queda constituido por 96 periodos de 15 minutos. Estos escenarios van a ser los siguientes:

- En primer lugar, un escenario inicial de 10 periodos. Lo que se pretende con el estudio y análisis de este caso es simplemente comprobar que el algoritmo programado no tiene fallos y proporciona soluciones razonables.
- En segundo lugar, se analizará una batería de 8 escenarios de 96 periodos, cuyas características diferenciadoras serán descritas posteriormente. Tras estudiar cada caso por separado, se harán algunos comentarios y conclusiones que es posible extraer de esta batería de supuestos.

A la hora de analizar los resultados obtenidos en cada caso, se prestará atención a dos aspectos fundamentalmente, que pueden ser considerados las salidas principales del modelo:

- El coste total de producción de la energía eléctrica y térmica necesaria para satisfacer la demanda con el sistema energético considerado. También se observará qué equipos están en funcionamiento, así como la cantidad de energía producida por cada uno en cada periodo para dar como solución dicho coste obtenido.

- El tiempo de resolución del modelo, es decir, el tiempo que tarda el programa en dar el resultado óptimo desde que se ejecuta hasta que se obtiene la solución. Este tiempo irá aumentando a medida que se incrementa el número de equipos participantes en los distintos escenarios. En caso de que, en un determinado escenario, el tiempo que tarde el programa en converger a una solución óptima sea superior a 15 minutos (tiempo entre periodo y periodo en los escenarios considerados), se implementará dicho escenario una segunda vez, limitando el tiempo de búsqueda del programa a 15 minutos.

En las tablas que siguen, se presentan los datos necesarios para la ejecución del programa que van a ser comunes en los distintos escenarios que se van a analizar.

Los datos de demanda eléctrica y térmica serán especificados en el escenario inicial de 10 periodos y al inicio de la batería de escenarios de 96 periodos.

Se comienza con los datos técnicos de los equipos de generación y almacenamiento energético presentes en el modelo considerado.

En la Tabla 5, se muestran los parámetros relativos a las cotas superiores energéticas de funcionamiento de los diferentes equipos que intervienen.

Tabla 5: Cota superior energética de los equipos generadores y almacenadores

Dato: CS_j (KWh)	Descripción	Valor
j=1	Potencia contratada (KW) * Periodo (h)	1000KW * 0,25h = 250KWh
j=2	Potencia máxima de funcionamiento de la fuente de energía solar fotovoltaica (KW) * Periodo (h)	600KW * 0,25h = 150KWh

j=3	Potencia máxima de funcionamiento de la fuente de energía eólica (KW) * Periodo (h)	600KW * 0,25h = 150KWh
j=4	Potencia máxima de funcionamiento del equipo de cogeneración (KW) * Periodo (h)	550KW * 0,25h = 137,5KWh
j=5	Potencia máxima de funcionamiento de la fuente de energía solar térmica (KW) * Periodo (h)	600KW * 0,25h = 150KWh
j=6	Potencia máxima de funcionamiento de la caldera (KW) * Periodo (h)	1500KW * 0,25h = 375KWh
j=15	Potencia máxima de carga y descarga de la batería (KW) * Periodo (h)	600KW * 0,25h = 150KWh
j=16	Potencia máxima de carga y descarga de acumulador térmico (KW) * Periodo (h)	600KW * 0,25h = 150KWh

Los datos presentes en la Tabla 5, relativos a las capacidades máximas de producción energética por parte de cada uno de los equipos de generación, permiten que:

-Toda la demanda de energía eléctrica pueda ser satisfecha por la red central o grid; así, la potencia máxima contratada va a ser superior a la máxima demanda eléctrica existente en los periodos de 15 minutos que componen el horizonte temporal de 1 día que se analiza.

-Toda la demanda de energía térmica pueda ser satisfecha por la caldera; para ello, la capacidad de la caldera multiplicada por el periodo de 15 minutos (0,25 horas) tiene que proporcionar una energía superior a la máxima demanda térmica existente en el horizonte temporal considerado.

Se diseña el modelo de esta forma para asegurar que es posible satisfacer toda la demanda con los elementos tradicionales de generación energética y poder, así, analizar de un modo más preciso cómo influye la intervención de nuevos equipos o formas de producción como son las fuentes renovables de energía, equipos de cogeneración o elementos de acumulación energética.

En la Tabla 6, se presenta el PCS y el PCI del gas natural, usado en las restricciones técnicas del equipo de cogeneración y la caldera, así como el ratio térmico/eléctrico que aparece en el cálculo de la energía térmica producida por el equipo de cogeneración.

Tabla 6: Datos técnicos del gas natural y el equipo de cogeneración

$PCS_4=PCS_6$ (KWh/Nm3)	11,986
$PCI_4=PCI_6$ (KWh/Nm3)	10.81
ρ_4 (adimensional)	0,5

En la Tabla 7, se exponen los rendimientos de los equipos de generación y almacenamiento de energía.

Tabla 7: Rendimientos de los equipos de generación y acumulación energética

Dato: $\eta_{j,t}$ (adimensional)	Descripción	Valor
j=2	Rendimiento sobre el recurso de la fuente renovable solar fotovoltaica.	0,15
j=3	Rendimiento sobre el recurso de la fuente renovable eólica.	0,40
j=4	Rendimiento del equipo de cogeneración.	0,406
j=5	Rendimiento sobre el recurso de la fuente renovable solar térmica.	0,40
j=6	Rendimiento de la caldera.	0,9
j=15	Rendimiento de la batería (almacenamiento eléctrico).	0,9
j=16	Rendimiento del acumulador térmico (almacenamiento térmico).	0,9

Como se observa, el rendimiento de la energía solar fotovoltaica ($j=2$) es muy inferior al de la energía solar térmica ($j=5$).

A continuación, se van a detallar los datos económicos que se van a considerar en la ejecución del modelo.

La Tabla 8 muestra el coste variable asociado a la energía recibida o proporcionada por la fuente o acumulador energético 'j' en el periodo 't'.

Tabla 8: Coste variable de los generadores y acumuladores energéticos

Dato: $c_{j,t}$ (€/KWh)	Descripción	Valor
j=1	Coste de la unidad de energía comprada a la red según el periodo tarifario en que se sitúe 't'.	Será detallado posteriormente, al ser dependiente de 't'.
j=2	Coste de la unidad de energía producida por la fuente solar fotovoltaica.	0,00002 €/KWh $\forall t$
j=3	Coste de la unidad de energía producida por la fuente de energía eólica.	0,00002 €/KWh $\forall t$
j=4	Coste de la unidad de energía producida por el equipo de cogeneración.	0,005 €/KWh $\forall t$
j=5	Coste de la unidad de energía producida por la fuente solar térmica.	0,00003 €/KWh $\forall t$
j=6	Coste de la unidad de energía producida por la caldera.	0,07 €/KWh $\forall t$
j=15	Coste de la unidad de energía que pasa a ser almacenada por la batería.	0,001 €/KWh $\forall t$
j=16	Coste de la unidad de energía que pasa a ser almacenada por el acumulador térmico.	0,001 €/KWh $\forall t$

En la Tabla 9 se exponen los costes fijos implicados en el funcionamiento de un equipo en un determinado periodo.

Tabla 9: Coste fijo de los generadores y acumuladores energéticos

Dato: $f_{j,t}$ (€)	Descripción	Valor
j=2	Coste fijo de funcionamiento de la fuente solar fotovoltaica en el instante 't'.	0,2 € $\forall t$
j=3	Coste fijo de funcionamiento de la fuente de energía eólica en el instante 't'.	0,4 € $\forall t$
j=4	Coste fijo de funcionamiento del equipo de cogeneración en el instante 't'.	1,75€ (en cada periodo de 15 min; 7€ por cada hora) $\forall t$
j=5	Coste fijo de funcionamiento de la fuente solar térmica en el instante 't'.	0,3 € $\forall t$
j=6	Coste fijo de funcionamiento de la caldera en el instante 't'.	1€ (en cada periodo de 15 min; 4€ por cada hora) $\forall t$
j=15	Coste fijo de funcionamiento de la batería en el instante 't'.	0,4 € $\forall t$
j=16	Coste fijo de funcionamiento del acumulador térmico en el instante 't'.	0,4 € $\forall t$

8.1. Presentación del escenario inicial de 10 períodos

El objetivo del análisis de este escenario es comprobar de forma sencilla el funcionamiento del programa implementado. Una vez se complete esta tarea, se procederá al estudio de la batería de escenarios de 96 periodos, que constituyen un horizonte temporal de un día, como ya se ha comentado anteriormente.

En cuanto a los datos necesarios para la ejecución del programa, ya se han mostrado aquellos que van a ser comunes en todos los casos.

A continuación, en la Figura 28 se presentan los datos de demanda eléctrica y térmica, así como la previsión de energía que es posible obtener de las fuentes renovables de energía en las Figura 29, Figura 30 y Figura 31; y el coste del grid y precio de venta por unidad de energía según el periodo tarifario para cada uno de los 10 periodos considerados en la Figura 32.

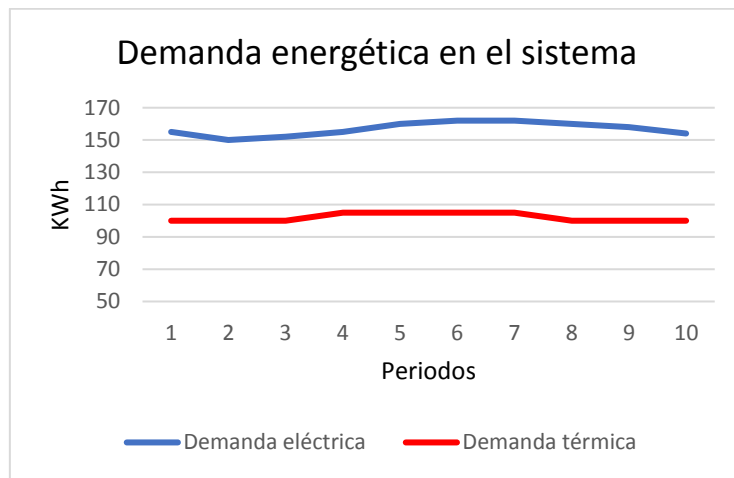


Figura 28: Demanda energética en el sistema en el escenario inicial de 10 periodos

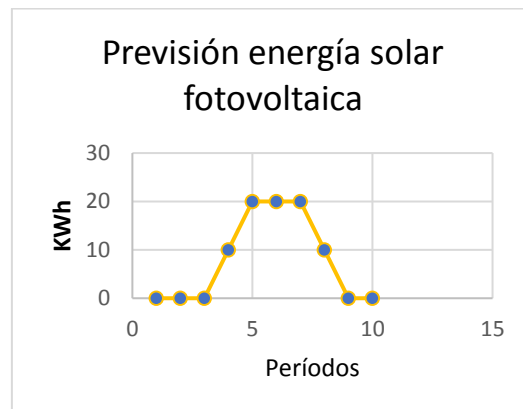


Figura 29: Previsión de energía solar fotovoltaica en el escenario inicial de 10 periodos

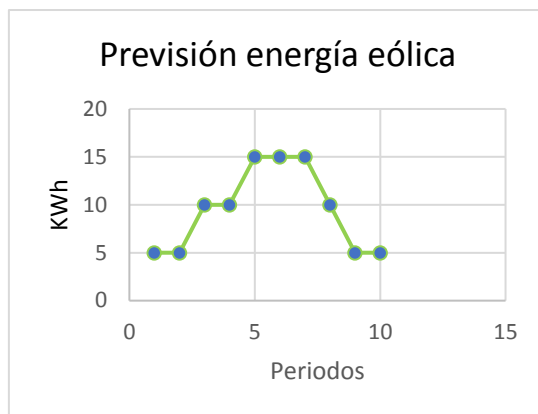


Figura 30: Previsión de energía eólica en el escenario inicial de 10 periodos

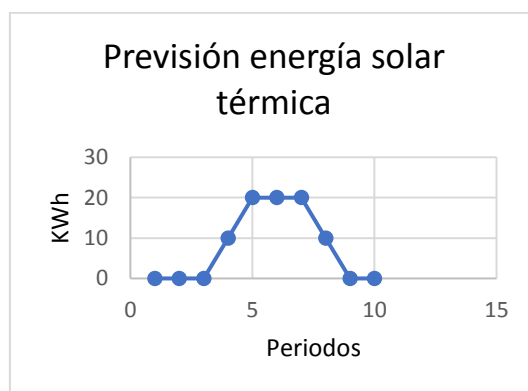


Figura 31: Previsión de energía solar térmica en el escenario inicial de 10 periodos

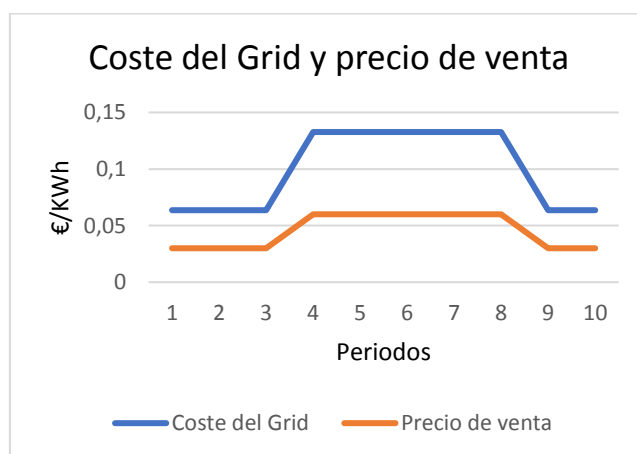


Figura 32: Precio de compra del Grid y precio de venta en el escenario inicial de 10 periodos

Asimismo, en las Tabla 10 y Tabla 11 se presentan ciertos datos que no se han detallado anteriormente, ya que van a variar en los distintos escenarios.

Tabla 10: Carga inicial de los dispositivos de almacenamiento en el escenario inicial de 10 periodos

Dato: $I_{j,0}$ (KWh)	Descripción	Valor
j=15	Carga inicial de la batería.	5000
j=16	Carga inicial del acumulador térmico.	2500

Tabla 11: Carga máxima de los dispositivos de almacenamiento en el escenario inicial de 10 periodos

Dato: $I_{max j}$ (KWh)	Descripción	Valor
j=15	Carga máxima de almacenamiento de la batería.	5000
j=16	Carga máxima de almacenamiento del acumulador térmico.	2500

En este primer caso, se va a considerar la presencia y participación de todos los equipos disponibles en la instalación: Grid, fuentes renovables de energía eléctrica (solar fotovoltaica y eólica) y térmica (solar térmica), equipo de cogeneración, la caldera y los elementos de almacenamiento de energía eléctrica (batería) y térmica (acumulador térmico).

8.2. Presentación de batería de escenarios de 96 períodos

Seguidamente, se va a presentar una batería de 8 escenarios de 96 períodos.

En la presentación de cada uno, se van a mostrar los datos específicos de cada escenario. Al inicio del apartado 8, se han detallado los datos comunes a todos los casos. Sin embargo, algunos parámetros irán variando para comprobar cómo influyen en el resultado final obtenido. Así, los datos variables en cada escenario son:

- Niveles de carga iniciales y de carga máxima de la batería y el acumulador térmico.
- Previsión de la energía que se puede obtener de las distintas fuentes de energía renovable que intervienen.
- El número de equipos que participan en cada escenario.

Antes de comenzar con el estudio de los 8 escenarios, tal como se hizo para el escenario de 10 períodos, se muestran los datos de demanda eléctrica y térmica, así como el coste del grid y precio de venta por unidad de energía según el periodo tarifario para cada uno de los 96 períodos considerados y que van a ser iguales en todos los casos considerados.

La Figura 33 muestra la demanda eléctrica y térmica en el horizonte temporal de un día.

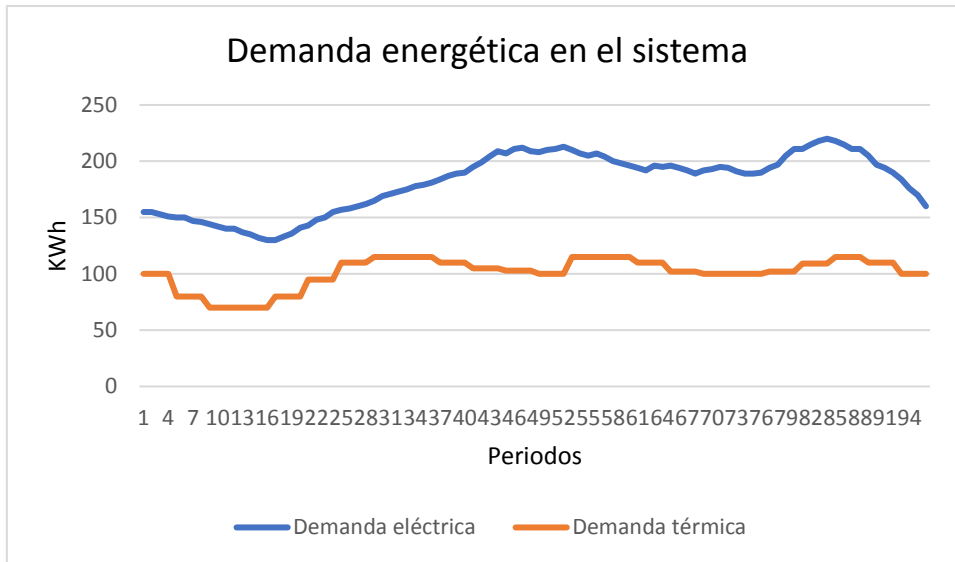


Figura 33: Demanda energética en el sistema en la batería de escenarios de 96 periodos

La Figura 34 presenta el coste del grid y precio de venta de la unidad de energía según el periodo tarifario.

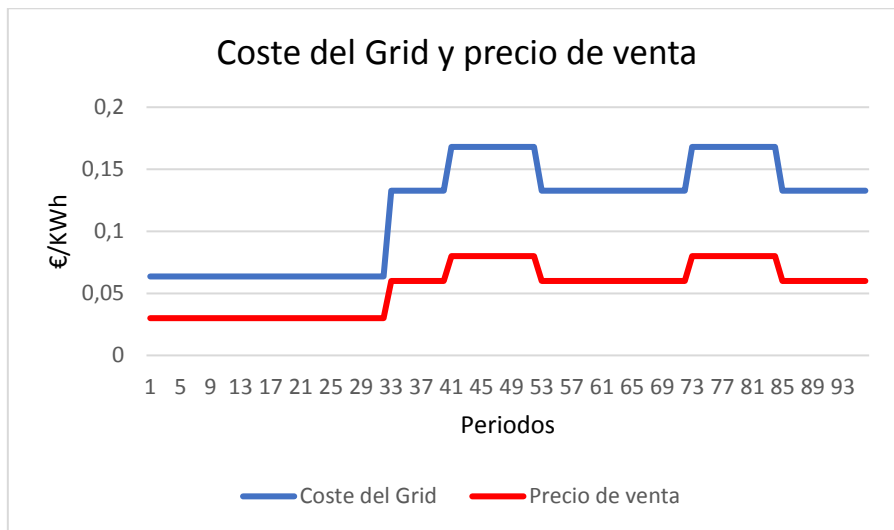


Figura 34: Precio de compra del Grid y precio de venta en la batería de escenarios de 96 periodos

En la Tabla 12 se especifican los precios de compra y venta en el Grid de los tres periodos tarifarios que se observan en la figura anterior.

Tabla 12: Datos del Grid en la batería de problemas de 96 periodos

Periodo tarifario del Grid	1	2	3
Precio d compra	0,063615	0,132674	0,16801
Precio de venta	0,03	0,06	0,08

A continuación, se va a mostrar un resumen de los distintos datos que van a ir variando en los distintos escenarios que se van a analizar.

En primer lugar, en la Tabla 13 se observan los equipos que van a estar presentes en cada uno de los 8 escenarios.

Tabla 13: Cuadro-resumen de los equipos presentes en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos

	1	2	3	4	5	6	7	8
Grid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ren. Solar Elec.		✓	✓	✓				✓
Ren. Eólica		✓	✓	✓				✓
CHP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ren. Sol. Térm.		✓	✓	✓				✓
Caldera	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Batería					✓	✓	✓	✓
Acumulador					✓	✓	✓	✓

La elección de los equipos que participan en cada escenario se ha hecho para analizar determinados aspectos, que se exponen a continuación:

- El Escenario 1 plantea un caso sencillo en el que únicamente intervienen la red eléctrica, la caldera y el equipo de cogeneración. Como se ha explicado en apartados anteriores, se ha contratado una potencia máxima de la red que permite satisfacer toda la demanda

eléctrica de cualquier periodo; de igual forma, la capacidad de la caldera permite satisfacer toda la demanda de energía térmica en cualquier instante del horizonte de análisis. Con ello, se va a poder apreciar cómo influye la introducción del equipo de cogeneración en el sistema energético tradicional.

- En los Escenarios 2, 3 y 4 se va a estudiar el efecto de combinar el equipo de cogeneración con las fuentes renovables de energía. Se va a ir aumentando la previsión de estas energías limpias para ver cómo influye en la configuración de los equipos para satisfacer la demanda. Además, se van a mantener el grid y la caldera para asegurar que sea siempre posible satisfacer la demanda.

- Los Escenarios 5, 6 y 7, además del grupo de elementos de generación energética compuesto por la red eléctrica, la caldera y el equipo de cogeneración, van a incluir los elementos de almacenamiento energético (batería y acumulador térmico). Se van a analizar casos con distintas capacidades máximas de almacenamiento y distintos niveles iniciales de carga.

- Por último, el Escenario 8 va a incluir todos los elementos de generación de energía eléctrica (red central, fuentes renovables de energía eléctrica: solar fotovoltaica y eólica) y de energía térmica (solar térmica, el equipo de cogeneración y la caldera), así como todos los elementos de almacenamiento disponibles (batería y acumulador térmico).

En las Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 se presentan los datos que son específicos de cada periodo.

Las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 muestran las gráficas de previsión de las fuentes renovables de energía en los distintos escenarios. Estas fuentes de generación energética intervienen en los casos 2, 3, 4 y 8.

Tabla 14: Previsión de energía solar eléctrica en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos

<u>Previsión Solar eléctrica</u>	
1	-
2	<div style="text-align: center;"> <p>Previsión energía solar fotovoltaica</p> <p>30 20 10 0</p> <p>KWh</p> <p>1 7 13 19 25 31 37 43 49 55 61 67 73 79 85 91</p> <p>Periodos</p> </div>
3	<div style="text-align: center;"> <p>Previsión energía solar fotovoltaica</p> <p>60 40 20 0</p> <p>KWh</p> <p>1 7 13 19 25 31 37 43 49 55 61 67 73 79 85 91</p> <p>Periodos</p> </div>
4	<div style="text-align: center;"> <p>Previsión energía solar fotovoltaica</p> <p>100 50 0</p> <p>KWh</p> <p>1 7 13 19 25 31 37 43 49 55 61 67 73 79 85 91</p> <p>Periodos</p> </div>
5	-
6	-
7	-

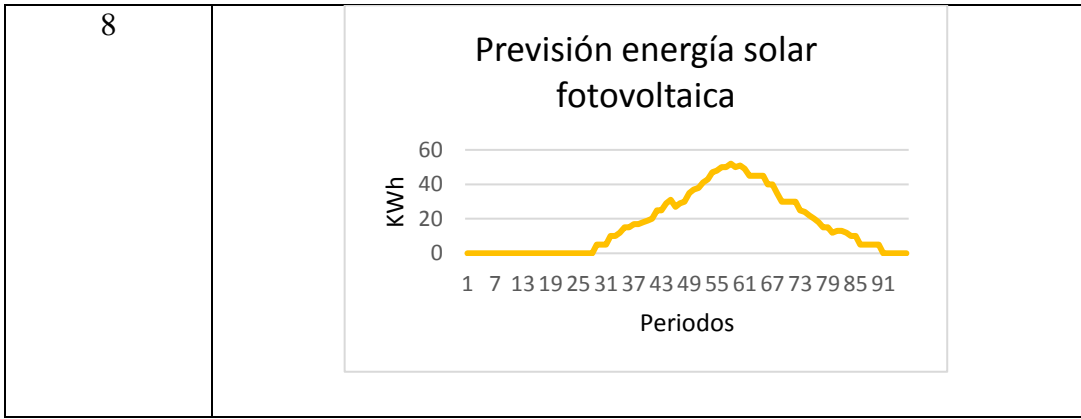


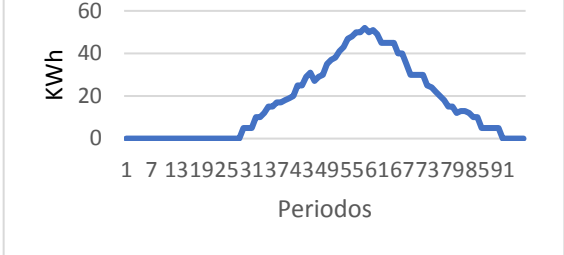
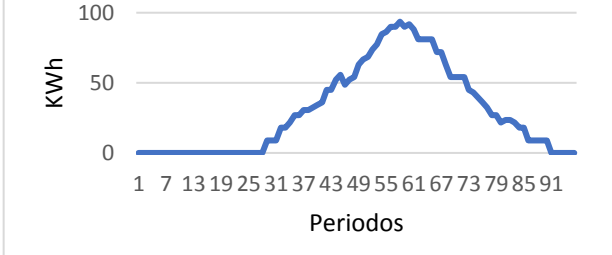
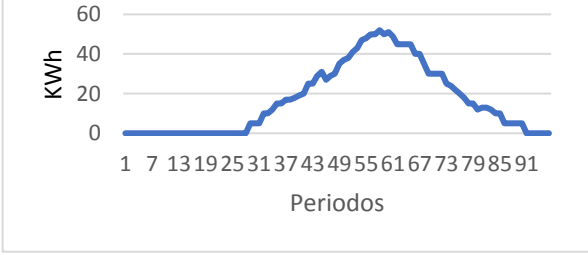
Tabla 15: Previsión de energía eólica en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos

<u>Previsión Eólica</u>	
1	-
2	<p>Previsión energía eólica</p>
3	<p>Previsión energía eólica</p>

4	<div style="text-align: center;"> <h3>Previsión energía eólica</h3> </div>
5	-
6	-
7	-
8	<div style="text-align: center;"> <h3>Previsión energía eólica</h3> </div>

Tabla 16: Previsión de energía solar térmica en los escenarios de la batería de problemas de 96 periodos

<u>Previsión Solar térmica</u>	
1	-
2	<div style="text-align: center;"> <h3>Previsión energía solar térmica</h3> </div>

3	<p style="text-align: center;">Previsión energía solar térmica</p> 
4	<p style="text-align: center;">Previsión energía solar térmica</p> 
5	-
6	-
7	-
8	<p style="text-align: center;">Previsión energía solar térmica</p> 

La Tabla 17 muestra los datos de capacidad máxima de almacenamiento, así como el nivel de carga inicial para cada uno de los escenarios. En los casos 1, 2, 3 y 4 no interviene ninguno de estos dos elementos.

Tabla 17: Carga inicial y carga máxima de los dispositivos de almacenamiento en la batería de escenarios de 96 periodos

	$I_{15,0}$	$I_{\max 15}$	$I_{16,0}$	$I_{\max 16}$
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	5000	5000	2500	2500
6	10000	10000	5000	5000
7	0	10000	0	5000
8	5000	5000	2500	2500

9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS

En este apartado se va a proceder al estudio y análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los casos presentados. En concreto, el análisis de cada escenario va a ser estructurado de la siguiente forma:

1. Datos específicos del caso concreto.
2. Presentación de las salidas del modelo que, como se ha explicado, son fundamentalmente el coste total y el tiempo de resolución.
3. Conjunto de gráficas que resultan de interés para comparar los distintos casos y alcanzar conclusiones.

9.1. Estudio del escenario inicial de 10 periodos

Se va a comenzar con el análisis del caso inicial que abarca un horizonte temporal de 10 periodos de 15 minutos. El objetivo de este primer estudio es comprobar que el modelo matemático implementado en lenguaje Python funciona correctamente.

Datos específicos

Como se ha comentado anteriormente, se van a considerar presentes todos los equipos disponibles en el sistema energético considerado.

Por otro lado, en este caso concreto no se van a detallar de nuevo todos los datos expuestos en el apartado anterior, ya que este escenario es un escenario de prueba del programa implementado, y no va a ser objeto de análisis en función de los datos de entrada.

Salidas del modelo

La Tabla 18 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 18: Salidas del modelo para el Escenario inicial de 10 periodos

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
9,363735305273 €	0,64 s

Análisis de resultados

Las Figura 35 y Figura 36 muestran las consignas eléctricas y térmicas, respectivamente, de los diferentes equipos que intervienen en este Escenario inicial, generadas por el programa implementado.

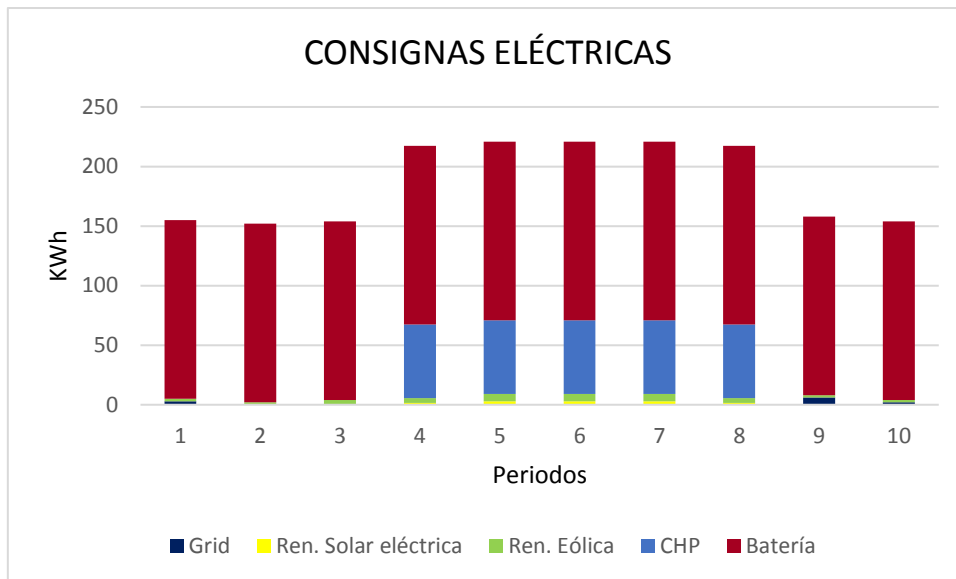


Figura 35: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario inicial

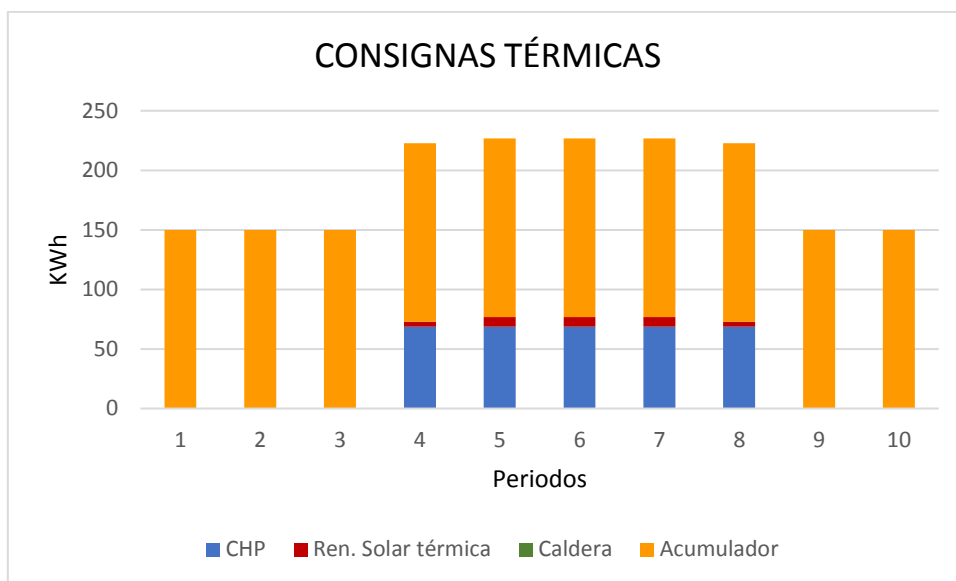


Figura 36: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario inicial

Como se observa, las energías renovables cubren un porcentaje de demanda muy pequeño, debido a los bajos rendimientos sobre el recurso que poseen estos equipos de generación (15% energía solar eléctrica, 40% energía solar térmica, 40% energía eólica) y a que las previsiones de este escenario no han sido lo suficientemente grandes como para que, al aplicar los rendimientos, quede una cantidad de energía efectiva significativa.

También se puede apreciar que la batería y el acumulador están inicialmente cargados. Como el coste variable de estos equipos ha sido imputado a cada unidad de KWh que pasa a ser almacenada, la carga inicial realmente no implica un coste variable por unidad en el modelo de optimización desarrollado; es por ello, por lo que el programa intenta satisfacer la demanda eléctrica y térmica con la carga almacenada en estos dispositivos, aunque existe un límite de potencia máxima de descarga de ambos, que permite descargar únicamente 150 KWh por periodo, tal como se ha reflejado anteriormente en la presentación de los datos del modelo.

Por otro lado, en algunos periodos, las fuentes de energía renovables y los equipos de almacenamiento resultan insuficientes para satisfacer la demanda. Así, entra en escena el equipo de cogeneración cuando la cantidad de energía que queda por producir es relativamente grande. Esto es debido a que el equipo de cogeneración implica un coste fijo que la red no tiene, pero tiene un coste variable por KWh bastante menor; por ello, cuando la cantidad de energía eléctrica que queda por producir es grande, resulta rentable desde el punto de vista económico utilizar el equipo de cogeneración en lugar de la red. Una prueba del caso contrario aparece en el periodo 9, donde prácticamente toda la demanda eléctrica ha sido satisfecha con las fuentes renovables y la batería, de forma que la demanda eléctrica que queda por ser cubierta es tan pequeña que resulta más rentable obtenerla directamente desde la red central (que además cuenta con una tarifa baja para el periodo 9 que se está analizando).

Por último, se observa que la caldera no ha sido necesaria para satisfacer la demanda térmica, ya que se han utilizado otros equipos que han implicado un coste menor.

Las Figura 37 y Figura 38 muestran, respectivamente, el nivel de carga de la batería y el acumulador térmico en el horizonte temporal de 10 periodos considerado.

Se aprecia un descenso lineal del nivel de carga en ambos casos debido a la razón antes comentada: la energía de estos equipos se utiliza para abastecer la demanda con un límite máximo de 150 KWh de descarga por periodo.

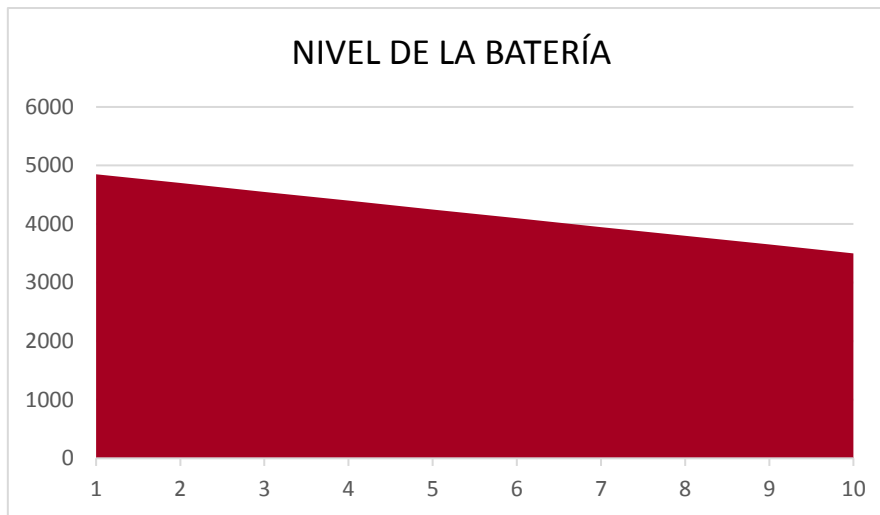


Figura 37: Nivel de carga de la batería en el Escenario inicial

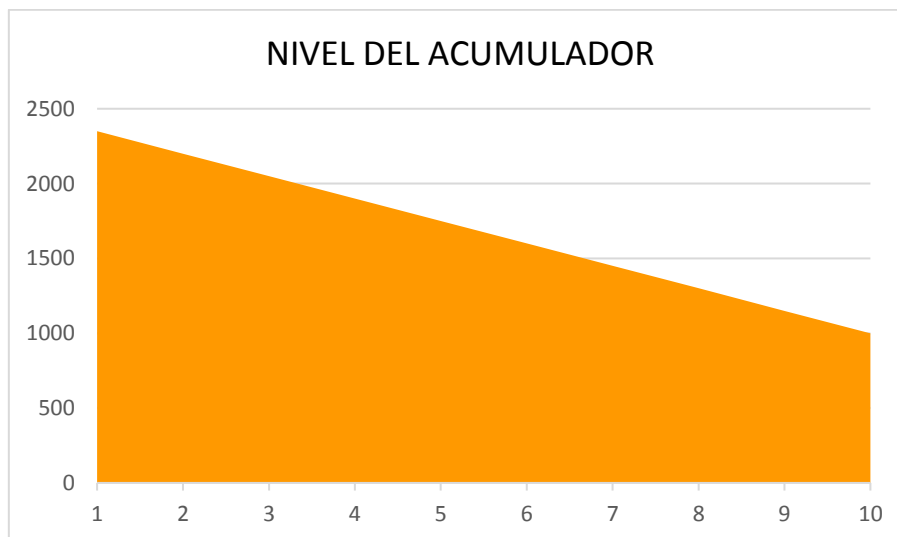


Figura 38: Nivel de carga del acumulador en el Escenario inicial

Por otro lado, en la Figura 39 se observa cómo en algunos casos se produce:

- Exceso eléctrico, en los periodos intermedios: esto es porque se trata de los periodos donde el precio de venta a la red es mayor. Así, es posible producir en esos periodos una cantidad de energía superior de la necesaria mediante equipos cuya generación energética resulta económica.
- Exceso térmico: como no se ha impuesto penalización por exceso térmico, este se generará en aquellos casos donde el equipo de cogeneración sea necesario para satisfacer la demanda eléctrica y se produzca, simultáneamente, energía térmica

no útil. Sin embargo, también se observan periodos en los que el acumulador descarga una cantidad de energía superior a la demanda térmica de ese periodo, lo que genera un exceso térmico no útil; esto es debido a que, al tratarse de un escenario de prueba con 10 periodos únicamente y con una carga inicial del acumulador superior a $(10 \text{ periodos} * 150 \text{ KWh/periodo})$ (siendo este último valor la máxima cantidad de energía que puede descargar en un periodo)), no hay nada que limite la cantidad de energía cedida por el acumulador. En caso de un horizonte temporal mayor, la carga inicial del acumulador sería mejor distribuida entre los periodos que lo requiriesen, en la cantidad justa necesaria.

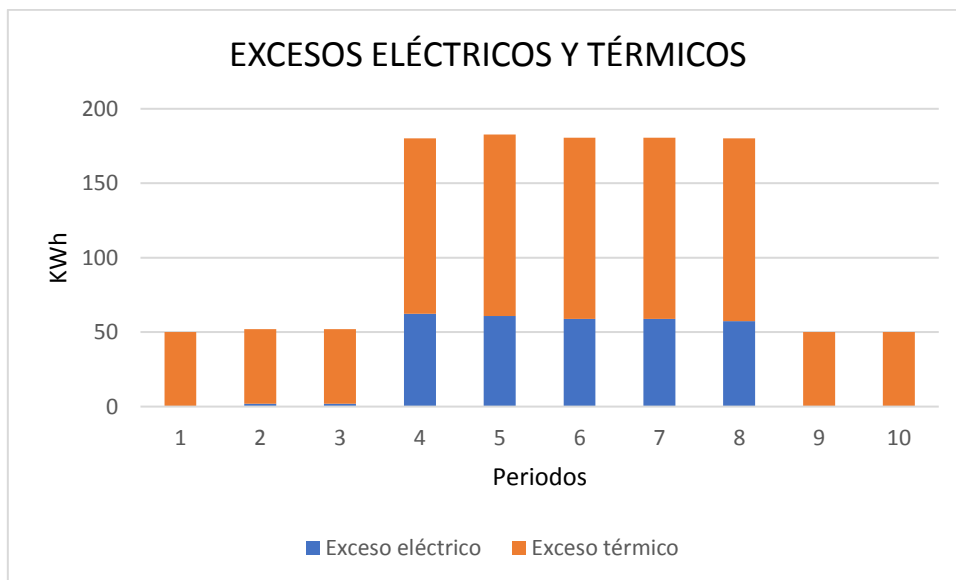


Figura 39: Excesos eléctricos y térmicos en el Escenario inicial

9.2. Estudio de la batería de escenarios de 96 periodos

En el apartado anterior, se ha comprobado el funcionamiento del programa desarrollado para un horizonte temporal de 10 periodos de 15 minutos.

A continuación, se va a analizar una batería de 96 periodos de 15 minutos (horizonte temporal de 1 día) y, posteriormente, se hará una comparación de los resultados obtenidos para alcanzar conclusiones acerca del modelo matemático desarrollado.

9.2.1. Escenario 1

Datos específicos

En el Escenario 1 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 19.

Tabla 19: Equipos presentes en el Escenario 1

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	
Fuente renovable de energía eólica	
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	
Caldera	✓
Batería	
Acumulador térmico	

En este caso, no hay datos variables específicos de este escenario concreto.

Salidas del modelo

La Tabla 20 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 20: Salidas del modelo para el Escenario 1

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
2001,302826495 €	0,19 s

Análisis de resultados

Las Figura 40 y Figura 41 muestran las consignas eléctricas y térmicas, respectivamente, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 1, generadas por el programa implementado.

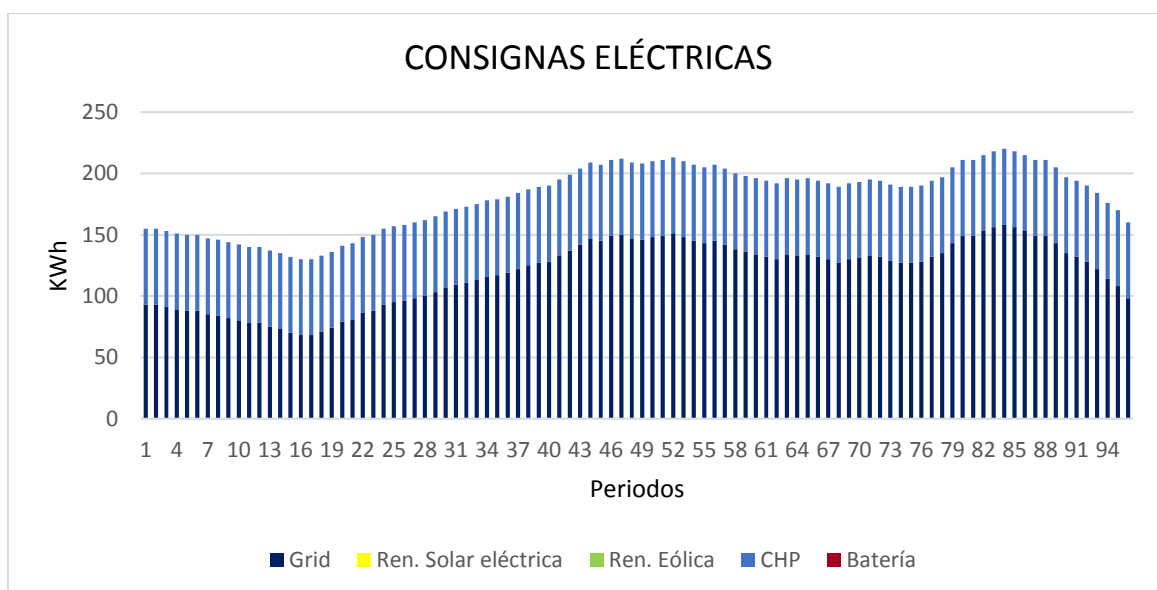


Figura 40: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 1

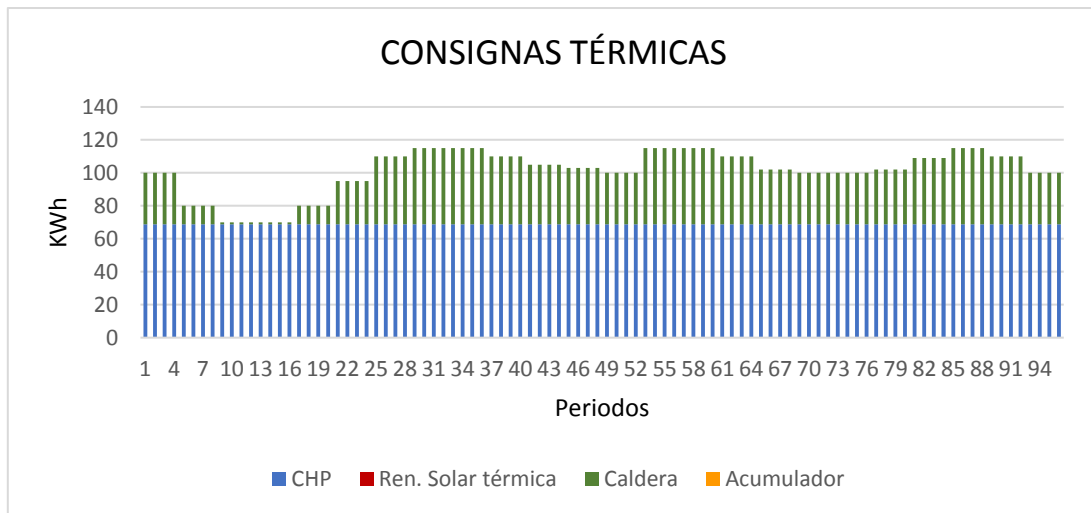


Figura 41: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 1

Se observa que los perfiles de energía eléctrica y térmica generada coinciden exactamente con los perfiles de demanda eléctrica y térmica respectivamente. Esto es debido a tres razones fundamentalmente, a partir de las cuales se analiza este caso:

- Por un lado, en este escenario no se consideran presentes los elementos de almacenamiento energético (batería y acumulador térmico), por lo que toda la energía producida no utilizada para cubrir la demanda se convertiría directamente en exceso energético.
- Por otro lado, en el caso de los equipos de generación eléctrica, únicamente están presentes el equipo de cogeneración y la red. Como se observa, el equipo de cogeneración proporciona siempre la misma cantidad de energía, que se corresponde con su máxima capacidad afectada por el rendimiento, lo que resulta en unos 60 KWh; el equipo de cogeneración está activo en todos los periodos porque, aunque implique un coste fijo que la red no tiene, la cantidad de energía que produce hace que sea rentable desde el punto de vista económico, ya que el coste variable por unidad de energía en el equipo de cogeneración es inferior al de la red. El resto de demanda eléctrica tiene que ser satisfecha directamente desde la red, por lo que nunca va a haber exceso eléctrico, ya que el precio de compra de la red siempre va a ser inferior al de venta; en caso contrario la compra y venta de energía a la red se convertiría en un negocio.
- De igual forma, tampoco se va a producir en ningún periodo exceso térmico, ya que la demanda de energía térmica siempre va a ser superior a la máxima

proporcionada por el equipo de cogeneración, por lo que la diferencia tiene que ser aportada por la caldera, la cual implica un coste fijo por periodo y un coste variable por unidad de energía. Como el objetivo es minimizar costes, el producir con la caldera una cantidad de energía superior a la demanda carecería de sentido.

9.2.2. Escenario 2

Datos específicos

En el Escenario 2 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 21.

Tabla 21: Equipos presentes en el Escenario 2

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	✓
Fuente renovable de energía eólica	✓
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	✓
Caldera	✓
Batería	
Acumulador térmico	

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar la previsión de las fuentes de energía renovables presentes en el modelo. Estos datos vienen expresados en las gráficas de las Figura 42, Figura 43 y Figura 44.

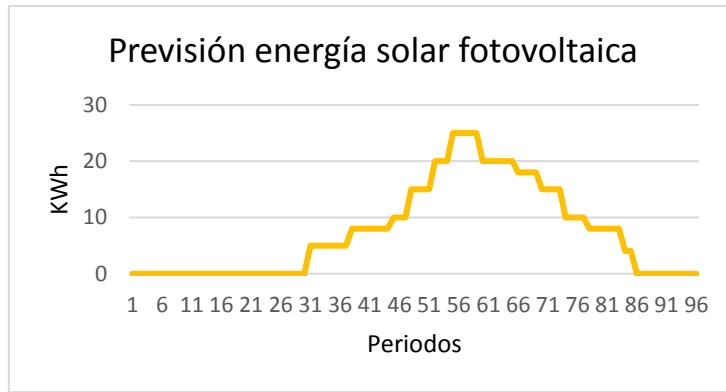


Figura 42: Previsión de energía solar fotovoltaica del Escenario 2

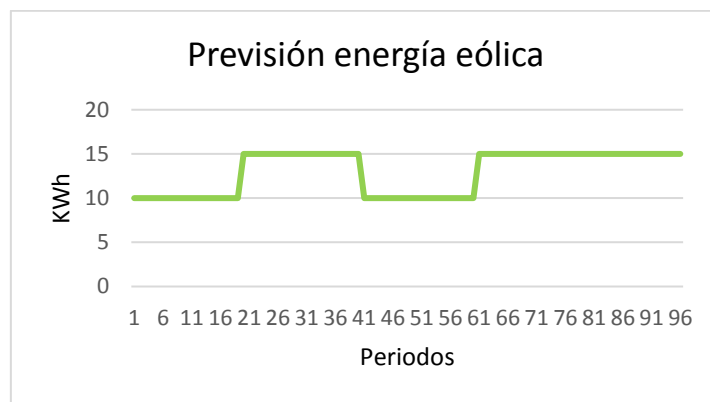


Figura 43: Previsión de energía eólica del Escenario 2

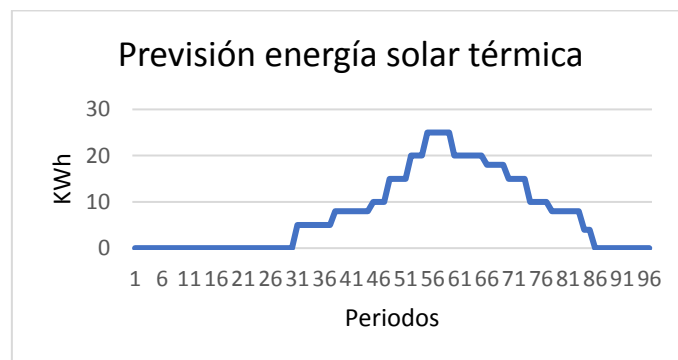


Figura 44: previsión de energía solar térmica del Escenario 2

Salidas del modelo

La Tabla 22 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 22: Salidas del modelo para el Escenario 2

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
1972,127060019€	0,17 s

Análisis de resultados

Las Figura 45 y Figura 46 muestran las consignas eléctricas y térmicas, respectivamente, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 2, generadas por el programa implementado.

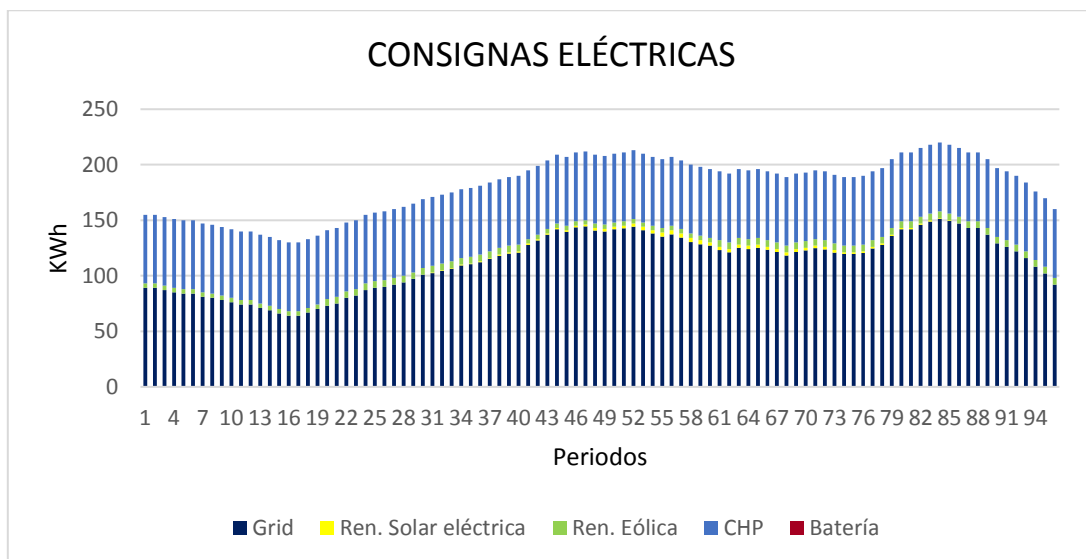


Figura 45: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 2

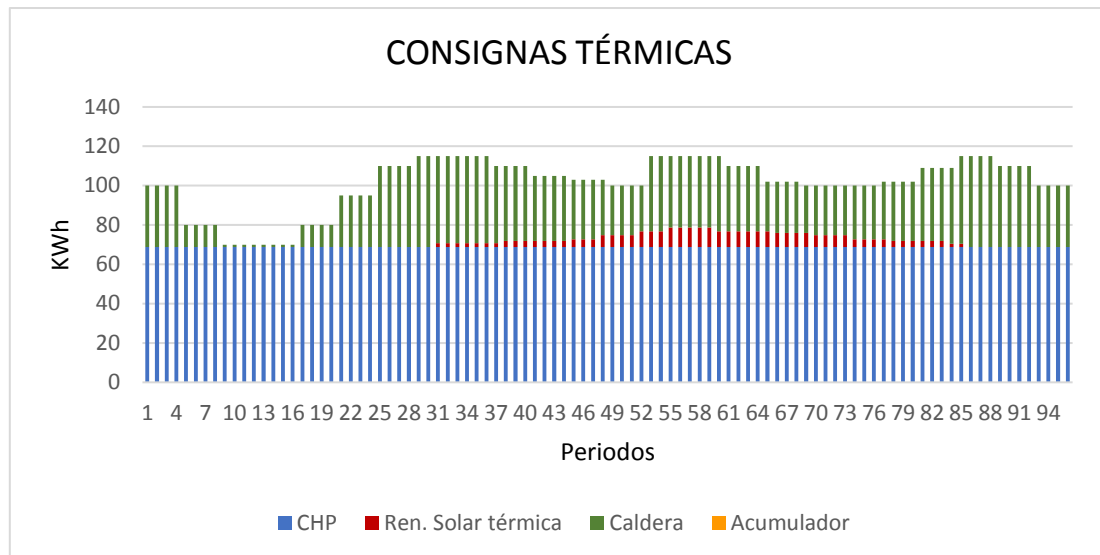


Figura 46: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 2

En este caso, a los equipos de generación presentes en el Escenario 1 (el equipo de cogeneración, la caldera y la red eléctrica) se añaden las fuentes renovables de energía (solar fotovoltaica y eólica, para producir energía eléctrica y solar térmica, para producir energía térmica).

En las figuras anteriores, es posible apreciar que el perfil de producción energética vuelve a coincidir con el de la demanda eléctrica y térmica, lo que implica que no hay energía producida que se acumula, ya que no se consideran los equipos de almacenamiento en este caso, ni energía en exceso.

Las fuentes renovables de energía son las primeras que se utilizan para satisfacer la demanda, ya que son las que implican un coste menor. Sin embargo, en ambas gráficas se observa que la demanda cubierta con este tipo de energías limpias es muy pequeña. Esto es debido a los bajos rendimientos sobre el recurso que poseen estos equipos de generación energética; así, requieren de previsiones muy altas para que la energía producida por ellos sea considerable.

A continuación, entra en escena el equipo de cogeneración: aunque implique un coste fijo en cada periodo, se aprovecha la máxima capacidad de este elemento generador, de forma que resulta rentable su activación en todos los periodos para la producción de energía eléctrica y térmica.

Por último, el resto de demanda eléctrica tiene que ser cubierta desde la red y el resto de demanda térmica es satisfecha a partir de la producción de energía térmica en la caldera.

9.2.3. Escenario 3

Datos específicos

En el Escenario 3 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 23.

Tabla 23: Equipos presentes en el Escenario 3

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	✓
Fuente renovable de energía eólica	✓
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	✓
Caldera	✓
Batería	
Acumulador térmico	

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar:

- La previsión de las fuentes de energía renovables presentes en el modelo, que se muestra en las gráficas de las Figura 47, Figura 48 y Figura 49.

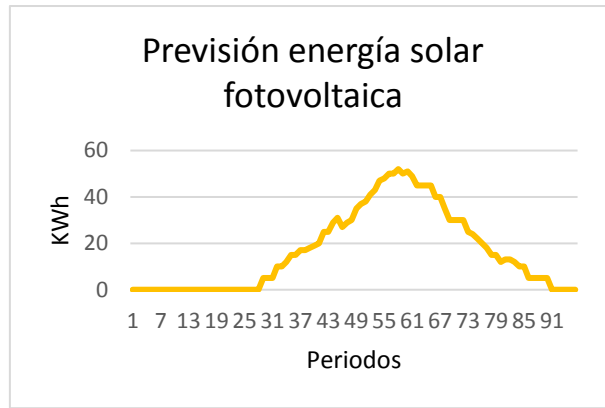


Figura 47: Previsión de energía solar fotovoltaica del Escenario 3

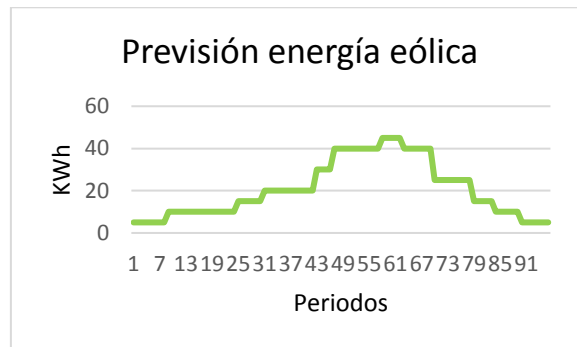


Figura 48: Previsión de energía eólica del Escenario 3

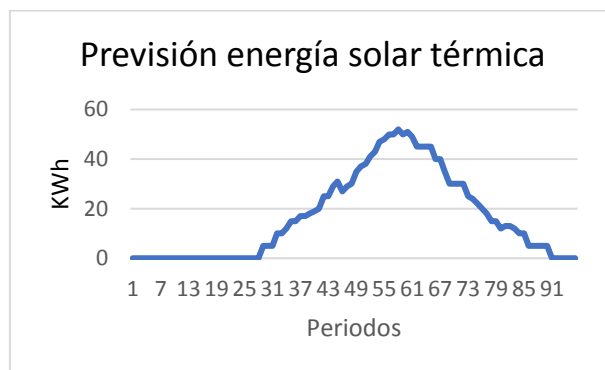


Figura 49: Previsión de energía solar térmica del Escenario 3

Como se observa en estas figuras, la previsión de la energía que se puede obtener con las fuentes de energía renovables presentes en la instalación considerada es muy superior a la esperada en el Escenario anterior.

Salidas del modelo

La Tabla 24 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 24: Salidas del modelo para el Escenario 3

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
1885,686254652 €	0,12 s

Análisis de resultados

Las Figura 50 y Figura 51 muestran las consignas eléctricas y térmicas, respectivamente, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 3, generadas por el programa implementado.

En este escenario están presentes los mismos equipos que en el caso anterior: todos los equipos de generación eléctrica y térmica considerados en el modelo y ningún equipo de almacenamiento energético. La diferencia está en la previsión de las fuentes renovables de energía, que en este caso es superior.

Se aprecia que los perfiles de producción energética coinciden de nuevo con los de la demanda, debido a las razones expuestas en el escenario anterior.

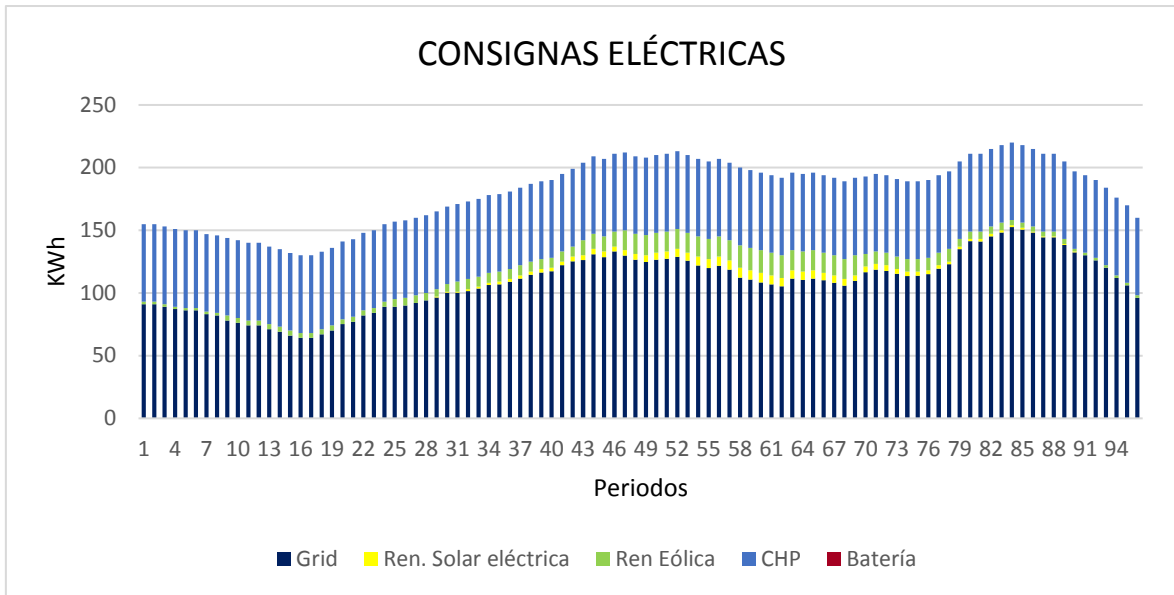


Figura 50: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 3

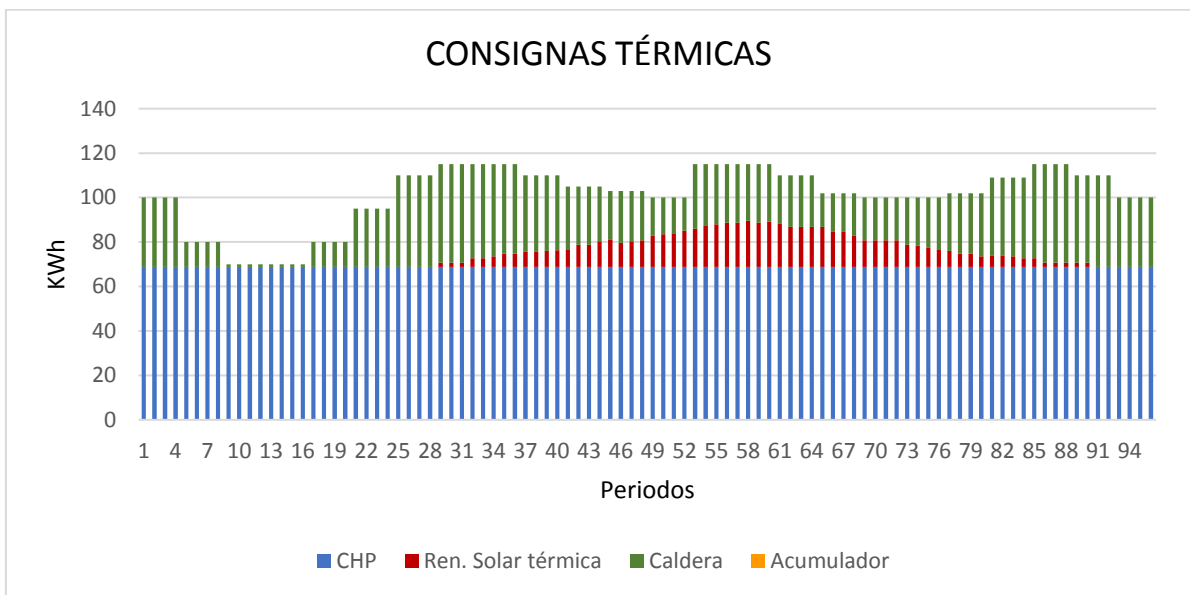


Figura 51: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 3

En este caso, la demanda que es posible cubrir a partir de las fuentes de energía renovables es superior a la del escenario 2 (al disponer de previsiones más altas), lo que se va a traducir directamente en un coste total menor, ya que son estas fuentes de generación las que permiten producir energía de forma más económica.

9.2.4. Escenario 4

Datos específicos

En el Escenario 4 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 25.

Tabla 25: Equipos presentes en el Escenario 1

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	✓
Fuente renovable de energía eólica	✓
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	✓
Caldera	✓
Batería	
Acumulador térmico	

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar:

- La previsión de las fuentes de energía renovables presentes en el modelo, que se muestra en las gráficas de las Figura 52, Figura 53 y Figura 54.

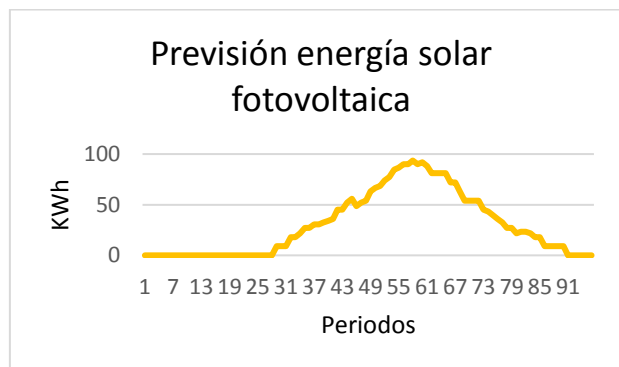


Figura 52: Previsión de energía solar fotovoltaica del Escenario 4

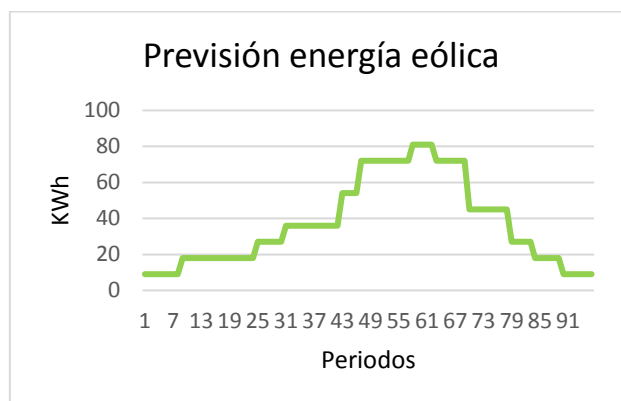


Figura 53: Previsión de energía eólica del Escenario 4

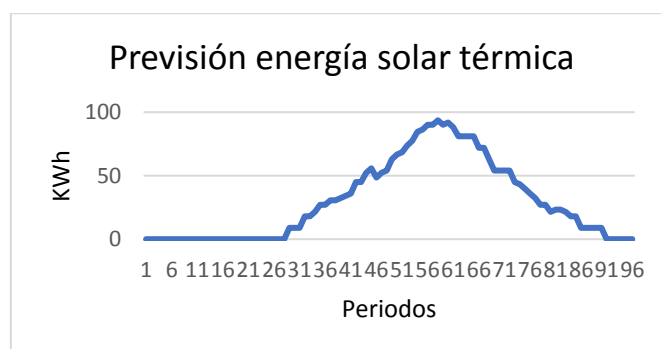


Figura 54: Previsión de energía solar térmica del Escenario 4

Como se observa en estas figuras, la previsión de la energía que se puede obtener con las fuentes de energía renovables presentes en la instalación considerada es muy superior a la esperada en los escenarios anteriores.

Salidas del modelo

La Tabla 26 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 26: Salidas del modelo para el Escenario 4

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
1737,672997178 €	0,16 s

Análisis de resultados

Las Figura 55 y Figura 56 muestran las consignas eléctricas y térmicas, respectivamente, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 4, generadas por el programa implementado.

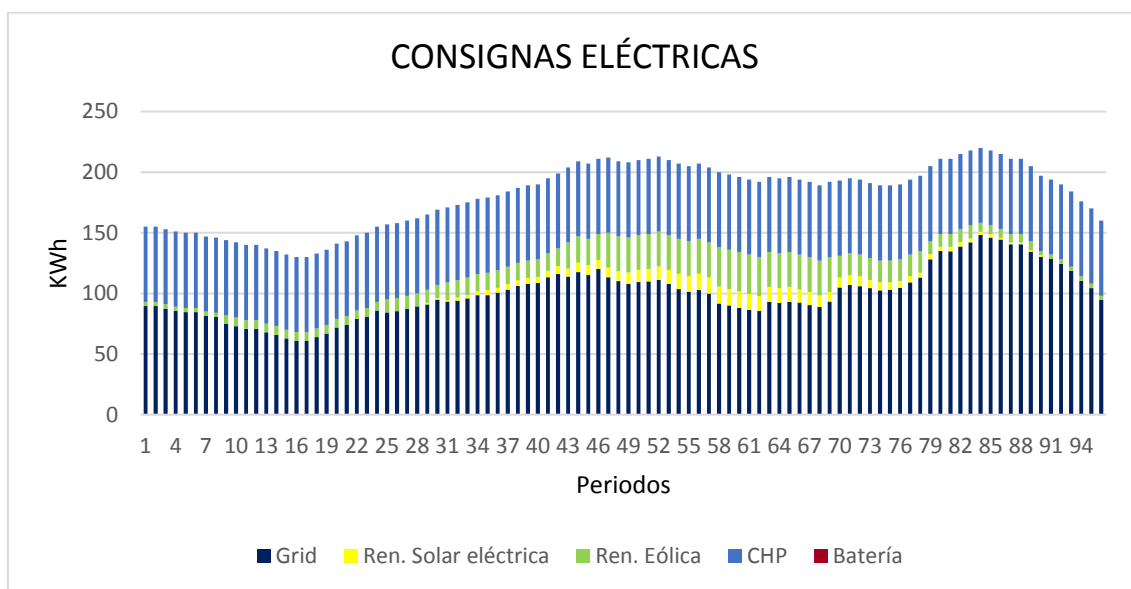


Figura 55: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 4

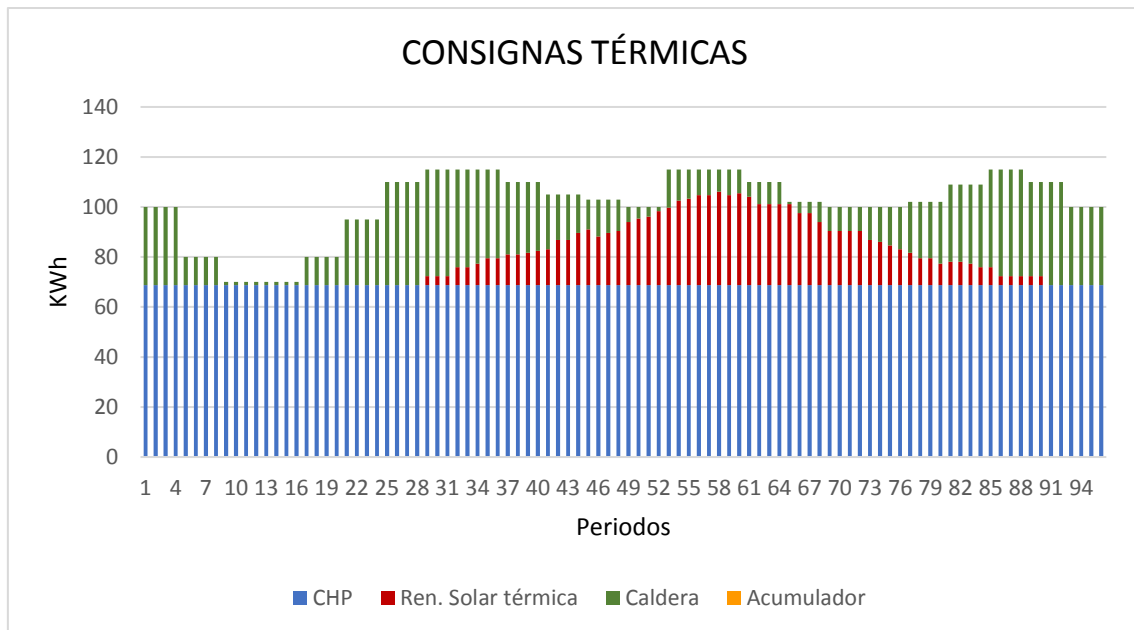


Figura 56: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 4

En este caso, los equipos presentes son los mismos que en los casos anteriores: intervienen todos los dispositivos de generación energética y ninguno de almacenamiento. Este escenario cuenta con previsiones de las fuentes de energía renovables muy superiores, lo que de nuevo se va a traducir en un coste total de abastecimiento de energía eléctrica y térmica menor.

Aun siendo estas previsiones superiores, las fuentes renovables siguen resultando insuficientes para cubrir toda la demanda. Por ello, el equipo de cogeneración está activo en todos los periodos del horizonte temporal considerado y se utiliza su capacidad de producción máxima.

Como en caso anteriores, el resto de demanda eléctrica es satisfecha directamente desde la red central y para cubrir el resto de demanda térmica se utiliza la caldera.

La caldera, que es el último equipo al que se recurre para producir energía térmica, por ser el que implica un mayor coste, tiene que ser activada en todos los periodos, aunque su activación podría haber sido evitada en torno al periodo 10 de haber contado con una capacidad máxima del equipo de cogeneración mayor, o en torno al periodo 60 de haber contado con una previsión de la fuente renovable solar térmica algo mayor, tal como se puede apreciar en la Figura 56.

9.2.5. Escenario 5

Datos específicos

En el Escenario 5 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 27.

Tabla 27: Equipos presentes en el Escenario 5

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	
Fuente renovable de energía eólica	
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	
Caldera	✓
Batería	✓
Acumulador térmico	✓

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar las cargas inicial y máxima de los dos elementos almacenadores que se consideran en este caso y que aparecen en la Tabla 28.

Tabla 28: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 5

$I_{15,0}$ (KWh) (Batería)	5000
$I_{max\ 15}$ (KWh) (Batería)	5000
$I_{16,0}$ (KWh) (Acumulador térmico)	2500
$I_{max\ 16}$ (KWh) (Acumulador térmico)	2500

Salidas del modelo

La Tabla 29 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 29: Salidas del modelo para el Escenario 5

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
1006,028859208 €	14,31 s

Análisis de resultados

En este escenario intervienen: elementos de generación eléctrica y térmica (equipo de cogeneración, caldera y red) y dos elementos de almacenamiento energético (batería y acumulador); es decir, los únicos dispositivos del sistema energético desarrollado que no se van a tener en cuenta en este escenario son las fuentes de energía renovables.

La Figura 57 muestra las consignas eléctricas, generadas por el programa, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 5. Por su parte, la Figura 58 refleja el nivel de carga de la batería en cada uno de los periodos del horizonte temporal considerado, que está en consonancia con el perfil energético mostrado en la gráfica de las consignas eléctricas.

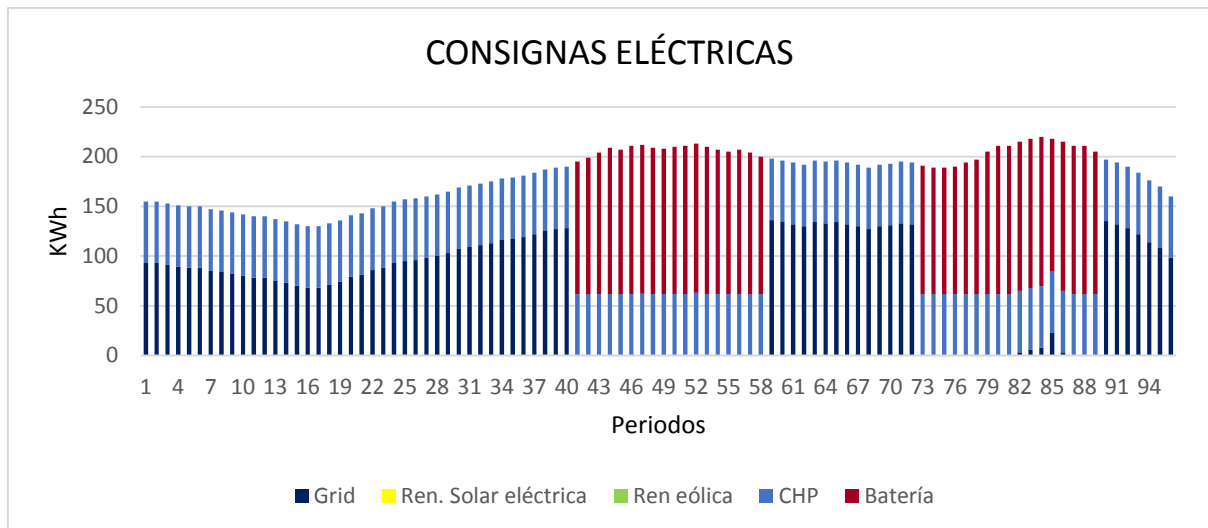


Figura 57: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 5

La producción de energía eléctrica junto con la energía cedida por la batería coincide con la demanda eléctrica en cada periodo. Es posible extraer esta conclusión, ya que:

- El perfil de producción eléctrica coincide con el perfil de demanda.
- No hay excesos de energía.
- El nivel de carga de la batería siempre disminuye, tal como se observa en la Figura 58, por lo que en ningún periodo se produce energía eléctrica de sobra para almacenarla en la batería. Esto es posible porque la batería se encuentra inicialmente cargada.

En este escenario, es posible satisfacer la demanda eléctrica de tres formas distintas: desde la red, haciendo uso del equipo de cogeneración o haciendo uso de la carga almacenada en la batería (la cual, en este caso, únicamente se descarga, como se ha comentado).

Lo ideal sería satisfacer toda la demanda eléctrica a partir de la carga almacenada en la batería, ya que el coste variable se imputa por cada unidad de energía que pasa a ser almacenada por este dispositivo, por lo que la carga inicial almacenada en la batería no supone coste variable. El problema o limitación es que esta carga es de 5000 KWh, por lo que no es suficiente para cubrir toda la demanda del horizonte considerado.

Así, el equipo de cogeneración va a estar activo en todos los periodos, haciendo uso de su capacidad de producción máxima.

El resto de energía eléctrica tendrá que ser abastecida a partir de la batería o desde la red. En los periodos situados en la franja horaria de mayor coste unitario de la red, se hará uso de la carga de la batería para cubrir la demanda eléctrica no satisfecha a partir del equipo de cogeneración. Por eso, en la Figura 58 se aprecia un primer tramo donde la batería se mantiene cargada (y se compra energía eléctrica a la red para satisfacer la demanda), un segundo tramo donde el nivel de la batería disminuye por ser utilizada esta energía y un tercer y cuarto tramo, donde se repite la lógica de los dos primeros tramos.

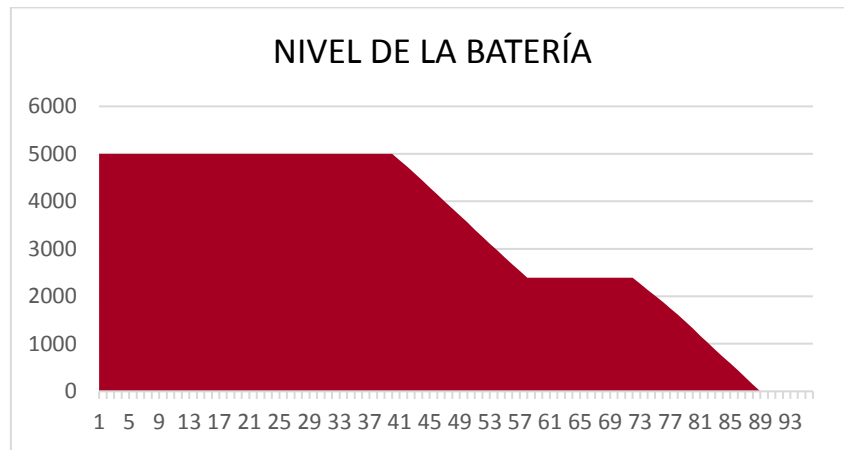


Figura 58: Nivel de carga de la batería en el Escenario 5

La Figura 59 muestra las consignas térmicas, generadas por el programa, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 5. Por su parte la Figura 60 refleja el nivel de carga del acumulador térmico en cada uno de los periodos del horizonte temporal considerado.

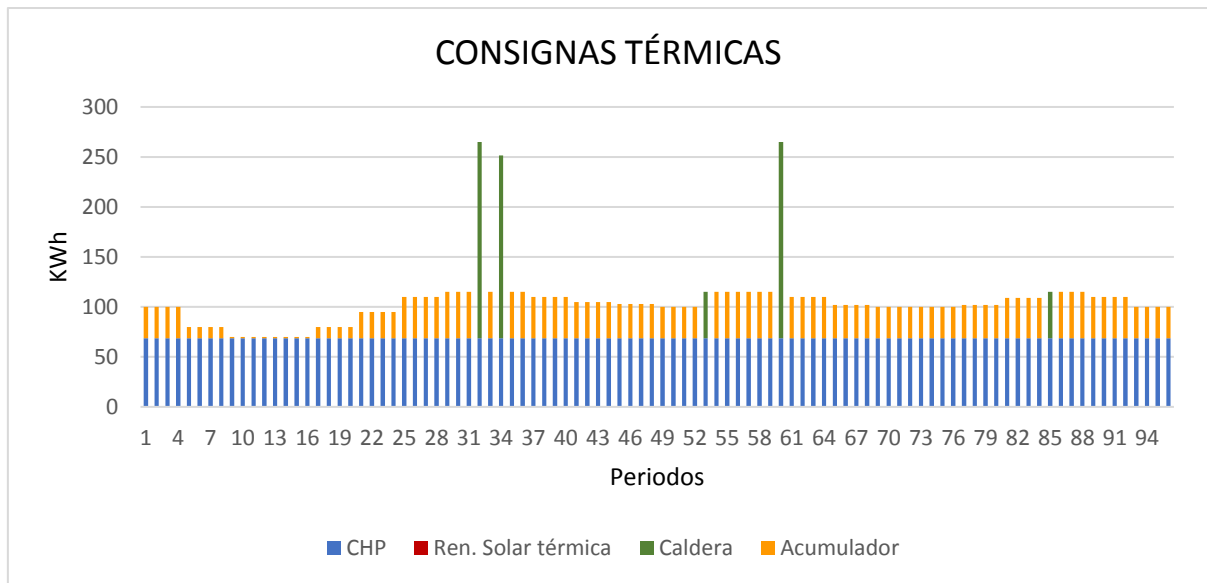


Figura 59: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 5

Para cubrir la demanda de energía térmica, se utiliza el equipo de cogeneración, haciendo uso de su capacidad máxima (simultáneamente a su producción de energía eléctrica), el acumulador y la caldera.

Al igual que ocurría con la batería en el caso de la energía eléctrica, la forma más económica de satisfacer la demanda térmica es también a partir de la energía que se encuentra inicialmente en el acumulador. De hecho, como se observa en la gráfica de la Figura 60, toda esta carga es utilizada, quedando el nivel de energía a cero al final del horizonte temporal de 96 periodos.

Lo que ocurre en este caso es que la tercera forma de obtener energía térmica es a partir de la producción energética en la caldera. Debido a que la caldera en funcionamiento en un periodo determinado implica un coste fijo en dicho periodo, se va a producir energía térmica en exceso, producción que se va a concentrar en algunos periodos, haciendo uso del acumulador para almacenar este exceso de energía; esto se puede comprobar si se observan los picos de la gráfica de la Figura 60. La energía almacenada será cedida en los casos en que sea necesario. Globalmente, la energía que produce la caldera en el conjunto de los 96 periodos considerados es igual a la diferencia entre la demanda térmica global y la energía producida por el equipo de cogeneración junto con la carga inicial del acumulador.

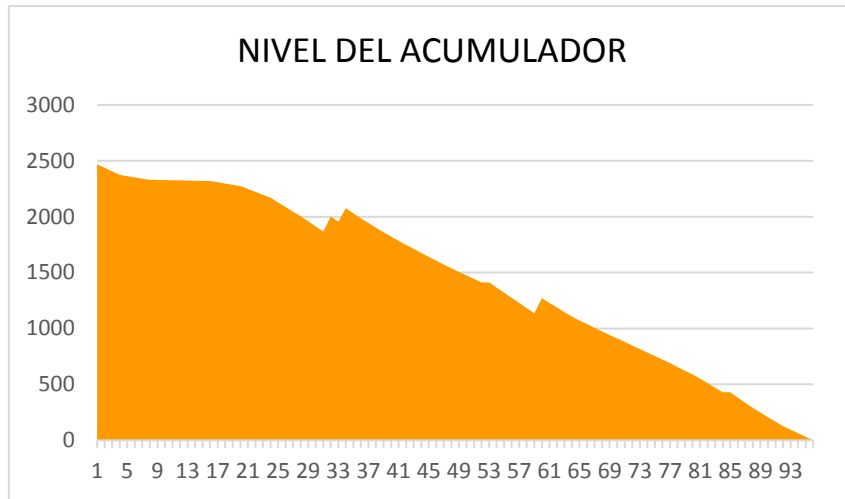


Figura 60: Nivel de carga del acumulador en el Escenario 5

9.2.6. Escenario 6

Datos específicos

En el Escenario 6 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 30.

Tabla 30: Equipos presentes en el Escenario 6

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	
Fuente renovable de energía eólica	
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	
Caldera	✓
Batería	✓
Acumulador térmico	✓

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar las cargas inicial y máxima de los dos elementos almacenadores que se consideran en este caso y que aparecen en la Tabla 31.

Tabla 31: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 6

$I_{15,0}$ (KWh) (Batería)	10000
$I_{max\ 15}$ (KWh) (Batería)	10000
$I_{16,0}$ (KWh) (Acumulador térmico)	5000
$I_{max\ 16}$ (KWh) (Acumulador térmico)	5000

Este escenario cuenta con los mismos equipos que el caso anterior. La diferencia es que ahora se considera que la batería y el acumulador térmico cuentan con una carga inicial y una carga máxima de almacenamiento muy superior.

Salidas del modelo

La Tabla 32 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 32: Salidas del modelo para el Escenario 6

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
395,6376354226 €	0,53 s

Análisis de resultados

Como ya se ha comentado, en este escenario intervienen los mismos equipos de generación y almacenamiento que en el escenario anterior. A continuación, se analiza cómo influye y cómo cambian los resultados obtenidos al considerar que la batería y el acumulador cuentan inicialmente con una carga mayor y disponen de una capacidad máxima también superior al caso anterior.

La Figura 61 muestra las consignas eléctricas, generadas por el programa, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 6. Por su parte la Figura 62 refleja el nivel de carga de la batería en cada uno de los periodos del horizonte temporal considerado, que está en consonancia con el perfil energético mostrado en la gráfica de las consignas eléctricas.

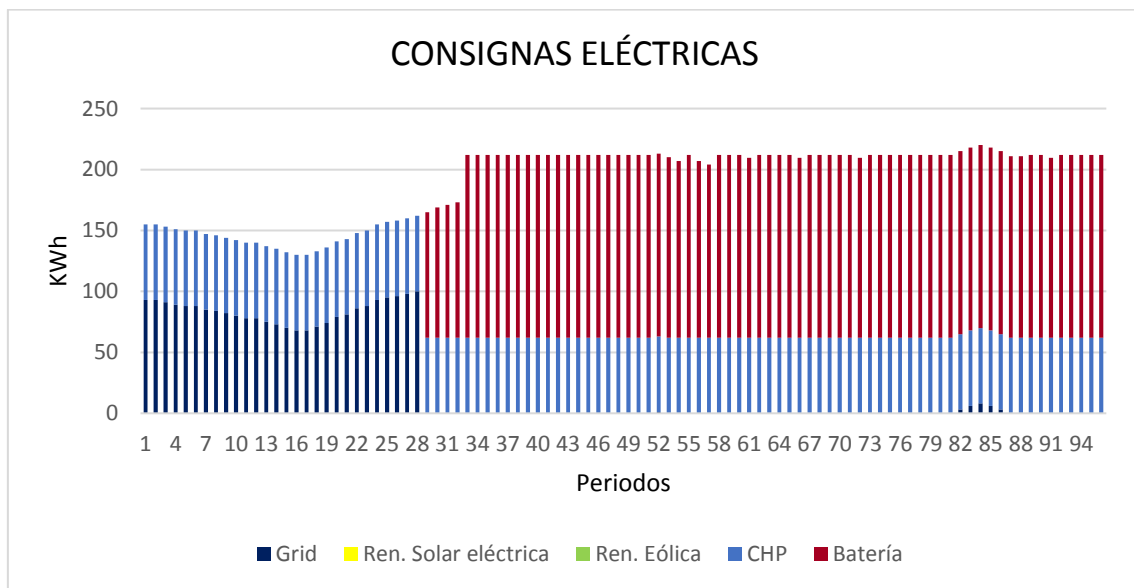


Figura 61: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 6

La Figura 61 muestra un perfil de producción de energía eléctrica que no coincide con el de demanda, lo que va a implicar un exceso eléctrico que se va a vender a la red.

Se observa que el equipo de cogeneración va a estar presente en todos los periodos, implicando por ello un coste fijo. Se utiliza la máxima capacidad de este dispositivo generador, ya que el coste variable de producción es muy pequeño.

Por otro lado, se dispone de la red central y de la energía de la batería para cubrir la demanda. En los primeros periodos, lo óptimo, según el programa implementado y la resolución por parte del optimizador Gurobi, es comprar el resto de energía eléctrica necesaria directamente a la red; esto se debe a que la red dispone de unos precios de KWh bajos para esos periodos del horizonte temporal considerado. Así, la batería se mantiene con una carga constante durante los primeros periodos, como se observa en la Figura 62.

Posteriormente, se hará uso de toda la energía almacenada en la batería, que se utilizará: bien para cubrir la demanda o bien para vender este exceso energético a la red. En la resolución, se tiene en cuenta que la batería tiene una capacidad máxima de descarga (lo que viene reflejado en una de las restricciones del modelo).

La batería entra en escena en los periodos donde sube el precio de la red, y se descarga completamente, ya que el exceso eléctrico produce beneficio al venderlo a la red. En caso de haber considerado un horizonte temporal mayor, seguramente el nivel de la batería en el periodo 96 (último periodo del horizonte considerado) habría sido distinto de cero.

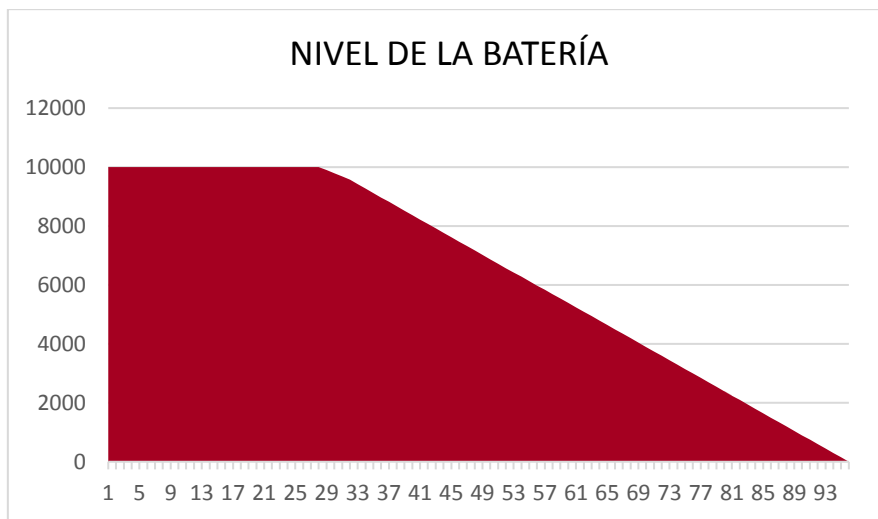


Figura 62: Nivel de carga de la batería en el Escenario 6

Las Figura 63 y Figura 64 muestran las consignas térmicas de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 6 y el nivel de carga de acumulador, respectivamente, en cada uno de los periodos del horizonte temporal considerado.

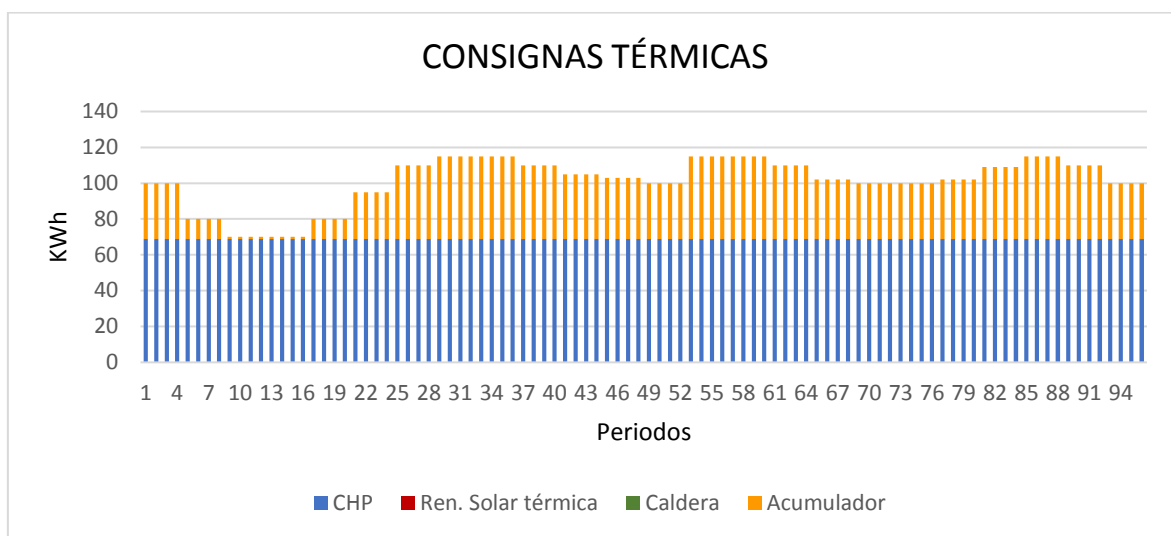


Figura 63: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 6

Podría llamar la atención el hecho de que el equipo de cogeneración esté activo en todos los periodos y que el nivel de carga del acumulador al final del horizonte temporal considerado sea no nulo (como se observa en la Figura 64), cuando se ha comentado que la forma más económica de satisfacer la demanda es a partir de la carga inicial de los equipos de almacenamiento (si se tiene en cuenta la no intervención de las fuentes renovables de energía en este escenario). Esto es debido a que el equipo de cogeneración se activa para satisfacer la demanda eléctrica, por lo que simultáneamente se produce energía térmica.

El resto de la demanda térmica se cubre haciendo uso de la energía almacenada en el acumulador inicialmente, con lo que disminuye el nivel de carga de este equipo. En la Figura 64, se observa un primer tramo con un descenso de carga más lento, por la menor demanda térmica existente en los primeros periodos; y un segundo tramo con una pendiente más pronunciada.

Por su parte, se observa que no es necesaria la activación de la caldera para la producción de energía térmica en ningún periodo.

En cuanto al coste que resulta de producir la energía térmica y eléctrica necesaria para satisfacer la demanda, hay que decir que es considerablemente inferior al de otros escenarios. Esto se debe a que los equipos de almacenamiento energético están

inicialmente cargados con una gran cantidad de energía, energía que no implica coste variable.

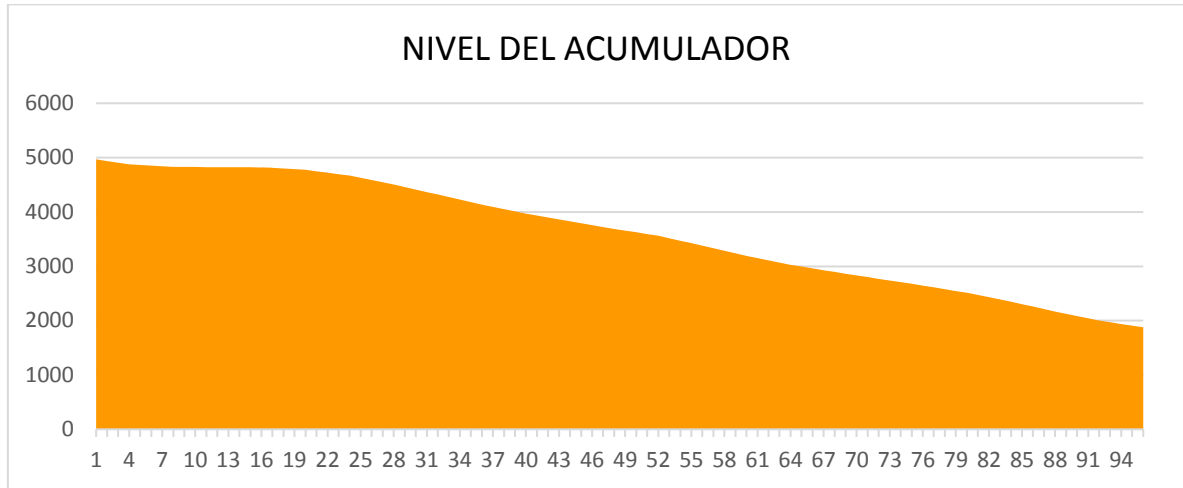


Figura 64: Nivel de carga del acumulador en el Escenario 6

Por último, la gráfica de la Figura 65 refleja los excesos eléctricos en los distintos periodos antes comentados. Como se puede observar, no se producen excesos térmicos, ya que la energía térmica en exceso no produce ningún beneficio, al contrario de lo que ocurre con la energía eléctrica.

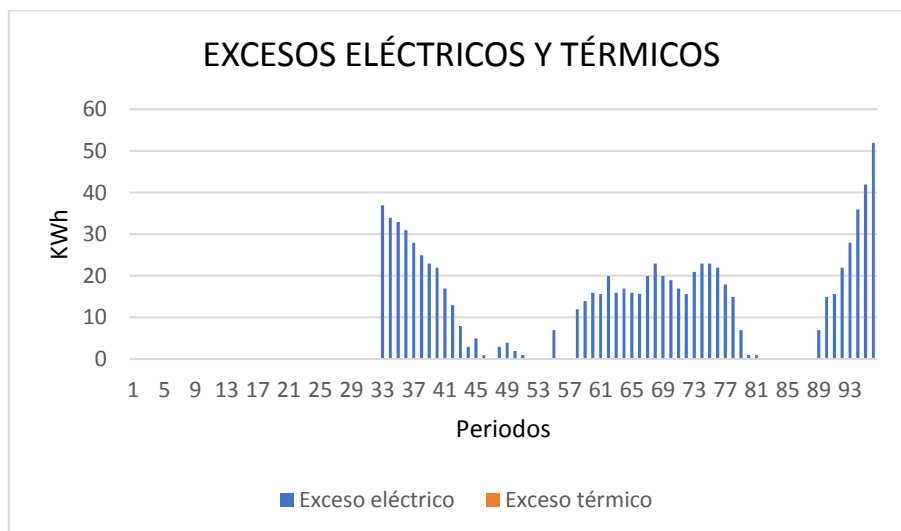


Figura 65: Excesos eléctricos y térmicos en el Escenario 6

9.2.7. Escenario 7

Datos específicos

En el Escenario 7 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 33.

Tabla 33: Equipos presentes en el Escenario 7

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	
Fuente renovable de energía eólica	
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	
Caldera	✓
Batería	✓
Acumulador térmico	✓

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar las cargas inicial y máxima de los dos elementos almacenadores que se consideran en este caso y que aparecen en la Tabla 34.

Tabla 34: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 7

$I_{15,0}$ (KWh) (Batería)	0
$I_{max\ 15}$ (KWh) (Batería)	10000
$I_{16,0}$ (KWh) (Acumulador térmico)	0
$I_{max\ 16}$ (KWh) (Acumulador térmico)	5000

Este escenario cuenta con los mismos equipos que los dos casos anteriores. La diferencia es que ahora se considera que la batería y el acumulador térmico no están cargados al

inicio del horizonte temporal considerado, sino que comienzan con un nivel nulo de energía.

Salidas del modelo

La Tabla 35 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 35: Salidas del modelo para el Escenario 7

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
1625,046009329 €	2,5 s

Análisis de resultados

Como ya se ha comentado, en este escenario intervienen los mismos equipos de generación y almacenamiento que en los dos escenarios anteriores. A continuación, se analiza cómo influye y cómo cambian los resultados obtenidos al considerar que la batería y el acumulador cuentan inicialmente con un nivel nulo de energía.

La Figura 66 muestra las consignas eléctricas, generadas por el programa, de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 7. Por su parte la Figura 67 refleja el nivel de carga de la batería en cada uno de los periodos del horizonte temporal considerado.

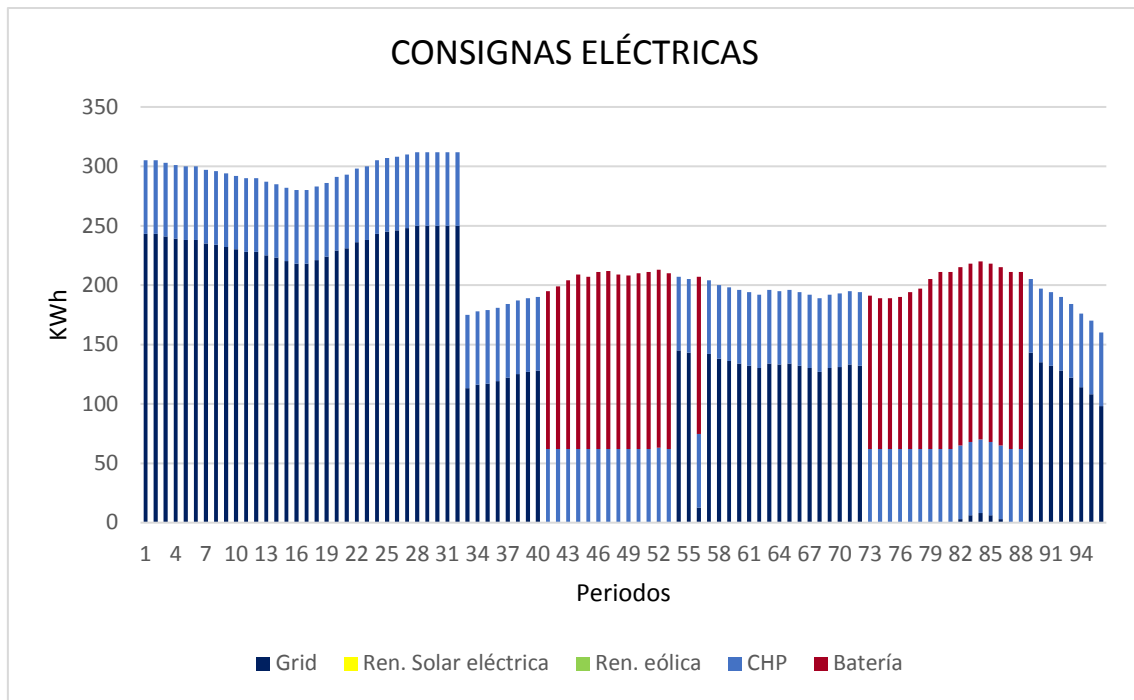


Figura 66: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 7

Se procede a analizar las consignas eléctricas generadas por el programa en este escenario concreto a partir de la gráfica que representa el nivel de carga de la batería a lo largo del horizonte temporal considerado, representado en la Figura 67:

- Inicialmente, se observa un primer tramo donde la batería está cargándose. Esto es debido a que los primeros periodos se sitúan en un periodo tarifario de la red con precios bajos, por lo que se adquiere energía de la misma. Por su parte, el equipo de cogeneración va a estar activo en todos los periodos, produciendo la máxima cantidad de energía que su capacidad le permite.
- Posteriormente, se observa un tramo donde el nivel de carga de la batería se mantiene constante: los precios de la red son más caros, por lo que únicamente se va a comprar la diferencia de energía entre la demanda y la que produce el equipo de cogeneración.
- A continuación, se observa un tramo en el que disminuye el nivel de carga de la batería: los periodos de dicho tramo se encuentran en el periodo tarifario de la red más caro, por lo que se va a hacer uso de la energía que se ha ido almacenando previamente en la batería para satisfacer la demanda.

- Finalmente, se aprecia otro tramo de nivel de carga constante y otro de descenso, que se explica con los mismos argumentos comentados.

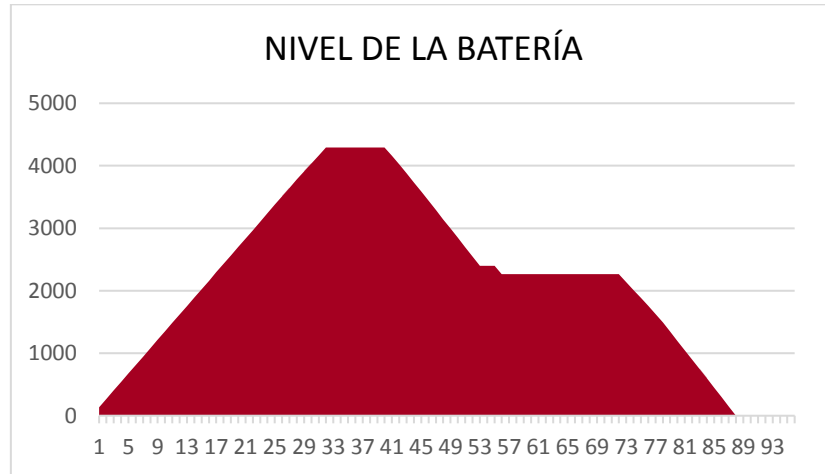


Figura 67: Nivel de carga de la batería en el Escenario 7

Las Figura 68 y Figura 69 muestran las consignas térmicas de los diferentes equipos que intervienen en el Escenario 7 y el nivel de carga de acumulador, respectivamente, en cada uno de los periodos del horizonte temporal considerado.

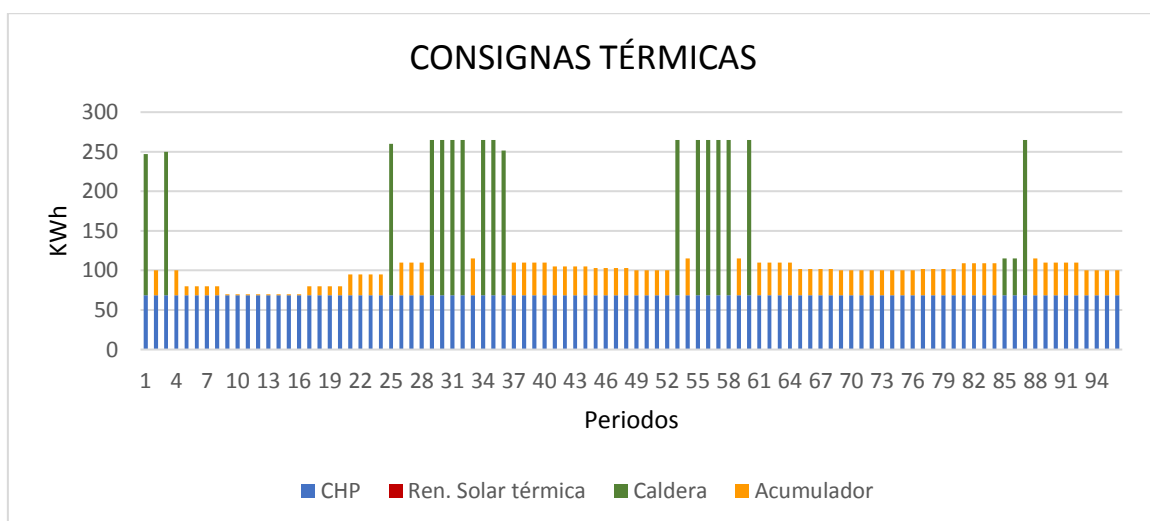


Figura 68: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 7

En cuanto a la energía térmica, en este caso se produce un comportamiento similar al que tenía lugar en el Escenario 5: la demanda térmica tiene que ser cubierta a partir del equipo de cogeneración, la energía que se vaya acumulando y descargando en los distintos periodos haciendo uso del acumulador, o mediante la producción en la caldera.

El equipo de cogeneración está activo en todos los periodos, cubriendo buena parte de la demanda térmica. El resto de demanda tiene que ser satisfecha a partir del acumulador o de la caldera; como el acumulador está inicialmente descargado, se tiene que activar la caldera al principio del horizonte temporal. Se observa que la caldera sólo producirá energía en algunos periodos en grandes cantidades, para almacenar esta energía en exceso en el acumulador, desde donde se podrá obtener energía para satisfacer la demanda de periodos posteriores. La razón por la que la caldera produce energía en pocos periodos y en grandes cantidades es que el funcionamiento de este equipo implica un coste fijo; por ello, se producen grandes cantidades de energía concentradas en unos pocos periodos. Esto se traduce en una serie de picos en la Figura 69, que reflejan periodos de carga y de descarga del acumulador térmico.

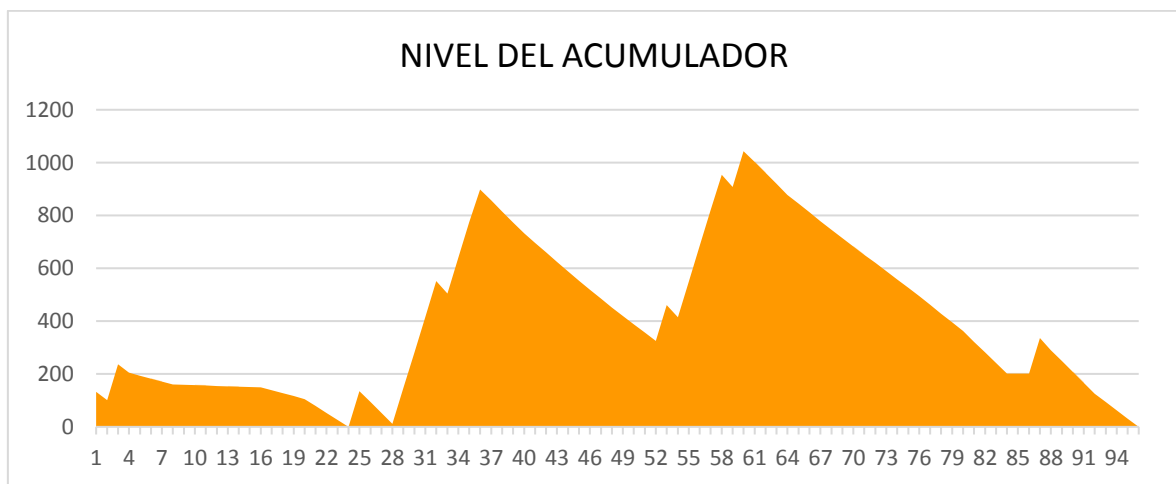


Figura 69: Nivel de carga del acumulador en el Escenario 7

Por último, hay que comentar que tanto la batería como el acumulador cuentan con un nivel de carga nulo al final del horizonte temporal, ya que no tendría sentido producir energía de sobra para que quede almacenada en los elementos de almacenamiento si lo que se pretende es minimizar los costes de producción energética.

9.2.8. Escenario 8

Datos específicos

En el Escenario 8 se encuentran presentes los equipos que figuran en la Tabla 36.

Tabla 36: Equipos presentes en el Escenario 8

Grid	✓
Fuente renovable de energía solar fotovoltaica	✓
Fuente renovable de energía eólica	✓
CHP	✓
Fuente renovable de energía solar térmica	✓
Caldera	✓
Batería	✓
Acumulador térmico	✓

Se observa que en este escenario están disponibles todos los equipos de generación y almacenamiento energético de la instalación.

Como datos concretos de este escenario, hay que indicar:

- La previsión de las fuentes de energía renovables presentes en el modelo. Se van a considerar las previsiones mostradas en las gráficas de las Figura 47, Figura 48 y Figura 49 del Escenario 3.
- Las cargas inicial y máxima de los dos elementos almacenadores que se consideran en este caso y que aparecen en la Tabla 37.

Tabla 37: Carga inicial y máxima de los elementos almacenadores Escenario 8

$I_{15,0}$ (KWh) (Batería)	5000
$I_{max\ 15}$ (KWh) (Batería)	5000
$I_{16,0}$ (KWh) (Acumulador térmico)	2500
$I_{max\ 16}$ (KWh) (Acumulador térmico)	2500

Salidas del modelo

La Tabla 38 muestra las dos salidas principales del modelo de optimización desarrollado (coste total en € necesario para satisfacer la demanda eléctrica y térmica y tiempo de resolución) para este escenario concreto.

Tabla 38: Salidas del modelo para el Escenario 8

Coste total (€)	Tiempo de resolución (segundos)
896,9626168866 €	54,75 s

Análisis de resultados

En este escenario se consideran disponibles todos los elementos de generación y almacenamiento energético que forman parte del sistema energético considerado.

Las Figura 70 y 71 muestran las consignas eléctricas y térmicas de los diferentes equipos, que han sido generadas por el programa implementado con el objetivo de minimizar los costes de producción.

Las Figura 72 y Figura 73 reflejan, respectivamente, el nivel de carga de la batería y el acumulador térmico.

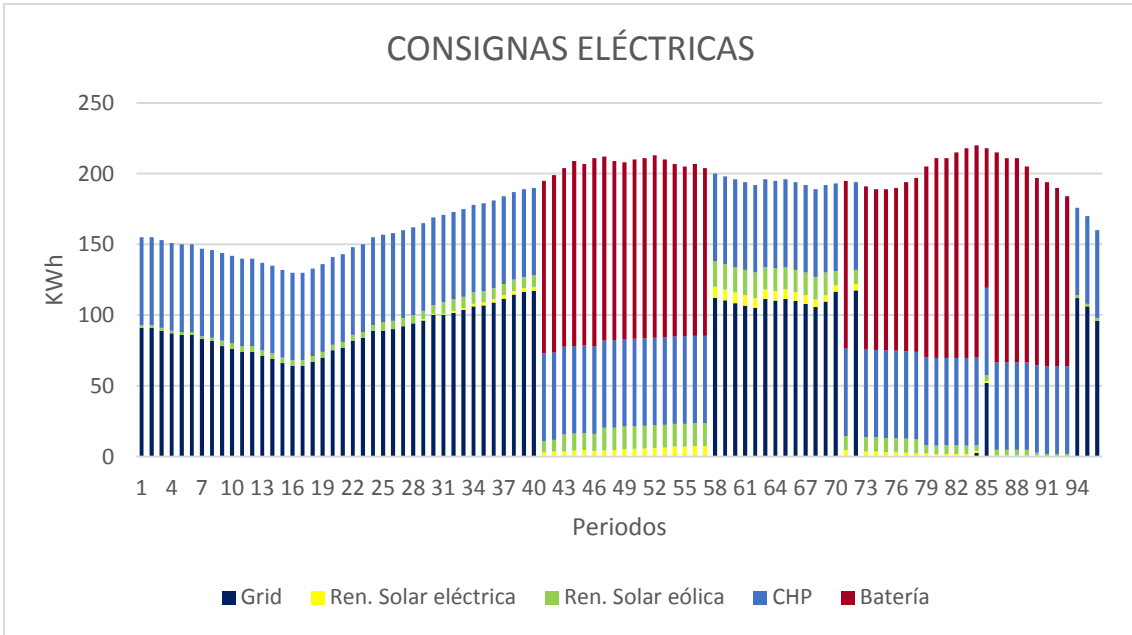


Figura 70: Consignas eléctricas generadas por el programa en el Escenario 8

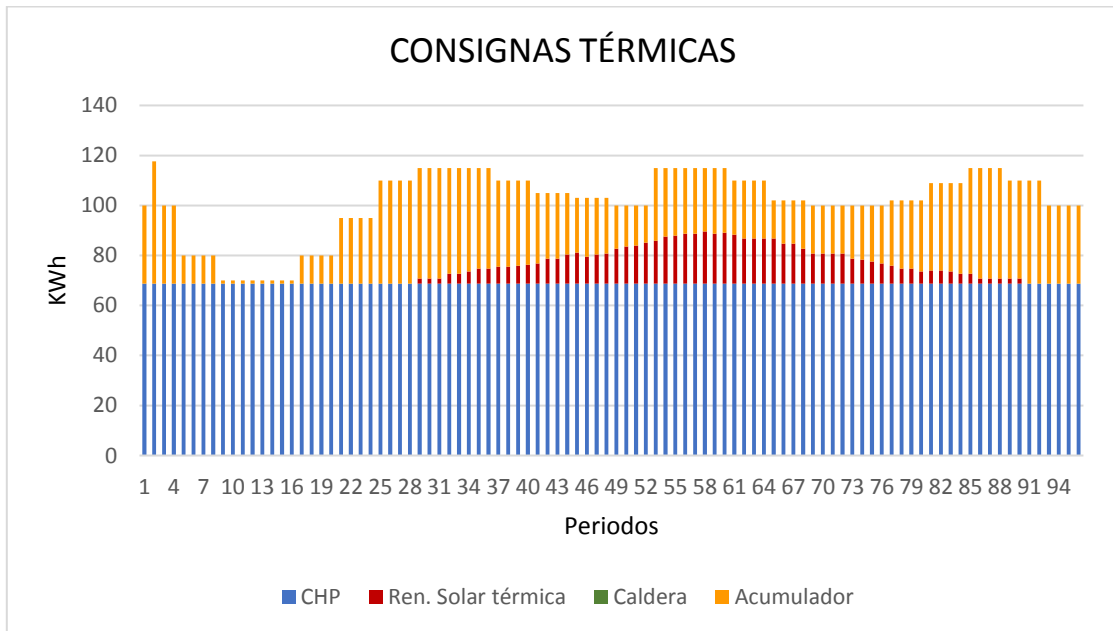


Figura 71: Consignas térmicas generadas por el programa en el Escenario 8

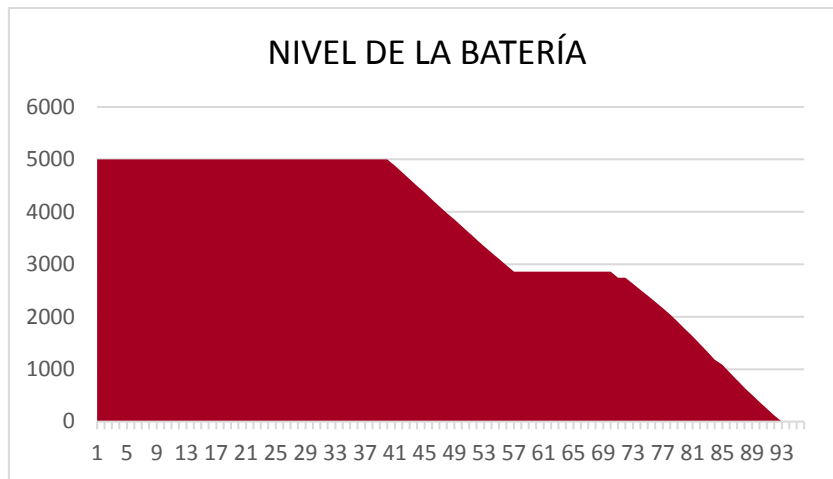


Figura 72: Nivel de carga de la batería en el Escenario 8

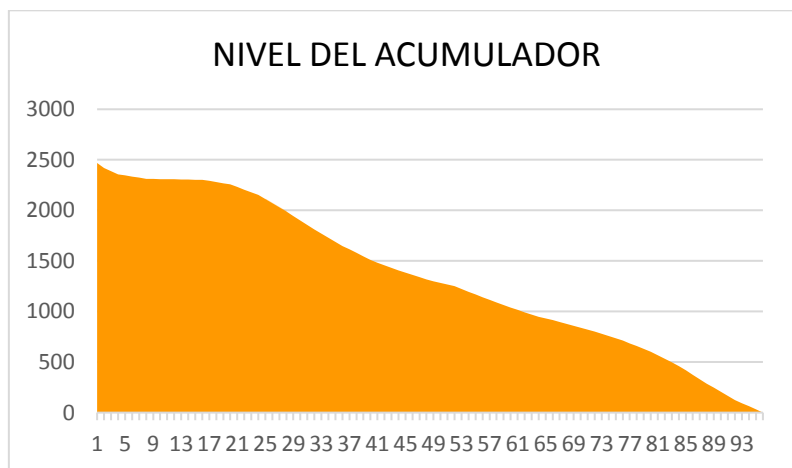


Figura 73: Nivel de carga de la batería en el Escenario 8

El análisis de este escenario es el resultado de la unión de los distintos fenómenos que se han ido analizando en escenarios anteriores. Es posible hacer una serie de comentarios generales:

- La energía producida por las fuentes renovables de energía es la primera que se utiliza para abastecer la demanda, ya que es la que resulta más rentable desde el punto de vista económico.
- El equipo de cogeneración está activo en todos los periodos y se utiliza su máxima capacidad de producción para rentabilizar el alto coste fijo que implica su

funcionamiento, ya que el coste variable de la unidad de energía (KWh) es relativamente bajo.

- La batería y el acumulador están inicialmente cargados, pero finalizan el horizonte temporal de 96 periodos con nivel de carga nulo, lo que cuadra bien con las expectativas; carecería de sentido dejar energía almacenada en estos equipos si el objetivo es minimizar los costes de producción.
- La demanda eléctrica no satisfecha a partir de las fuentes renovables de energía o el equipo de cogeneración tiene que ser cubierta con la carga de la batería o desde la red central; lo ideal sería utilizar la carga de la batería, pero, al ser ésta limitada, lo óptimo es actuar de la siguiente forma: obtener energía de la red en los periodos tarifarios de menor coste, y obtener la energía de la carga almacenada en la batería cuando el precio de la red sea elevado.
- No es necesaria la activación de la caldera para satisfacer la demanda térmica.
- No se producen excesos energéticos.

9.3. Análisis global de resultados de la batería de escenarios de 96 periodos

En la gráfica de la Figura 74, se representa el coste total en €, que resulta de producir la energía eléctrica y térmica necesaria para satisfacer la demanda de la instalación de cada uno de los 8 escenarios de la batería de problemas con horizonte temporal de 96 periodos.

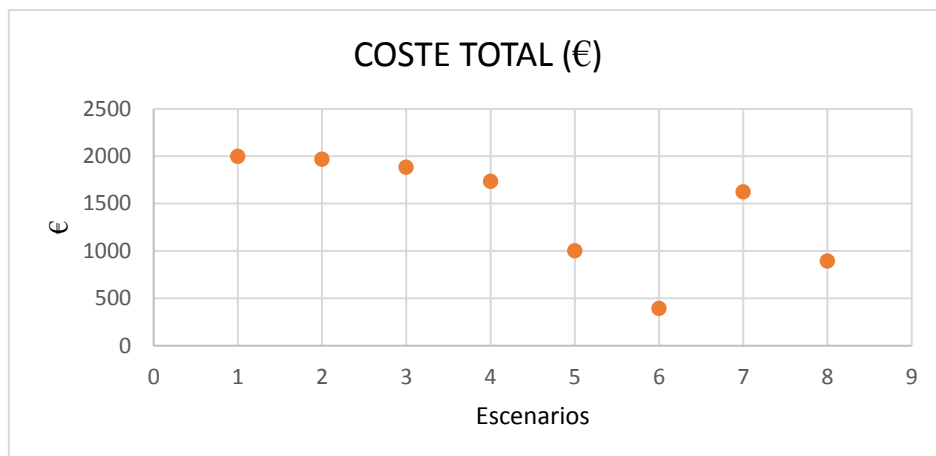


Figura 74: Coste total de cada uno de los escenarios de la batería de problemas con horizonte temporal de 96 periodos

Es posible hacer una serie de comentarios relativos a la gráfica de la figura anterior:

- En primer lugar, es posible analizar el coste de los cuatro primeros escenarios de forma conjunta.
 - En el primer escenario únicamente participan el equipo de cogeneración, la red central y la caldera. Se trata del escenario de mayor coste.
 - En el segundo escenario intervienen las fuentes de energía renovables, además de los equipos del caso anterior. Se aprecia una leve disminución de precio. El motivo de que la diferencia en el coste sea tan pequeña es que las previsiones de las fuentes de energías limpias son muy bajas, por lo que se va a obtener de ellas una cantidad de energía muy pequeña.
 - En los escenarios tercero y cuarto, van aumentando las previsiones de las fuentes renovables, lo que disminuye el coste de producción a medida que aumentan las previsiones.
- En segundo lugar, los escenarios 5, 6 y 7 cuentan con los mismos equipos de generación y almacenamiento energético: el equipo de cogeneración, la red, la caldera y los elementos de almacenamiento energético (batería y acumulador térmico).

- En el escenario 5, la batería y el acumulador están inicialmente cargados con 5000 KWh y 2500 KWh, lo que reduce considerablemente el coste de producción, ya que, como se ha comentado en alguna ocasión, el coste variable en estos equipos se imputa por cada unidad de energía que pasa a ser almacenada, no por la cantidad de energía almacenada en cada periodo.
- En el escenario 6, la batería y el acumulador están inicialmente cargados con el doble de energía que el caso anterior, lo que reduce el coste total de producción de forma significativa.
- En el escenario 7, la batería y el acumulador poseen una carga nula al inicio del horizonte temporal considerado, lo que implica que el coste total de producción sea superior al de los dos casos anteriores. No obstante, se aprecia que posee un coste inferior al del escenario 1, el cual contaba con los mismos equipos de generación, pero con ninguno de almacenamiento; así, es posible concluir que la incorporación de elementos de acumulación energética en la instalación resulta rentable desde el punto de vista económico, ya que, a largo plazo, los beneficios obtenidos gracias a su uso justificarán la inversión que requieren inicialmente.
- Finalmente, en el escenario 8 se consideran disponibles todos los elementos de generación y almacenamiento energético presentes en la instalación. En este caso, la batería y el acumulador térmico están inicialmente cargados con la misma cantidad de energía que en el escenario 5; si comparamos el coste de ambos, se observa que el coste del caso 8 es inferior al del caso 5, y esto es debido a la entrada en escena de las fuentes renovables de energía.

En la Figura 75, aparece representado el tiempo que tarda el programa desarrollado, haciendo uso del optimizador Gurobi, en encontrar la configuración óptima de los equipos de generación y almacenamiento energético disponibles para satisfacer la demanda con el menor coste posible.



Figura 75: Tiempo de resolución de los escenarios de la batería de problemas con horizonte temporal de 96 periodos

Todos los tiempos de resolución son bastante pequeños, ya que se trata de un modelo lineal y el optimizador Gurobi es muy potente.

Se observa que el tiempo que se tarda en alcanzar el óptimo en el Escenario 8 es muy superior al del resto de escenarios, lo que puede estar asociado a la intervención de todos los equipos disponibles en este caso.

10. CONCLUSIONES

El presente Trabajo Fin de Grado tenía como objetivo el desarrollo y prueba de un modelo matemático de optimización que permitiese llevar a cabo una gestión óptima de los flujos de energía eléctrica y térmica de una instalación, para cubrir toda la demanda energética de dicha instalación con el menor coste posible.

En primer lugar, se han presentado los aspectos negativos y puntos débiles del sistema energético actual, entre los que se pueden destacar dos: por un lado, la utilización de los combustibles fósiles como fuente primaria de energía para satisfacer la demanda de los usuarios; por otro lado, el carácter centralizado del modelo actual, que provoca una alta dependencia de la red central y altos costes de distribución, así como una gran dificultad para integrar nuevas tecnologías de producción energética más baratas.

En este contexto surgen nuevos enfoques para la mejora de la eficiencia energética. Así, se propone un nuevo modelo: la generación distribuida de energía, que se caracteriza por ser un modelo descentralizado, es decir, la energía se produce en lugares próximos a los puntos de consumo, lo que trae consigo numerosas ventajas: menor dependencia de la red central, menores pérdidas energéticas y costes de distribución y posible integración de nuevas tecnologías que permiten producir energía de forma más eficiente, más económica y más limpia.

En esta dirección se diseña una instalación que cuenta con una serie de equipos de generación energética (fuentes de energía renovables (solar fotovoltaica, solar térmica y eólica), equipo de cogeneración, caldera y red central) y con una serie de equipos de almacenamiento eléctrico (batería) y térmico (acumulador térmico). La producción energética de estos equipos por separado no justificaría la inversión inicial requerida para incluirlos en el sistema energético actual; sin embargo, la combinación de todos ellos resulta en un coste de producción muy inferior al existente en el modelo energético actual, además de constituir una alternativa mucho más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Para comprobar la funcionalidad y eficiencia de este nuevo sistema energético, se ha desarrollado un modelo matemático de optimización, cuyo objetivo es minimizar el coste de satisfacer la demanda eléctrica y térmica de la instalación, cumpliendo con una serie de restricciones técnicas y balances energéticos de los diferentes equipos que intervienen en la instalación.

Posteriormente, se ha ‘traducido’ ese modelo matemático a lenguaje Python y se ha utilizado el optimizador Gurobi para su resolución.

Con el objetivo de comprobar si el modelo desarrollado funciona conforme a lo esperado, se han planteado una serie de escenarios con distintas características:

- En primer lugar, se ha planteado un escenario inicial con un horizonte temporal de 10 periodos. Se ha ejecutado este escenario a modo de prueba, ya que el reducido horizonte temporal considerado en el mismo facilita la detección de posibles fallos.
- A continuación, se ha ejecutado una batería de 8 escenarios con un horizonte temporal de 96 periodos de 15 minutos, que constituyen un día. En los diferentes casos, se han ido modificando datos de entrada del modelo como son las previsiones de las fuentes renovables de energía o las cargas inicial y máxima de almacenamiento de los equipos de acumulación energética.

Tras la ejecución de estos escenarios, se han obtenido los resultados esperados y se han alcanzado conclusiones coherentes que han sido detalladas en el apartado de análisis de los mismos.

Por tanto, tras el presente estudio, es posible asegurar que los beneficios derivados de la implantación de un modelo energético descentralizado como es la generación distribuida y la incorporación de nuevas tecnologías más eficientes constituyen una realidad y, a largo plazo, justifican la inversión inicial que requieren estos nuevos equipos de producción y almacenamiento energético.

11. REFERENCIAS

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2017). La energía en Europa : situación actual.
<https://eea.europa.eu>

Barrantes, J. A. (2012). *Smart Grids. Diseñando el sistema eléctrico del futuro*.
https://www.aec.es/c/document_library/get_file?uuid=697160ba-ed93-45ce-9d2a-2ed47c445ceb&groupId=10128

BP (BritishPetroleum). (2016). BP Statistical Review of World Energy 2016.
https://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2016/bp-statistical-review-world-energy-2016.html

Costa Campi, M. T. (2016). Evolución del sector eléctrico español. *Revistas ICE*, 889,890. <http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/>

De la Fuente Ortiz, J. (2016). Cogeneración, clave para competir en tiempos de contracción económica. *Energética XXI*, 157, 72–73.

Eurostat. (2016). *Energy, transport and environment indicators 2016 edition*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/7731525/KS-DK-16-001-EN-N.pdf/cc2b4de7-146c-4254-9521-dcbd6e6fafa6>

Fernercom. (2007). Guía Básica de la Generación Distribuida. *Fundación de La Energía de La Comunidad de Madrid*, 65.

Folch, R., Palau Garrabou, J. M., & Moreso Ventura, A. (2013). *El transporte eléctrico y su impacto ambiental*.

http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/el_transporte_electrico_y_su_impacto_ambiental.pdf

Galdón Ruiz, J. A., Marí Soucause, B., & Guaita Pradas, I. (2016). *La dependencia energética en España por sectores y su impacto económico*.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/84250/2016-06-dependencia-8al.pdf?sequence=2>

Red Eléctrica de España. (2017a). *Compromiso contra el cambio climático del Grupo Red Eléctrica*.

http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/compromiso_cambioclimatico_2017.pdf

Red Eléctrica de España. (2017b). *INTEGRACIÓN SEGURA DE ENERGÍAS RENOVABLES*. www.ree.es