

Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA
HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA
DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y
TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN
CONSUMIDOR

Autor: Javier Ostos Curiel

Tutor: Pablo Cortés Achedad

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA
HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA
DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y
TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN
CONSUMIDOR**

Autor:

Javier Ostos Curiel

Tutor:

Pablo Cortés Achedad

Catedrático de la Universidad

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo de Fin de Grado: TÍTULO

Autor: Javier Ostos Curiel

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, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

Quiero agradecer y recordar, en este punto y final a mi carrera a todas las personas, que de una manera u otra han conseguido que llegar hasta aquí fuese posible. En primer lugar, y como no podría ser de otra manera, a mis padres, que nunca han escatimado en esfuerzos para hacérmelo todo lo más fácil posible. Al resto de mi familia, a mi hermana, a tía y a abuela Amadora, agradeceré siempre todo lo que hacéis por mí a diario.

A los grandes amigos que esta universidad me ha dado la oportunidad de conocer y que estoy seguro me acompañarán para siempre. Al resto de mis amigos y especialmente a mis compañeros de biblioteca que lo han hecho todo más ameno.

A mi tutor, Pablo Cortés por darme la oportunidad de trabajar con él y estar siempre dispuesto a ayudar. Al resto de trabajadores de la Escuela de Ingenieros, por poner su granito de arena

Javier Ostos Curiel

Sevilla, 2024

Resumen

El presente trabajo se basa en la aplicación de una heurística *greedy* al problema de suministro de energía eléctrica y térmica a un gran consumidor en una red de recursos de producción y almacenamiento de energía, con el objetivo de obtener la forma más rentable económicamente de suministrar energía térmica y calorífica a un gran consumidor. Para lograr este objetivo, se dispone de un sistema de generación de energía distribuida (DER), que incluye tanto fuentes de energías renovables como fuentes no renovables. Además, se contempla el uso de dispositivos de almacenamiento energético para optimizar la gestión de la energía generada.

El sistema descrito está modelado matemáticamente en forma de un problema de programación lineal mixta entera, lo que permite una representación precisa de las restricciones y objetivos del sistema. La resolución de este problema se llevará a cabo mediante la aplicación de una heurística *greedy*, la cual es conocida por su capacidad para proporcionar soluciones satisfactorias de manera eficiente en términos de tiempo computacional. Esta heurística permitirá identificar una estrategia óptima o casi óptima para satisfacer la demanda energética del consumidor.

En el desarrollo del estudio, se analizarán tanto los beneficios como las limitaciones inherentes a la aplicación de la heurística *greedy* en este contexto. Se espera que el enfoque propuesto ofrezca una solución económicamente viable para la gestión de la energía térmica y calorífica, maximizando el uso de las fuentes renovables y optimizando el uso de las fuentes no renovables y los dispositivos de almacenamiento.

Finalmente, se discutirá el impacto de los resultados obtenidos en términos de rentabilidad económica y eficiencia energética, así como las posibles mejoras y adaptaciones futuras del modelo para abordar las limitaciones identificadas. Este análisis permitirá evaluar la viabilidad de implementar sistemas similares en otros contextos y proporcionará una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la optimización de la gestión energética.

Abstract

The present work is based on the application of a greedy heuristic to the problem of supplying electric and thermal energy to a large consumer in a network of energy production and storage resources. The objective is to obtain the most economically profitable way to supply thermal and heat energy to a large consumer. To achieve this objective, a distributed energy generation system (DER) is available, which includes both renewable and non-renewable energy sources. Additionally, the use of energy storage devices is considered to optimize the management of the generated energy.

The described system is mathematically modeled as a mixed-integer linear programming problem, allowing for a precise representation of the system's constraints and objectives. The resolution of this problem will be carried out through the application of a *greedy* heuristic, known for its ability to provide satisfactory solutions efficiently in terms of computational time. This heuristic will identify an optimal or near-optimal strategy for meeting the consumer's energy demand.

Throughout the study, both the benefits and limitations inherent to the application of the *greedy* heuristic in this context will be analyzed. It is expected that the proposed approach will offer an economically viable solution for managing thermal and heating energy, maximizing the use of renewable sources and optimizing the use of non-renewable sources and storage devices.

Finally, the impact of the obtained results in terms of economic profitability and energy efficiency will be discussed, as well as possible future improvements and adaptations of the model to address the identified limitations. This analysis will allow for the evaluation of the feasibility of implementing similar systems in other contexts and will provide a solid foundation for future research in the field of energy management optimization.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Figuras	17
Notación	19
1 Introducción	21
2 OBJETIVO DEL PROYECTO	24
3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	25
4 MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN LINEAL MIXTA ENTERA	28
5 PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN mediante la aplicación de una heurística <i>greedy</i>	31
6 RESULTADOS	37
6.1 <i>Batería 1: Alta demanda eléctrica con demanda térmica constante.</i>	37
6.1.1 Escenario 1. Recursos de energía: GRID y Caldera	38
6.1.2 Escenario 2. Recursos de energía: GRID, CHP, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	39
6.1.3 Escenario 3. Recursos de energía: GRID, CHP, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	40
6.1.4 Escenario 4. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica y Eólica	41
6.1.5 Escenario 5. Recursos de energía: Baterías, Caldera y GRID.	42
6.1.6 Escenario 6. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	43
6.1.7 Escenario 7. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	44
6.1.8 Escenario 8. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	45
6.1.9 Escenario 9. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	46
6.1.10 Escenario 10. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías	47
6.2 <i>Batería 2: Demandas variables de energía eléctrica y térmica</i>	48
6.2.1 Escenario 1. Recursos de energía: GRID y Caldera.	49
6.2.2 Escenario 2. Recursos de energía: GRID y Caldera.	50
6.2.3 Escenario 3. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.	51
6.2.4 Escenario 4. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.	52
6.2.5 Escenario 5. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.	53
6.2.6 Escenario 6. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.	54
6.2.7 Escenario 7. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías.	55
6.2.8 Escenario 8. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías.	

	56	
6.2.9	Escenario 9 Recursos de energía: Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías	57
6.2.10	Escenario 10. Recursos de energía: Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías	58
6.3	<i>Análisis de los costes para cada escenario</i>	59
6.3.1	Costes en la Batería 1	59
6.3.2	Costes en la Batería 2	60
6.4	<i>Escenario final</i>	61
7	CONCLUSIONES	63
	Referencias	65
	ANEXO: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual del problema [5]	26
Figura 2. Esquema conceptual del problema	28
Figura 3. Distribución temporal de la demanda para cada tipo de energía	37
Figura 4. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 1$.	38
Figura 5. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 2$.	38
Figura 6. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 1$.	39
Figura 7. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 2$.	39
Figura 8. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 1$.	40
Figura 9. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 2$.	40
Figura 10. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 1$.	41
Figura 11. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 2$.	41
Figura 12. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 1$.	42
Figura 13. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 2$.	42
Figura 14. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 1$.	43
Figura 15. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 2$.	43
Figura 16. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 1$.	44
Figura 17. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 2$.	44
Figura 18. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 1$.	45
Figura 19. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 2$.	45
Figura 20. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 1$.	46
Figura 21. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 2$.	46
Figura 22. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 1$.	47
Figura 23. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 2$.	47
Figura 24. Distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y $k = 2$	48
Figura 25. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 1$.	49
Figura 26. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 2$.	49
Figura 27. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 1$.	50
Figura 28. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 2$.	50
Figura 29. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 1$.	51
Figura 30. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 2$.	51
Figura 31. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 1$.	52
Figura 32. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 2$.	52
Figura 33. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 1$.	53
Figura 34. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 2$.	53
Figura 35. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 1$.	54

Figura 36. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 1$.	54
Figura 37. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 1$.	55
Figura 38. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 2$.	55
Figura 39. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 1$.	56
Figura 40: Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 2$.	56
Figura 41. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 1$.	57
Figura 42. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 2$.	57
Figura 43. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 1$.	58
Figura 44. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 2$.	58
Figura 45. Evolución temporal de la demanda de $k = 1$ y capacidad de las RES. (Escenario de prueba)	61
Figura 46. Evolución temporal de la demanda y respuesta generada para $k = 1$	61
Figura 47. Evolución temporal del nivel de energía eléctrica almacenada	62

Notación

J	Conjunto de fuentes de generación de energía. Donde $j \in J$; $T = \{1, 2, \dots, j, \dots, J \}$. El valor $j = 1$ se le asigna para la red eléctrica.
S	Conjunto de fuentes de generación de energía térmica. Donde $s \in S$; $S = \{2, 3\}$
K	Conjunto de tipos de energía, eléctrica y térmica, donde $k \in K$; $K = \{1, 2\}$, siendo $k = 1$ la energía eléctrica y $k = 2$ la térmica.
T	Horizonte temporal, donde $t \in T$; $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, T \}$.
x_{jkt}	Flujo de energía del tipo k generada por la fuente j en cada periodo de tiempo t .
I_{kt}	Nivel de energía del tipo k almacenada al final del periodo t .
u_{kt}	Cantidad de energía del tipo k que es almacenada en cada periodo t .
v_{kt}	Cantidad de energía del tipo k que es descargada en cada periodo t .
g_{jt}	Cantidad de gas adquirido en cada periodo t para la fuente de generación de energía j .
e_{kt}	Exceso de energía del tipo k generada en el periodo t . Para ser vendida en caso de electricidad o usada en caso de calor.
y_{jkt}	Variable binaria que indica si la fuente j de generación de energía del tipo k está activada en el instante t .
a_{jkt}	Variable que indica si la fuente j de generación de energía del tipo k se inicializa en el instante t . Se aplica $\forall j \in J \setminus \{1\}$.
z_{kt}	Variable binaria que indica si está activada la fuente de almacenamiento de energía k en el instante t .
b_{kt}	Variable que indica si la fuente de almacenamiento de energía k se inicializa en el instante t .
D_{kt}	Demanda de la energía de tipo k en el instante t .
K_{jkt}	Capacidad de la fuente de generación j de generación de energía del tipo k en el instante t .
IM_k	Capacidad máxima del sistema de almacenamiento de energía del tipo k .
MB_k	Flujo máximo de energía del tipo k que puede ser cargado/descargado del correspondiente sistema de almacenamiento de energía del tipo k .
η_{jk}	Rendimiento de la fuente de generación j para producir energía de tipo k .
ρ_k	Rendimiento del sistema de almacenamiento de energía k .
F_j	Coste de inicializar fuente de generación j .
C_{jt}	Coste de utilización de la fuente de generación j en el instante t .
S_k	Coste de inicializar el sistema de almacenamiento k .
V_k	Coste de utilización del sistema de almacenamiento k .
P_t	Precio de venta de la electricidad a la red eléctrica en el instante t .

1 INTRODUCCIÓN

La demanda energética global sigue en constante aumento, según la Agencia Internacional de la Electricidad, *International Electricity Agency* (IEA), lo hará en un promedio del 3,4 % entre 2024 y 2026 y serán las energías de bajas emisiones las que cubran este aumento. Dentro de este grupo de energías de bajas emisiones, encontramos tanto a las energías renovables como a la energía nuclear [1].

En el panorama global, cada vez tienen mayor peso las fuentes de energía de bajas emisiones, de hecho, se proyecta que para 2026 estas fuentes representarán la mitad de la generación de electricidad a nivel global, un incremento significativo considerando que en 2023 su participación no alcanzaba el 40% [1]. Estos datos subrayan la importancia actual y futura de las energías renovables en el panorama energético global.

Este cambio en el ecosistema energético actual y la exploración de nuevas tecnologías o el perfeccionamiento de las existentes, viene provocado por la crisis climática en la que estamos envueltos. Para intentar mitigarla, los gobiernos de las principales economías mundiales, se comprometieron en el acuerdo de París en 2015, a limitar el ascenso de la temperatura global a 1,5º sobre los niveles preindustriales. Para cumplir dicho objetivo, es fundamental controlar la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales son los principales responsables del aumento de la temperatura a nivel global. La producción de energía es la responsable del 77% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea [2], por lo que, si queremos disminuir la emisión de estos gases, es fundamental buscar soluciones dentro del sector energético.

Estas soluciones deben ser factibles tanto en términos de plazos como económicamente. Es crucial considerar que, en los próximos años, se anticipa que el principal incremento en la demanda de energía provendrá de economías emergentes. Estos países, que presentan una realidad económica más compleja y una menor concienciación ecológica, requieren que las soluciones propuestas sean lo más simples de implementar posible. Asimismo, la crisis climática es un problema que requiere una solución decisiva. Prolongar la situación actual y mantener el ritmo de emisiones a la atmósfera puede tener consecuencias catastróficas a medio plazo.

En este contexto de desarrollo de las energías renovables, surge el concepto de los recursos energéticos distribuidos, *Distributed Energy Resources* (DER). Los DER consisten en unidades de generación de energía de menor tamaño, las cuales se conectan directamente al sistema de media o baja tensión en lugar de depender de los sistemas de transmisión masiva de energía. Estas fuentes de generación de energía suelen utilizar fuentes renovables y se encuentran localizadas en las proximidades del consumidor final, reduciendo así las distancias y la necesidad del transporte de energía, lo que reduce aún más su impacto ambiental. En resumen, las DER se definen como: “cualquier fuente de energía eléctrica de capacidad limitada, conectada directamente a la red de distribución del sistema eléctrico donde es consumida por los usuarios finales” [3]. Aunque no se trate de un concepto nuevo, sí lo es su enfoque como modelo sostenible.

La generación distribuida opera en dos escalas: la escala local y la del punto de consumo final. En la escala local, las plantas de generación suelen incorporar tecnologías de energía renovable adaptadas a las características específicas del sitio, como turbinas eólicas, producción de energía geotérmica, sistemas solares (tanto fotovoltaicos como de combustión) y ciertas plantas hidrotermales. En el nivel del punto de consumo final, los usuarios individuales de energía pueden utilizar muchas de estas mismas tecnologías con efectos comparables [3].

Uno de los principales desafíos identificados por aquellos que se oponen a estas tecnologías es la naturaleza intermitente del suministro de energías renovables, *Renewable Energy Sources* (RES), especialmente en el caso de la energía eólica y solar. No obstante, este inconveniente puede ser superado con la implementación de sistemas de almacenamiento de energía. Estos sistemas no solo ayudan a mitigar la variabilidad de la generación, sino que también ofrecen una serie de ventajas adicionales en términos de estabilidad y flexibilidad del sistema eléctrico.

Los Recursos Energéticos Distribuidos (DER), aunque parezcan un concepto reciente, están más integrados en nuestro día a día de lo que pensamos. Algunos ejemplos cotidianos son: paneles solares en tejados, las placas fotovoltaicas que vemos en casas, edificios e incluso algunas empresas son DER que convierten la luz solar en electricidad. Pequeñas turbinas eólicas, en zonas con vientos constantes, estas turbinas generan electricidad a partir de la energía cinética del viento. Vehículos eléctricos, los cuales cada vez están más presentes, almacenan energía eléctrica en sus baterías para su funcionamiento, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Calefacción geotérmica, aprovechando el calor natural de la tierra, este sistema DER proporciona calefacción y agua caliente sanitaria de manera sostenible.

Otra ventaja de la generación distribuida es la posibilidad de implementar sistemas de cogeneración a pequeña escala. La generación de electricidad convencional no es particularmente eficiente; de hecho, aproximadamente un tercio de la energía producida se libera en forma de calor, que en las centrales eléctricas tradicionales se disipa en la atmósfera circundante. Los DER al estar ubicados cerca del punto de consumo, permiten que este calor residual se aproveche para sistemas de calefacción. Estos sistemas híbridos, que generan tanto electricidad como calor, se conocen como *Combined Heat and Power* (CHP). Los sistemas CHP son fundamentales para la sostenibilidad energética, ya que permiten aprovechar una gran cantidad de energía que de otro modo se desperdiciaría.

Es de destacar también, como a raíz de la invasión rusa a Ucrania, escuchamos a los líderes políticos hablar cada vez más de independencia energética. Según Eurostat, la dependencia energética en España en el 2022 fue del 66,8% [4]. Es decir, menos de un tercio de la energía que consumió nuestro país fue producida dentro de nuestras fronteras. En el complejo contexto geopolítico que vivimos actualmente, es necesario realizar un esfuerzo para reducir esa cifra al máximo posible, ya que nos coloca en una situación de debilidad. La adopción de DER puede ser una de las posibles medidas a tomar para avanzar en la senda de la independencia energética, posibilitando que los hogares produzcan energía de una forma limpia, independiente y económica.

De igual forma, al descentralizar la generación de energía, se reduce la dependencia de grandes plantas generadoras y de largas líneas de transmisión, las cuales son vulnerables a fallos y desastres naturales. De esta manera, las comunidades pueden beneficiarse de una mayor autonomía energética y de una red eléctrica más robusta y menos susceptible a interrupciones.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

Por otro lado, la integración de tecnologías inteligentes en la gestión de los DER, como los sistemas de gestión de energía, *Energy Management System* (EMS) y las redes inteligentes (*smart grids*), permite una optimización más eficiente del consumo y la producción de energía. Estas tecnologías pueden ajustar automáticamente la demanda y la oferta en tiempo real, mejorando la eficiencia energética y reduciendo los costes operativos.

Finalmente, el impulso hacia las energías renovables y los DER no solo tiene implicaciones ambientales, sino también económicas y sociales. La creación de empleos en el sector de las energías limpias, el desarrollo de nuevas industrias tecnológicas y la mejora de la calidad de vida en áreas rurales y urbanas son beneficios adicionales que refuerzan la necesidad de continuar avanzando en esta dirección.

Estos sistemas ya son una realidad en países como Alemania o Dinamarca que se sitúan a la cabeza en la aplicación de los DER a nivel global. Es de destacar el ejemplo de Freiburg, una pequeña ciudad al sur de Alemania, conocida como “la ciudad más verde de Alemania”, en la cual el 90% de la energía que se consume se obtiene a través de DER, principalmente, paneles solares. Encontramos ejemplos así en muchos rincones del mundo, lo que nos demuestra la relevancia, cada vez mayor de estos sistemas en el panorama energético a nivel global.

Por último, es importante destacar algunos inconvenientes y aspectos a considerar para lograr una implementación exitosa de los DER. En primer lugar, la implementación de estos nuevos sistemas podría acarrear unos costes iniciales que serían importantes, no obstante, los ahorros que proporcionarían a largo plazo en término de costes energéticos hará que la inversión en los mismos sea muy atractiva, no obstante, es importante que su implantación se vea favorecida por los poderes públicos para poder llegar a un nivel realmente relevante. Además, estos DER han de estar integrados en la red, no se puede olvidar la intermitencia de la mayoría de RES, por lo que han de estar plenamente integrados en la red eléctrica para asegurar el suministro sin incidencias. También destacar que si se pretende que los DER tengan un papel relevante en el suministro público de energía se necesita un marco regulatorio claro a la par que favorable, este ha de favorecer la inversión, pero también definir las responsabilidades de los diferentes actores, así como abordar cuestiones legales como las distintas competencias en la gestión de recursos.

2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El presente estudio se centra en la optimización económica de un sistema de Generación Distribuida de Energía (DER, por sus siglas en inglés). Este sistema se compone de diversas fuentes de generación de energía que producen de manera simultánea energía eléctrica y térmica. El sistema eléctrico está constituido por la red eléctrica, la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. En cuanto al sistema de generación de energía térmica, este está conformado por una caldera y la energía solar térmica. Ambos sistemas están interconectados mediante un sistema de cogeneración conocido como CHP (Combined Heat and Power).

El objetivo primordial de este estudio es diseñar una alternativa que no solo sea económicamente viable, sino también sostenible, para satisfacer la demanda de ambos tipos de energía por parte de un gran consumidor. Esta alternativa se construirá mediante la aplicación de una heurística greedy, tal como se describe en la referencia [6]. La heurística, implementada en Python, será aplicada a diversos escenarios de datos con el fin de observar la evolución temporal de la demanda y los flujos de energía generados por las distintas fuentes, ya sea para ser almacenados en los dispositivos de almacenamiento energético o para cubrir la demanda existente en ese periodo.

El análisis de los resultados se llevará a cabo identificando los puntos fuertes del estudio, así como sus limitaciones y posibles áreas de mejora. Este análisis no solo proporcionará una comprensión más profunda del funcionamiento de las heurísticas greedy, sino también de sus posibles aplicaciones en el campo de la gestión energética. La implementación de esta heurística en diferentes escenarios permitirá evaluar su efectividad y adaptabilidad en contextos variados, aportando así una perspectiva sobre su utilidad práctica en la optimización de sistemas DER.

En conclusión, el presente estudio no solo tiene como meta la optimización económica de un sistema DER, sino también ofrecer una solución sostenible para el suministro energético a grandes consumidores. La metodología propuesta, basada en heurísticas greedy, representa una aproximación eficiente para abordar los desafíos actuales en la gestión de la energía.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Generalmente, los DER están compuestos por varias fuentes de generación de energía conectadas entre sí, las cuales trabajan en conjunto para suministrar la cantidad de energía requerida. El modelo empleado en este estudio cuenta con seis fuentes de generación de energía, identificadas cada una de ellas dentro del conjunto J . ($J = j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$). Estas seis fuentes de generación son: la red eléctrica general (GRID), que se corresponde con $j = 1$, como se ha especificado con anterioridad, todos los DER han de estar integrados en la red eléctrica, debido a la naturaleza intermitente de las energías renovables, especialmente, la energía solar y la eólica. El sistema de generación CHP, el cual se alimenta del calor residual producido en la generación de energía para su conversión en energía útil y el cual se identifica con $j = 2$. La caldera, que se corresponde al valor de $j = 3$. Además de las fuentes de energía renovables, como son la solar, identificada por $j = 4$ en el caso de su uso en la producción de energía eléctrica y por $j = 5$ en la producción de energía térmica, y la eólica que se corresponde con el valor de $j = 6$. Igualmente, el modelo contempla dos tipos de energía, resumidos en el conjunto K ($K = k, k \in \{1, 2\}$). En este, el valor de $k = 1$ se corresponde con la energía eléctrica y el de $k = 2$ con la energía térmica, usada para los sistemas de calefacción. Además de lo descrito anteriormente, el modelo contempla sistemas de almacenamiento de ambos tipos de energía.

El complejo sistema, esquematizado de forma gráfica en la figura 1. [5], será estudiado con hipótesis similares a las realizadas por [5]. Es de destacar que la inclusión de dispositivos de almacenamiento de energía complica sustancialmente la resolución de la problemática, al entrar en juego la posibilidad de almacenar energía para su uso en el momento óptimo.

Así, este trabajo se centra en un sistema compuesto por dos redes, eléctrica y de calefacción, acopladas entre sí mediante el sistema CHP. El objetivo es encontrar la solución más eficiente para satisfacer la demanda de ambos tipos de energía al menor coste posible. Para ello, se aporta un modelo matemático [6] de programación lineal mixta entera, el cual impone una serie de restricciones que debe cumplir el sistema de energía con el objeto de alcanzar el valor mínimo de la función objetivo, que se corresponde con la función de costes del sistema. Posteriormente se procederá a la descripción de una heurística que busca encontrar una buena solución que verifique las restricciones especificadas en el modelo de programación lineal.

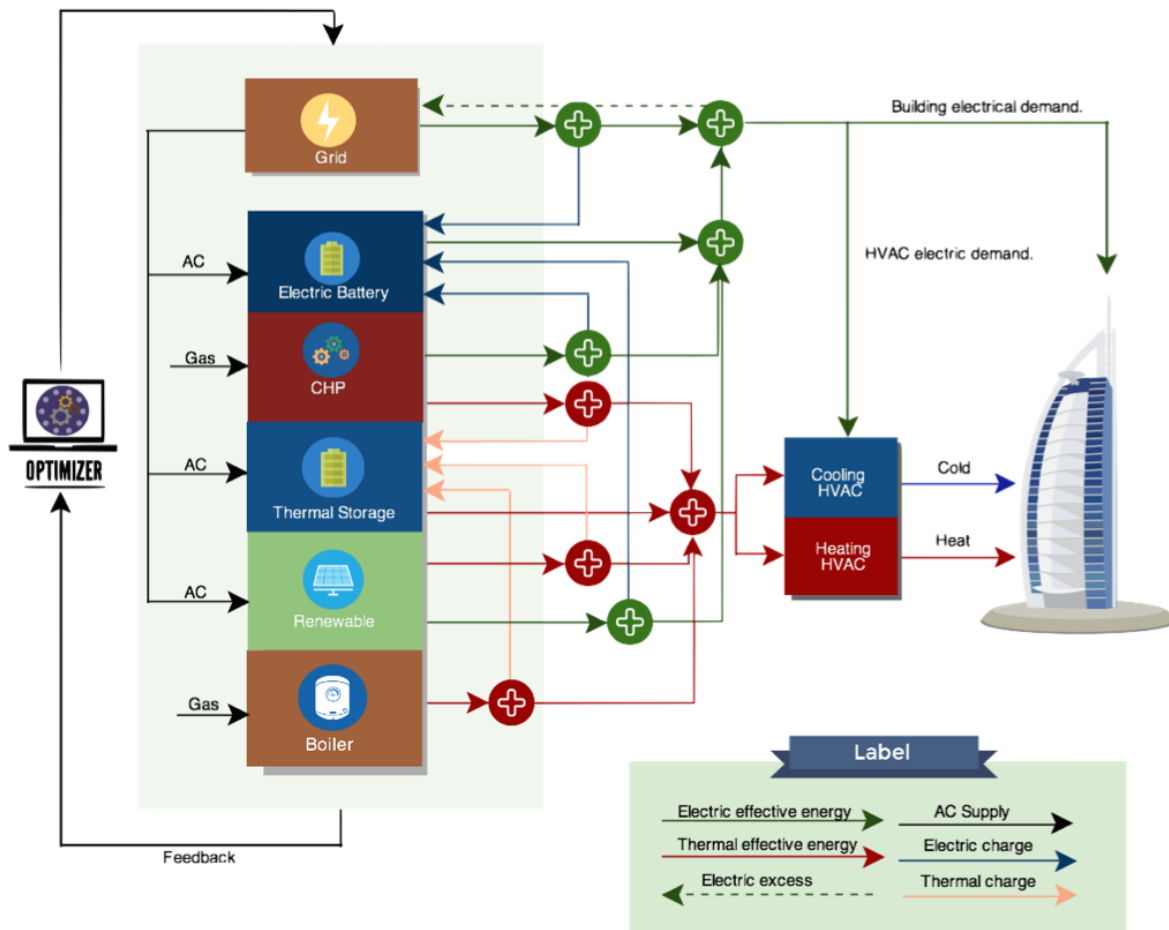


Figura 1. Esquema conceptual del problema [5]

Como se puede observar en la Figura 1, el modelo está conformado por dos redes de energía, la red eléctrica y la red térmica. Aunque a priori, estas redes parezcan ser independientes entre sí, podemos observar que se encuentran interconectadas por el sistema de cogeneración CHP. Entre los distintos equipos de generación presentes en el modelo, podemos diferenciar los que están incluidos en el sistema de generación eléctrico, que son el GRID, la energía solar fotovoltaica y la red eléctrica general, y aquellos incluidos en el sistema de generación térmico, la caldera y la energía solar térmica. Además de esto, el modelo contempla la existencia de dispositivos de almacenamiento de ambos tipos de energía. Este amplio conjunto de sistemas ofrece una amplia posibilidad de combinaciones y formas de satisfacer la demanda.

Esta situación complica significativamente los algoritmos de resolución debido a la gran variedad de soluciones que deben considerarse. Además, el modelo incluye la opción de vender el exceso de energía generada a la

red eléctrica general, lo que podría representar un beneficio potencial para el consumidor en caso de producir más energía de la que el sistema necesita consumir y puede almacenar.

Para el estudio del modelo, dispondremos de 20 escenarios diferentes de problemas, los cuales se agrupan en dos baterías de 10 tipos de problema cada una. A su vez, cada una de los problemas, está dividido en noventa y siete periodos temporales. Cada uno de estos periodos, aporta unos datos de coste y capacidad para cada fuente de generación de energía en cada periodo de tiempo. En el caso de la red eléctrica, su capacidad se

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

supone infinita, por lo que se le da un valor significativamente mayor al de la demanda en cada periodo.

Además de estos datos, se considerarán otros factores en el modelo, que proporcionará la heurística, así como la capacidad de almacenamiento de cada energía, los costes de activación y uso de los sistemas de almacenamiento, así como los costes de activación de cada una de las fuentes de generación. Se dispone igualmente de datos de rendimiento de cada una de las fuentes y de los sistemas de almacenamiento. Por último, se incluye el precio al que la energía puede ser vendida a la red eléctrica.

4 MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMACIÓN LINEAL MIXTA ENTERA

Se procede a presentar el modelo de programación lineal desarrollado en [6]. Para la comprensión del modelo matemático es necesario consultar la notación utilizada, especificada en el apartado notación. Además de esto, para mayor comprensión del modelo y de las conexiones realizadas en el, se aporta un esquema conceptual del problema mostrado en la Figura 2. Este modelo, utiliza los datos especificados con anterioridad en la presentación del problema.

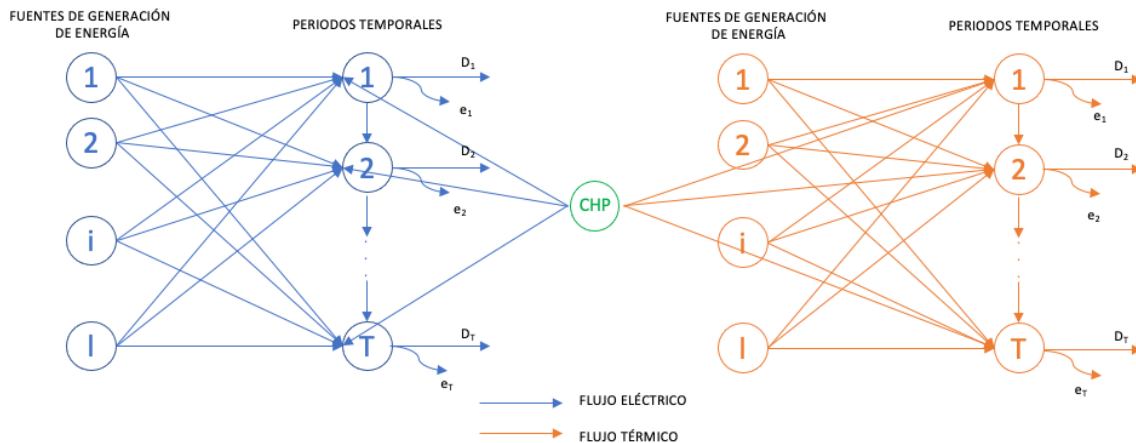


Figura 2. Esquema conceptual del problema

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER
LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

$$\text{Min } Z = \sum_{t \in T} \left(\sum_{k \in K} \left(\sum_{j \in J\{1\}} F_j \cdot a_{jkt} + \sum_{j \in J \setminus S} C_{jt} \cdot x_{jkt} + S_k \cdot b_{kt} + V_k \cdot (u_{kt} + v_{kt}) \right) + \sum_{j \in S} C_{jt} \cdot g_{jt} - P_t \cdot e_{1t} \right) \quad (1)$$

$$I_{k,t-1} + \sum_{j \in J} x_{jkt} = D_{kt} + e_{kt} + I_{kt} ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2)$$

$$I_{k,t} - I_{k,t-1} = u_{kt} - v_{kt} ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3)$$

$$u_{kt} \geq \rho_k \left(\sum_{j \in J} x_{jkt} - D_{kt} - e_{kt} \right) ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (4)$$

$$v_{kt} \geq D_{kt} + e_{kt} - \sum_{j \in J} x_{jkt} ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (5)$$

$$u_{kt} + v_{kt} \leq MB_k \cdot z_{kt} ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (6)$$

$$b_{kt} \geq z_{kt} - z_{k,t-1} ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (7)$$

$$I_{kt} \leq IM_k ; \forall k \in K, \forall t \in T \quad (8)$$

$$x_{jkt} \leq K_{jkt} \cdot y_{jkt} ; \forall j \in J \setminus \{1\}, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (9)$$

$$a_{jkt} \geq y_{jkt} - y_{jk,t-1} ; \forall j \in J \setminus \{1\}, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (10)$$

$$x_{jkt} \leq K_{jkt} \cdot y_{jkt} ; \forall j \in J \setminus \{1\}, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (11)$$

$$a_{jkt} \geq y_{jkt} - y_{jk,t-1} ; \forall j \in J \setminus \{1\}, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (12)$$

$$x_{jkt} = \eta_{jk} \cdot g_{jt} ; \forall j \in S, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (13)$$

$$x_{jkt}, a_{jkt} \geq 0 ; \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (14)$$

$$g_{jt} \geq 0, \forall j \in S, \forall t \in T \quad (15)$$

$$I_{kt}, u_{kt}, v_{kt}, b_{kt}, e_{kt} \geq 0, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (16)$$

$$y_{jkt} = \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (17)$$

$$z_{kt} = \{0,1\}, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (18)$$

$$I_{k0}, y_{jk0}, z_{k0} \text{ dato} \quad (19)$$

La función objetivo viene descrita por la ecuación (1), la cual busca minimizar los costes de operación. Estos incluyen los costes fijos de inicialización de las fuentes de generación de energía ($\sum_{j \in J\{1\}} F_j \cdot a_{jkt}$) y de las instalaciones de almacenamiento ($S_k \cdot b_{kt}$). A estos se les suman los costes variables de operación ($\sum_{j \in J \setminus S} C_{jt} \cdot x_{jkt} + V_k \cdot (u_{kt} + v_{kt}) + \sum_{j \in S} C_{jt} \cdot g_{jt}$) y se le restan las ventas de electricidad a la red eléctrica, que se consideran ingresos ($P_t \cdot e_{1t}$).

La ecuación (2) corresponde al balance de energía. En esta se establece que la cantidad de energía del tipo k generada en todas las fuentes de generación de energía del tipo k en el periodo t , más la cantidad de energía del tipo k almacenada al inicio del periodo, ha de ser igual a la demanda de energía del tipo k en el periodo más la energía almacenada al final de dicho periodo.

El conjunto de restricciones (3-8) regula el funcionamiento de las instalaciones de almacenamiento. La Ecuación (3) establece que la diferencia entre la energía de tipo k almacenada al final y al principio del periodo t es igual a la energía cargada menos la energía descargada en la instalación de almacenamiento durante dicho periodo. Las restricciones (4) y (5) determinan el valor mínimo para u_{kt} y v_{kt} . Por un lado, la instalación de almacenamiento de energía de tipo k se carga (u_{kt}) durante el periodo t si la cantidad de energía de tipo k generada es mayor que la energía de tipo k demandada más el exceso de energía de tipo k generada. Esta cantidad se modifica por el rendimiento de la instalación de almacenamiento durante el proceso de carga. Por otro lado, la instalación de almacenamiento de energía de tipo k se descarga (v_{kt}) durante el periodo t si la cantidad de energía de tipo k generada es inferior a la energía de tipo k demandada más el exceso de energía de tipo k generada.

La restricción (6) activa la variable binaria z^{kt} en caso de que la instalación de almacenamiento se active en un proceso de carga o descarga durante el periodo t . Además, la ecuación establece que el flujo máximo a cargar/descargar viene dado por MB^k .

La restricción (7) determina si la instalación de almacenamiento se inicializa en el periodo t . Por otra parte, la restricción (8) determina que la cantidad de energía de tipo k en la instalación de almacenamiento no puede ser mayor que la capacidad de la batería ($k=1$) o del almacenamiento térmico ($k=2$).

Las restricciones (9) a (11) regulan los suministros de las fuentes de energía y aparecen limitadas por las capacidades de los arcos. La restricción (9) activa la variable binaria y_{jkt} en caso de que la fuente de generación de energía de tipo k se active en el periodo t . El valor de K_{jkt} depende de la previsión meteorológica y del rendimiento correspondiente en el caso del sistema de fuentes de energía renovable, *Renewable Energy Sources* (RES). En el caso de la cogeneración (CHP) y la caldera, la capacidad depende del flujo máximo que el equipo puede producir (tanto energía eléctrica como térmica en el caso de que la cogeneración se produzca), así como de la cantidad de energía adquirida al proveedor de la red. No hay una variable binaria asociada a la activación de la red eléctrica ya que siempre está disponible y activa. La restricción (10) establece si la fuente de generación de energía de tipo k se inicializa en el periodo t . La Ecuación (11) se refiere a la adquisición de gas del proveedor de la red. En caso de generar energía de tipo k en la cogeneración o en la caldera, la cantidad que se puede generar depende de la cantidad de gas adquirida en la red de gas corregida por el rendimiento del equipo.

Por último, las especificaciones de (12) a (17) establecen los valores factibles para las variables continuas (es decir, fuerza que todas sean positivas), la declaración de las variables binarias y las condiciones iniciales de activación de las fuentes de energía y las instalaciones de almacenamiento, así como el nivel de carga de las instalaciones de almacenamiento, que se dan.

5 PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA HEURÍSTICA *GREEDY*

Para resolver el modelo matemático presentado con anterioridad, se procederá a la aplicación de una heurística propuesta en [6].

Una heurística *greedy* es una técnica de resolución de problemas que toma decisiones en cada etapa seleccionando la opción que parece más prometedora en ese momento, con la esperanza de encontrar una solución óptima global. Este método se basa en la construcción progresiva de una solución mediante la elección iterativa de la mejor alternativa disponible en cada paso, sin reconsiderar decisiones previas. Es especialmente útil en problemas de optimización donde el objetivo es maximizar o minimizar una función objetivo. Aunque no siempre garantiza una solución óptima, su simplicidad y eficiencia la hacen una elección popular en numerosos algoritmos y aplicaciones computacionales, especialmente en aquellos problemas complejos en los que la obtención del óptimo mediante métodos matemáticos exactos puede conducir a un gran consumo de tiempo y esfuerzo computacional.

A continuación, se procede a detallar el diseño de la heurística aplicada a los distintos escenarios con la finalidad de resolver el problema planteado con anterioridad. Esta heurística ha sido programada en Python, el código se encuentra disponible en el Anexo de este documento.

Para ello, se ha de definir los conjuntos con los que trabajaremos. En primer lugar, el conjunto J_k , son las fuentes de producción de energía que son capaces de producir energía de tipo k . El conjunto R_k será el conjunto de fuentes de generación de energía renovable (RES) capaces de producir energía eléctrica para el caso $k = 1$, y las RES capaces de producir energía calorífica, más la energía calorífica producida por la cogeneración para el caso $k = 2$. El conjunto S se define por las fuentes de generación de energía térmica, la cogeneración (CHP) y la caldera ($j = \{2,3\}$). El conjunto B_k lo conforman las instalaciones de almacenaje de energía térmica y eléctrica. Por último, el conjunto L_k , se define como $L_k = \{J_k \setminus R_k\} \cup B_k$. El pseudocódigo de la heurística es el

siguiente:

For $t = 1$ to $|T|$

{

For $k = 1$ to 2

{

$$x_{jkt} = K_{jkt}, \quad \forall j \in R_k$$

Para las fuentes de energía renovables, la producción de energía será siempre la máxima posible, es decir, su capacidad K .

IF $k = 2$

$$x_{22t} = \eta_{22} g_{2t}$$

Para la producción de energía calorífica en el CHP, se ha de tener corregir con el rendimiento g_{2t} .

IF $\sum_{j \in R_k} x_{jkt} \geq D_{kt}$

En caso de que la energía producida en el periodo sea mayor que la demanda.

{

IF $\{\rho_k (\sum_{j \in R_k} x_{jkt} - D_{kt}) \leq IM_k - I_{k,t-1}\} \& \{\rho_k (\sum_{j \in R_k} x_{jkt} - D_{kt}) \leq MB_k\}$

En el caso de que la energía que ha de ser cargada sea menor que la capacidad disponible y menor que el flujo máximo que puede ser cargado:

$$\{ \quad u_{kt} = \rho_k (\sum_{j \in R_k} x_{jkt} - D_{kt})$$

Se carga la energía disponible en el almacenamiento correspondiente.

$$I_{kt} = I_{k,t-1} + u_{kt}$$

Se actualiza el dato de la energía almacenada.

}

ELSE IF $\{\rho_k (\sum_{j \in R_k} x_{jkt} - D_{kt}) > MB_k\} \& \{MB_k \leq (IM_k - I_{k,t-1})\}$

En el caso de que la energía que ha de ser cargada exceda el flujo máximo de energía que puede ser cargado en el periodo t pero hay espacio libre en el almacenamiento:

$$\{ \quad u_{kt} = MB_k$$

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

$$I_{kt} = I_{k,t-1} + u_{kt}$$

$$e_{kt} = \left(\sum_{j \in R_k} x_{jkt} - \frac{u_{kt}}{\rho_k} - D_{kt} \right)$$

Actualiza el nivel de almacenamiento al valor máximo posible permitido por su capacidad y calcula el exceso de energía.

}

ELSE

En caso de que la cantidad de energía que ha de ser cargada sea mayor que la capacidad disponible en el dispositivo de almacenamiento:

$$\{ \quad u_{kt} = IM_k - I_{k,t-1}$$

$$I_{kt} = IM_k$$

$$e_{kt} = \left(\sum_{j \in R_k} x_{jkt} - \frac{u_{kt}}{\rho_k} - D_{kt} \right)$$

Actualiza el nivel de almacenamiento al valor máximo posible permitido por su capacidad y calcula el exceso de energía.

}

}

$$\text{IF } \sum_{j \in R_k} x_{jkt} < D_{kt}$$

En el caso de que el conjunto R_k produzca menos energía que la requerida por la demanda:

$$\{ \quad \text{Define } L_k = \{J_k \setminus R_k\} \cup B_k$$

For $l \in L_k$

$$COST = F_l \cdot (1 - y_{lk,t-1}) + C_{lt} \cdot (D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt})$$

Calcula el coste del sistema l como el coste de inicialización, en caso de que el sistema tenga que ser iniciado, más el coste de suplir la demanda que no ha sido cubierta por R_k .

Order list L_k

Ordena la lista de los sistemas en L_k en orden creciente de coste, siendo el primero aquel que tenga un menor coste.

Initiate=0; $ACC_j=0$

While $\{ (D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt}) > ACC_l \}$

Mientras que el acumulado de energías de las fuentes en L_k sea menor que la demanda no cubierta por las fuentes del conjunto R_k .

$$\{ \quad l = l + 1$$

$$\text{IF } \{l \in \{J_k \setminus R_k\}\} \& \{K_{lkt} \leq D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\}$$

$$f_{lkt} = K_{lkt}$$

Si el Sistema l es una fuente de generación de energía y su capacidad es menor que la demanda a suplir, la energía producida por el sistema será su capacidad máxima.

$$\text{ELSE IF } \{l \in \{J_k \setminus R_k\}\} \& \{K_{lkt} > D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\}$$

$$f_{lkt} = D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}$$

En caso de que el sistema l tenga capacidad suficiente para cubrir la demanda restante, el flujo del sistema es igual a la demanda restante.

$$\text{ELSE IF } \{l \in B_k\} \& \{I_{kt} \leq D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\} \& \{I_{kt} \leq MB_k\}$$

$$f_{lkt} = I_{kt}$$

En el caso de que el sistema l sea una fuente de almacenamiento y su energía almacenada sea menor que la demanda a cubrir y menor también al flujo máximo que puede ser descargado, entonces el flujo del sistema es igual a la energía almacenada.

$$\text{ELSE IF } \{l \in B_k\} \& \{I_{kt} \leq D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\} \& \{I_{kt} > MB_k\}$$

$$f_{lkt} = MB_k$$

En el caso de que el sistema l sea una fuente de almacenamiento y su energía almacenada sea menor que la demanda a cubrir pero mayor que el flujo máximo que puede ser descargado, entonces el flujo del sistema es igual al flujo máximo de descarga.

$$\text{ELSE IF } \{l \in B_k\} \& \{I_{kt} > D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\} \& \{MB_k < D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\}$$

$$f_{lkt} = MB_k$$

Si el Sistema l es una Fuente de almacenamiento y tiene capacidad de proveer más energía que la demanda a cubrir pero esta es mayor que el flujo máximo que puede ser descargado, entonces el flujo del sistema es igual al flujo máximo que pueda ser descargado.

$$\text{ELSE IF } \{l \in B_k\} \& \{I_{kt} > D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\} \& \{MB_k > D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}\}$$

$$f_{lkt} = D_{kt} - \sum_{j \in R_k} x_{lkt} - ACC_{l-1}$$

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

Si el sistema l es una fuente de almacenamiento y tiene capacidad de proveer más energía que la demanda a cubrir y la energía almacenada es menor que el flujo máximo que puede ser descargado, entonces el flujo del sistema es igual a la demanda a cubrir.

IF $\{l \in B_k\}$

$$v_{kt} = f_{lkt}$$

Actualiza el dato de los flujos descargados del sistema de almacenamiento.

ELSE

{ $x_{lkt} = f_{lkt}$

Actualiza los flujos descargados de los niveles de almacenamiento de energía.

IF $l \in S$

$$g_{lt} = x_{lkt} / \eta_{lk}$$

Calcula la cantidad de gas comprada al proveedor.

}

$$ACC_l = ACC_{l-1} + f_{lkt}$$

Actualiza los flujos de energía acumulados en los sistemas de L_k .

6 RESULTADOS

La heurística descrita con anterioridad ha sido programada en Python y aplicada a un conjunto de datos. Estos datos se encuentran disponibles en [7]. Estos, se presentan en 20 escenarios agrupados en dos baterías. Para cada uno de estos escenarios, se dispone de una serie de datos relativos a demanda, coste y rendimiento, los cuales han sido especificados con anterioridad. Es relevante destacar que, en ninguno de los veinte escenarios, la capacidad de ninguna de las RES supera la demanda, por lo que no se cargará energía en los sistemas de almacenamiento. Por el contrario, en aquellos escenarios donde inicialmente se presentan niveles de energía almacenada, esta energía se utilizará para cubrir la demanda no satisfecha por las RES hasta su agotamiento. En caso de que alguna de las RES tenga una capacidad de producción no nula, producirá toda la energía que sea posible, a partir de ahí, el resto de energía necesaria para cubrir la demanda, será aportada bien por los sistemas de almacenamiento o por las fuentes de generación no renovables.

6.1 Batería 1: Alta demanda eléctrica con demanda térmica constante.

La Batería 1 se distingue por presentar valores de demanda energética superiores a los de la Batería 2. La demanda de electricidad ($k=1$) se encuentra dentro de un rango que oscila entre los 100 y los 130 kWh, mientras que la demanda de energía calorífica se sitúa en valores menores. Es importante destacar que la demanda de electricidad presenta una alta variabilidad, mientras que la demanda de energía calorífica se mantiene constante durante todo el intervalo de estudio. Todos los escenarios pertenecientes a la batería 1, presentan la misma demanda de ambos tipos de energía, lo que diferencia a los distintos escenarios es, bien la capacidad de las distintas fuentes de generación de energía, el coste de uso de cada una de las fuentes de generación o los niveles iniciales de almacenamiento de energía. La distribución temporal de ambas demandas se muestra en la figura 2:

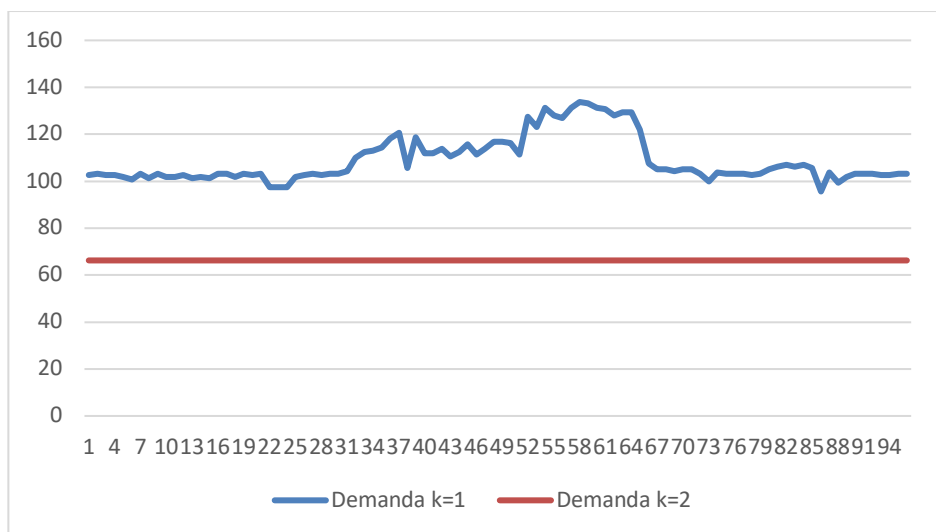


Figura 3. Distribución temporal de la demanda para cada tipo de energía

6.1.1 Escenario 1. Recursos de energía: GRID y Caldera

Este primer escenario, se caracteriza por la nula capacidad de las RES para generar electricidad, ya sea eléctrica o térmica. Igualmente, se consideran nulos los niveles iniciales de almacenamiento energético. Por el contrario, disponemos de la red eléctrica para la generación de electricidad, y de la caldera en el caso de la térmica, así como del sistema de cogeneración para ambas.

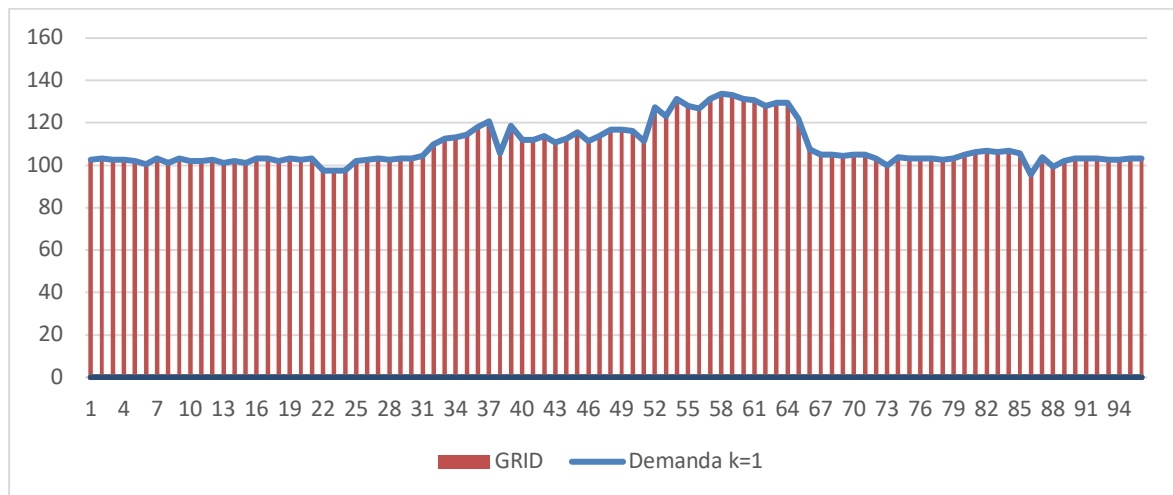


Figura 4. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 1$.

En la Figura 4 se muestra la evolución temporal de la demanda para la energía eléctrica ($k=1$). Se observa que toda la demanda de energía es cubierta por la red eléctrica. Las únicas fuentes de generación de energía con capacidad de generación en este escenario son la red eléctrica y el sistema de cogeneración. Debido a su menor coste, la solución elegida por la heurística para satisfacer la demanda es la red eléctrica.

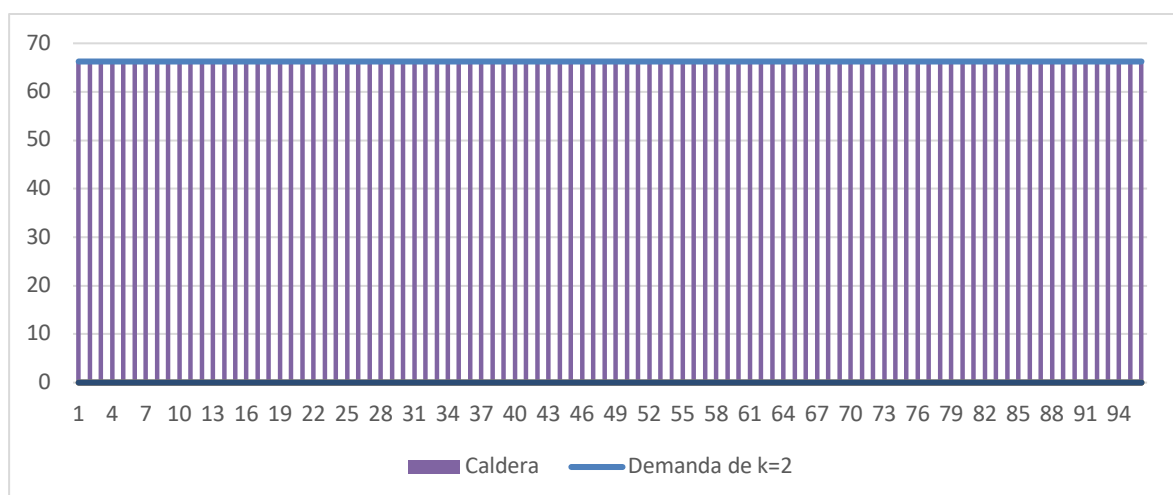


Figura 5. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 2$.

En la Figura 5 se muestra el valor constante que toma la demanda de energía térmica, la cual es cubierta en su totalidad por la caldera. Al igual que se explica en el apartado anterior, la capacidad de las RES es nula para todos los periodos temporales y debido a su menor coste, es la caldera la fuente de generación escogida para satisfacer la demanda.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.1.2 Escenario 2. Recursos de energía: GRID, CHP, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En esta ocasión todas las RES presentan capacidad para la generación de energía. Por el contrario, la capacidad de la red eléctrica se considera nula, contando así con el CHP y la caldera. Además de esto, ambos sistemas de almacenaje presentan un nivel inicial de 1000 kWh cada uno.

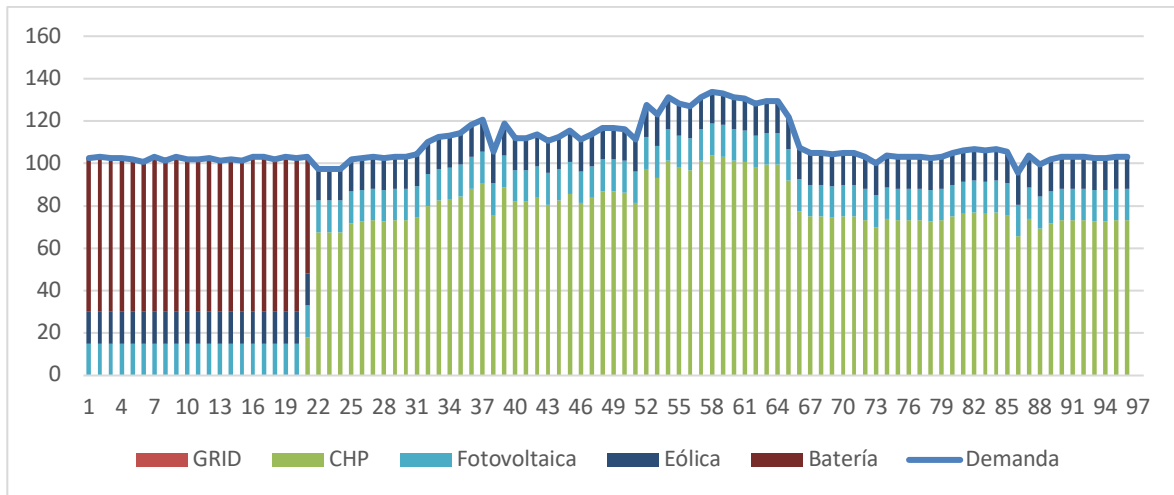


Figura 6. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 1$.

En la Figura 6 se observa la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la energía solar y la eólica tienen una capacidad de 15 kWh cada una para cada periodo temporal. Dicha capacidad será utilizada en su totalidad, esta, se complementará con la energía disponible en los sistemas de almacenamiento. Tras agotar estas reservas, el sistema CHP será el encargado de cubrir la energía restante.

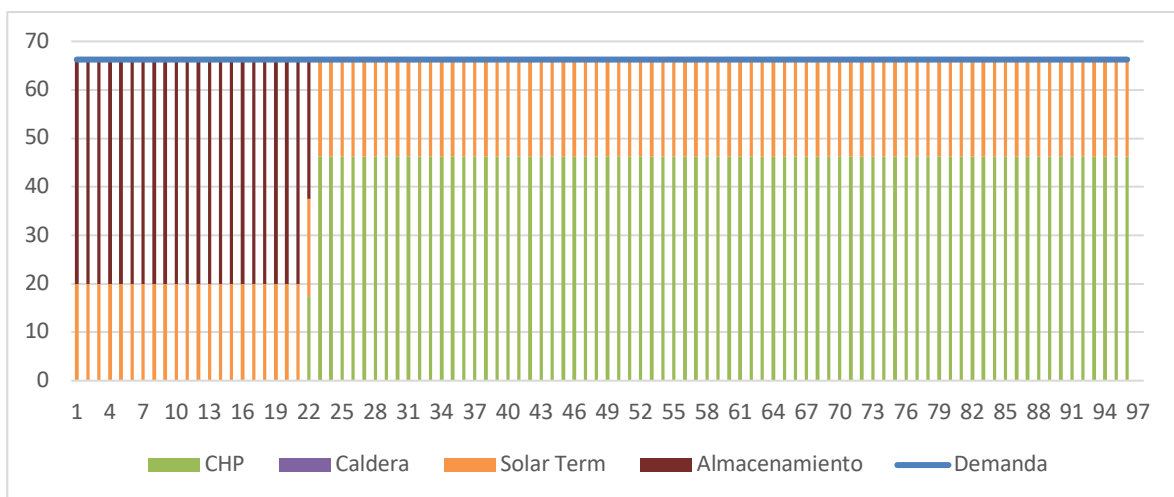


Figura 7. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 2$.

En la Figura 7 se muestra el valor que toma la demanda de energía calorífica para todos los periodos temporales. Esta demanda es satisfecha en primer lugar por la energía solar, la cual presenta una capacidad de 20 kWh, una vez agotada esta capacidad, la cual se complementa con las reservas de energía disponibles en el dispositivo de almacenamiento. Tras agotarlas, el CHP será el encargado de cubrir la demanda restante al presentar un coste menor que la caldera.

6.1.3 Escenario 3. Recursos de energía: GRID, CHP, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En este escenario se vuelve a suponer nula la capacidad de la red eléctrica. Por el contrario, tanto el CHP como la caldera además de todas las RES sí presentarán capacidad de producción de energía. Además de esto, los sistemas de almacenamiento de energía presentan unos niveles de 1500 kWh para $k=1$ y 1000 kWh para $k=2$.

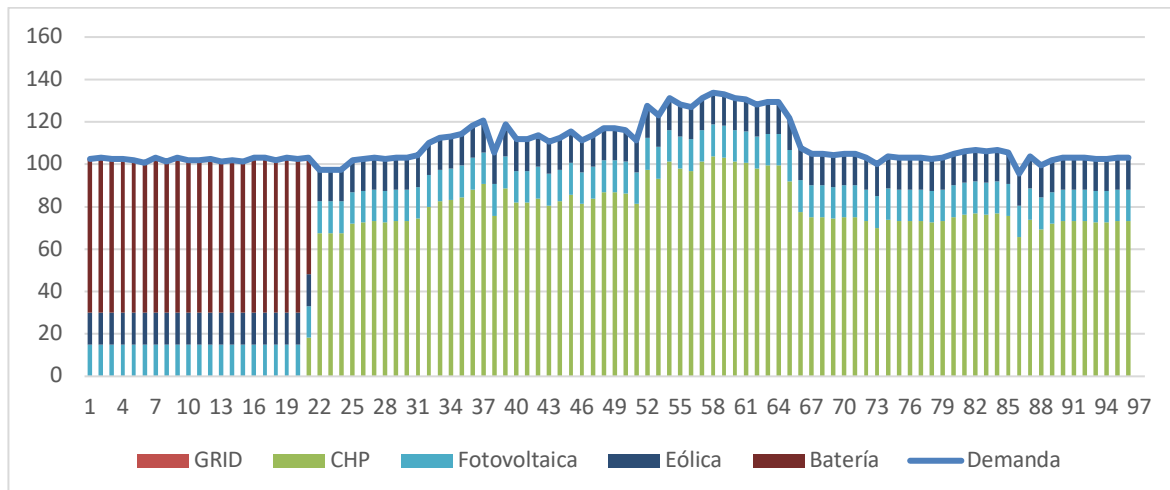


Figura 8. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 1$.

En la Figura 8 se observa la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la energía solar y la eólica tienen una capacidad de 15 kWh cada una para cada periodo temporal. Dicha capacidad será utilizada en su totalidad, aparte de esta, la demanda restante será cubierta por la energía almacenada hasta que esta se agote. Tras esto, es el CHP el encargado de cubrir la demanda para la que las RES no tienen capacidad suficiente.

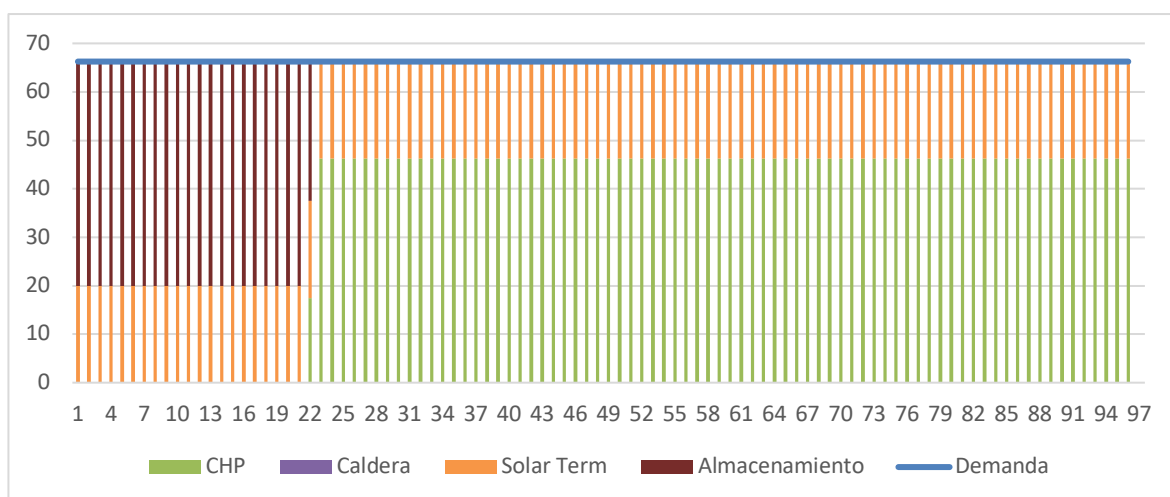


Figura 9. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 2$.

En la Figura 9 se muestra el valor que toma la demanda de energía calorífica para todos los periodos temporales. Esta demanda es satisfecha en primer lugar por la energía solar, la cual presenta una capacidad de 20 kWh, durante los primeros periodos temporales esta capacidad es cumplimentada por las reservas de energía disponibles. Tras agotarlas, será el CHP el encargado de cubrir la demanda para la que las RES no tienen capacidad suficiente.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.1.4 Escenario 4. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica y Eólica

En el presente escenario, todas las RES presentan capacidad para la generación de energía, ya sea térmica o eléctrica. Igualmente, presentan capacidad de generación tanto la red eléctrica en el caso de la energía eléctrica como la caldera en el caso de la térmica y el CHP para ambas. Por el contrario, los sistemas de almacenamiento de energía no presentan reservas iniciales.

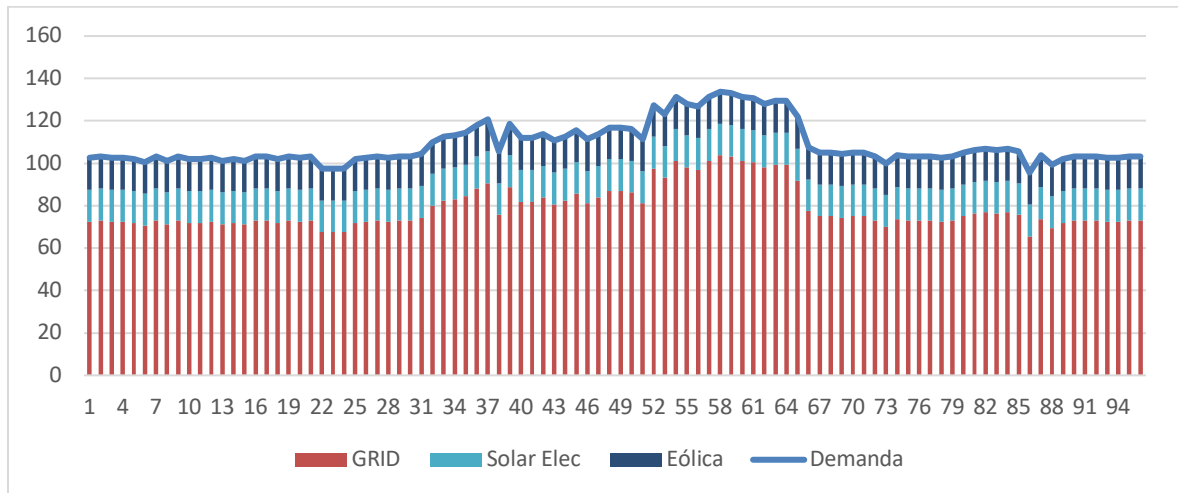


Figura 10. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 1$.

La Figura 10 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En este escenario encontramos las RES solar y eólica con una capacidad de 15 kWh cada una, además de ellas, dispondremos del sistema de cogeneración y la red eléctrica. Como ya sabemos, la heurística agota la capacidad de las fuentes renovables, posteriormente, cubre la demanda restante con la fuente que presente un menor coste, en este caso, la red eléctrica.

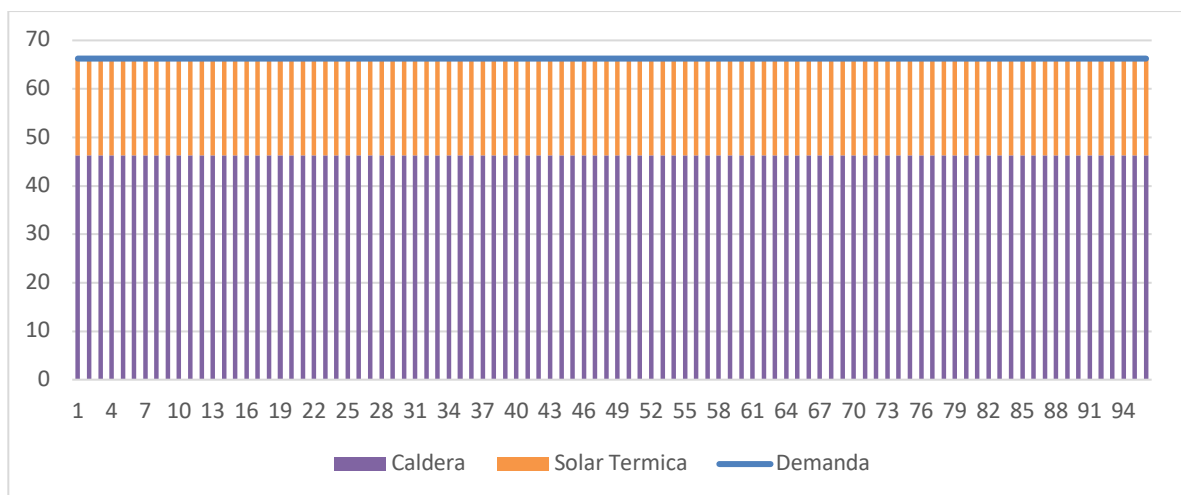


Figura 11. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 2$.

En la Figura 11 se muestra el valor que toma la demanda de energía calorífica para todos los periodos temporales. Esta demanda es satisfecha en primer lugar por la energía solar, la cual presenta una capacidad de 20 kWh, una vez agotada esta capacidad, el resto de la demanda es cubierta por la fuente de generación con menor coste disponible, en este caso la caldera.

6.1.5 Escenario 5. Recursos de energía: Baterías, Caldera y GRID.

De nuevo, encontramos un escenario en el que la capacidad de producción de las RES es nula. Presentan capacidades de producción la red eléctrica, la caldera y el CHP. Además de esto, ambos sistemas de almacenamiento presentan 1500 kWh de energía en el instante inicial.

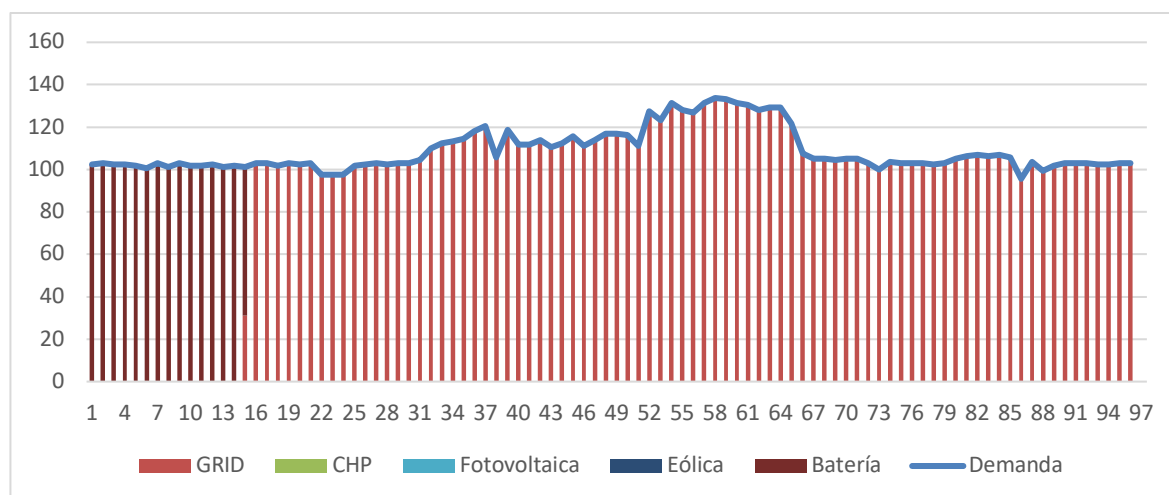


Figura 12. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 1$.

La Figura 12 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacerla. Como se observa en la gráfica, en los primeros intervalos temporales la demanda es cubierta en su totalidad por los sistemas de almacenamiento. Tras agotar la energía almacenada, la red eléctrica aporta la energía necesaria para cubrir la demanda.

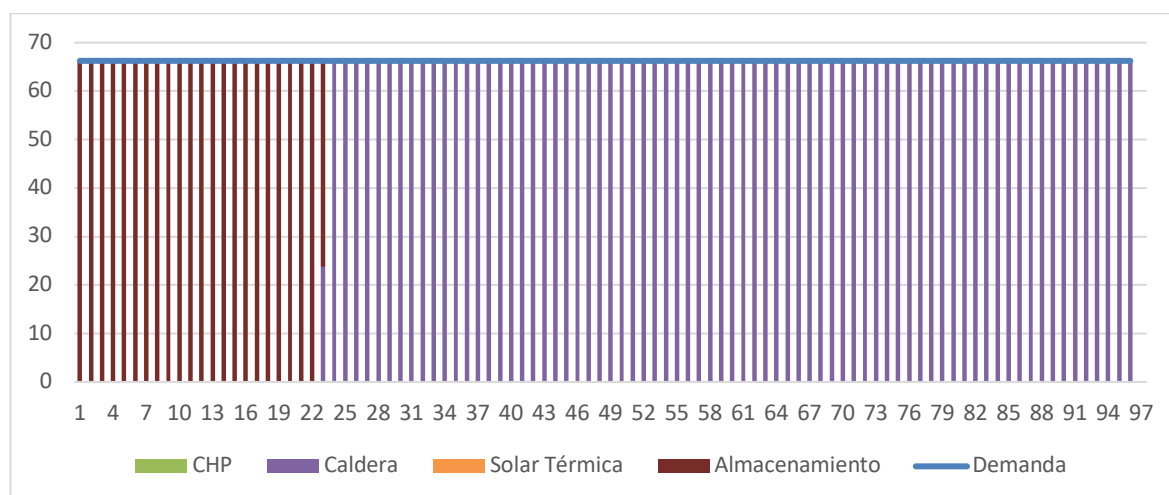


Figura 13. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 2$.

En la Figura 13 se muestra el valor que toma la demanda de energía calorífica así como la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. Al igual que en el caso de la energía eléctrica, en los primeros intervalos la demanda es cubierta con la energía almacenada. Tras agotarla, la caldera es la encargada de satisfacer la demanda restante.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.1.6 Escenario 6. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En este escenario, todas las fuentes presentan capacidad de generación de energía ya sea eléctrica o térmica. Además de esto, los sistemas de almacenamiento presentan unos niveles iniciales de 2000 y 1500 kWh para el caso de la energía eléctrica y la calorífica respectivamente.

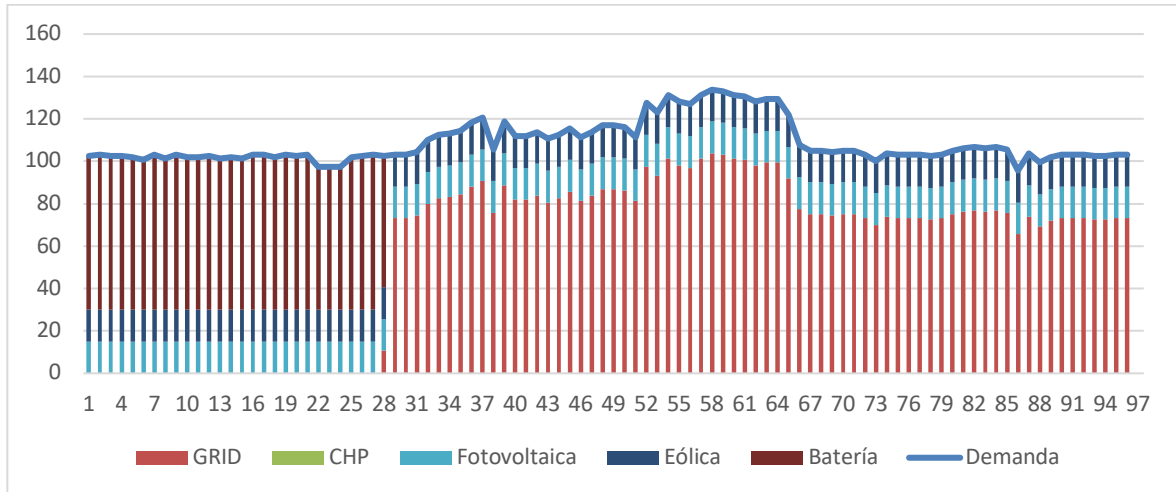


Figura 14. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 1$.

La Figura 14 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

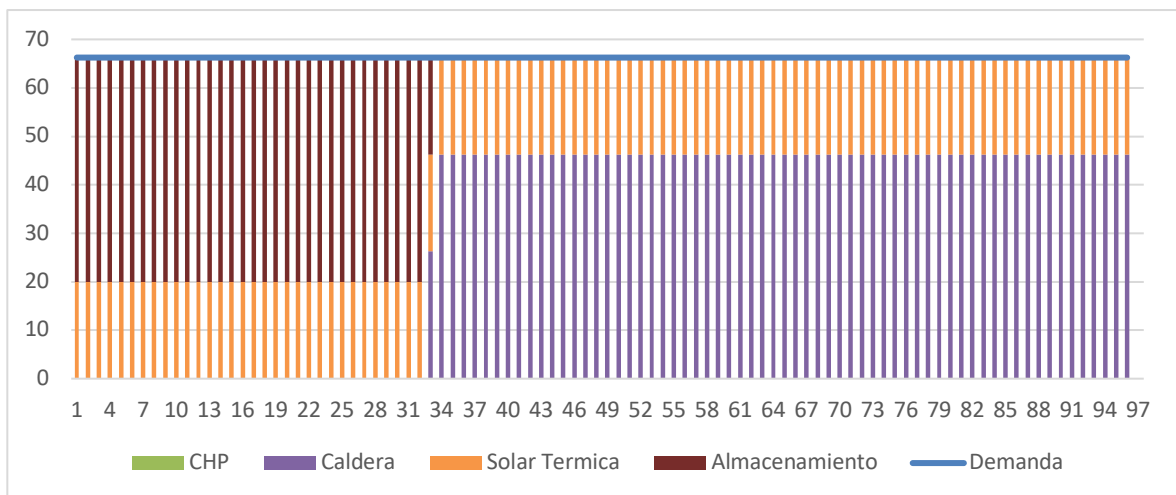


Figura 15. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 2$.

En la Figura 15 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

6.1.7 Escenario 7. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En el presente escenario, todas las RES presentan capacidad para la generación de energía, ya sea térmica o eléctrica. Igualmente, presentan capacidad de generación tanto la red eléctrica en el caso de la energía eléctrica como la caldera en el caso de la térmica y el CHP para ambas.

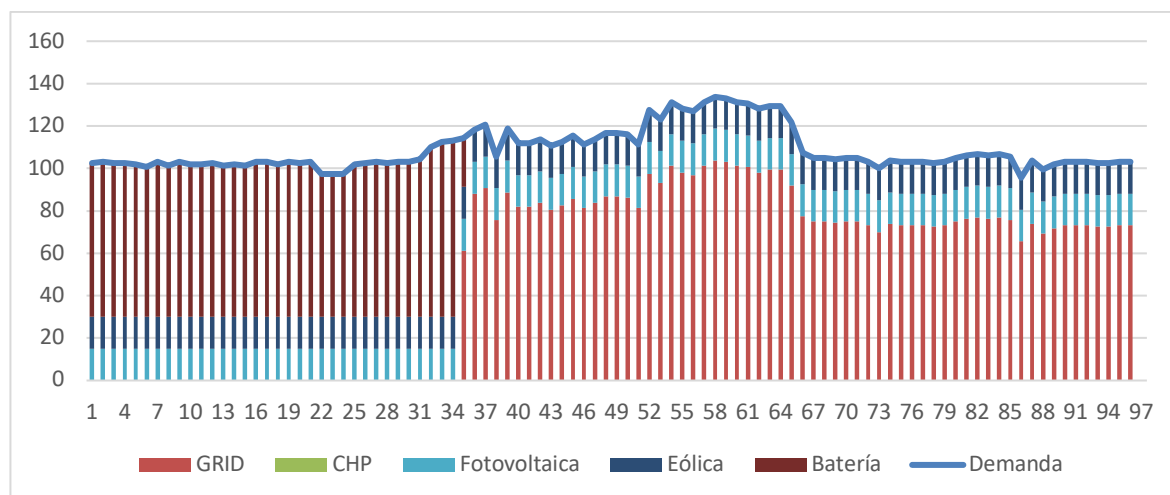


Figura 16. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 1$.

La Figura 16 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

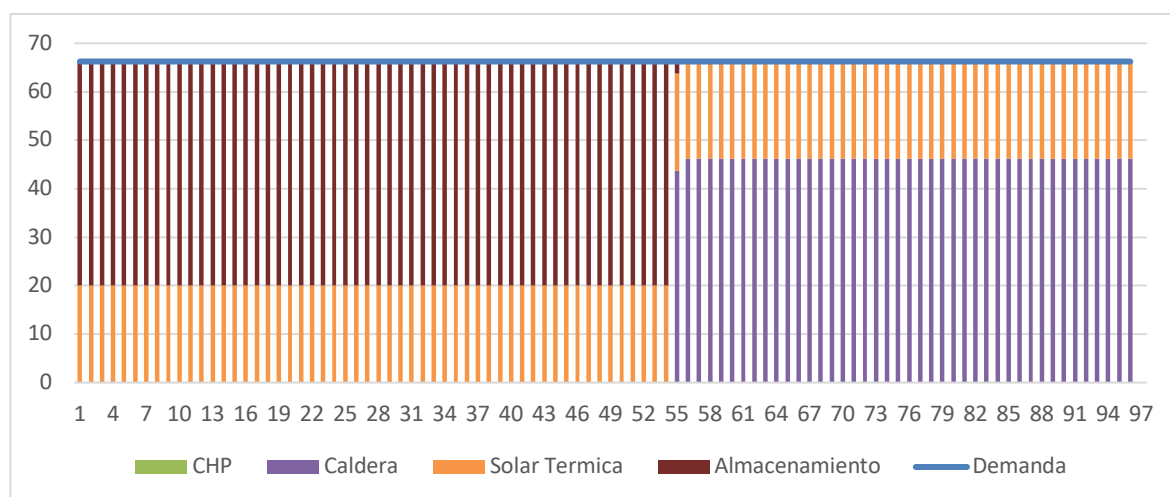


Figura 17. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 2$.

En la Figura 17 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.1.8 Escenario 8: Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En el presente escenario, todas las RES presentan capacidad para la generación de energía, ya sea térmica o eléctrica. Igualmente, presentan capacidad de generación tanto la red eléctrica en el caso de la energía eléctrica como la caldera en el caso de la térmica y el CHP para ambas. Además, los sistemas de almacenamiento presentan unos valores iniciales de 3000 kWh para $k = 1$ y 2000 kWh para $k = 2$.

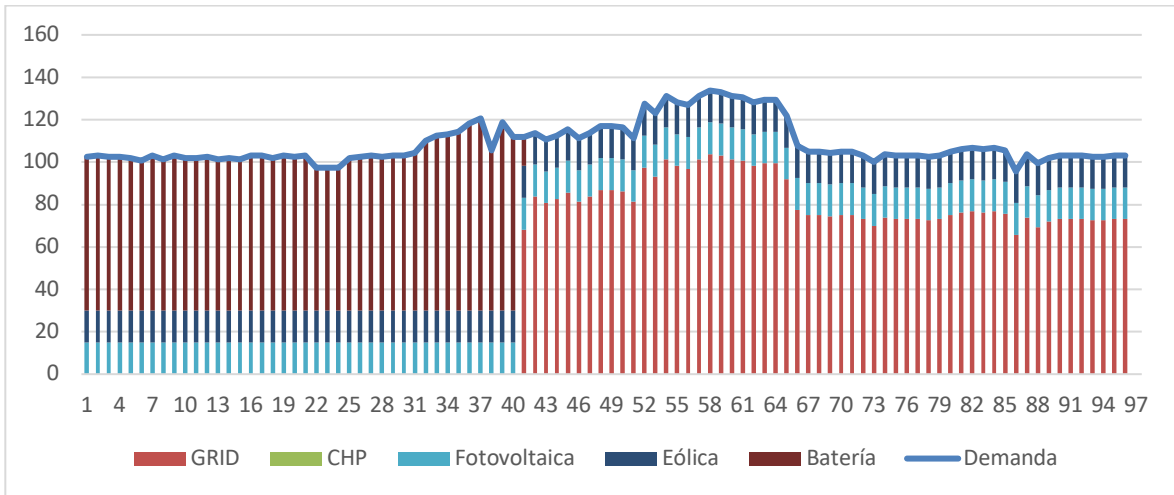


Figura 18. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 1$.

La Figura 18 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

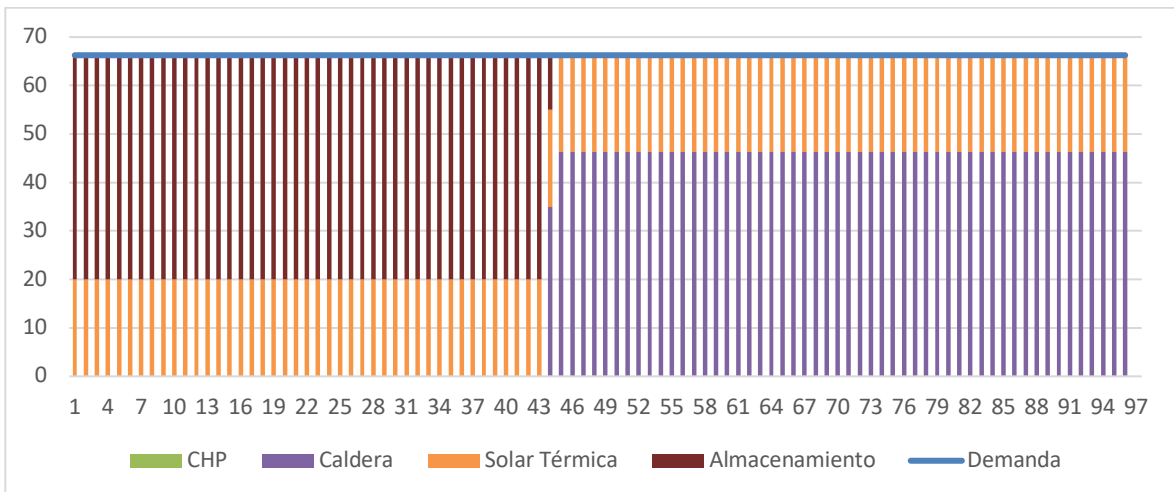


Figura 19. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 2$.

En la Figura 19 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

6.1.9 Escenario 9. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En el presente escenario, todas las RES presentan capacidad para la generación de energía, ya sea térmica o eléctrica. Igualmente, presentan capacidad de generación tanto la red eléctrica en el caso de la energía eléctrica como la caldera en el caso de la térmica y el CHP para ambas. Ambos sistemas de almacenamiento presentan niveles iniciales de 3500 kWh.

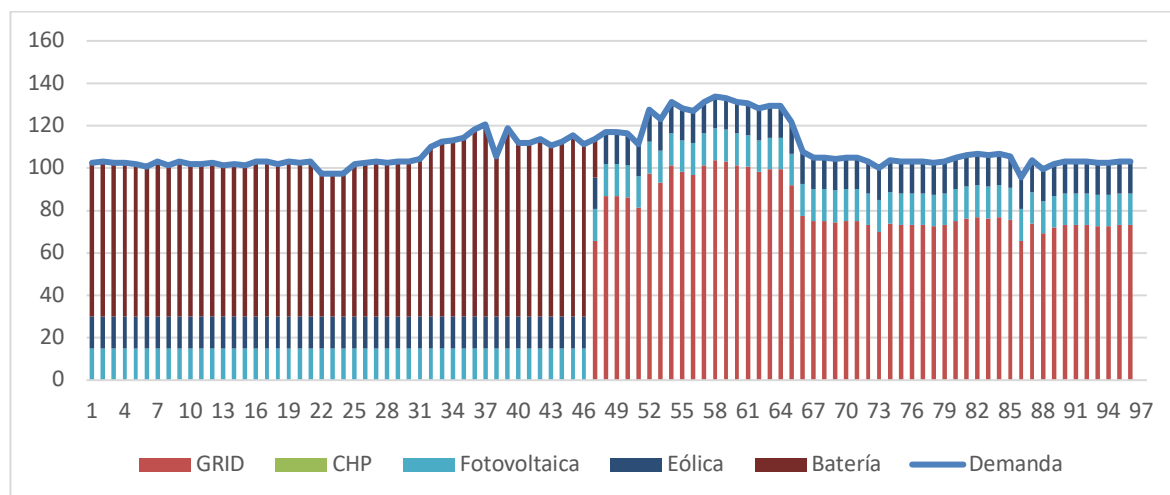


Figura 20. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 1$.

La Figura 20 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

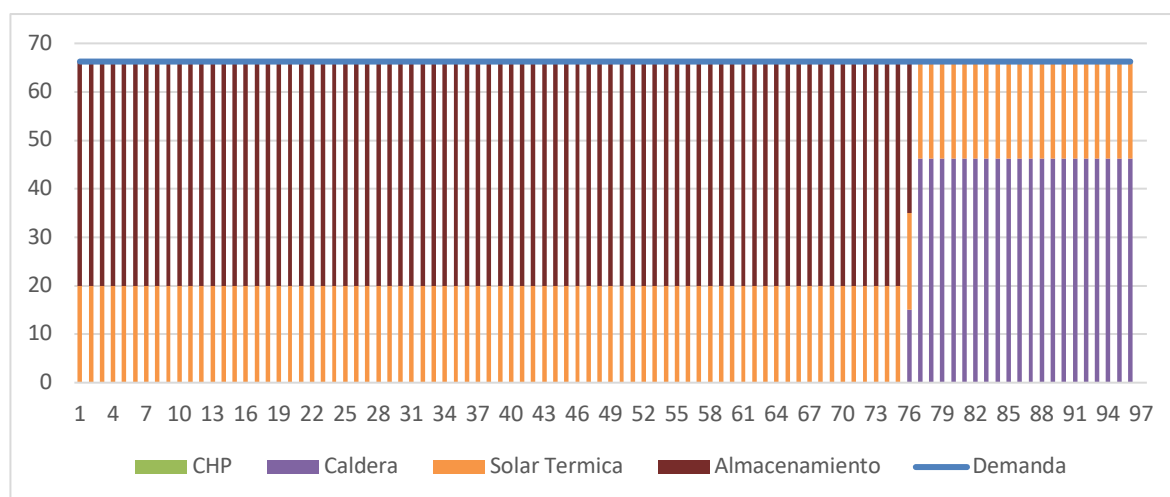


Figura 21. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 2$.

En la Figura 21 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.1.10 Escenario 10. Recursos de energía: GRID, Caldera, Solar Térmica, Fotovoltaica, Eólica y Baterías

En el presente escenario, todas las RES presentan capacidad para la generación de energía, ya sea térmica o eléctrica. Igualmente, presentan capacidad de generación tanto la red eléctrica en el caso de la energía eléctrica como la caldera en el caso de la térmica y el CHP para ambas. Ambos sistemas de almacenamiento presentan niveles iniciales de 3500 kWh.

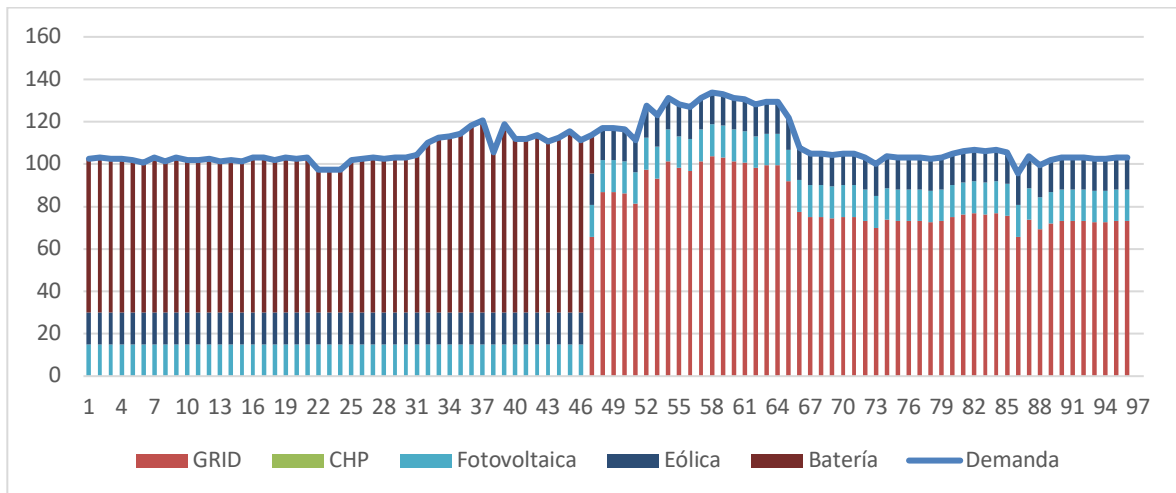


Figura 22. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 1$.

La Figura 22 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

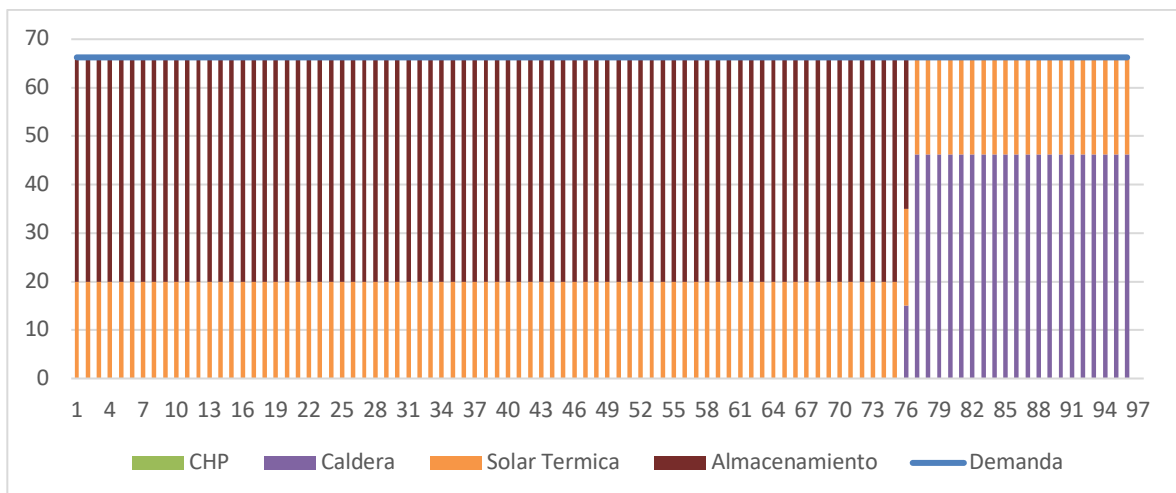


Figura 23. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 2$.

En la Figura 23 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

6.2 Batería 2: Demandas variables de energía eléctrica y térmica

La Batería 2 se distingue por presentar valores de demanda energética inferiores a los de la Batería 1. En cambio, es de destacar que los valores de demanda de ambas energías son más similares en esta batería. A demanda de energía eléctrica, tomará valores comprendidos entre 8 y 12 kWh, por su parte, la energía calorífica lo está comprendida en el rango entre 5,4 kWh y 8 kWh. En esta batería los sistemas de almacenamiento tienen menos protagonismo que en la anterior, pues varios escenarios presentan niveles iniciales de energía almacenada nulos. Todos los escenarios pertenecientes a la batería 2, presentan la misma demanda de ambos tipos de energía, lo que diferencia a los distintos escenarios es, bien la capacidad de las distintas fuentes de generación de energía o bien el coste de uso de cada una de las fuentes de generación. La distribución temporal de ambas demandas se muestra en la Figura 24:

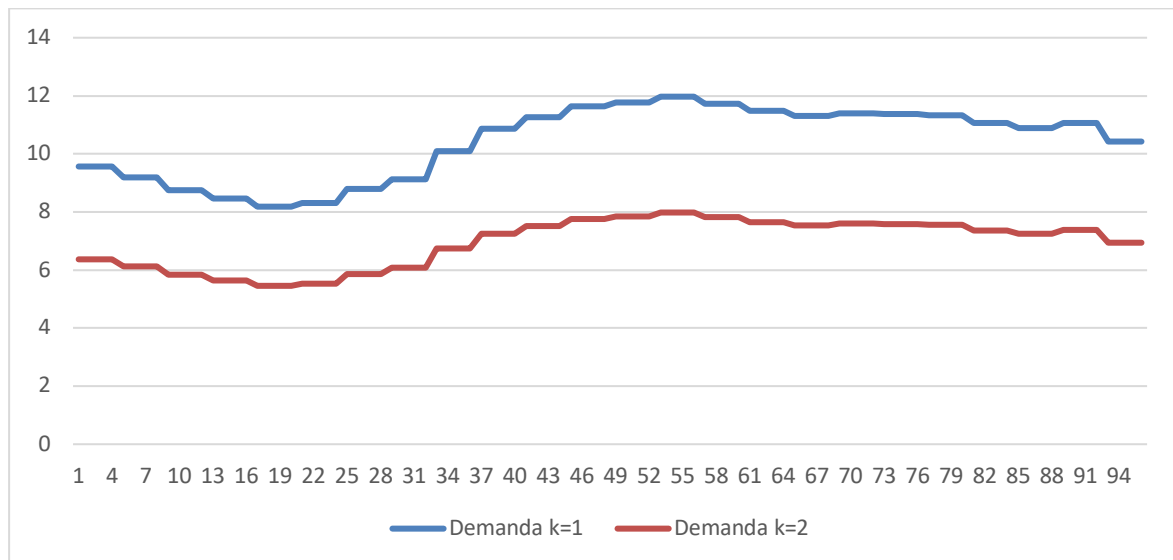


Figura 24. Distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y $k = 2$

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.2.1 Escenario 1. Recursos de energía: GRID y Caldera.

Nos encontramos ante un escenario en el que la capacidad de generación de las RES es nula. Dispondremos de la red eléctrica, la caldera y el CHP para la generación de energía. El CHP presenta una mayor capacidad para la producción de energía eléctrica que para la térmica. Los sistemas de almacenamiento presentan una carga inicial nula.

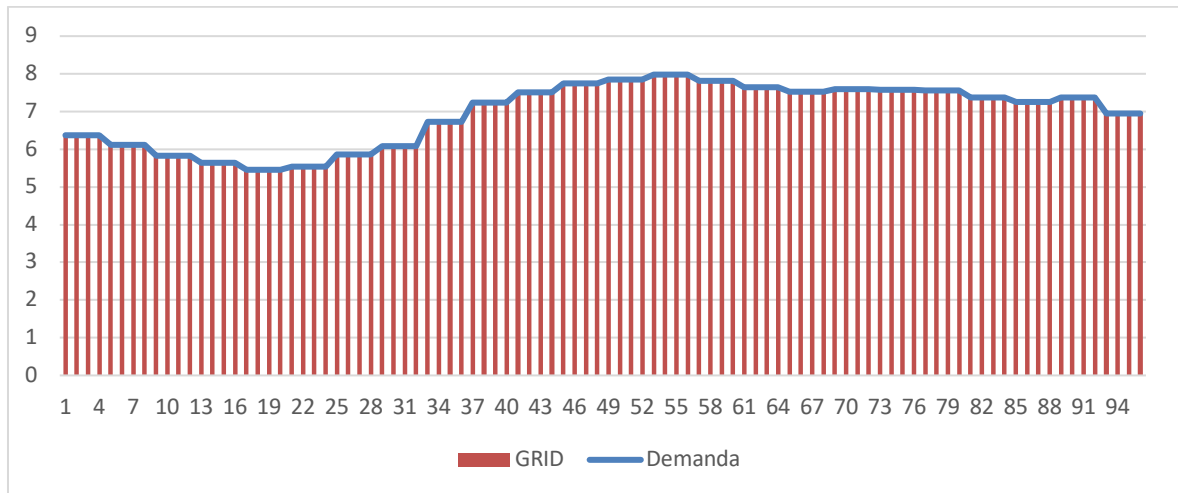


Figura 25. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 1$.

La Figura 25 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. Ante la posibilidad de elección entre la red eléctrica o el sistema CHP, la heurística se decanta por la red eléctrica debido a su menor coste. Esta elección se justifica, pese a que el coste de uso del sistema CHP es menor que el coste de la red eléctrica, el CHP presenta un elevado coste de iniciación, inexistente en caso de la red eléctrica.

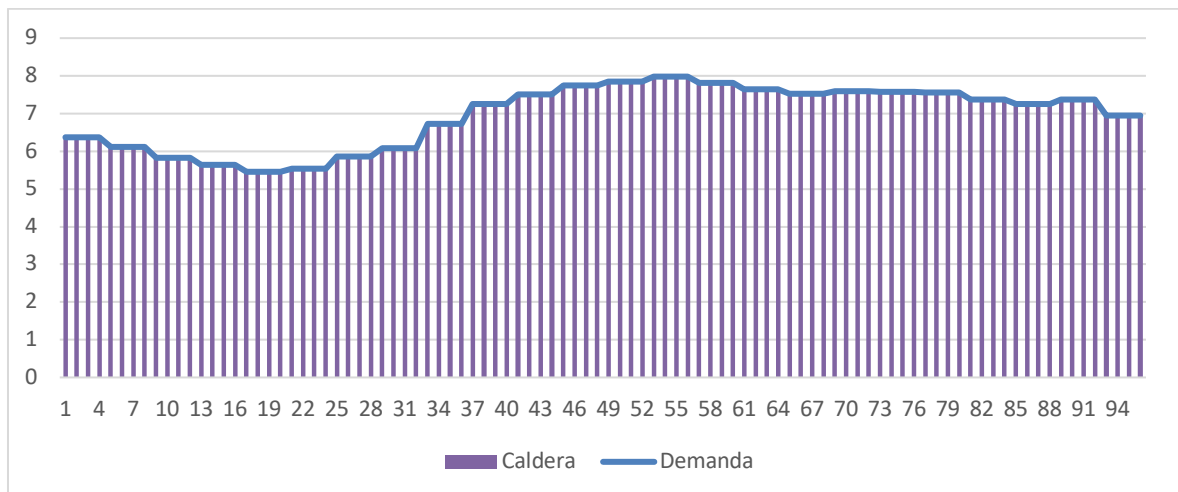


Figura 26. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 1 para $k = 2$.

La Figura 26 representa la distribución temporal de la demanda de energía calorífica para este escenario. En este caso, las únicas fuentes con capacidad de producción de energía son el sistema CHP y la caldera. Al contrario que en el caso de $k = 1$, el factor decisivo en este caso es el coste de utilización, ya que ambas fuentes presentan un mismo coste de inicialización.

6.2.2 Escenario 2. Recursos de energía: GRID y Caldera.

El presente escenario, muestra los mismos niveles de capacidad que el escenario anterior. Lo que diferencia a ambos escenarios, es que en este caso los costes de iniciación son menores. Igualmente, al ser nulo el coste de iniciación de la red eléctrica, la heurística se decanta por esta para satisfacer la demanda eléctrica. Los sistemas de almacenamiento presentan una carga inicial nula.

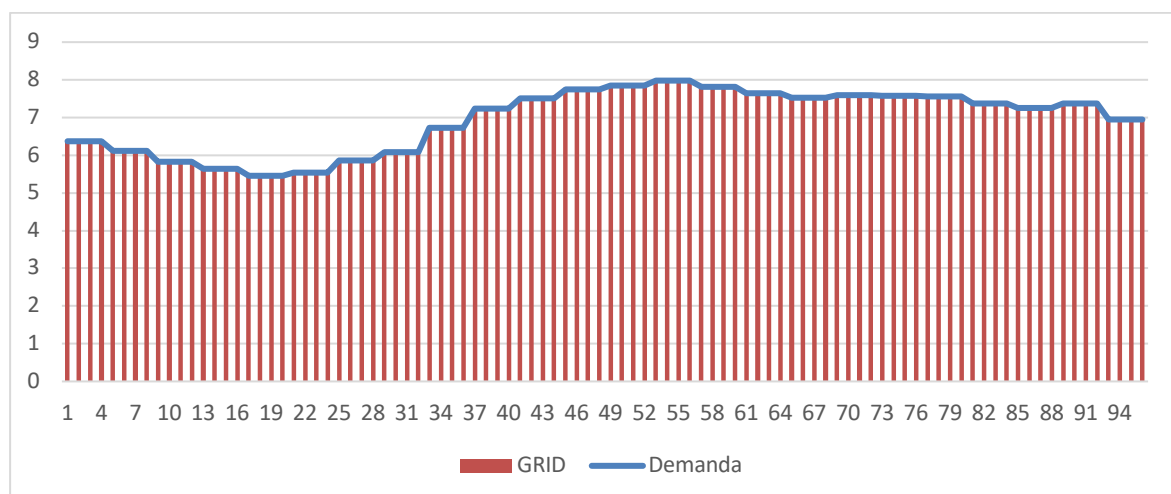


Figura 27. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 1$.

La Figura 27 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. Es de destacar, que en el presente escenario la capacidad de producción de energía de las RES es nula. Ante la posibilidad de elección entre la red eléctrica o el sistema CHP, la heurística se decanta por la red eléctrica debido a su menor coste. Al igual que en el apartado anterior, este ahorro de costes se da por el menor coste de inicialización de la red eléctrica que del CHP.

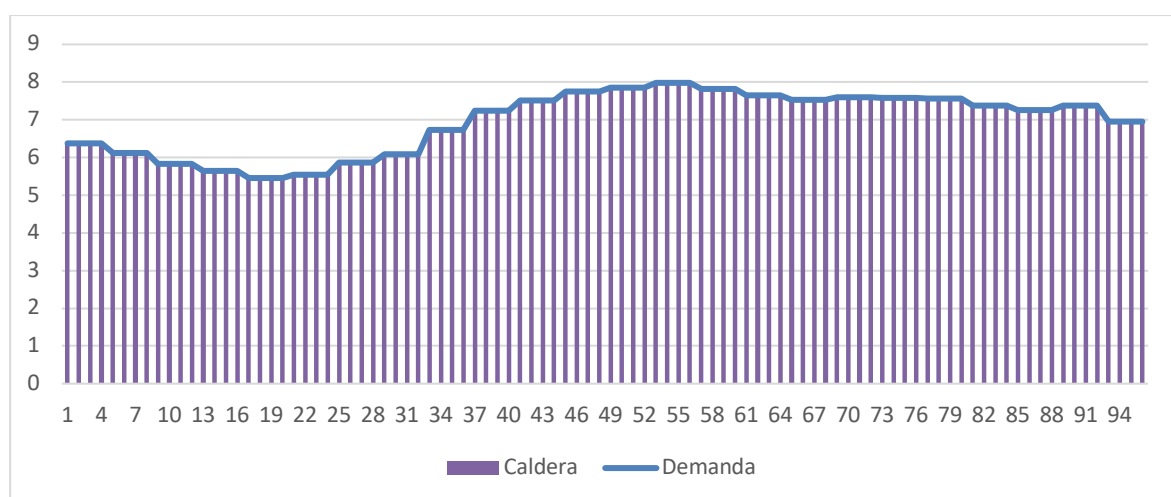


Figura 28. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 2 para $k = 2$.

La Figura 28 representa la distribución temporal de la demanda de energía calorífica para este escenario. En este caso, las únicas fuentes con capacidad de producción de energía son el sistema CHP y la caldera. Al contrario que en el caso de $k = 1$, el factor decisivo en este caso es el coste de utilización, ya que ambas fuentes presentan un mismo coste de inicialización.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.2.3 Escenario 3. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.

Por primera vez en esta batería, encontramos un escenario en el que todas las RES presentan capacidad de producción de energía, en este caso toma un valor de 1 kWh. De igual forma, la red eléctrica, así como la caldera y el CHP también se encuentran disponibles para la generación de energía. Los sistemas de almacenamiento presentan una carga inicial nula.

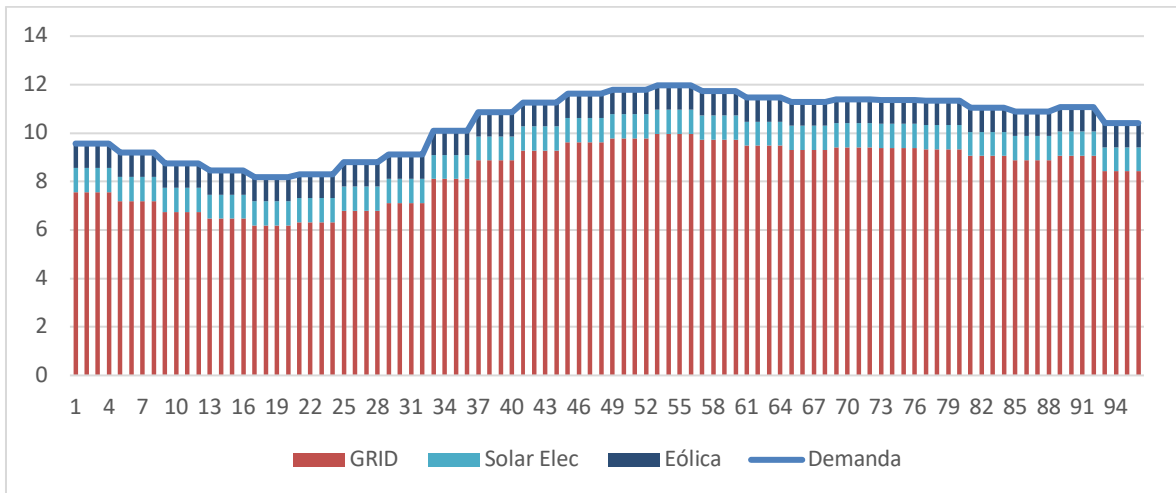


Figura 29. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 1$.

La Figura 29 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. Una vez agotadas, la red eléctrica cubrirá la demanda pendiente de satisfacer.

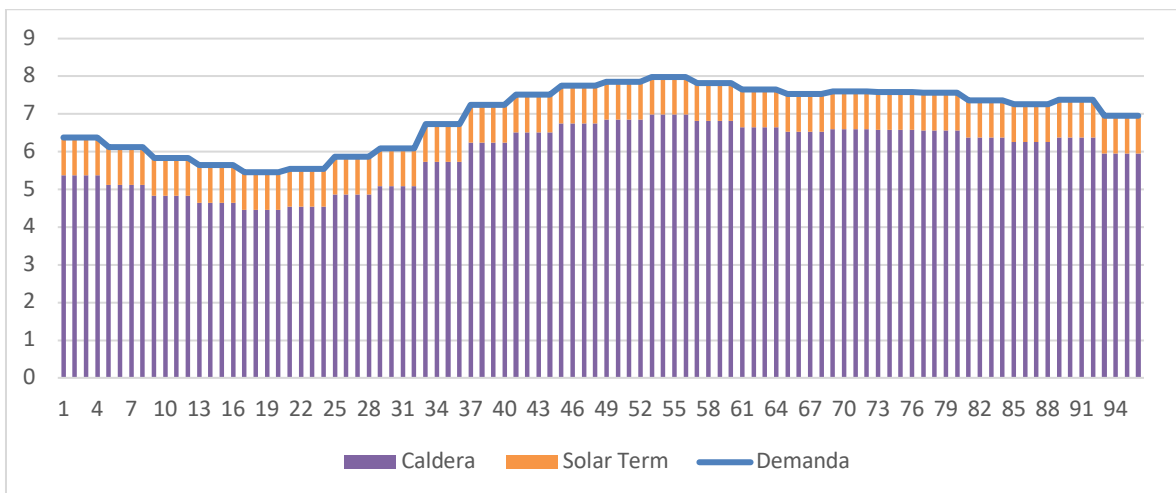


Figura 30. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 3 para $k = 2$.

La Figura 30 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 2$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, la única energía renovable con capacidad para producir energía térmica es la energía solar, una vez agotada dicha capacidad, será la caldera quien cubra la demanda restante.

6.2.4 Escenario 4. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.

Se presenta una situación idéntica al apartado anterior. Todas las RES tienen capacidad de producción de energía, así como el GRID, el CHP y la caldera. Los sistemas de almacenamiento presentan una carga inicial nula.

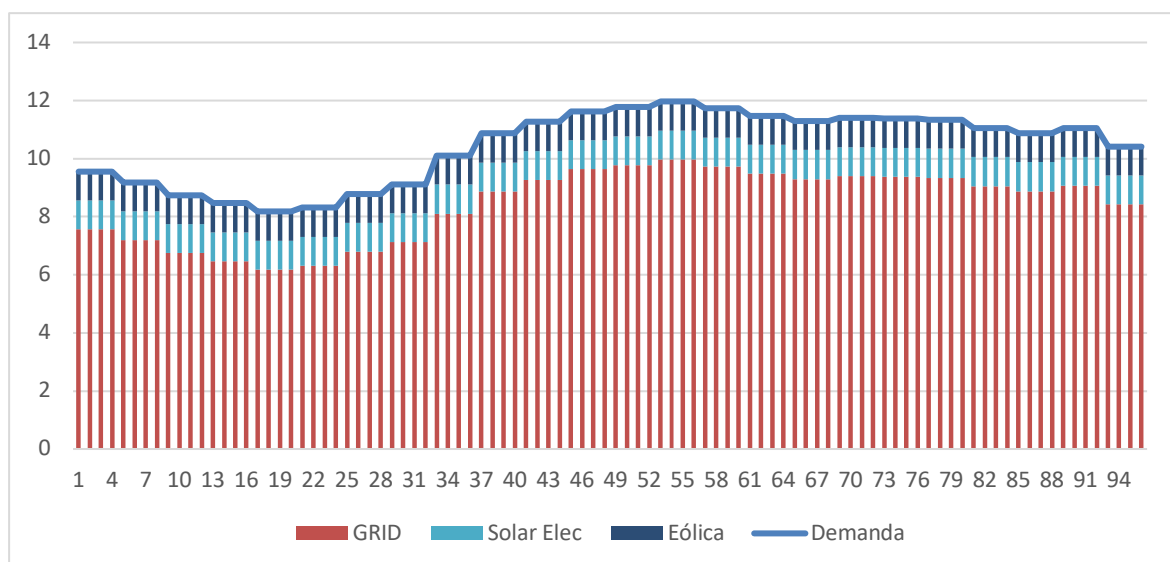


Figura 31. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 1$.

La Figura 31 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística par satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. Una vez agotadas, la red eléctrica cubrirá la demanda pendiente de satisfacer.

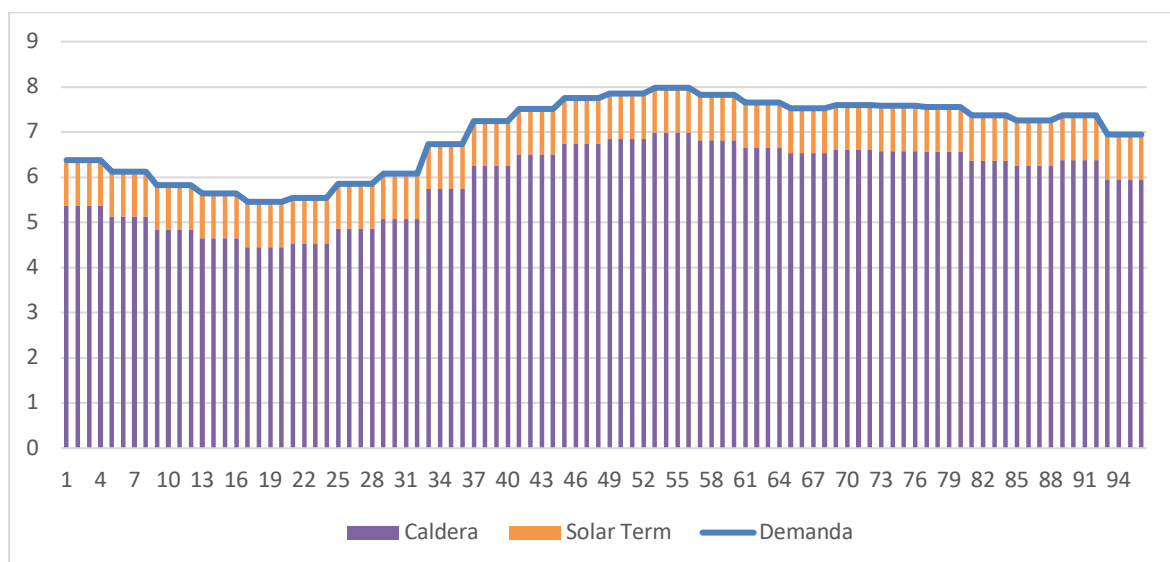


Figura 32. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 4 para $k = 2$.

La Figura 32 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 2$ y la solución propuesta por la heurística par satisfacerla. En primer lugar, la única energía renovable con capacidad para producir energía térmica es la energía solar, una vez agotada dicha capacidad, será la caldera quien cubra la demanda restante.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.2.5 Escenario 5. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.

Encontramos un escenario en el que todas las RES presentan capacidad de producción de energía, en este caso toma un valor de 1 kWh. De igual forma, la red eléctrica, así como la caldera y el CHP también se encuentran disponibles para la generación de energía. Los sistemas de almacenamiento presentan una carga inicial nula.

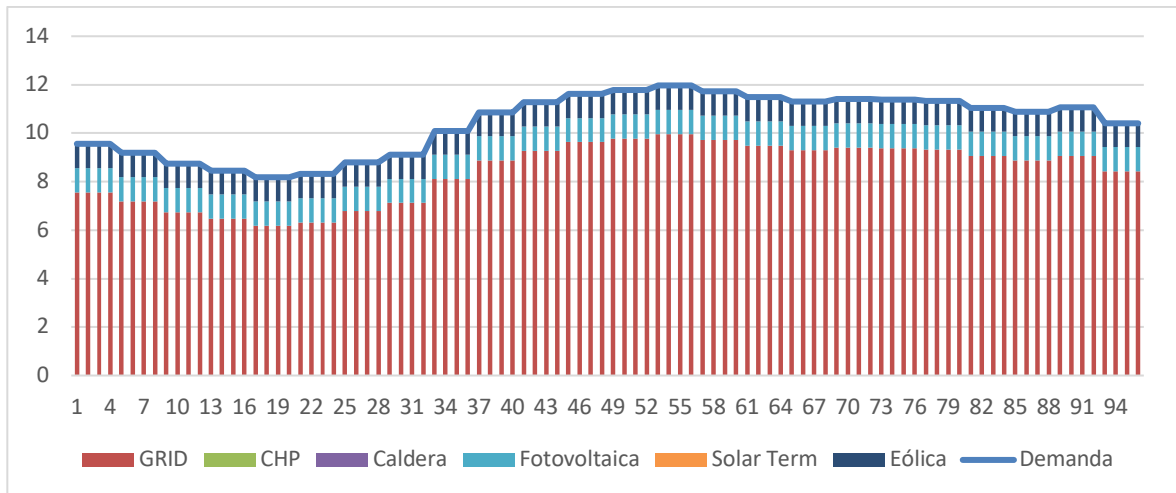


Figura 33. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 1$.

La Figura 33 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. Una vez agotadas, la red eléctrica cubrirá la demanda pendiente de satisfacer.

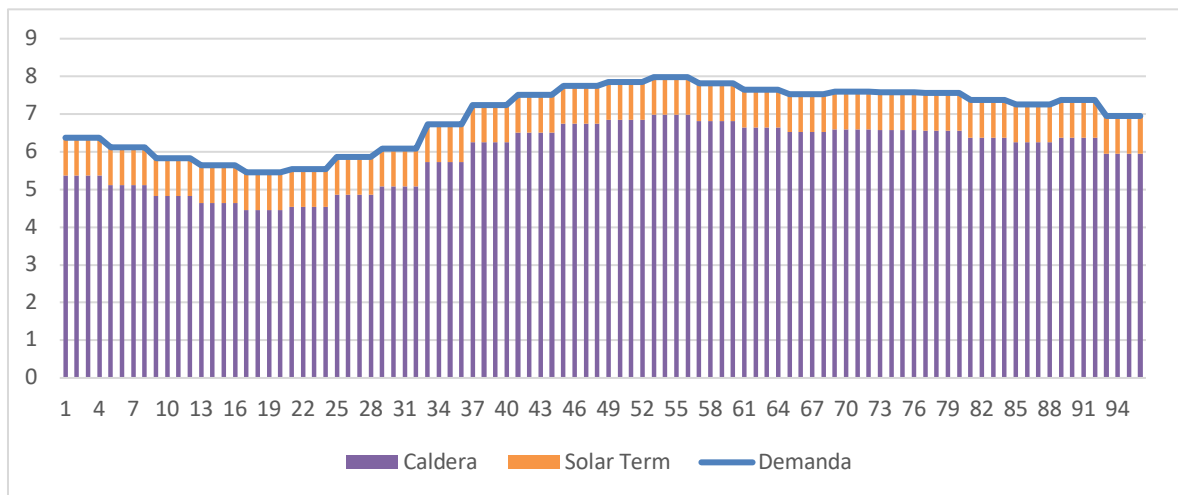


Figura 34. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 5 para $k = 2$.

La Figura 34 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 2$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, la única energía renovable con capacidad para producir energía térmica es la energía solar, una vez agotada dicha capacidad, será la caldera quien cubra la demanda restante.

6.2.6 Escenario 6. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica y Eólica.

De nuevo encontramos un escenario que presenta capacidad de producción de energía en todas las fuentes disponibles, tanto las RES como el GRID, la caldera y el CHP. Los sistemas de almacenamiento presentan una carga inicial nula.

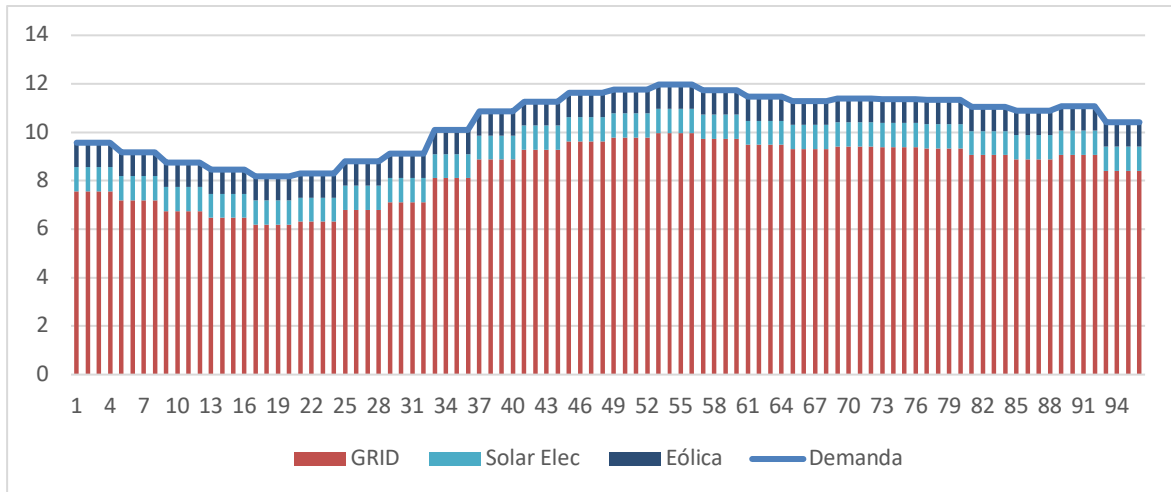


Figura 35. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 1$.

La Figura 35 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística par satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. Una vez agotadas, la red eléctrica cubrirá la demanda pendiente de satisfacer.

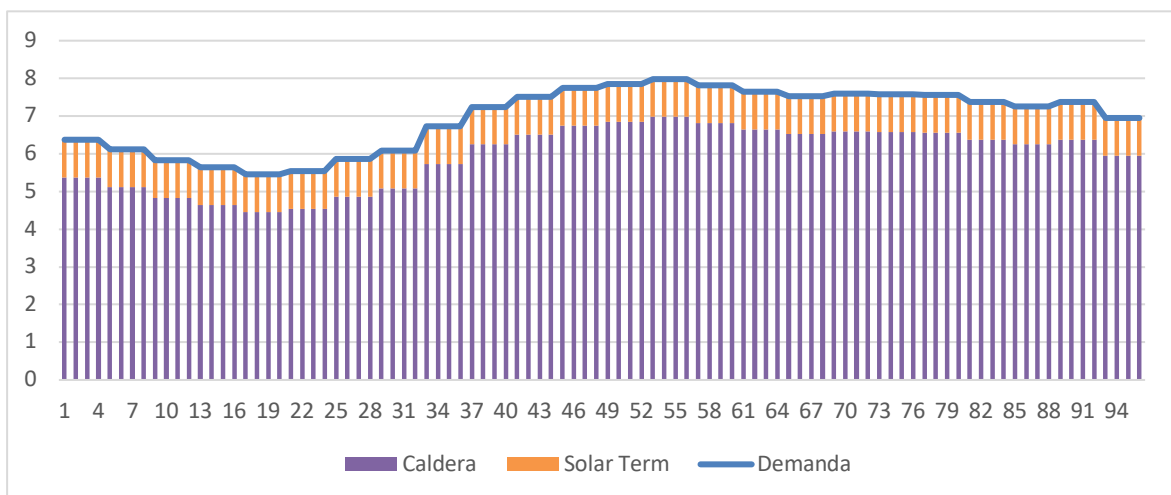


Figura 36. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 6 para $k = 1$.

La Figura 36 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 2$ y la solución propuesta por la heurística par satisfacerla. En primer lugar, la única energía renovable con capacidad para producir energía térmica es la energía solar, una vez agotada dicha capacidad, será la caldera quien cubra la demanda restante.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.2.7 Escenario 7. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías.

Este escenario, también presenta generación de energía en todas las RES. Igualmente, tanto la caldera, como el CHP y la red eléctrica están disponibles para la generación de la correspondiente energía. Los sistemas de almacenamiento presentan niveles de carga inicial de 500 y 350 kWh para $k = 1$ y $k = 2$ respectivamente.

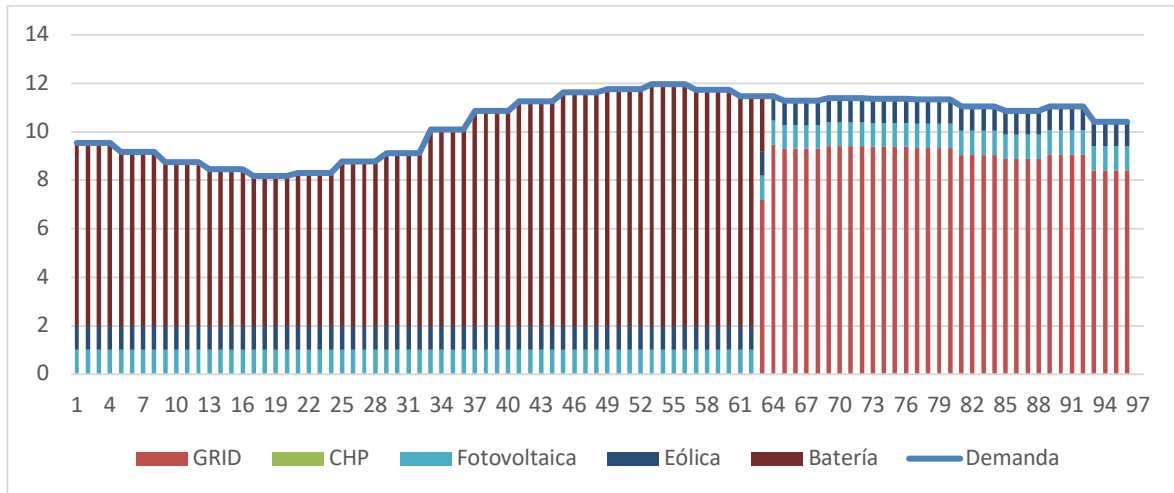


Figura 37. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 1$.

La Figura 37 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

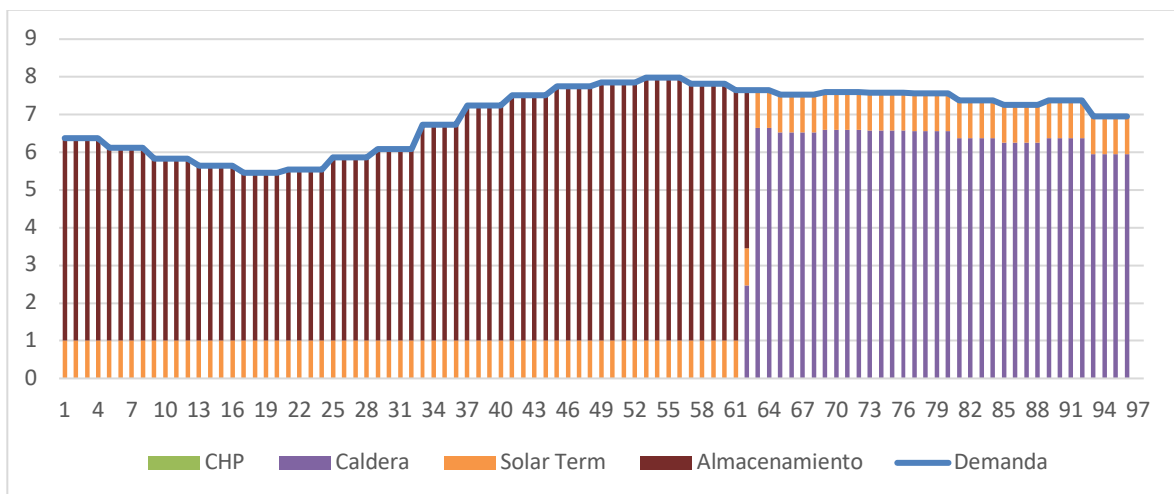


Figura 38. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 7 para $k = 2$.

La Figura 38 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

6.2.8 Escenario 8. Recursos de energía: GRID, Caldera, Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías.

Encontramos un escenario en el que todas las RES presentan capacidad de producción de energía, en este caso toma un valor de 1 kWh. De igual forma, la red eléctrica, así como la caldera y el CHP también se encuentran disponibles para la generación de energía. Los sistemas de almacenamiento presentan niveles de carga inicial de 500 y 350 kWh para $k = 1$ y $k = 2$ respectivamente.

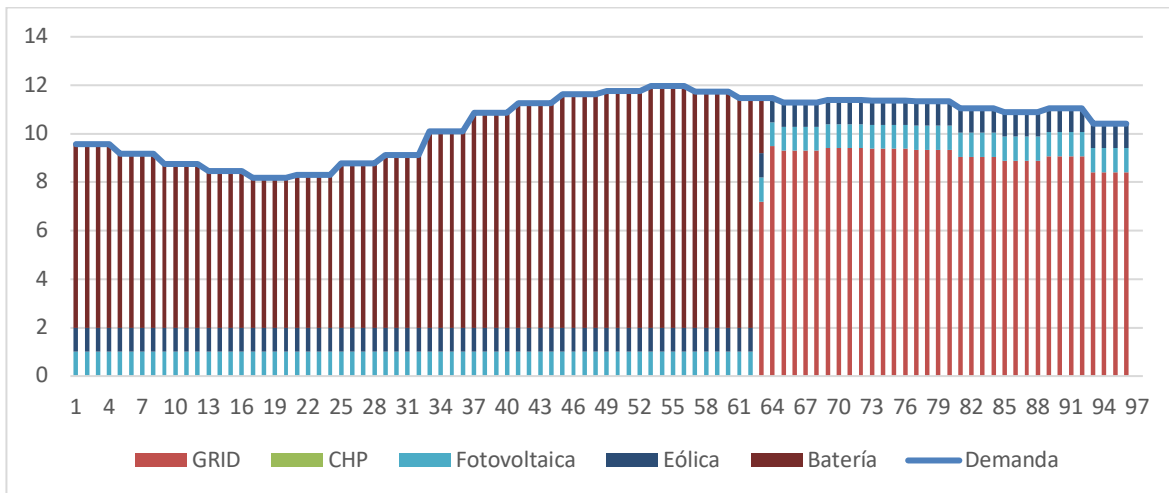


Figura 39. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 1$.

La Figura 39 muestra la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y la solución aportada por la heurística para satisfacer dicha demanda. En primer lugar, la heurística aprovecha toda la energía aportada por las RES. Durante los primeros intervalos temporales, esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada esta última, se utiliza la red eléctrica para satisfacer la demanda restante.

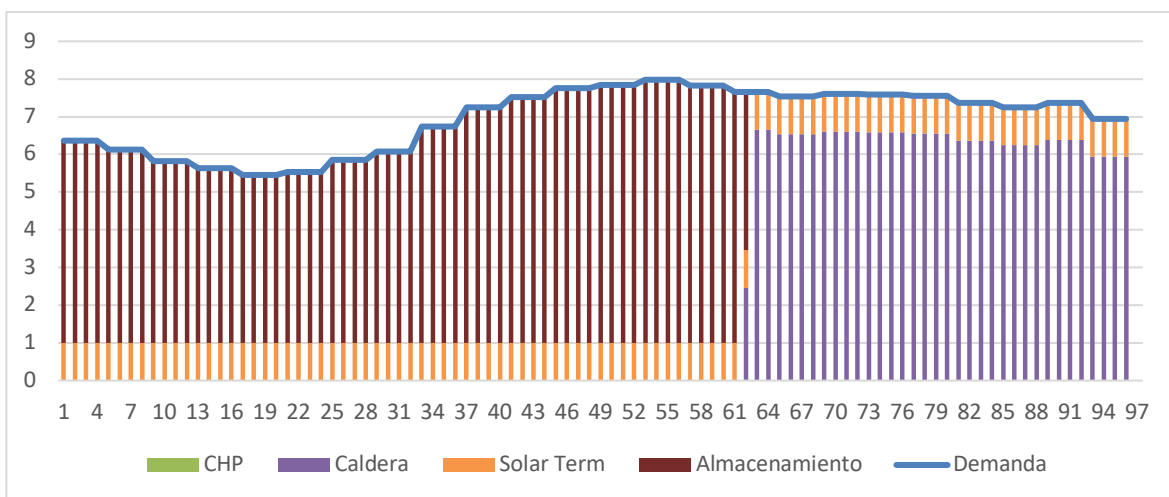


Figura 40: Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 8 para $k = 2$.

La Figura 40 se presenta el valor correspondiente a la demanda de energía calorífica, así como la solución propuesta por la heurística para satisfacer dicha demanda. La única fuente de energía renovable (RES) con capacidad para la producción de energía térmica es la solar. Esta se complementa con la energía almacenada. Una vez agotada la energía almacenada, la caldera proporciona la energía restante.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.2.9 Escenario 9 Recursos de energía: Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías

Encontramos un escenario en el que todas las RES presentan capacidad de producción de energía, en este caso toma un valor de 1 kWh. De igual forma, la red eléctrica, así como la caldera y el CHP también se encuentran disponibles para la generación de energía. Los sistemas de almacenamiento de $k = 1$ y $k = 2$ presentan niveles de energía almacenada inicialmente de 1100 y 700 kWh.

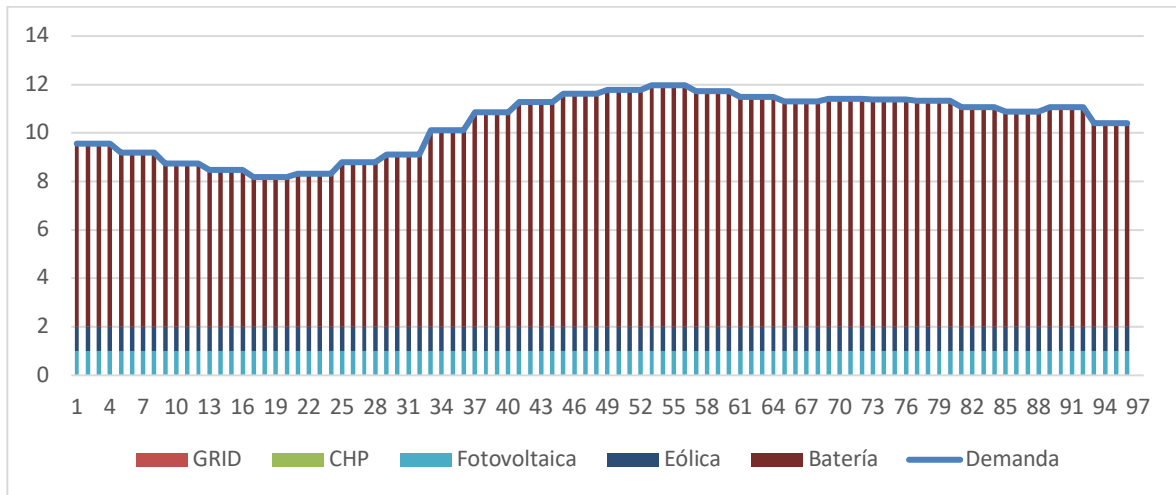


Figura 41. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 1$.

La Figura 41 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. En este caso, la energía almacenada es suficiente para cubrir toda la demanda no cubierta por las RES.

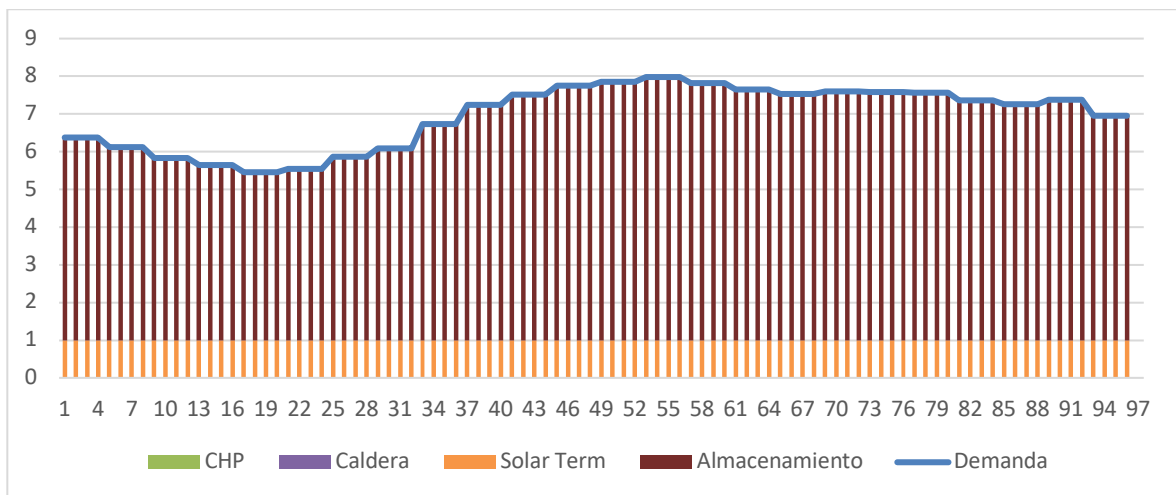


Figura 42. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 9 para $k = 2$.

La Figura 42 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 2$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. En este caso, la energía almacenada es suficiente para cubrir toda la demanda no cubierta por las RES.

6.2.10 Escenario 10. Recursos de energía: Fotovoltaica, Solar Térmica, Eólica y Baterías

Encontramos un escenario en el que todas las RES presentan capacidad de producción de energía, en este caso toma un valor de 1 kWh. De igual forma, la red eléctrica, así como la caldera y el CHP también se encuentran disponibles para la generación de energía. Los sistemas de almacenamiento de $k = 1$ y $k = 2$ presentan niveles de energía almacenada inicialmente de 1100 y 700 kWh.

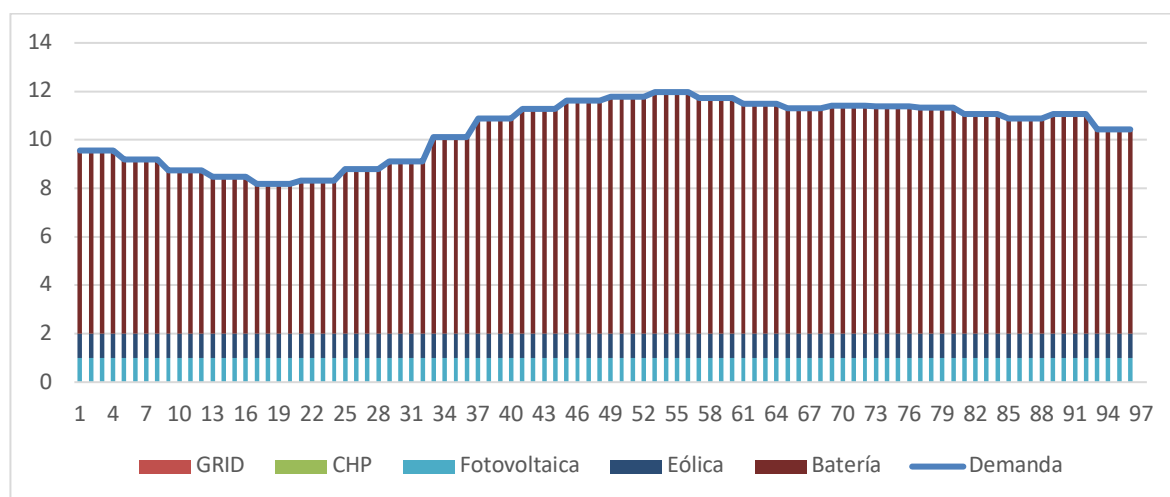


Figura 43. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 1$.

La Figura 43 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 1$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. En este caso, la energía almacenada es suficiente para cubrir toda la demanda no cubierta por las RES.

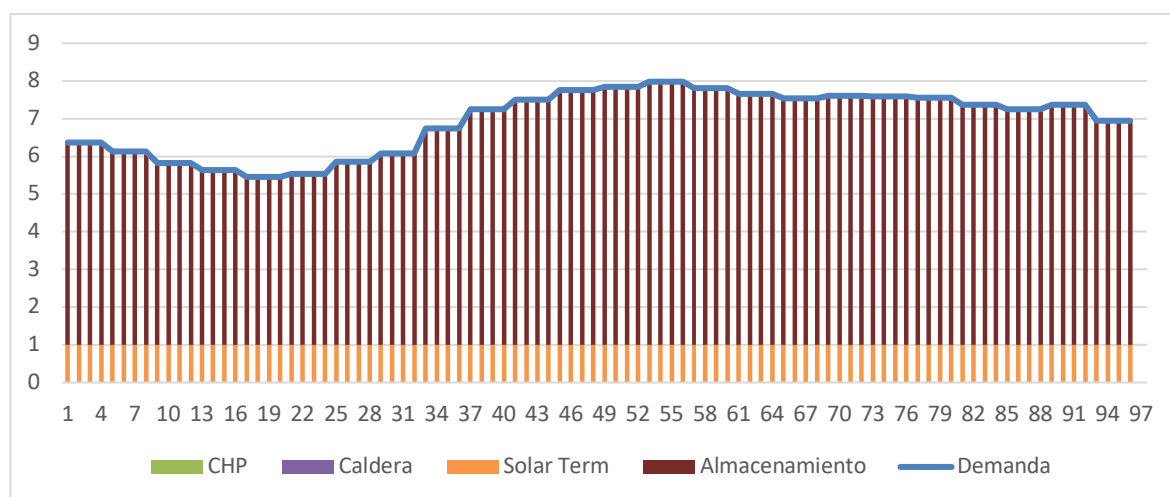


Figura 44. Evolución de la demanda y solución propuesta para el escenario 10 para $k = 2$.

La Figura 44 representa la distribución temporal de la demanda para $k = 2$ y la solución propuesta por la heurística para satisfacerla. En primer lugar, agotaremos la capacidad de las RES. En este caso, la energía almacenada es suficiente para cubrir toda la demanda no cubierta por las RES.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.3 Análisis de los costes para cada escenario

En este apartado se procede a analizar el coste económico que supondría la solución aplicada por la heurística en cada escenario. Analizaremos por separado las distintas baterías. Para calcularlo, se aplica la fórmula de coste, que se especifica en la sección modelo matemático de este documento, a los resultados obtenidos tras la aplicación de la heurística a los distintos problemas estudiados.

6.3.1 Costes en la Batería 1

En la siguiente tabla se detallan los resultados de coste obtenidos tras aplicar la heurística a los distintos escenarios pertenecientes a la batería 1:

Tabla 1. Costes del suministro energético en la Batería 1

ESCENARIO	COSTE (u.m.)
Escenario 1	1601.9697
Escenario 2	363.5218
Escenario 3	345.3718
Escenario 4	1163.5063
Escenario 5	1466.5434
Escenario 6	989.5930
Escenario 7	922.0237
Escenario 8	847.8231
Escenario 9	726.2120
Escenario 10	726.2120

Como se observa en la Tabla 1, los escenarios que presentan un menor coste son aquellos en los que las fuentes de almacenamiento, así como las RES juegan un papel fundamental. Siendo estas fuentes de generación con un coste mucho menor que las no renovables, a mayor protagonismo tengan, menor será el computo global de coste. Es de destacar, que en todos los escenarios, las fuentes de almacenamiento, no presentan costes ni de uso ni de utilización, lo que convierte a esta energía en “gratuita”.

6.3.2 Costes en la Batería 2

En la siguiente tabla se detallan los resultados de coste obtenidos tras aplicar la heurística a los distintos escenarios pertenecientes a la batería 2:

Tabla 2. Costes del suministro energético en la Batería 2

ESCENARIO	COSTE (u.m.)
Escenario 1	113.8497
Escenario 2	113.8497
Escenario 3	92.8035
Escenario 4	92.8035
Escenario 5	92.8035
Escenario 6	92.8035
Escenario 7	41.9065
Escenario 8	41.9065
Escenario 9	0
Escenario 10	0

Como se observa en la Tabla 2, las baterías presentan ciertos escenarios con un coste nulo. Esto es debido a que en ellos, la totalidad de la demanda es cubierta por fuentes de generación de energías renovables y por la energía almacenada en los sistemas de almacenamiento. Al no presentar estos ni costes de inicialización ni costes de utilización, se pueden considerar fuentes “gratuitas”.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

6.4 Escenario final

Sería interesante estudiar algún escenario en el que las fuentes de almacenamiento no solo se descarguen. Para tal efecto, se ha diseñado un escenario en el que la capacidad de las RES es variable, habiendo intervalos en la que esta excede a la demanda y otros en los que es menor que esta, dándose así ambos casos.

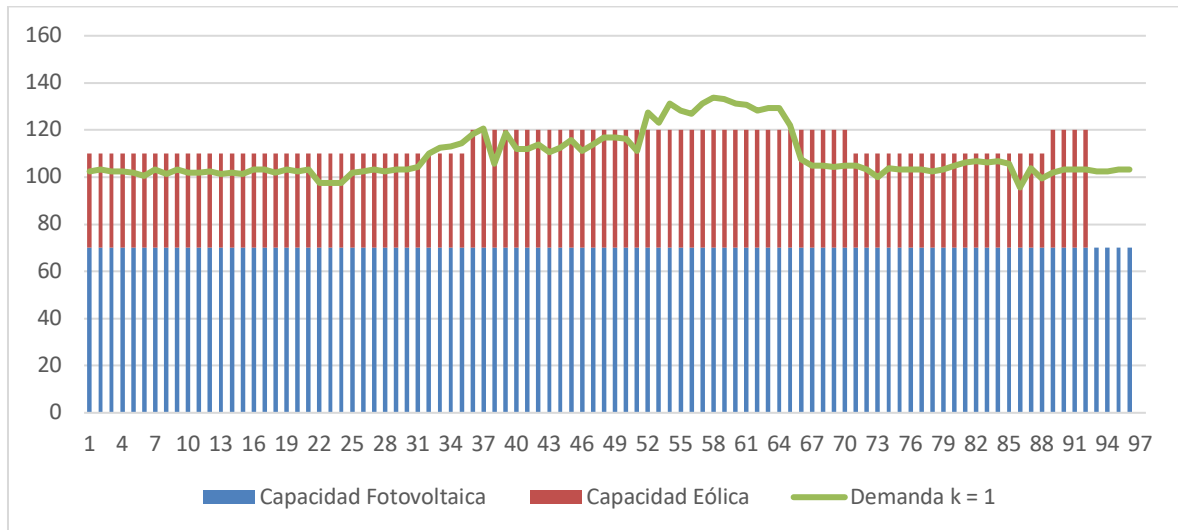


Figura 45. Evolución temporal de la demanda de $k = 1$ y capacidad de las RES. (Escenario de prueba)

En la Figura 45 se representa la evolución temporal de la demanda de energía eléctrica y de las capacidades que presentan las RES. Como se observa, para ciertos periodos temporales, la capacidad de las RES es mayor que la demanda de energía, este exceso de energía generada se almacena en la batería para su posterior uso en aquellos periodos temporales en los que la capacidad de generación no sea suficiente. Tras aplicar la heurística a este conjunto de datos se obtiene la siguiente solución propuesta por la heurística.

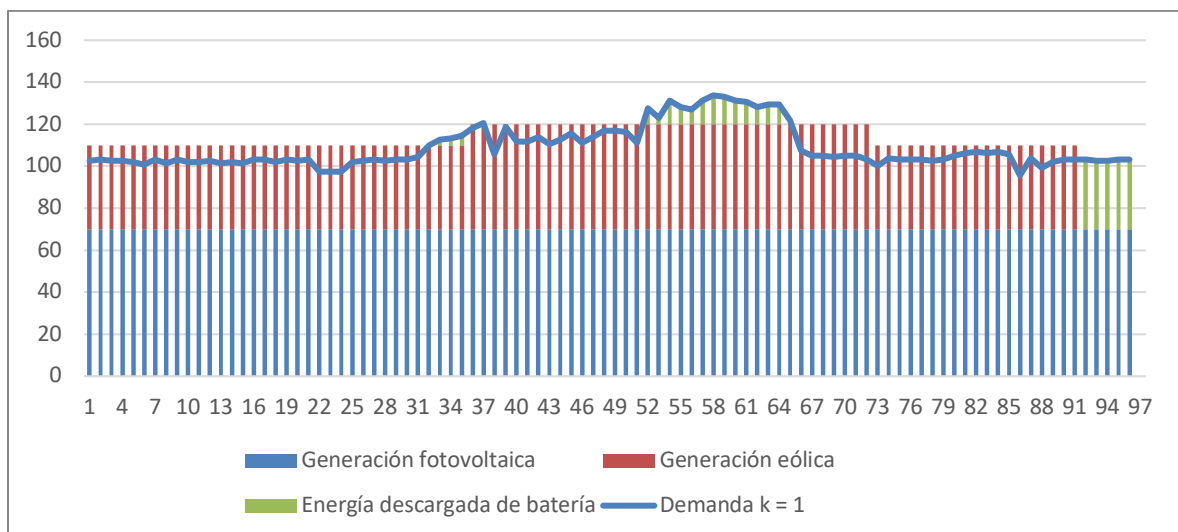


Figura 46. Evolución temporal de la demanda y respuesta generada para $k = 1$

Como se muestra en la Figura 46, en aquellos periodos en los que la energía superada por las RES no es suficiente para cubrir la demanda, se emplean los sistemas de almacenamiento. Igualmente, se ha considerado de interés incluir un gráfico que muestre la evolución temporal del nivel de energía almacenada. Este se representa en la Figura 47.

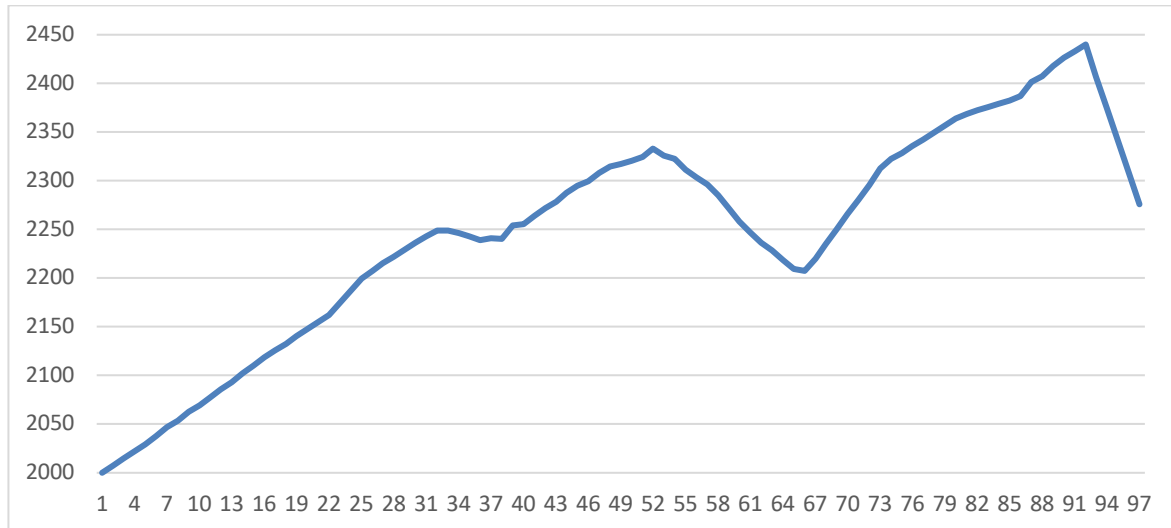


Figura 47. Evolución temporal del nivel de energía eléctrica almacenada

Se observa en la Figura 47 que, en aquellos intervalos en los que la capacidad de las RES supera a la demanda, el nivel de energía almacenada aumenta. Por el contrario, en aquellos en los que la demanda supera a la capacidad, este decrece.

7 CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto no es otro que la optimización económica de un DER compuesto por 6 fuentes de generación de energía. Este DER lo componen dos redes de energía, la eléctrica y la térmica, a priori independientes pero que se encuentran interconectadas por un sistema de cogeneración CHP. Como se menciona anteriormente, el sistema produce dos tipos de energía, eléctrica y térmica. El objetivo principal es dar una solución a estas demandas de energía al menor coste posible, primando en todo momento el empleo de energías renovables.

En la presentación del modelo matemático, se muestra la situación en estudio como un problema de programación lineal mixta entera compuesto por una función objetivo, que se corresponde con la función de costes del sistema, y una serie de restricciones que la solución ha de cumplimentar para satisfacer correctamente ambas demandas.

Una vez comprendida la estructura del modelo, se procede a la descripción de una heurística *greedy* que busca encontrar una buena solución que verifique las restricciones impuestas por el modelo de programación lineal. Esta heurística, tomada de [6], ha sido programada en Python, el código de programación empleado se encuentra disponible en los anexos de este documento.

A continuación, se procede a compilar en Python el código programado para una serie de datos tomados de [7]. La solución propuesta por la heurística para los 20 escenarios contemplados está recogida en el apartado resultados de este documento. En ellas, se observa claramente la predilección por las RES y como una vez agotada la capacidad de estas, la solución aportada se rige a criterios económicos. En primer lugar, se procede a cubrir la demanda con la energía almacenada en las baterías. Una vez esta se agota, será la fuente de generación que presente un menor coste aquella que proporcione la energía restante para cubrir la demanda.

Tras observar los resultados obtenidos, se puede llegar a una serie de conclusiones. En primer lugar, se observa que, una vez agotada la capacidad de las RES y la energía disponible en los sistemas de almacenamiento, lo que hace a la heurística decantarse por una fuente de generación u otra suele ser el coste de iniciación. En repetidas ocasiones, se observa que pese a presentar el CHP un coste de uso menor que el de la red eléctrica, el modelo se decanta por el uso de la red, esto se explica por la ausencia de coste de iniciación en la red eléctrica. Se presenta la posibilidad de trabajar en la reducción de los costes de inicialización del sistema CHP que lo convertiría en una opción mucho más atractiva a la par que económica.

De igual forma, es de destacar que, las RES no tienen capacidad suficiente para satisfacer la demanda en su totalidad para ninguno de los escenarios estudiados, esto apoya la idea defendida al principio del estudio sobre la imperiosa necesidad de que los DER han de estar perfectamente integrados en la red eléctrica. Sería interesante la implementación de mejoras en los sistemas de energías renovables para poder cubrir totalmente la demanda mediante el empleo de energías renovables, ya que como hemos podido observar, la mayor parte de la demanda es cubierta por energías no renovables.

Por lo anteriormente descrito, al no superar la capacidad de las RES a la demanda en ningún intervalo, tampoco se cargará energía en los sistemas de almacenamiento, ya que la heurística *greedy* de resolución, por su propia concepción *greedy* o avariciosa, solo contempla que sean cargados con el exceso de energía producido por las RES. Hay que tener en cuenta que la heurística *greedy* resuelve periodo a periodo la solución más económica, sin atender a periodo futuros. Por el contrario, en aquellos casos en los que los sistemas de almacenamiento presenten niveles iniciales no nulos, serán utilizados para cubrir la demanda no satisfecha por las RES hasta su agotamiento.

Como se ha estudiado en el “escenario final” del apartado resultados de este documento, el modelo permite la exploración de numerosas posibilidades. Resulta especialmente interesante el caso en el que la capacidad de las RES supera a la demanda en determinados periodos temporales, pues explora una actividad obviada en los escenarios aportados anteriormente como es el aumento del nivel de energía presente en los sistemas de almacenamiento cuando sea conveniente. Esto permite aclarar el funcionamiento de las heurísticas *greedy* así como sus limitaciones por su condición de avariciosa al no contemplar las posibilidades de escenarios futuros.

Además de lo anterior, se ha comprobado la utilidad de los sistemas de cogeneración (CHP), tras comprobar como han sido utilizados en distintas soluciones propuestas por el modelo. Como se explica anteriormente, este sistema, pese a tener un coste de uso menor que la red eléctrica, es descartado en numerosas ocasiones por su coste de iniciación. Sería interesante estudiar la posible reducción de este coste para hacerla una opción más atractiva.

Por último, como se ha comentado con anterioridad, el modelo solo contempla el almacenaje de energía cuando la generada por las RES supera a la demanda. Sería interesante contemplar la posibilidad de adquirir energía de las fuentes no renovables (caldera o red eléctrica) cuando su precio sea mínimo, para almacenarla y usarla posteriormente.

REFERENCIAS

- [1] IEA (2024), Electricity 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>, Licence: CC BY 4.0
- [2] Europeo, P. (2023). Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector. Obtenido de https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301STO98928/20180301STO98928_es.pdf
- [3] Akorede, M. F., Hizam, H., & Pouresmaeil, E. (2010). Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 724-734.
- [4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). Balance energético España 2021 y 2022. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/balances/Balances/Documents/balance-20231218/Balance%20Energetico%20España%202021%20y%202022_v0.pdf
- [5] Cortés, P., Muñuzuri, J., Domínguez, I. (2018). Genetic algorithms to optimize the operating costs of electricity and heating networks in buildings considering distributed energy generation and storage. *Computers & Operations Research*, 96, 157-172.
- [6] Cortés, P., Escudero-Santana, A., Barbadilla-Martín, E., Guadix, J. (2024). A production-inventory model to optimize the operation of distributed energy resource networks in a rolling horizon. *Article in press*.
- [7] Escudero-Santana, A., & Cortés, P. (2024). Distributed energy generation and storage [Dataset].

ANEXO: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

```
import openpyxl
from pulp import *
import copy

excel_dataframe = openpyxl.load_workbook("BAT2_Escenario5.xlsx",data_only=True)

Data1="Data1"
dataframe= excel_dataframe[Data1]

print(dataframe)

#SETS

J=6
S=2
K=2
T=97

#EXTRACCION DE DATOS

D1t = [] #DEMANDA DE ELECTRICIDAD
for row in range(12, dataframe.max_row+1):
    cell_value = dataframe.cell(row=row, column=2).value
    D1t.append(cell_value)

D2t = [] #DEMANDA DE CALOR
for row in range(12, dataframe.max_row+1):
    cell_value = dataframe.cell(row=row, column=3).value
    D2t.append(cell_value)

Fj=[] #Coste de inicializar la fuente de generación de energía
for i in range(5,11):
    cell_value = dataframe.cell(row=9, column=i).value
```

```
Fj.append(cell_value)

print(Fj)

#Coste de cada fuente de energia en cada instante
Cjt = [[0 for j in range(len(Fj))] for j in range(len(D1t)+1)]
i=0
for row in range(12, dataframe.max_row+1):
    j=0
    for col in range(5,11):
        cell_value = dataframe.cell(row=row, column=col).value
        Cjt[i][j]= cell_value
        j=j+1
    i=i+1

IMk=[]
for col in range(2,4):
    cell_value = dataframe.cell(row=3, column=col).value
    IMk.append(cell_value)

rok=[]
for col in range(2,4):
    cell_value = dataframe.cell(row=5, column=col).value
    rok.append(cell_value)

sk=[]
for col in range(2,4):
    cell_value = dataframe.cell(row=7, column=col).value
    sk.append(cell_value)

vk=[]
for col in range(2,4):
    cell_value = dataframe.cell(row=9, column=col).value
    vk.append(cell_value)

Pt=[]
for row in range(12, dataframe.max_row+1):
    cell_value = dataframe.cell(row=row, column=12).value
```

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER
LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

```
Pt.append(cell_value)
```

```
MBk=[]
```

```
for col in range(8,10):
```

```
    cell_value = dataframe.cell(row=3, column=col).value
```

```
    MBk.append(cell_value)
```

```
Data2= "Data2"
```

```
dataframe2= excel_dataframe[Data2]
```

```
eta_jk=[[0 for j in range(6)]for i in range(2)]
```

```
j=0
```

```
for col in range(2,8):
```

```
    cell_value = dataframe2.cell(row=4, column=col).value
```

```
    eta_jk[0][j]=cell_value
```

```
    j=j+1
```

```
j=0
```

```
for col in range(8,14):
```

```
    cell_value = dataframe2.cell(row=4, column=col).value
```

```
    eta_jk[1][j]=cell_value
```

```
    j=j+1
```

```
K1_jt=[[1 for j in range(len(Fj))] for j in range(len(D1t)+1)]
```

```
i=0
```

```
for row in range(7, dataframe2.max_row+1):
```

```
    j=0
```

```
    for col in range(2,8):
```

```
        cell_value = dataframe2.cell(row=row, column=col).value
```

```
        K1_jt[i][j]= cell_value
```

```
        j=j+1
```

```
    i=i+1
```

```
K2_jt=[[1 for j in range(len(Fj))] for j in range(len(D1t)+1)]
```

```
i=0
```

```
for row in range(7, dataframe2.max_row+1):
```

```
    j=0
```

```
    for col in range(8,14):
```

```

    cell_value = dataframe2.cell(row=row, column=col).value
    K2_jt[i][j]= cell_value
    j=j+1
    i=i+1

```

```
#SETS
```

```
J=6
```

```
S=2
```

```
K=2
```

```
T=97
```

```
#DECLARACIÓN DE VARIABLES
```

```

x1jt= [[0 for j in range(J)] for t in range(T)]
x2jt= [[0 for j in range(J)] for t in range(T)]
ikt = [[0 for k in range(K)] for t in range(T)]
ukt = [[0 for k in range(K)] for t in range(T)]
vkt = [[0 for k in range(K)] for t in range(T)]
gjt = [[0 for j in range(J)] for t in range(T)]
ekt = [[0 for k in range(K)] for t in range(T)]
y1jt= [[0 for j in range(1,J)] for t in range(T)]
y2jt= [[0 for j in range(1,J)] for t in range(T)]
a1jt= [[0 for j in range(1,J)] for t in range(T)]
a2jt= [[0 for j in range(1,J)] for t in range(T)]
zkt = [[0 for k in range(K)] for t in range(T)]
bkt = [[0 for k in range(K)] for t in range(T)]
f1lt= [[0 for j in range(8)] for t in range(T)]
f2lt= [[0 for j in range(8)] for t in range(T)]
ACCI= 0

```

```
j=0
```

```
for col in range(5,7):
```

```

    cell_value = dataframe.cell(row=3, column=col).value
    ikt[T-1][j]=cell_value
    j=j+1

```

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER
LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

$R_k = [3, 4, 5]$

for j in range(K):

$ikt[t][K] =$

for t in range(T):

for k in range(K):

$ikt[t][k] = ikt[t-1][k] + ukt[t-1][k] - vkt[t-1][k]$

for j in R_k :

$x1j[t][j] = K1_jt[t][j]$

$x2j[t][j] = K2_jt[t][j]$

$x2j[t][1] = \eta_jk[1][1] * gjt[t][1]$

if $\sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) \geq D1t[t]$:

if $(rok[0] * (\sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - D1t[t])) \leq (IMk[0] - ikt[t-1][0])$ and $(rok[0] * (\sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - D1t[t])) \leq MBk[0]$:

$ukt[t][0] = rok[0] * (\sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - D1t[t])$

$ikt[t][0] = ikt[t-1][0] + ukt[t][0]$

elif $(rok[0] * (\sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - D1t[t])) > MBk[0]$ and $MBk[0] \leq (IMk[0] - ikt[t-1][0])$:

$ukt[t][0] = MBk[0]$

$ikt[t][0] = ikt[t-1][0] + ukt[t][0]$

$ekt[t][0] = \sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - (ukt[t][0] / rok[0]) - D1t[t]$

else:

$ukt[t][0] = IMk[0] - ikt[t-1][0]$

$ikt[t][0] = IMk[0]$

$ekt[t][0] = \sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - (ukt[t][0] / rok[0]) - D1t[t]$

elif $\sum(x1j[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) < D1t[t]$:

$L_k = [0, 1, 2]$

$B_k = [6]$ #HE LLAMADO ASI A LAS FUENTES DE ALMACENAMIENTO PARA QUE NO SE CONFUNDAN CON LAS FTES ENERGÍA

$S = [0]$

```

COST=[]

for l in Lk:
    COST.append(Fj[l]*(1-y1jt[t-1][l])+Cjt[t][l]*(D1t[t]-sum(x1jt[t][l] for l in Lk)))

for b in S:
    COST.append(sk[b]*(1-zkt[t-1][b])+vk[b]*((D1t[t]-sum(vkt[t][b] for b in S))))
# print("COST",COST)
cost_orden=sorted(COST)

fuentes = Lk.copy()
fuentes.append(Bk[0])

Lfin = []

fuentesycostes= list(zip(fuentes, COST))

fuentesycostesorden = sorted(fuentesycostes, key=lambda x: x[1])

fuentesorden=[fuente for fuente,coste in fuentesycostesorden ]

Lfin=copy.deepcopy(fuentesorden)
# initiate = 0

i=0
l=Lfin[i]
ACCI=0

while (D1t[t]-sum(x1jt[t][j] for j in Rk)) > ACCI: ##ACCL NUMERO O VECTOR

    l=Lfin[i]
    i=i+1

    if l in Lk and K1_jt[t][l] <= ( D1t[t]- sum(x1jt[t][j] for j in Rk ) - ACCI):

```


DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER
LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

$$f_{1l}[t][1] = K1_jt[t][1]$$

elif $l \in L_k$ and $K1_jt[t][1] > (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$:

$$f_{1l}[t][1] = (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$$

if $l \in B_k$ and $ikt[t][0] \leq (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$ and $ikt[t][0] \leq MBk[0]$:

$$f_{1l}[t][1] = ikt[t][0]$$

elif $l \in B_k$ and $ikt[t][0] \leq (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$ and $ikt[t][0] > MBk[0]$:

$$f_{1l}[t][1] = MBk[0]$$

elif $l \in B_k$ and $ikt[t][0] > (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$ and $MBk[0] > (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$:

$$f_{1l}[t][1] = (D1t[t] - \sum(x1jt[t][j] \text{ for } j \text{ in } R_k) - ACCL)$$

if $l \in B_k$:

$$vkt[t][0] = f_{1l}[t][1]$$

else:

$$x1jt[t][1] = f_{1l}[t][1]$$

if $l \in [1,2]$:

$$\# \quad gjt[t][1] = x2jt[t][1] / \eta_{jk}[0][1]$$

$$ACCL = \sum(f_{1l}[t][1] \text{ for } l \text{ in } L_{fin})$$

for $k \in \text{range}(K)$:

$$\# \quad ikt[t][k] = ikt[t-1][k] + ukt[t-1][k] - vkt[t-1][k]$$

```

## PARA COMPROBAR QUE FUNCIONA, SUMO TODOS LOS FLUJOS EN CADA PERIODO DE
TIEMPO Y LOS COMPARO CON LA DEMANDA EN EL PERIODO.
### COMO EN EL ESCENARIO 1 NO HAY FUENTES RENOVABLES, NO SE ALMACENA NADA
Y TIENE QUE COINCIDIR, SI NO HABRÍA QUE SUMARLE LAS DESCARGAS
# sumas = sum(x1jt[t][j] for j in range(J))
# print(sumas , "/", D1t[t])
# print(x1jt)

if sum(x2jt[t][j] for j in Rk) >= D2t[t]:

    if (rok[1]*(sum(x2jt[t][j] for j in Rk)-D2t[t])) <= (IMk[1]-ikt[t-1][1]) and (rok[1]*(sum(x2jt[t][j] for j in
    Rk)-D2t[t])) <= MBk[1]:

        ukt[t][1] = rok[1]*(sum(x2jt[t][j] for j in Rk)-D2t[t])
        ikt[t][1] = ikt[t-1][1] + ukt[t][1]

    elif (rok[1]*(sum(x2jt[t][j] for j in Rk)-D2t[t])) > MBk[1] and MBk[1] <= (IMk[1]-ikt[t-1][1]):
        ukt[t][1] = MBk[1]
        ikt[t][1] = ikt[t-1][1] + ukt[t][1]
        ekt[t][1] = sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - (ukt[t][1]/rok[1]) - D2t[t]

    else:
        ukt[t][1] = IMk[1] - ikt[t-1][1]
        ikt[t][1] = IMk[1]
        ekt[t][1] = sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - (ukt[t][1]/rok[1]) - D2t[t]

elif sum(x2jt[t][j] for j in Rk) < D2t[t]:

    Lk = [0,1,2]
    Bk = [7] #HE LLAMADO ASI A LAS FUENTES DE ALMACENAMIENTO PARA QUE NO SE
    CONFUNDAN CON LAS FTES ENERGÍA
    S = [1]

    COST2 = []

    for l in Lk:
        COST2.append(Fj[l]*(1-y2jt[t-1][l]) + Cjt[t][l]*(D2t[t] - sum(x2jt[t][l] for l in Lk)))

    for b in S:

```

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HEURÍSTICA GREEDY PARA SATISFACER
LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA A PARTIR DE UNA RED DE
ENERGÍA DISTRIBUIDA EN UN GRAN CONSUMIDOR

```
COST2.append(sk[1]*(1-zkt[t-1][1])+vk[1]*(D2t[t]-sum(vkt[t][1] for b in S)))
```

```
cost_orden2=sorted(COST2)
```

```
fuentes2 = Lk.copy()
```

```
fuentes2.append(7)
```

```
Lfin2 = []
```

```
fuentesycostes2= list(zip(fuentes2, COST2))
```

```
fuentesycostesorden2 = sorted(fuentesycostes2, key=lambda x: x[1])
```

```
fuentesorden2=[fuente2 for fuente2,coste2 in fuentesycostesorden2 ]
```

```
Lfin2=copy.deepcopy(fuentesorden2)
```

```
# initiate = 0
```

```
i=0
```

```
l=Lfin2[i]
```

```
ACCL2=0
```

```
#print("Lfin", Lfin2)
```

```
while (D2t[t]-sum(x2jt[t][j] for j in Rk)) > ACCL2: ##ACCL NUMERO O VECTOR
```

```
    l=Lfin2[i]
```

```
    i=i+1
```

```
    if l in Lk and K2_jt[t][l] <= ( D2t[t]- sum(x2jt[t][j] for j in Rk ) - ACCL2 ):
```

```
        # print(t, "caso1")
```

```
        f2lt[t][l] = K2_jt[t][l]
```

```
    if l in Lk and K2_jt[t][l] > (D2t[t] - sum(x2jt[t][j]for j in Rk) - ACCL2):
```

```
        #print(t, "caso2")
```

```
        f2lt[t][l]=( D2t[t] - sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - ACCL2)
```

```
    if l in Bk and ikt[t][l] <= D2t[t] - sum(x2jt[t][j]for j in Rk) - ACCL2 and ikt[t][l]<=MBk[l]:
```

```

#print(t, "caso3")

f2lt[t][1] = ikt[t][1]

elif l in Bk and ikt[t][1] <= (D2t[t] - sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - ACC12) and ikt[t][1] > MBk[1]:
    #print(t, "caso4")
    f2lt[t][1] = MBk[1]

    elif l in Bk and ikt[t][1] > (D2t[t] - sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - ACC12) and MBk[1] > (D2t[t]-
sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - ACC12):
        #print(t, "caso5")
        f2lt[t][1] = (D2t[t] - sum(x2jt[t][j] for j in Rk) - ACC12)

ACC12 = sum( f2lt[t][1] for l in Lfin2 )

if l in Bk:

    vkt[t][1] = f2lt[t][1]

else:

    x2jt[t][1] = f2lt[t][1]

if l in [1,2]:

    gjt[t][1] = x2jt[t][1]/eta_jk[1][1]

if (D2t[t]-sum(x2jt[t][j] for j in Rk)) <= ACC12:

    break

```