

## Trabajo Fin de Máster

Análisis y optimización energética de instalaciones aisladas en refugios de montaña a través de mejoras basadas en las energías renovables y la eficiencia energética

Autor/es

**Manuel Gutiérrez Roa**

Director/es

**D. Ángel Antonio Bayod Rújula**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza  
2018



DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Manuel Gutiérrez Roa

con nº de DNI 77330605-M en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Máster \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Análisis y optimización energética de instalaciones aisladas en refugios de montaña a través de mejoras basadas en las energías renovables y la eficiencia energética

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 29 de junio de 2018

Fdo: Manuel Gutiérrez Roa

# Análisis y optimización energética de instalaciones aisladas en refugios de montaña a través de mejoras basadas en las energías renovables y la eficiencia energética

## Resumen

Los refugios de montaña son instalaciones aisladas en las que, debido a su ubicación y difícil accesibilidad, la gestión energética del edificio adquiere una especial relevancia en cuanto a mantener y proveer una serie de servicios mínimos de electricidad y confort térmico. Debido a la madurez y robustez de las tecnologías basadas en combustibles fósiles, los refugios de montaña basan actualmente su generación energética en estos vectores energéticos.

Este trabajo plantea la modelización y el análisis energético de dos refugios de montaña del Pirineo Aragonés así como la introducción de diferentes soluciones basadas en las energías renovables y la eficiencia energética. Para esto, se analizan los consumos, las instalaciones y la disponibilidad de recursos de generación renovable, modelizando las diferentes tecnologías y evaluando comparativamente los balances energéticos resultantes.

Puesto que cada refugio presenta unas características propias que permiten el aprovechamiento de una serie de recursos disponibles, se analizan individualmente aquellos accesibles en las situaciones planteadas, como son la biomasa, la energía solar térmica, la energía solar fotovoltaica y la generación hidráulica. En cuanto a sistemas de almacenamiento, se proponen aquellos que permiten mejorar el balance energético del refugio a corto plazo, como las baterías, y a medio plazo, como el almacenamiento de hidrógeno, mostrando especial interés en aquellas tecnologías que permitirían el autoabastecimiento del refugio con generación renovable estacional.

Las soluciones se analizan bajo criterios de rentabilidad a lo largo de la vida útil del proyecto así como de reducción del impacto ambiental, relacionando este con las emisiones durante su etapa de uso. La rentabilidad de cada refugio es evaluada mediante la optimización de aquellas configuraciones que permiten aumentar la penetración renovable asegurando la recuperación de la inversión inicial a lo largo de la vida útil.

A través de este análisis, se concluye que las tecnologías de generación renovable no solo reducen el impacto ambiental de instalaciones aisladas de refugios de montaña sino que, además, permiten aumentar la rentabilidad de la instalación, incrementar su resiliencia con el medio y disminuir su vulnerabilidad respecto a recursos externos, facilitando su gestión y asegurando una mayor independencia energética.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>1</b>
<b>3. Casos de estudio</b>	<b>2</b>
3.1. Refugio de Lizara . . . . .	2
3.2. Refugio de Bachimaña . . . . .	6
<b>4. Resultados y propuestas</b>	<b>8</b>
4.1. Refugio de Lizara . . . . .	8
4.1.1. Aprovechamiento térmico mediante intercambiadores de calor . . .	10
4.1.2. Instalación de una termochimenea . . . . .	10
4.1.3. Generación ACS mediante calderas eléctricas . . . . .	12
4.1.4. Generación ACS mediante paneles híbridos térmicos-PV . . . . .	12
4.1.5. Dimensionamiento de PV y baterías . . . . .	14
4.1.6. Comparación de resultados . . . . .	17
4.1.7. Variación de la configuración en función de distintos precios . . . . .	19
4.2. Refugio de Bachimaña . . . . .	20
4.2.1. Electrificación del consumo térmico . . . . .	21
4.2.2. Autoabastecimiento . . . . .	22
<b>5. Conclusiones</b>	<b>27</b>
<b>6. Agradecimientos</b>	<b>29</b>
<b>A. Anexo I. Parámetros Lizara.</b>	<b>33</b>
A.1. Generadores diésel y caldera de condensación . . . . .	33
A.2. Baterías e inversor . . . . .	34
A.3. Tecnología PV e híbrida . . . . .	34
A.4. Termochimenea e intercambiadores térmicos . . . . .	36
A.5. Perfiles de consumo . . . . .	39
A.6. Recursos energéticos . . . . .	40
A.7. Combustibles . . . . .	40
A.8. Otros . . . . .	44
<b>B. Anexo II. Parámetros Bachimaña.</b>	<b>45</b>
B.1. Generadores y caldera diésel . . . . .	45
B.2. Turbina . . . . .	47
B.3. Baterías e inversor . . . . .	47
B.4. Caldera eléctrica y acumuladores . . . . .	49

B.5. Almacenamiento de hidrógeno . . . . .	49
B.6. Perfiles de consumo . . . . .	51
B.7. Recursos energéticos . . . . .	54
B.8. Combustibles . . . . .	54
B.9. Otros . . . . .	55
<b>C. Anexo III. Otros resultados.</b>	<b>56</b>
C.1. Optimización en función de la inclinación de los paneles fotovoltaicos . . .	56
C.2. Optimización en función del precio del diésel . . . . .	56
C.3. Optimización en función del precio PV . . . . .	56

## Índice de tablas

1.	Tecnologías inicialmente instaladas en el refugio de Lizara. . . . .	3
2.	Tecnologías inicialmente instaladas en el refugio de Bachimaña. . . . .	8
3.	Tecnologías instaladas en las distintas configuraciones analizadas. . . . .	17
4.	Características de cada una de las configuraciones propuestas. . . . .	18
5.	Comparación de las configuraciones inicial y con electrificación en Bachimaña. . . . .	21
6.	Parámetros de las configuraciones inicial y con electrificación en Bachimaña. . . . .	22
7.	Configuraciones posibles para aumentar el autoabastecimiento de Bachimaña. . . . .	24
8.	Parámetros característicos de las distintas configuraciones analizadas. . . . .	25
9.	Variables utilizadas para los generadores diésel de Lizara. . . . .	33
10.	Variables utilizadas para el sistema de calefacción de Lizara. . . . .	34
11.	Modelos y precios de baterías e inversor de Lizara. . . . .	35
12.	Parámetros del inversor de Lizara. . . . .	35
13.	Especificaciones técnicas de los paneles PV de Lizara. . . . .	36
14.	Especificaciones técnicas de los paneles PV de Lizara. . . . .	37
15.	Modelos y precios de PV y paneles híbridos de Lizara. . . . .	37
16.	Especificaciones técnicas generales de los paneles híbridos de Lizara. . . . .	38
17.	Especificaciones térmicas de los paneles híbridos de Lizara. . . . .	38
18.	Especificaciones eléctricas de los paneles híbridos de Lizara. . . . .	38
19.	Parámetros técnicos de la termochimenea instalada en Lizara. . . . .	39
20.	Modelos y precios de termochimenea e intercambiadores de Lizara. . . . .	40
21.	Parámetros utilizados para el cálculo de la demanda ACS en Lizara. . . . .	41
22.	Valores de irradiación y temperatura en el refugio de Lizara. . . . .	43
23.	Propiedades de los combustibles usados en Lizara. . . . .	44
24.	Precio y consumo de los combustibles usados en Lizara. . . . .	45
25.	Otros valores necesarios para la simulación. . . . .	45
26.	Variables utilizadas para los generadores diésel de Bachimaña. . . . .	47
27.	Características de la turbina hidráulica instalada en Bachimaña. . . . .	48
28.	Modelos y precios de baterías e inversor de Bachimaña. . . . .	48
29.	Costes del almacenamiento de hidrógeno en Bachimaña. . . . .	51
30.	Características técnicas del almacenamiento de hidrógeno en Bachimaña. . . . .	52
31.	Parámetros utilizados para el cálculo de la demanda ACS en Bachimaña. . . . .	54
32.	Precio y consumo del diésel usado en Bachimaña. . . . .	55

## Índice de figuras

1.	Refugio de Lizara. . . . .	4
2.	Consumo eléctrico de Lizara durante los meses de abril, julio y diciembre. . . . .	4
3.	Consumo térmico de Lizara durante los meses de abril, julio y diciembre. . . . .	5
4.	Consumo mensual y huéspedes del refugio de Lizara. . . . .	5
5.	Refugio e ibón alto de Bachimaña. . . . .	7
6.	Consumo eléctrico de Bachimaña durante los meses de abril, julio y diciembre. . . . .	7
7.	Consumo térmico de Bachimaña durante los meses de abril, julio y diciembre. . . . .	9
8.	Consumo mensual y huéspedes del refugio de Bachimaña. . . . .	9
9.	Ahorro mediante intercambiadores de calor en los generadores diésel. . . . .	11
10.	NPC de distintos con aprovechamiento del calor de los generadores. . . . .	11
11.	Localización de la caseta de los generadores con respecto al edificio principal. . . . .	11
12.	NPC y emisiones de CO <sub>2</sub> tras la instalación de la termochimenea. . . . .	13
13.	NPC para configuraciones de ACS en función de la potencia PV instalada. . . . .	13
14.	Cobertura solar térmica en función del número de paneles híbridos (mayo). . . . .	15
15.	Configuraciones posibles PV y baterías con ACS mediante caldera de gas. . . . .	15
16.	Configuraciones posibles PV y baterías con ACS mediante caldera eléctrica. . . . .	15
17.	Configuraciones posibles PV y baterías con ACS mediante paneles híbridos. . . . .	16
18.	Comparación del NPC para los tres casos analizadas en el refugio de Lizara. . . . .	16
19.	Optimización de la inclinación PV para ACS con paneles híbridos. . . . .	18
20.	Coste acumulado de las configuraciones propuestas (30 años). . . . .	18
21.	Configuración más óptima en función del precio del diésel («Híbr.»). . . . .	20
22.	Configuración más óptima en función del precio PV («Híbr.»). . . . .	21
23.	Coste acumulado de las configuraciones «Inicial» y «Elect.». . . . .	22
24.	Coste acumulado del refugio para distintos costes del diésel («Inicial»). . . . .	23
25.	Coste acumulado del refugio para distintos costes del diésel («Elect.»). . . . .	23
26.	Funcionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno. . . . .	26
27.	Costes acumulados para las distintas soluciones de autoabastecimiento. . . . .	26
28.	Rendimiento del generador de 22,4 kW instalado en Lizara. . . . .	35
29.	Rendimiento del generador de 12,8 kW instalado en Lizara. . . . .	35
30.	Generación ACS de la instalación de paneles híbridos. . . . .	37
31.	Generación eléctrica de la instalación de paneles híbridos. . . . .	37
32.	Rendimiento térmico de los paneles Ecomesh. . . . .	38
33.	Perfil FF-Chart para el desarrollo de ACS. . . . .	41
34.	Perfil de consumo ACS en el refugio de Lizara. . . . .	42
35.	Perfil de consumo de calefacción en el refugio de Lizara. . . . .	42
36.	Perfil de consumo inicial de la chimenea en el refugio de Lizara. . . . .	42
37.	Irradiación horaria en el refugio de Lizara. . . . .	43

38.	Temperatura horaria en el refugio de Lizara. . . . .	44
39.	Rendimiento del generador de 26,8 kW instalado en Bachimaña. . . . .	46
40.	Rendimiento del generador de 7,9 kW instalado en Bachimaña. . . . .	46
41.	Rendimiento de una pila de combustible en función de su potencia de salida. . . . .	52
42.	Pérdida de potencia por pérdida de presión en pilas de combustible. . . . .	52
43.	Perfil de consumo de calefacción en el refugio de Bachimaña. . . . .	53
44.	Perfil de consumo de ACS en el refugio de Bachimaña. . . . .	53
45.	Recurso hidráulico del refugio de Bachimaña. . . . .	55
46.	Optimización de la inclinación PV para ACS con caldera de propano. . . . .	57
47.	Optimización de la inclinación PV para ACS con caldera eléctrica. . . . .	57
48.	Configuración más óptima en función del precio del diésel («Cald.»). . . . .	57
49.	Configuración más óptima en función del precio del diésel («Elect.»). . . . .	58
50.	Configuración más óptima en función del precio PV («Cald.»). . . . .	58
51.	Configuración más óptima en función del precio PV («Elect.»). . . . .	58



## 1. Introducción

Los refugios de montaña son edificios destinados a acoger y proteger a montañeros y excursionistas a los que se les ofrece una serie de recursos (comida, alojamiento, aseo, energía, etc.) para poder permanecer en la montaña durante un periodo de tiempo variable. Estos refugios son instalaciones aisladas cuya gestión energética es fundamental de cara a ofrecer una serie de servicios mínimos al menor coste energético y económico, ya que su ubicación y accesibilidad complica enormemente la gestión de la energía producida y consumida. De forma tradicional, los refugios de montaña se han abastecido mediante la energía obtenida de generadores y calderas diésel, del que son provistos de forma externa, acompañados de sistemas puntuales de generación renovable y baterías.

En este contexto, y sumado a una mayor concienciación en cuanto al uso de combustibles fósiles y emisiones de gases de efecto invernadero por parte de federaciones y usuarios externos, las energías renovables se presentan como una alternativa económica y sostenible a las fuentes de generación más tradicionales, siempre y cuando su implantación y su uso vayan acompañados de un análisis previo de los recursos energéticos, las tecnologías propuestas y la gestión energética a medio y largo plazo.

Así, este trabajo presenta el análisis energético de dos refugios de montaña situados en el Pirineo Aragonés y pertenecientes a la Federación Aragonesa de Montañismo (FAM), los cuales están aislados y obtienen su energía a través de distintos recursos, por lo que las soluciones propuestas para ambos diferirán en función de su ubicación, fuentes y tecnologías ya instaladas. Para ello, se modelizarán los refugios, se analizarán diversas soluciones energéticas y se evaluarán los resultados con el fin de obtener aquellas configuraciones que presenten una mayor penetración de energías renovables, con un coste económico competitivo respecto a soluciones tradicionales basadas en el uso de combustibles fósiles.

## 2. Metodología

A lo largo del desarrollo de este Trabajo Fin de Máster (TFM) se ha seguido e implementado una metodología que ha permitido conocer y documentar los refugios de montaña propuestos, además de evaluarlos y modelizarlos para obtener nuevas configuraciones mediante las soluciones propuestas. Para ello, se ha implementado la siguiente metodología:

- Conocimiento de los refugios, recolección de información y toma de datos. Durante esta fase, se mantuvieron entrevistas con los guardas de los refugios y con la FAM, propietaria de estos. Gracias al proyecto europeo LIFE+ SustainHuts, que analiza refugios de montaña europeos y la implementación de soluciones sostenibles en ellos, se pudo acceder a cifras e información previamente recolectada por miembros de la Fundación Hidrógeno de Aragón (FHA), lo que supone que gran cantidad de los datos utilizados en las modelizaciones son valores empíricos y reales. Sumado a esto, se amplía la información necesaria para el desarrollo de este trabajo mediante recursos bibliográficos y diversas entrevistas.
- Análisis de los datos obtenidos y evaluación conceptual de posibles soluciones. A través del análisis de la información adquirida durante la fase anterior y reuniones mantenidas con personal de la FAM y guardas de los refugios, se han identifica-

do aquellas actuaciones que podrían mejorar el balance energético de los refugios a través de soluciones basadas en energías renovables. Algunas de las propuestas analizadas en este TFM ya habían sido identificadas como necesarias tanto por la FAM como por el proyecto SustainHuts, por lo que varias de las soluciones analizadas en este trabajo son ejecutables en gran medida.

- **Modelización de refugios.** Una vez conocidas las necesidades de los refugios, estos han sido modelados para la evaluación dinámica de sus flujos de energía, su costes y sus consumos. El *software* utilizado principalmente ha sido HOMER Legacy (v2.68 beta del 8 de febrero de 2012) que permite modelar los balances energéticos de microrredes a partir de una serie de *inputs*, obteniendo datos de consumo, energía y emisiones entre otros parámetros. Además, como complemento se han utilizado hojas Excel para la preparación de *inputs* y el programa *Engineering Equation Solver* (EES) (v9.944-3D del 2015) para el desarrollo de la tecnología híbrida térmica-fotovoltaica (PV) y los perfiles de demanda de agua caliente sanitaria (ACS). La bibliografía necesaria para el desarrollo de las modelizaciones ha sido buscada y analizada durante esta fase del desarrollo.
- **Análisis de soluciones.** Una vez analizados los refugios, aquellas configuraciones propuestas como soluciones han sido modeladas mediante el uso de HOMER. Obtenidos los resultados, la evaluación y preparación de resultados se ha llevado a cabo mediante el uso de hojas Excel.
- **Conclusiones.** Tras la evaluación de las configuraciones propuestas se han obtenido conclusiones sobre su viabilidad energética y económica. Finalmente, se han presentado conclusiones en su contexto general buscando la transversalidad con otros conocimientos adquiridos durante el desarrollo de este trabajo en particular y del máster en general.

Si bien se ha mantenido la secuencia temporal seguida en los puntos anteriores, en algunas ocasiones se ha podido trabajar de forma simultánea entre puntos por requerimiento del desarrollo del TFM.

### 3. Casos de estudio

El estudio propuesto analiza dos refugios situados en el Pirineo Aragonés que, debido a sus características propias y distintas entre sí, permiten complementar el análisis de forma que en cada uno se plantean una serie de soluciones que permiten, por otro lado, la replicabilidad del método y las soluciones en un gran número de refugios con características similares.

#### 3.1. Refugio de Lizara

El refugio de Lizara se encuentra ubicado en el Valle de Aragües-Jasa, en el Parque Natural de Valles Occidentales, a una altitud de 1540 metros. Es accesible por carretera de montaña y cuenta con alojamiento para un total de 78 personas (sin contar el personal del refugio). Lizara ofrece electricidad y agua caliente no restringida a los huéspedes así como

calefacción, cocina y otros servicios. La variabilidad de huéspedes es muy estacional, concentrándose la mayor parte de ellos en verano, lo que supone un mayor consumo eléctrico durante esos meses, si bien el mayor consumo térmico se da a lo largo del invierno a modo de calefacción. La Figura 1 muestra el refugio de Lizara.

El consumo eléctrico es abastecido mediante dos generadores diésel de 22,4 kW y 12,8 kW, apoyados por tecnología fotovoltaica y 24 baterías 8 OPzS 800 Ah (C10). Al inicio de este trabajo, la instalación fotovoltaica contaba con 4,3 kW de potencia instalada, aunque realmente solo 0,492 kW generaban energía debido al mal estado de conservación del resto de paneles. En cuanto a las baterías, la mayoría de la bancada se conservaba en mal estado, lo que impedía el correcto funcionamiento del almacenamiento eléctrico.

La Figura 2 muestra el consumo eléctrico del refugio durante los meses de abril, julio y diciembre (solo se muestran tres meses al ser considerados estacionalmente representativos), obtenido a través de datos experimentales tomados en el refugio mediante un *data logger*. Los datos de las tecnologías instaladas se encuentran en el Anexo A.

El consumo térmico de todo el edificio se provee mediante una caldera de condensación de gas propano de alrededor de 30 kW (hay dos instaladas, si bien una de ellas está instalada como sustitución de la otra durante posibles fallos). A través de ella, se provee al refugio de agua caliente y calefacción. Además, en la estancia principal se sitúa una chimenea abierta que caldea la entrada, la sala de estar y parte de los pasillos, si bien su eficiencia es baja y su objetivo principalmente ornamental, calentando la mayor parte del refugio mediante el circuito de calefacción. Puesto que no existen medidas experimentales del consumo térmico, este se ha obtenido mediante dos métodos: el perfil de calefacción y chimenea a través del consumo anual de combustible, entrevistas con los guardas del refugio y distinta bibliografía [1, 2], mientras que el perfil de ACS se ha desarrollado a través de los ejercicios de la asignatura Ampliación de la Energía Solar donde, mediante el programa EES y los datos obtenidos del Código Técnico de Edificación (Sección HE4) [3], se desarrolla un perfil de consumo de agua caliente sanitaria. La Figura 3 muestra el perfil de consumo térmico del refugio (calefacción, agua caliente y chimenea) para los meses de abril, julio y diciembre. Además, la Figura 4 representa el consumo energético mensual del refugio de Lizara, observándose que, aunque la afluencia de huéspedes es mayor durante los meses de verano, el consumo energético es menor durante esta época debido al mayor gasto en calefacción durante los meses de invierno.

La Tabla 1 muestra, a modo de resumen, las tecnologías instaladas en la configuración inicial del refugio. Es importante mencionar que la palabra «genset» se utiliza como sinónimo de generador diésel debido a su menor extensión y, si bien no es correcta en castellano, es usada frecuentemente en el sector.

Las soluciones propuestas para el refugio de Lizara se basan principalmente en dos enfoques, reducción del consumo de gas propano y reducción del consumo diésel a través de una mayor penetración de la tecnología fotovoltaica. Para esto, se proponen cinco medidas a analizar:

Tecnología	Genset 1	Genset 2	Caldera	PV	Baterías
Potencia [kW]	22,4	12,8	30,0 (aprox.)	0,5	38,4 kWh

Tabla 1: Tecnologías inicialmente instaladas en el refugio de Lizara.



Figura 1: Refugio de Lizara.

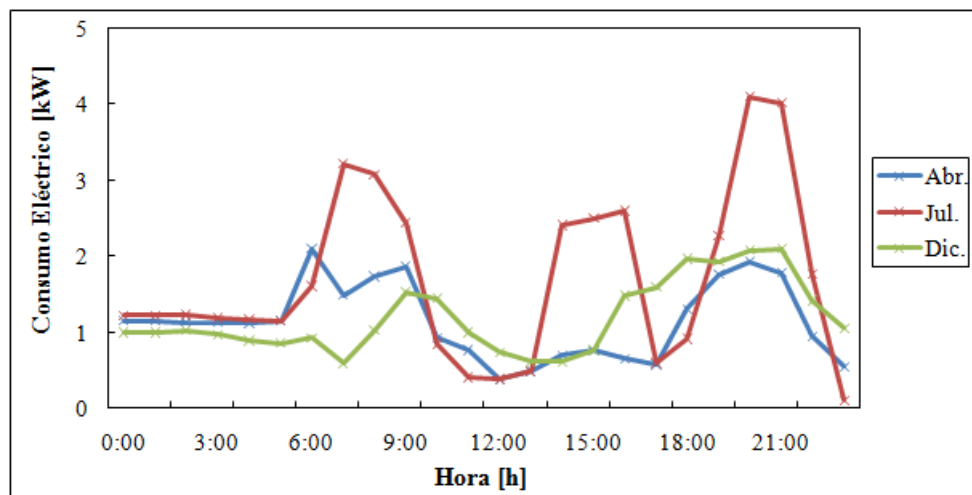


Figura 2: Consumo eléctrico de Lizara durante los meses de abril, julio y diciembre.

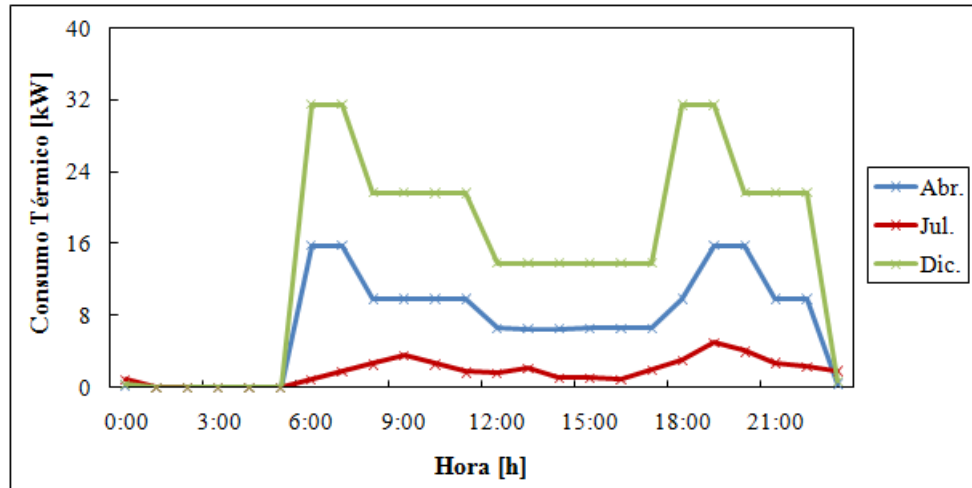


Figura 3: Consumo térmico de Lizara durante los meses de abril, julio y diciembre.

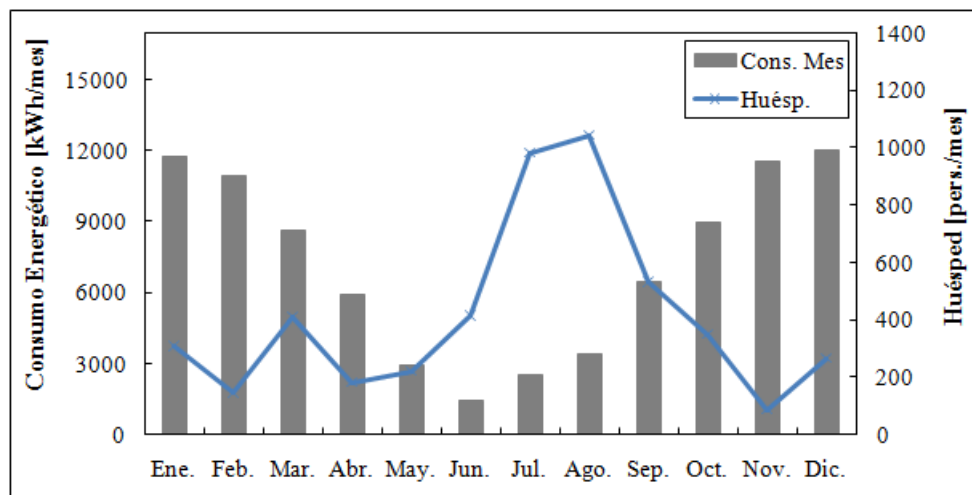


Figura 4: Consumo mensual y huéspedes del refugio de Lizara.

- Aprovechamiento del calor producido en los generadores diésel a través de intercambiadores que calienten agua, siendo esta posteriormente introducida en el sistema de calefacción.
- Reconversión de la chimenea abierta en una cerrada con aprovechamiento de calor a través de un circuito de agua que se introduce posteriormente en el sistema de calefacción.
- Sustitución de la generación ACS mediante caldera de propano por una caldera eléctrica con acumuladores de agua caliente.
- Sustitución de la generación ACS mediante caldera de propano por paneles híbridos térmicos-PV acompañados de una caldera eléctrica para la producción del ACS restante.
- Ampliación del campo solar fotovoltaico y sustitución (con posible ampliación) de la bancada de baterías.

A través de estas mejoras se prevé una reducción tanto de consumo de diésel como de gas propano, reduciendo así mismo las emisiones de CO<sub>2</sub> y el impacto ambiental del refugio. Es importante mencionar que, si bien todas las soluciones propuestas son analizadas, algunas de ellas no son compatibles entre sí, por lo que en estos casos se llevará a cabo un análisis comparativo entre ellas.

### 3.2. Refugio de Bachimaña

El refugio de los Ibones de Bachimaña, inaugurado en el año 2012, se localiza cerca de los conocidos Ibones Azules, en el Valle de Tena, zona muy frecuentada por montañeros y excursionistas. El refugio se encuentra a una altitud de 2200 metros y el abastecimiento de recursos debe hacerse mediante helicóptero debido a que solo es accesible por un sendero peatonal. Bachimaña pertenece a la localidad de Panticosa, en el Alto Gállego oscense, y su capacidad es de 80 personas sin contar al personal del refugio, ofreciendo acceso a electricidad, agua caliente, cocina, calefacción y otros servicios sin restricciones para los usuarios del refugio. Como en el caso anterior, la cantidad de pernoctas es muy estacional, concentrándose principalmente en los meses de verano, donde el consumo eléctrico es bastante mayor. La Figura 5 muestra el refugio de Bachimaña y el ibón del que se abastece energéticamente.

El refugio dispone de una turbina de 30 kW que aprovecha el caudal saliente del ibón más cercano, debido a que es controlado mediante una presa. La potencia de la turbina es suficiente para abastecer toda la demanda eléctrica del refugio si bien la descarga controlada de agua se realiza, aproximadamente, durante 10 meses al año por motivos de control de nivel del agua. Por tanto, durante los dos meses restantes, la demanda eléctrica del refugio se abastece mediante dos generadores diésel de 26,8 kW y 7,9 kW y una bancada de 24 baterías de 1500 Ah C10 (72,0 kWh). El periodo temporal sin descarga de agua es variable anualmente y depende de las precipitaciones anuales, si bien usualmente coincide con los meses de abril y mayo. La Figura 6 muestra el perfil de consumo eléctrico del refugio de Bachimaña para los meses de abril, julio y diciembre, extraído de mediciones de consumo en el refugio.



Figura 5: Refugio e ibón alto de Bachimaña.

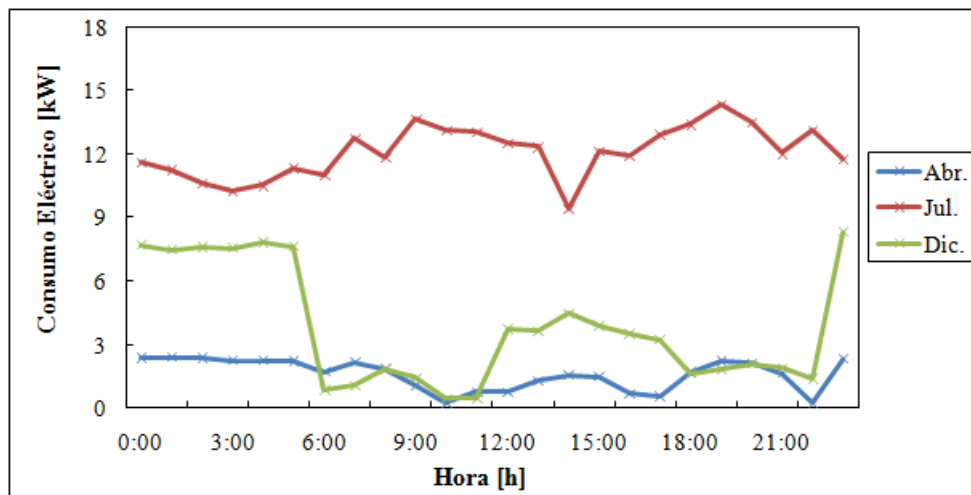


Figura 6: Consumo eléctrico de Bachimaña durante los meses de abril, julio y diciembre.

En cuanto a la demanda térmica, toda esta es abastecida a través de un caldera diésel de 115 kW. El perfil de consumo térmico, mostrado en la Figura 7, se ha obtenido siguiendo el mismo patrón que en el anterior refugio: el perfil de calefacción a partir del consumo anual de diésel, entrevistas con los guardas del refugio y distinta bibliografía [1, 2], y el consumo de ACS mediante los conocimientos adquiridos en la asignatura Ampliación de la Energía Solar (cursada en el máster) y el Código Técnico de Edificación [3]. El consumo energético mensual del refugio se muestra en la Figura 8, donde se observa un mayor consumo energético durante los meses de invierno (debido a la calefacción), mientras que durante el verano se concentran un mayor número de visitantes.

Como en el caso anterior y a modo de resumen, la Tabla 2 muestra las tecnologías instaladas en el refugio de Bachimaña. La información detallada se encuentra en el Anexo B.

Tras el análisis de las tecnologías instaladas en el refugio así como la potencia de generación renovable y los consumos energéticos, se propone el análisis de dos soluciones para mejorar el autoabastecimiento energético del refugio y la sostenibilidad de este.

- Instalación de calderas y acumuladores eléctricos para maximizar el aprovechamiento de la electricidad generada por la turbina. Tras el análisis de consumos y generación se plantea la conversión de todo el consumo abastecido por la caldera diésel en consumo eléctrico (obtenido mediante la turbina hidroeléctrica).
- Instalación de un sistema de almacenamiento estacional que permita almacenar energía eléctrica sobrante (generada por la turbina hidroeléctrica) para los dos meses en los cuales no hay caudal turbinable.

A través de las mejoras propuestas, que se desarrollarán posteriormente, se espera que el refugio de Bachimaña pueda ser autoabastecido por energía renovable durante todo el año, lo que implicaría que sus emisiones de CO<sub>2</sub> en cuanto a energía consumida serían nulas.

## 4. Resultados y propuestas

Una vez conocidos los refugios, es posible presentar las simulaciones para ambos casos, de modo que se modelizan las propuestas y se analizan los resultados obtenidos.

### 4.1. Refugio de Lizara

El punto de partida considerado en el refugio de Lizara es un refugio con dos generadores diésel, una caldera de condensación de gas propano, una chimenea abierta, 0,492 kW de paneles fotovoltaicos (el resto está en mal estado de conservación) y una bancada de baterías que debe ser completamente sustituida. Las características y precios de cada tecnología instalada y propuesta así como otros parámetros de su funcionamiento (eficiencia, vida útil, coste de combustible, etc.) se detallan en el Anexo A.

Tecnología	Turbina	Genset 1	Genset 2	Caldera	Baterías
Potencia [kW]	30,0	26,8	7,9	115,0	72,0 kWh

Tabla 2: Tecnologías inicialmente instaladas en el refugio de Bachimaña.



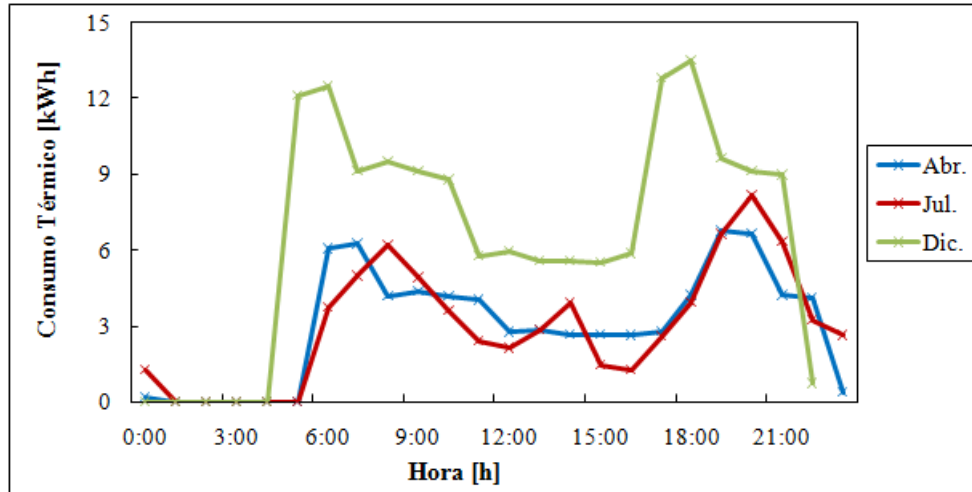


Figura 7: Consumo térmico de Bachimaña durante los meses de abril, julio y diciembre.

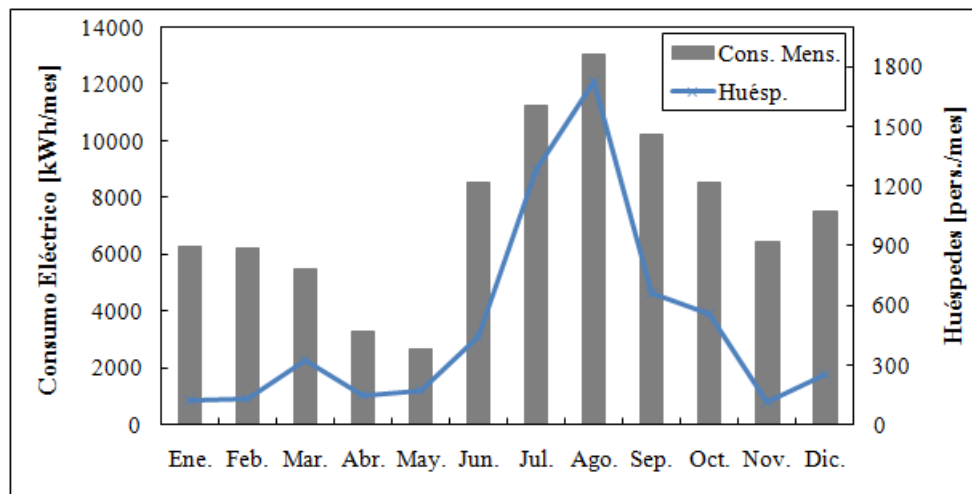


Figura 8: Consumo mensual y huéspedes del refugio de Bachimaña.

A continuación, se detallan las soluciones propuestas para la mejora del balance energético en el refugio de Lizara.

#### 4.1.1. Aprovechamiento térmico mediante intercambiadores de calor

El aprovechamiento térmico consiste en la instalación de intercambiadores de calor que permitan aprovechar la energía térmica que producen los generadores diésel para calentar agua e introducirla en el sistema de calefacción. Usando el *software* HOMER, la Figura 9 muestra que, aprovechando el calor de ambos generadores (en verde), se podría obtener un ahorro económico aproximadamente de un 10% a lo largo de toda la vida útil del proyecto, considerado en 30 años.

Por otro lado, la Figura 10 plantea el *Net Present Cost* (NPC), coste del sistema a lo largo de toda la vida útil, del sistema con aprovechamiento térmico en función de la potencia fotovoltaica instalada para los casos de aprovechamiento de calor en el generador grande, en el pequeño y en los dos, así como el coste del sistema si no se hubiera aprovechamiento térmico (línea gris). Así, se observa que la microrred con aprovechamiento térmico de los generadores es más rentable con una baja penetración renovable, puesto que el uso del generador diésel es mayor. Debido a que las actuaciones previstas en Lizara conllevarían el incremento de la potencia fotovoltaica instalada, esta actuación pierde rentabilidad en ese contexto. Además, debido a que los generadores diésel se encuentran situados en una caseta propia apartada del edificio central, donde se ubica el sistema de calefacción (Figura 11), el transporte de agua caliente hasta el refugio conllevaría un gasto de instalación enorme y unas pérdidas térmicas considerables, lo que provoca que esta solución de aprovechamiento térmico no sea viable para el contexto del refugio de Lizara y, por tanto, sea descartada.

#### 4.1.2. Instalación de una termochimenea

Una medida identificada como potencial tras reuniones con los guardas del refugio y personal de la FAM es el mayor aprovechamiento de la chimenea existente mediante su conversión en una termochimenea. Esta tecnología es una chimenea cerrada que permite el paso de un serpentín con agua cuyo calor absorbido es posteriormente introducido en el sistema de calefacción, reduciendo el aporte calorífico de la caldera de gas propano. Esta termochimenea tiene un rendimiento de un 78,3% [4] en comparación con el 10% [5] de rendimiento de una chimenea abierta ornamental, de modo que si a esto se le añade un mayor consumo de madera es posible llegar a obtener un ahorro considerable en coste económico y en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tras conversaciones con los guardas del refugio, no existe ningún registro de madera consumida a lo largo del año, si bien el máximo consumo permitido es de 10 000 kg anuales de madera, puesto que el Ayuntamiento de Aragües del Puerto ofrece un lote de 5000 kg de madera al precio de 100 € por año y habitante (dos guardas empadronados en el municipio). Debido a que el coste de la madera ofrecida es muy económico y es un recurso de biomasa local (considerando neutralidad de emisiones [6]), la remodelación de la chimenea y su conversión en una termochimenea ofrece una alta rentabilidad. La Figura 12 muestra el NPC y las emisiones de CO<sub>2</sub> para el sistema energético total del edificio en función del consumo de lotes de madera, obteniéndose la máxima rentabilidad con el máximo consumo de madera disponible con un ahorro económico total del 29,5% en los

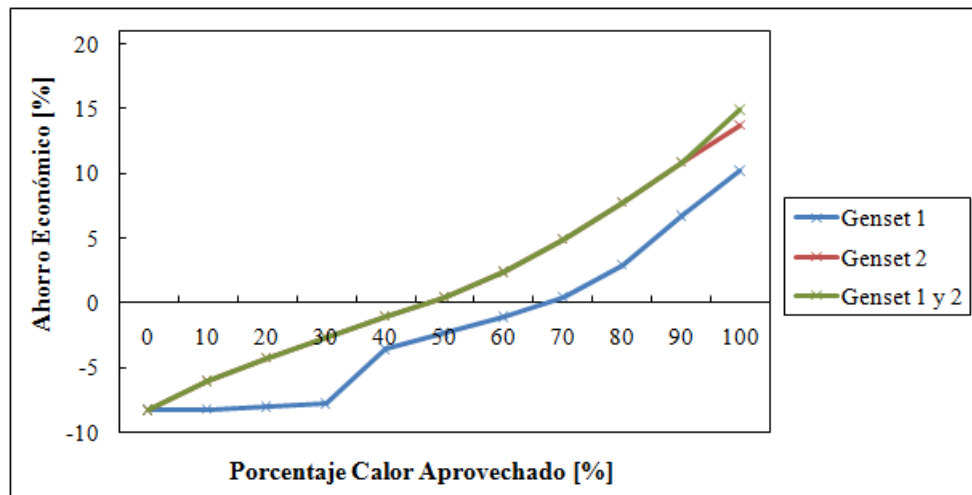


Figura 9: Ahorro mediante intercambiadores de calor en los generadores diésel.

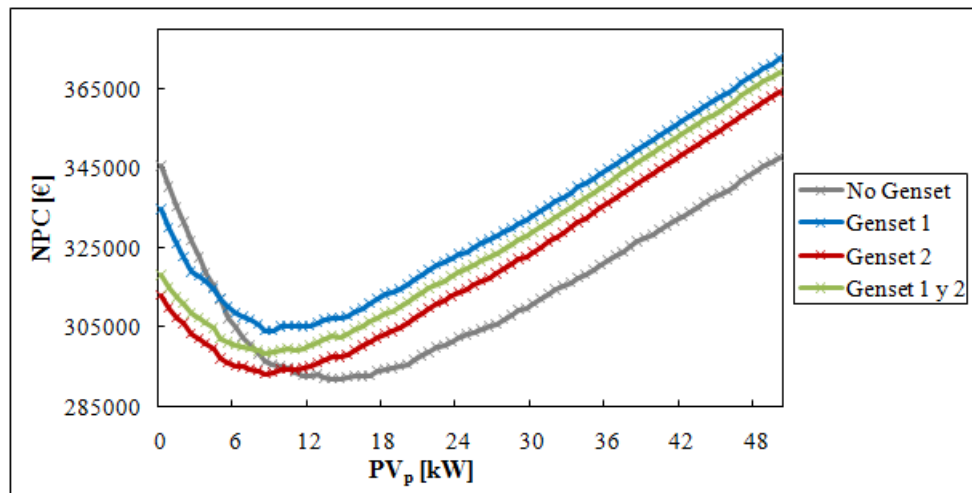


Figura 10: NPC de distintos con aprovechamiento del calor de los generadores.



Figura 11: Localización de la caseta de los generadores con respecto al edificio principal.

30 años supuestos como contexto de la inversión.

#### 4.1.3. Generación ACS mediante calderas eléctricas

La acción de sustituir el agua caliente sanitaria generada mediante la caldera de condensación por agua caliente producida mediante una caldera eléctrica tiene su principal argumento en que, en un refugio con una alta penetración de renovables, esto conlleva menos impacto ambiental. Por eso, aunque el rendimiento global del proceso sea menor, producir energía térmica a través de electricidad generada mediante energías renovables produciría menos impacto en emisiones el mismo proceso mediante gas propano. El perfil de consumo de ACS desarrollado para el refugio se basa en el trabajo *Cálculo dinámico de una instalación solar térmica de baja temperatura para ACS* desarrollado en la asignatura de Ampliación de la Energía Solar del máster, sumando este consumo inicialmente al perfil térmico del edificio y tras esta acción al perfil eléctrico (si bien como carga programable). En cuanto a la tecnología, se considera la instalación de una caldera eléctrica de 10 kW más un acumulador de 2,5 kW que se añadiría al ya instalado con la caldera de gas propano.

Aunque el impacto de esta acción puede ser positivo para el refugio, la Figura 13 muestra que no es posible analizarla y obtener conclusiones sin tener en cuenta una ampliación de la instalación fotovoltaica ya que, con solo 0,492 kW instalados al inicio, la rentabilidad de esta acción es negativa. Por tanto, el impacto de esta propuesta se analizará posteriormente tras la mejora de la generación eléctrica fotovoltaica.

La leyenda de la Figura 13 hace referencia a tres situaciones distintas: «Cald.» cuando la generación de ACS se realiza mediante caldera de gas propano, «Elect.» cuando la generación de ACS se realiza exclusivamente mediante una caldera eléctrica y «Híbr.» cuando la generación de ACS proviene de paneles solares térmicos con el apoyo ocasional de la caldera eléctrica.

#### 4.1.4. Generación ACS mediante paneles híbridos térmicos-PV

Otra alternativa para reducir el consumo de gas propano que ha sido analizada es la introducción de paneles híbridos térmicos-PV que aporten tanto generación de agua caliente como electricidad usando el recurso solar. Para ello se ha desarrollado un análisis mediante el *software* EES en el cual se modela la instalación de paneles híbridos en el refugio. Los paneles propuestos son del modelo Ecomesh [7] de la empresa EndeF (actualmente desaparecida, aunque siguen existiendo modelos comerciales casi idénticos). El desarrollo se ha basado en el realizado en la asignatura Ampliación de la Energía Solar del máster mediante el trabajo *Análisis de una instalación solar híbrida fotovoltaico-térmica*. A partir de los resultados obtenidos de generación se han modificado los perfiles de consumo introducidos en HOMER.

El dimensionamiento de esta tecnología se ha hecho a través de la generación solar térmica, puesto que es la mayor producción energética de los paneles. Así, primando la configuración del mes con mayor cobertura solar para no disipar energía, se concluye que la instalación óptima es la formada por 15 paneles Ecomesh. Esto se debe a que, como se muestra en la Figura 14, aportan una cobertura solar de 0,95 durante el mes más favorable (mayo). A partir de los 15 paneles no hay una gran mejora de la cobertura solar, por lo que se considera esta como la configuración óptima, obteniendo el resto de energía necesaria

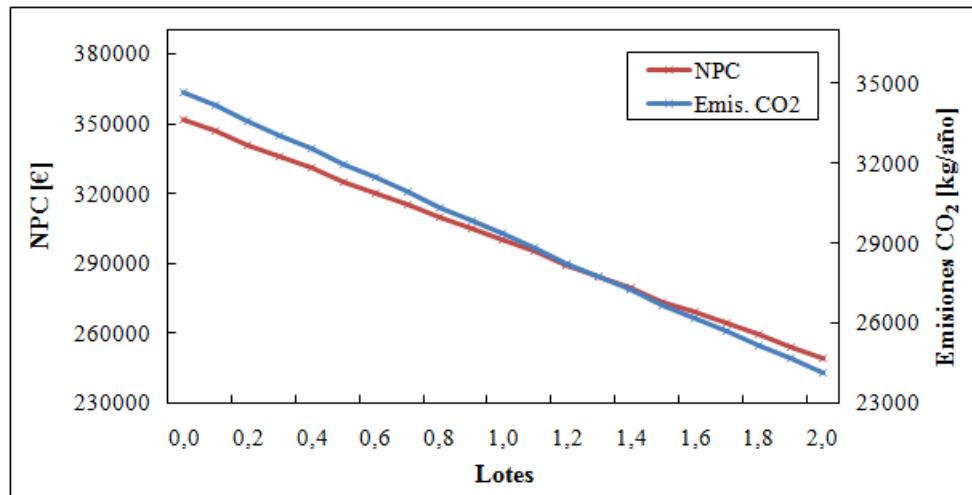


Figura 12: NPC y emisiones de CO<sub>2</sub> tras la instalación de la termochimenea.

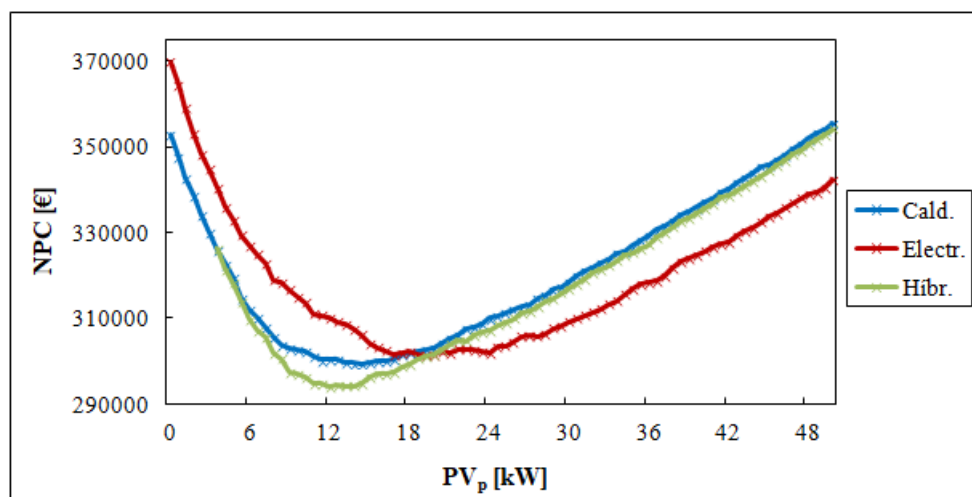


Figura 13: NPC para configuraciones de ACS en función de la potencia PV instalada.

para ACS a través de los paneles fotovoltaicos (generando el ACS mediante la caldera eléctrica).

Como en el caso anterior, la Figura 13 muestra que no es posible obtener conclusiones de la rentabilidad de esta acción sin tener en cuenta una ampliación del campo fotovoltaico pues, con solo 0,492 kW instalados, la rentabilidad es sumamente baja. Por tanto, esta acción será evaluada tras la ampliación del campo solar fotovoltaico y el almacenamiento de baterías.

#### 4.1.5. Dimensionamiento de PV y baterías

Las actuaciones propuestas anteriormente para el sistema térmico se completan con la actuación sobre el almacenamiento eléctrico en baterías y las tecnologías renovables para la generación eléctrica, proponiendo una mayor penetración de estas. Puesto que la legislación no permite la instalación de tecnología eólica en el Parque Natural [8] y no existe un caudal aprovechable de energía hidráulica en las proximidades del refugio, el mayor recurso renovable en la ubicación es el solar, por lo que se propone la instalación de paneles fotovoltaicos junto con almacenamiento eléctrico en baterías.

Inicialmente, se podrían aprovechar los anclajes de la fotovoltaica existente en el tejado de la caseta donde se sitúan los generadores diésel y sustituir los paneles en mal estado hasta una potencia de 4,3 kW, la actualmente instalada y en mal estado de conservación. A partir de ahí, se deberían aprovechar espacios circundantes en el suelo, lo que supone peor ubicación respecto a las inclemencias meteorológicas (por ejemplo, nieves en invierno) y a los animales de la zona. Aun así, puesto que el tejado de la casa principal no se considera una buena ubicación debido a su orientación, la instalación de fotovoltaica anclada a tierra (y probablemente vallada) se considera la opción más conveniente.

Así, se plantea el modelado de la instalación fotovoltaica y las baterías para las tres situaciones expuestas en la anterior subsección: aquella en que la demanda ACS sea suplida mediante la caldera de gas propano, aquella en que sea suplida mediante una caldera eléctrica y aquella en que parte de la generación ACS se realice a través de paneles solares híbridos. La Figura 15 muestra la optimización baterías-PV para la primera situación, la Figura 16 para la segunda y la Figura 17 para la tercera, observándose que en los tres casos la configuración es equivalente: 2 *strings* de baterías (76,8 kWh) y entre 10 kW y 20 kW de tecnología fotovoltaica (se considera ya incluida la termochimenea). La Figura 18 muestra la configuración más óptima para cada caso (2 *strings* en las tres opciones), en la que se observa que el menor NPC corresponde a aquella configuración en que el ACS se obtiene mediante la caldera de gas, si bien subiendo mínimamente el coste y ampliando un poco el campo solar se encuentra la configuración de paneles híbridos, por lo que otras variables no técnicas entran en juego. Con un mayor coste y un mayor campo fotovoltaico se encuentra la configuración de ACS mediante caldera eléctrica. Las características de las tecnologías introducidas en la optimización y su justificación se encuentran en el Anexo A.

Es importante mencionar que otra variable tenida en cuenta dentro del análisis de la fotovoltaica y paneles térmicos ha sido la inclinación de los paneles, puesto que esta supondrá una mayor o menor generación de energía eléctrica y, por tanto, optimizará la cantidad de paneles fotovoltaicos a instalar. Sumado a esto, la correcta configuración de la inclinación permitirá optimizar la generación durante los meses de mayor demanda,

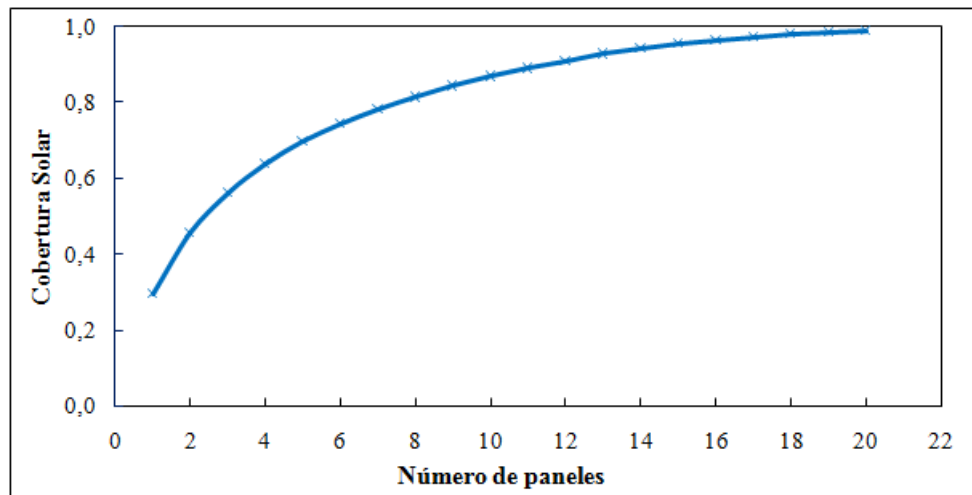


Figura 14: Cobertura solar térmica en función del número de paneles híbridos (mayo).

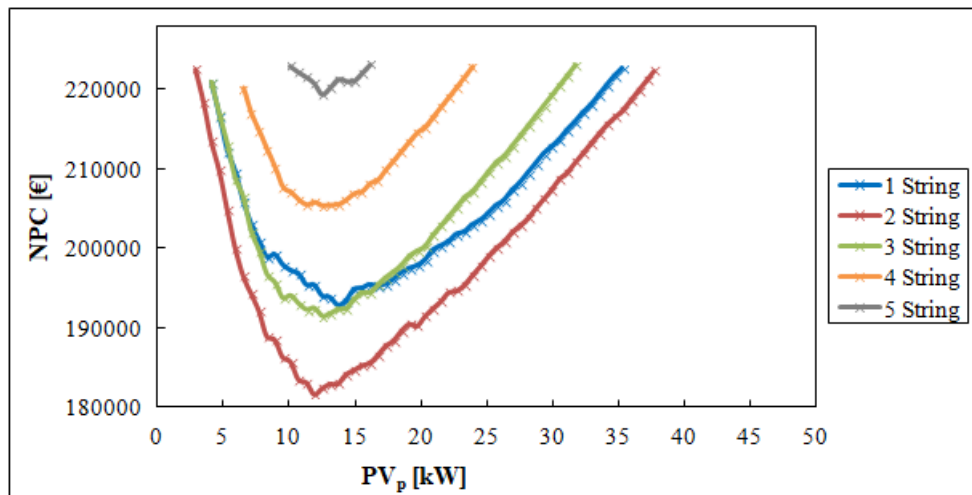


Figura 15: Configuraciones posibles PV y baterías con ACS mediante caldera de gas.

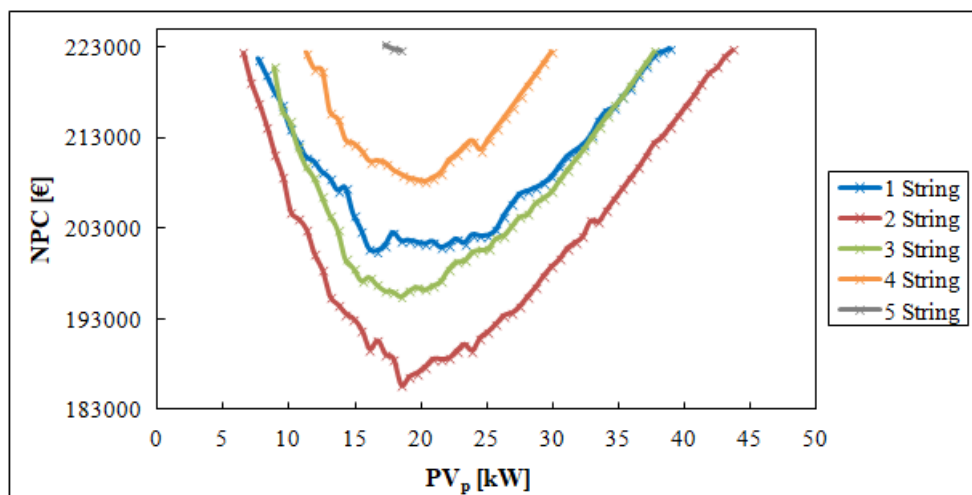


Figura 16: Configuraciones posibles PV y baterías con ACS mediante caldera eléctrica.

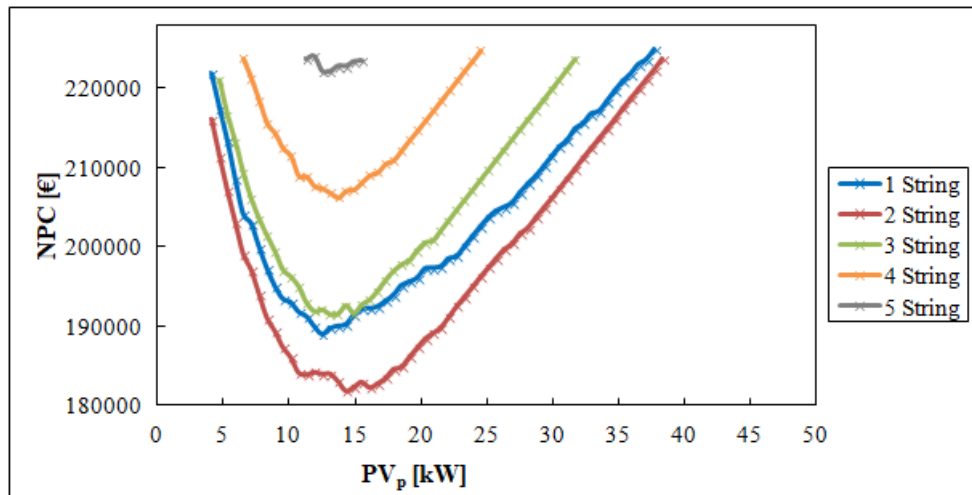


Figura 17: Configuraciones posibles PV y baterías con ACS mediante paneles híbridos.

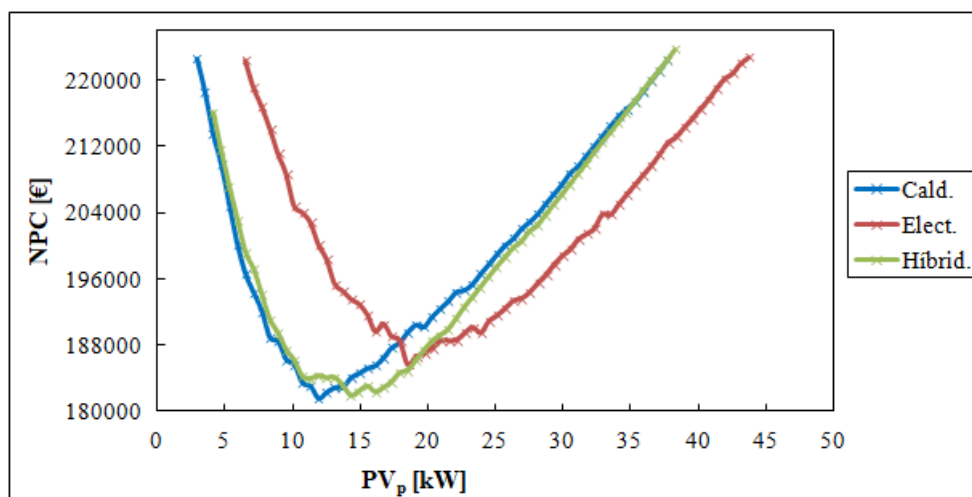


Figura 18: Comparación del NPC para los tres casos analizadas en el refugio de Lizara.



disminuyendo así el consumo de combustibles fósiles. La Figura 19 muestra la optimización del grado de inclinación de los paneles en función de la potencia PV instalada para el caso de generación de ACS mediante paneles híbridos y 2 *strings* de baterías, donde se concluye que, aunque sin ser un factor determinante puesto que no hay gran diferencia entre variaciones pequeñas de inclinación, la más óptima es de 35°, maximizando la generación eléctrica en verano debido a la mayor afluencia de personas. Para el caso de generación de ACS mediante la caldera de gas propano («Cald.») y mediante caldera eléctrica («Elect.»), el grado de inclinación óptimo de los paneles es de 40°, maximizando un poco más la generación en invierno, si bien las diferencias de generación obtenidas en el rango entre 25° y 45° son mínimas. En el Anexo C se muestran las dos gráficas restantes que no se han incluido en la memoria por no considerarse más aclaratorias que la Figura 19.

#### 4.1.6. Comparación de resultados

Una vez analizadas todas las soluciones propuestas para el refugio, es posible hacer un análisis comparativo de las distintas configuraciones de la microrred de tal forma que se puedan comparar los resultados y analizar la viabilidad de cada configuración. Para ello, como se muestra en la Tabla 3, se seleccionan cuatro configuraciones posibles. En la primera («Gensets»), se considera solamente la sustitución de las baterías por una bancada nueva puesto que un sistema de generadores diésel sin ningún tipo de almacenamiento sería tan inviable que ni siquiera se contempla (se mantendría los 0,492 kW de PV previamente instalada y en buen estado). En cuanto al sistema térmico, se mantiene igual con una generación térmica mediante la caldera de gas propano. Por otro lado, se analizan tres situaciones más, todas con la instalación de la termochimenea y consumo anual de dos lotes de 5000 kg, 2 *strings* de baterías y una ampliación de la penetración de energía fotovoltaica. En el primer caso («Cald.»), el agua caliente sanitaria se obtiene a través de la caldera de gas propano, en el segundo caso («Elect.»), a través de una caldera y acumuladores eléctricos y en el tercero («Híbr.»), a través de paneles híbridos térmicos-PV y una caldera eléctrica, de tal forma que en los dos últimos casos la demanda eléctrica es mayor y la de gas propano menor.

Una vez simuladas las cuatro soluciones, la Tabla 4 muestra la configuración más óptima de cada una de ellas, basado principalmente en el NPC, es decir, la configuración más rentable de cada una de las propuestas anteriores. Además, la Figura 20 muestra el coste acumulado de las tres soluciones a lo largo de los 30 años que se han considerado como vida útil del proyecto.

Como se puede observar, la primera configuración es claramente descartable debido a su alto coste, alto consumo de combustibles fósiles y alta emisión de gases de efecto inver-

Config.	Intercamb.	Termochim.	Elect. ACS	Híbridos	Gensets	Bat.	PV
Gensets	No	No	No	No	Sí	Sí	No
Cald.	No	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
Elect.	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Híbr.	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 3: Tecnologías instaladas en las distintas configuraciones analizadas.

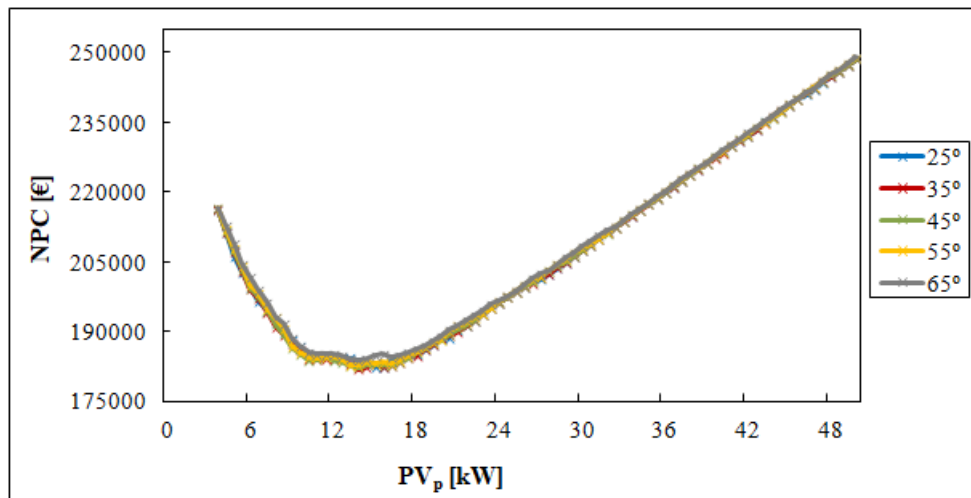


Figura 19: Optimización de la inclinación PV para ACS con paneles híbridos.

Configuración	PV <sub>p</sub> [kW]	Baterías [kWh]	NPC [€]	CO <sub>2</sub> [ton/a]	Diésel [l/a]	Propano [kg/a]
Gensets	0,49	38,40	339 152	34,67	5507	6568
Cald.	11,89	76,80	181 642	11,59	728	3140
Elect.	18,49	76,80	185 631	10,39	1039	2492
Híbr.	14,29	76,80	181 911	8,95	492	2492

Tabla 4: Características de cada una de las configuraciones propuestas.

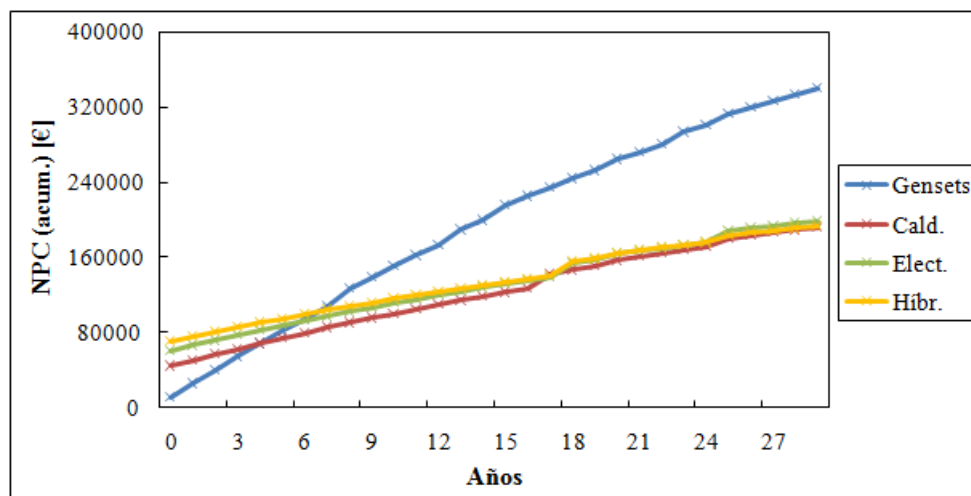


Figura 20: Coste acumulado de las configuraciones propuestas (30 años).

nadero. Entre las otras tres configuraciones, la situación es parecida y su NPC no muestra grandes diferencias, obteniendo la configuración con paneles híbridos una mayor reducción de CO<sub>2</sub>. En cuanto al coste, en la Figura 20 se observa como la inversión inicial (CAPEX) para las tres propuestas es parecida (algo mayor la inversión de instalar paneles híbridos) y todas más altas que la simulación con solo cambio de baterías, si bien a partir de sexto año aproximadamente las inversiones comienzan a recuperarse debido al menor gasto de combustible, rentabilizándose los sistemas.

Por tanto, las tres configuraciones propuestas como solución pueden considerarse válidas para el refugio de Lizara, al menos en comparación con la situación inicial. En cuanto a las configuraciones basadas en la obtención de ACS por medios alternativos a la caldera de gas propano, la propuesta de la instalación de paneles híbridos conlleva un menor coste a medio plazo, un menor impacto ambiental y menor necesidad de terreno para el campo solar, por lo que entre ambas soluciones es la más óptima.

En cuanto a la comparativa entre el sistema de ACS mediante paneles híbridos y mediante caldera de gas propano, el segundo caso conlleva menor extensión de terreno necesario y un menor NPC (con una diferencia mínima entre ambos), si bien el primero de ellos produce un menor impacto ambiental y menor dependencia de los combustibles fósiles. Por tanto, al ser configuraciones con resultados parecidos, los factores no técnicos de ambas opciones adquieren una mayor relevancia, por lo que la última palabra podrían tenerla tanto la FAM como los guardas del refugio, que priorizarían una de las soluciones en función de factores como la comodidad de uso, mantenimiento o probabilidad de fallos, entre otros. Aun así, y en cuanto a impacto ambiental, la solución más recomendable es aquella con generación de ACS mediante paneles híbridos, ya que reduce la dependencia de combustibles fósiles en el refugio aumentando su resiliencia.

#### 4.1.7. Variación de la configuración en función de distintos precios

Las simulaciones anteriores se han realizado teniendo en cuenta el precio pagado actualmente tanto por la tecnología fotovoltaica y baterías como por el gas propano y el diésel, como se explica en el Anexo A. Aun así, los precios actuales podrían sufrir modificaciones debido a distintas razones, por lo que se han analizado las configuraciones más óptimas en función del precio del diésel y de los paneles fotovoltaicos.

Actualmente el refugio paga el diésel a un coste de 0,849 €/litro, contando el transporte, pero podría ser previsible una subida del precio de combustible en el futuro. En la Figura 21 se presentan las distintas configuraciones más óptimas en caso de obtener el ACS mediante paneles híbridos. Las configuraciones con caldera de gas propano y caldera eléctrica también se han simulado, si bien no se muestran aquí por obtenerse resultados equivalentes, mostrándose estas soluciones en el Anexo C. Como puede observarse, la penetración de tecnología fotovoltaica permite amortiguar una supuesta subida del coste de combustible en comparación con una configuración con menor tecnología renovable, debido a su dependencia con el diésel. Por tanto, se concluye que la instalación de sistemas de generación renovable disminuye la vulnerabilidad de la configuración a la variación del coste de combustible.

Por otro lado, la Figura 22 muestra la variación de la configuración óptima en función del precio de la tecnología fotovoltaica para el caso de obtener el ACS mediante paneles híbridos. Como en el caso anterior, las soluciones equivalentes para el resto de configu-

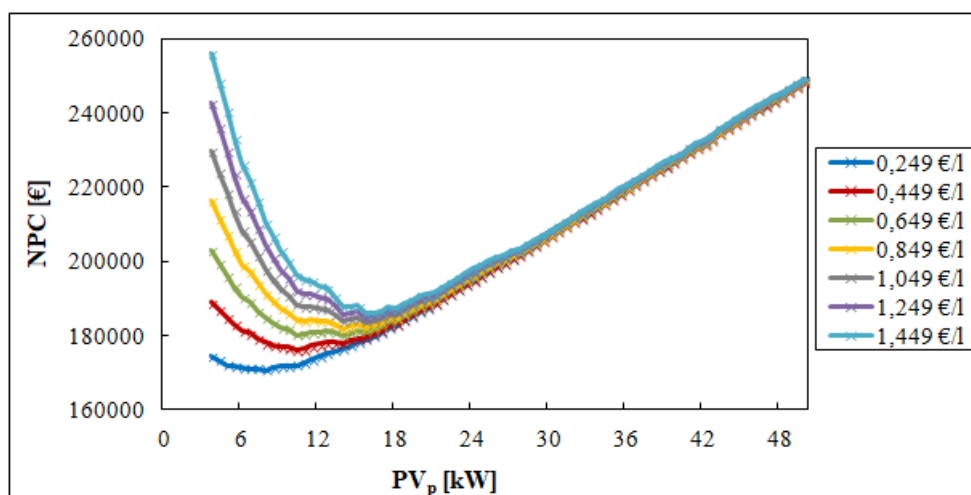


Figura 21: Configuración más óptima en función del precio del diésel («Híbr.»).

raciones se muestran en el Anexo C. Como se observa, la configuración óptima varía en función del coste de la fotovoltaica pues, a menor precio de la tecnología, más rentable es ampliar el campo de generación. Para la configuración más rentable obtenida (12,29 kW), el dimensionamiento del campo es relativamente estable, siendo necesaria una gran reducción de coste de la tecnología para que la rentabilidad de la microrred en su vida útil varíe considerablemente. Aun así, en un futuro previsto con menor inversión necesaria para implantar tecnología fotovoltaica sería interesante analizar una ampliación del campo fotovoltaico que posibilitaría una mejora del impacto ambiental del refugio.

#### 4.2. Refugio de Bachimaña

Como se ha mencionado anteriormente, el refugio de Bachimaña cuenta con una turbina hidroeléctrica de 30 kW que permite obtener la suficiente energía eléctrica para abastecer toda la demanda del refugio durante aproximadamente 10 meses al año. Por tanto, se considera como punto de partida la explotación de esta turbina para abastecer toda la demanda eléctrica del refugio durante 10 meses, dos generadores diésel para abastecer la electricidad durante los meses restantes, una caldera diésel para cubrir la demanda térmica todo el año y un sistema de baterías instaladas desde 2013 que van a ser sustituidas para analizar la nueva configuración, partiendo de cero respecto a su vida útil. Las características de cada tecnología, así como la disponibilidad de recursos y precio de combustible se encuentran en el Anexo B.

Es importante mencionar que el periodo anual de disponibilidad de caudal depende de la gestión que Acciona realiza sobre el embalse. Debido a que el objetivo de este es la regulación del caudal aguas abajo, es usual que durante finales de marzo procedan al desembalse de toda el agua posible para evitar crecidas indeseadas con el deshielo primaveral, lo que implica que durante los meses de abril y mayo, en que no hay agua en el ibón y el deshielo no ha elevado todavía el nivel del embalse, el caudal turbinable sea nulo o muy bajo. Por este motivo, el periodo de disponibilidad de agua puede variar cada año en función de las lluvias, las nieves, el frío o la anticipación de la primavera si bien, para simplicidad de este TFM, se ha supuesto que durante los meses de abril y mayo no hay caudal turbinable, disponiendo el resto del año suficiente agua para abastecer todo el

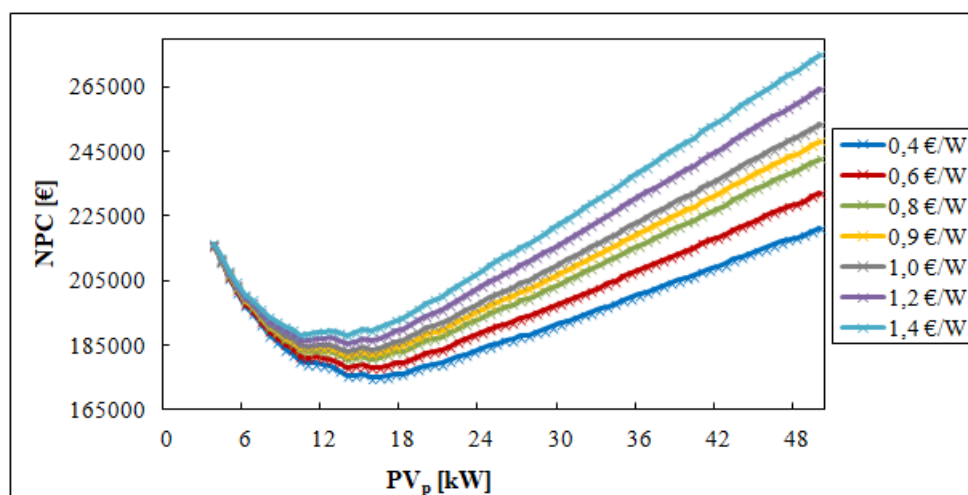


Figura 22: Configuración más óptima en función del precio PV («Híbr.»).

refugio, situación muy parecida a lo más frecuente.

#### 4.2.1. Electrificación del consumo térmico

La primera actuación propuesta para el refugio de Bachimaña es una acción de mejora ya identificada previamente por la FAM y los guardas del refugio, la sustitución del uso de la caldera diésel existente por calderas y acumuladores eléctricos durante los meses que hay caudal turbinable, de tal forma que tanto el consumo eléctrico como el térmico del refugio se basen en la generación de la turbina, ya que esta tiene suficiente potencia para abastecer la demanda completa, si bien el consumo de calefacción y ACS se ha considerado, en HOMER, como programable. Para ello se prevé la instalación de una caldera eléctrica de 10,0 kW y tres acumuladores de 2,5 kW que mantengan la temperatura del agua. Durante los meses sin posibilidad de usar la turbina, la demanda térmica se proveería a través de la caldera de diésel de cara a obtener una mayor eficiencia en el sistema.

Así, la Tabla 5 muestra las características de las configuraciones inicial («Inicial»), en la cual la generación de calefacción y agua caliente se obtiene todo el año mediante la caldera diésel, y la configuración en que la demanda térmica, cuando hay caudal turbinable, se obtiene mediante la caldera y los acumuladores eléctricos («Elect.»). Por otro lado, la Tabla 6 muestra los parámetros obtenidos para ambas simulaciones donde se observa que la reducción de consumo de diésel con fines térmicos se reduce un 91,5%, reduciéndose un 74,7% las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por último, la Figura 23 muestra el coste acumulado de ambas simulaciones donde se observa que, a pesar de que la solución propuesta requiere una inversión inicial algo mayor, el ahorro en combustible es tan alto que el tercer año ya se considera amortizado el sistema.

Configuración	Gensets	Turbina	Baterías	Caldera	Elect.
Inicial	Sí (2 meses)	Sí (10 meses)	Sí	Sí (12 meses)	No
Elect.	Sí (2 meses)	Sí (10 meses)	Sí	Sí (2 meses)	Sí (10 meses)

Tabla 5: Comparación de las configuraciones inicial y con electrificación en Bachimaña.

Config.	NPC [€]	Demanda [kWh/a]		Diésel [l/a]		CO <sub>2</sub> [ton/a]
		Eléctrica	Térmica	Gensets	Caldera	
Inicial	181 712	50 005	36 500	1193	5299	17,16
Elect.	72 131	83 824	3121	1193	453	4,34

Tabla 6: Parámetros de las configuraciones inicial y con electrificación en Bachimaña.

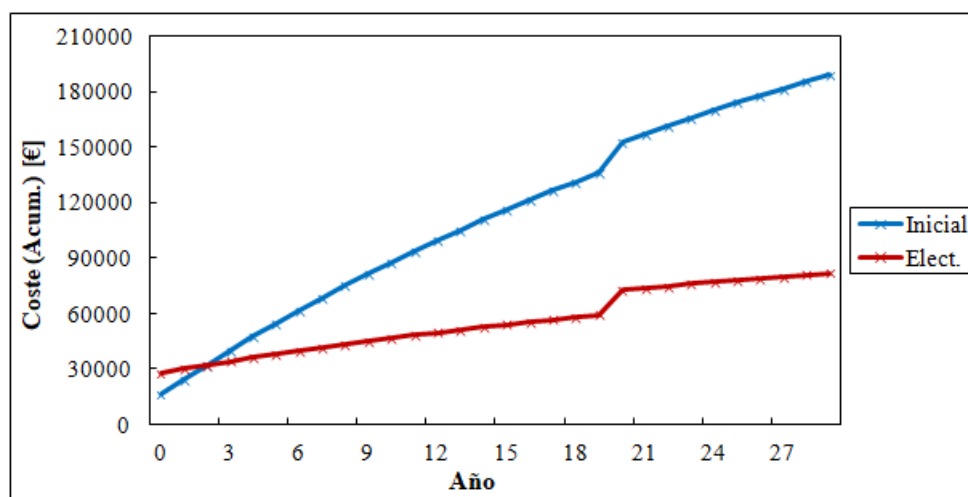


Figura 23: Coste acumulado de las configuraciones «Inicial» y «Elect.».

Por otro lado, esta nueva configuración, como en el caso del refugio de Lizara, presenta la ventaja de una menor dependencia con respecto al precio del diésel ya que, en Bachimaña, es más alto (1,275 €/l) debido a que debe ser transportado en helicóptero desde Baños de Panticosa. La Figura 24 muestra el coste acumulado a 30 años del sistema energético del refugio de Bachimaña antes de su electrificación para distintos valores de diésel y la Figura 25 muestra el mismo caso una vez ejecutada la electrificación. Como puede observarse, la dependencia a largo plazo de la variación del precio de diésel es considerablemente superior en caso de no electrificar el refugio, lo que supone un valor añadido a la solución propuesta.

#### 4.2.2. Autoabastecimiento

Una vez electrificado el consumo térmico del refugio solo se requieren combustibles fósiles para la generación energética durante dos meses al año. Así, como segunda actuación, se plantea la instalación de un sistema de almacenamiento estacional que permita almacenar la mayor cantidad de energía posible durante diez meses a fin de proveer al refugio durante los dos meses sin caudal turbinable, de tal modo que el refugio de Bachimaña tenga una configuración *off-grid* capaz de autoabastecerse parcial o totalmente mediante fuentes de energía renovables y locales, disminuyendo así su impacto ambiental y aumentando su resiliencia.

Suponiendo una microrred en la que la electrificación del refugio ya se ha llevado a cabo, se proponen tres situaciones distintas cuya implantación será analizada tanto de forma individual como mediante combinaciones de estos:

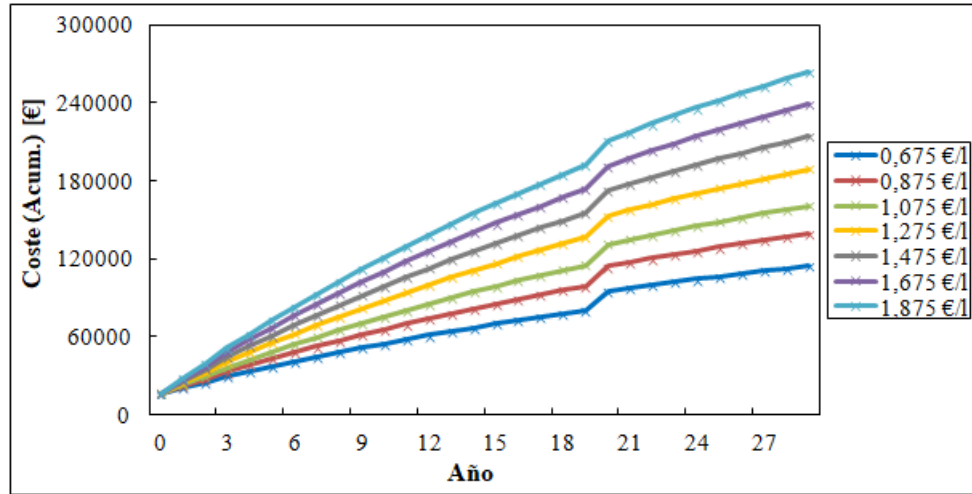


Figura 24: Coste acumulado del refugio para distintos costes del diésel («Inicial»).

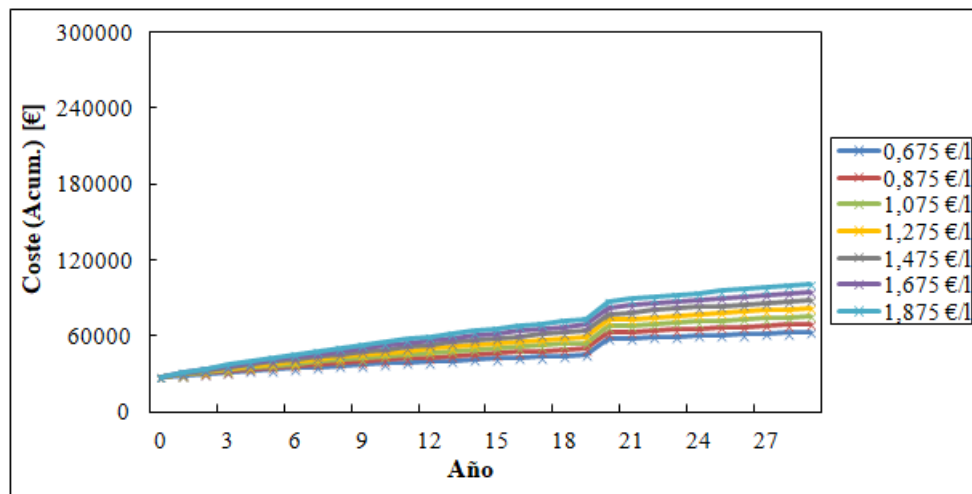


Figura 25: Coste acumulado del refugio para distintos costes del diésel («Elect.»).

- Diésel: estado inicial (con fines comparativos). La generación eléctrica se realiza mediante gensets y la generación térmica mediante la caldera.
- Baterías: instalación de baterías de mayor capacidad (3000 Ah C10) en *strings* de 24 unidades, dimensionando el número de *strings* necesarios.
- Hidrógeno: dimensionamiento de un sistema de almacenamiento de hidrógeno compuesto principalmente por un electrolizador, almacenamiento en *racks* a 200 bares y un pila de combustible que abastecerá el refugio cuando haya demanda sin generación hidroeléctrica.

Teniendo en cuenta todas las posibles combinaciones entre ellos, la Tabla 7 muestra solamente aquellas que se consideran ilustrativas de una tecnología o combinaciones competitivas de varias de ellas. FC son las siglas de *fuel cell*, usado frecuentemente para referirse a las pilas de combustible. Una vez conocidas las configuraciones posibles del sistema, en la Tabla 8 se analizan los resultados obtenidos para cada una de ellas en función de una serie de parámetros característicos. Las variables de coste, eficiencias y otras propiedades introducidas en las simulaciones se detallan en el Anexo B.

Como puede observarse, dentro de las configuraciones mostradas hay algunas que no plantean una solución viable, como es el uso de baterías para almacenamiento estacional, puesto que dispara los costes y secuestra gran cantidad de espacio útil para otros usos. Por tanto, se proponen como soluciones viables solo aquellas configuraciones que cuenten con almacenamiento de hidrógeno como solución de almacenamiento estacional, ya sea como único vector energético o como sustitución de generadores y acompañado de la caldera diésel para la obtención de agua caliente y calefacción.

El sistema de almacenamiento por hidrógeno más óptimo, suponiendo que el sistema de calefacción durante los dos meses analizados se provee a través de la caldera diésel, es aquel que cuenta con un electrolizador de 2 kW, una pila de combustible de 4 kW y un almacenamiento de cerca de 170 kg de hidrógeno, lo que supondría 12 *racks* de los propuestos (14,1 kg cada uno). Este almacenamiento presenta la ventaja de aproximarse pero no sobrepasar los 180 kg máximos almacenados, lo que le permitiría mantenerse en categoría 4 de la Instrucción Técnica Complementaria relacionada con el almacenamiento y botellas de gases a presión [9], conllevando menores actuaciones de seguridad que las siguientes categorías.

Configuración	Gensets	Cald.	Bat. [kWh]	Electrolizador [kW]	H <sub>2</sub> [kg]	FC [kW]
Diésel	Sí	Sí	72	No	No	No
Bat.	No	No	7200	No	No	No
H <sub>2</sub>	No	No	No	4	367	6
Bat.+Cald.	No	Sí	3600	No	No	No
H <sub>2</sub> +Cald.	No	Sí	No	2	169	4
H <sub>2</sub> +Bat.	No	No	144	4	338	5
H <sub>2</sub> +Bat.+Cald.	No	Sí	144	2	169	3

Tabla 7: Configuraciones posibles para aumentar el autoabastecimiento de Bachimaña.



Config.	NPC [€]	Demanda [kWh/a]		Diésel [l/a]		CO <sub>2</sub> [ton/a]
		Eléct.	Térmico	Gensets	Cald.	
Diésel	72 131	83 824	3121	1193	453	4,34
Bat.	2287 935	87 071	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	435 815	114 917	0	0	0	0
Bat.+Cald.	1 152 584	83 791	3121	0	453	1,20
H <sub>2</sub> +Cald.	234 395	95 162	3121	0	453	1,20
H <sub>2</sub> +Bat.	452 105	114 084	0	0	0	0
H <sub>2</sub> +Bat.+Cald.	231 065	97 359	3121	0	453	1,20

Tabla 8: Parámetros característicos de las distintas configuraciones analizadas.

El funcionamiento anual del almacenamiento de hidrógeno se representa en la Figura 26. El electrolizador trabaja de forma constante a potencia nominal desde junio hasta enero aproximadamente, lo que permite una mayor eficiencia al trabajar en condiciones nominales así como mayor esperanza de vida de los componentes, puesto que no se producen paradas y arranques en el *stack*. Además, esto permite instalar un sistema más pequeño y compacto (solo de 2 kW) que permite menor CAPEX y menor demanda de energía sobrante. Así, durante el funcionamiento del electrolizador se produce el almacenamiento de hidrógeno a 200 bares a través de un compresor, realizándose esta actividad durante gran parte del año. Durante los dos meses sin posibilidad de generar electricidad a través de la turbina, la pila de combustible consume el hidrógeno almacenado proveyendo la demanda en el refugio de tal forma que le permite abastecerse eléctricamente durante todo el día de la energía eléctrica generada *in situ*.

Es importante mencionar que el almacenamiento mediante hidrógeno debería ser complementado con una bancada de baterías que absorba picos de potencia y permita mejores condiciones de trabajo de la FC, asegurando así una rápida respuesta del sistema y una mejor conservación de la membrana y las celdas de la pila. Aun así, esta bancada de baterías (cuyo dimensionamiento se escapa de los objetivos del trabajo) no se ha tenido en cuenta en el sistema de almacenamiento de hidrógeno puesto que no tiene una función de almacenamiento eléctrico como tal sino una finalidad técnica, por lo que el hecho de que deban incluirse junto con la tecnología de hidrógeno no la convierte en una combinación de ambos tipos de almacenamiento.

Comparando en la Figura 27 el precio acumulado de las tres soluciones propuestas (diésel, hidrógeno e hidrógeno con caldera) es posible observar que, si bien el hidrógeno se presenta como una solución de almacenamiento estacional que se ajusta relativamente bien a los parámetros técnicos y ambientales demandados, el coste actual de esta tecnología la convierte en no competitiva con el resto, multiplicándose por más de 2,5 el precio total utilizando la caldera y por más de 4,5 en caso de autoabastecer el refugio a través del hidrógeno.

Por tanto, es posible concluir que, si bien el almacenamiento de hidrógeno podría suponerse como una solución técnica para conseguir el autoabastecimiento energético en el refugio de Bachimaña, a día de hoy no se puede considerar como una tecnología económicamente competitiva, si bien una mayor madurez y penetración en el mercado podrían

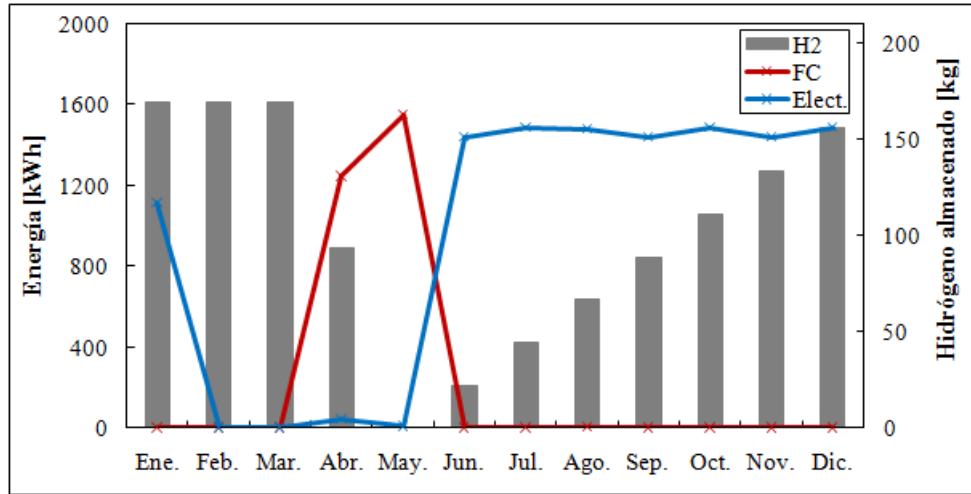


Figura 26: Funcionamiento del sistema de almacenamiento de hidrógeno.

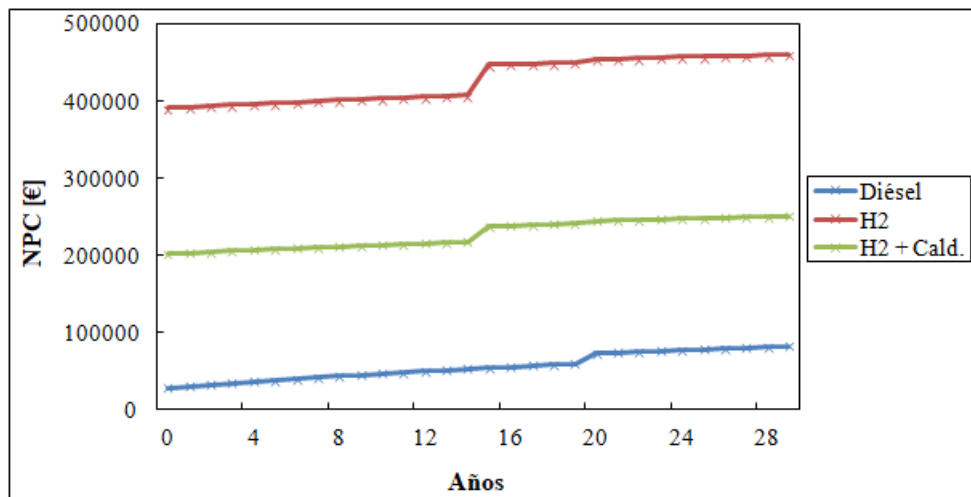


Figura 27: Costes acumulados para las distintas soluciones de autoabastecimiento.

abaratar los costes en un futuro de forma que sea una solución no solo técnica y ambientalmente apropiada sino, además, competitiva en coste con otros vectores energéticos que conllevan un impacto ambiental tanto en su etapa de traslado al refugio como en su etapa de uso.

## 5. Conclusiones

A lo largo este trabajo se ha expuesto el análisis energético de dos refugios de montaña *off-grid* en los cuales se han evaluado distintas soluciones de generación energética, buscando una mayor penetración de las energías renovables y una menor dependencia de vectores energéticos de procedencia fósil, aumentando así su sostenibilidad y resiliencia con el medio.

Tanto para el refugio de Lizara como para el refugio de Bachimaña se encuentran soluciones y mejoras que no solo reducen el impacto ambiental si no que además disminuyen el coste de la generación energética a largo plazo, lo que permite concluir que las energías renovables no solo son la solución más acorde con la sostenibilidad sino, en ciertas circunstancias, también la más económica.

Para el refugio de Lizara se han analizado varias propuestas obteniendo una configuración final en la cual la energía térmica es obtenida mediante paneles solares híbridos, una caldera eléctrica de apoyo y una termochimenea instalada en la estancia central. Por otro lado, se propone la producción de energía eléctrica mediante 14,29 kW de fotovoltaica, 2 *strings* de baterías (72 kWh) y dos generadores diésel de 12,8 kW y 22,4 kW, si bien el uso del segundo de ellos se dejaría para situaciones de emergencia. En cuanto al refugio de Bachimaña, se propone la electrificación del sistema térmico de tal forma que el agua caliente para ACS y calefacción se genere mediante la electricidad producida por la turbina hidráulica de 30 kW, lo que permite al refugio autoabastecerse durante 10 meses al año. Los dos meses restantes se produciría energía eléctrica mediante dos generadores de 7,9 kW y 26,8 kW (el segundo estaría para casos de emergencia) y un *string* de baterías. La generación térmica se proveería por medio de una caldera diésel.

Además, durante el planteamiento, toma de datos y simulaciones de este trabajo se han obtenido una serie de conclusiones transversales que complementan el trabajo concreto de los dos refugios de montaña y que se presentan en los siguientes puntos:

- Las energías renovables son una solución sostenible y competitiva en refugios de montaña *off-grid* puesto que su penetración en las microrredes y sistemas térmicos permite la diversificación de fuentes de generación, costes más competitivos y la disminución de la dependencia de vectores energéticos externos al refugio.
- Las energías renovables conllevan, de forma general, una mayor inversión inicial que es amortizada con los años mediante el menor uso de combustibles fósiles. El retorno de la inversión dependerá de parámetros como la vida útil, coste de la tecnología o frecuencia de uso. Además, la mayor penetración de energías renovables en un refugio disminuye su dependencia con respecto a la variación del precio del diésel, obteniendo configuraciones energéticas menos vulnerables a precios externos.
- El análisis de la configuración energética óptima de un refugio de montaña con

penetración de energías renovables no es único más allá de la utilización de una metodología unificada en mayor o menor grado. Cada refugio presenta unas características propias en cuanto a recursos renovables, localización e instalaciones que requieren un análisis propio del refugio. La inclusión en mayor o menor grado de las energías renovables variará en función de las características propias del refugio.

- Los refugios de montaña presentan, a día de hoy, inconvenientes para ser autoabastecidos energéticamente. Las localizaciones remotas dificultan el acceso a gran cantidad de recursos (baja irradiación solar, falta de vegetación para biomasa, etc.) que impiden que el refugio pueda generar completamente la energía necesaria para autoabastecerse. Aun así, ciertos refugios con características inusuales (como la instalación de una turbina propia de 30 kW en Bachimaña) pueden acercarse en gran medida a este objetivo.
- Las tecnologías de almacenamiento energético juegan un papel esencial en la penetración de energías renovables en refugios de montaña. Tanto las baterías para almacenamiento a corto plazo (diario, semanal) como el hidrógeno para almacenamiento estacional presentan ventajas técnicas que incentivan su uso en refugios de montaña. Aun así, algunas tecnologías de almacenamiento no son todavía económicamente competitivas, por lo que su introducción en estos sistemas no es rentable económicamente a día de hoy.
- La introducción de actuaciones no activas en cuanto a generación de energía puede producir un impacto en el funcionamiento energético del refugio tan alto como las medidas activas. Orientación del edificio, aislamiento, medidas de eficiencia energética (iluminación, electrodomésticos, etc.) o monitorización, así como la correcta gestión de demandas y consumos, son factores esenciales a tener en cuenta en la mejora energética. Estos factores no son sencillos de introducir en refugios ya construidos pero su inclusión en aquellos de nueva construcción adquiere tanta importancia como la introducción de fuentes de generación renovable.
- La mayoría de las acciones de penetración de energías renovables y eficiencia energética ejecutadas producen una mejora del impacto ambiental del refugio, reduciendo sus emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorando su relación con el entorno, el cual tiene generalmente un alto valor natural. Por tanto, la introducción de energías renovables en los refugios aumenta su sostenibilidad y su respeto al medio ambiente, manteniendo la coherencia con la filosofía de vida y la forma de pensar de los dueños del refugio y la gran mayoría de los huéspedes que se alojan.
- Las condiciones de un refugio de montaña no son estáticas anualmente y la variación de los parámetros debe ser tomada en cuenta a la hora de ejecutar acciones en los refugios. Frecuencia de lluvia y nieve, periodos primaverales u otoñales más largos y/o flujo de visitantes, entre otros, varían anualmente y pueden alterar los balances energéticos de los refugios entre distintos años naturales.
- El análisis de factores no técnicos a la hora de ejecutar una reforma en un refugio es de vital importancia para la viabilidad de las actuaciones. Legislación, impacto visual, usos y costumbres de los huéspedes o formación de los guardas son factores que no afectan directamente al dimensionamiento técnico de las tecnologías pero que pueden afectar de forma muy considerable a la mayor o menor funcionalidad de

las distintas configuraciones. A lo largo del desarrollo de este TFM se ha identificado este punto como condicionante en el dimensionamiento y funcionamiento de los refugios.

## 6. Agradecimientos

Debido a la gran cantidad de datos reales de los refugios que han sido necesarios para las evaluaciones y las modelizaciones, el desarrollo de este TFM no hubiera sido posible sin la inestimable ayuda de un gran número de personas que han puesto, de un modo u otro, su granito de arena en este trabajo. Por eso, agradecer a todas ellas su contribución y su ayuda.

- A Ángel A. Bayod Rújula por tutorizar este trabajo.
- A Fernando Garcés y los trabajadores de la FAM por tanta información aportada.
- A Jorge, Xaro, Jose Ángel, Nano y todos los guardas de Lizara y Bachimaña que han contribuido y contestado a las innumerables preguntas y llamadas.
- A Pedro Casero y a todos mis compañeros de la Fundación Hidrógeno Aragón.
- A Diego, Isa, Lucía, Stefano, Tomás y todos aquellos que de una forma u otra han contribuido, generosamente, a este trabajo.
- A mis padres y a mis hermanos.

A todos ellos, muchísimas gracias.

## Bibliografía

- [1] Runming, Y. y Steemers, K. (2005). «A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK» en *Energy and Buildings* 37, pág. 663-671.
- [2] HOMER Pro (versión 3.11.6, 2018). HOMER Energy LLC. [Consulta: 15 de julio de 2017].
- [3] Instituto para la diversificación y el ahorro de energía. (2006). *Código Técnico de Edificación. Documento Básico HE4, contribución solar mínima de agua caliente sanitaria*. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/realDecreto/RD3142006.pdf>. [Consulta: 19 de mayo de 2018.]
- [4] Termochimeneas de Leña: Idro 70. Edilkamin S.p.A. Milano (IT). 2014.
- [5] Bosch Marín. *¿Qué es la eficiencia energética?* Disponible en: <https://www.boschmarin.com/blog/que-es-la-eficiencia-energetica/>. [Consulta: 5 de junio de 2018].
- [6] Göran Berndes et al. (2016). «Forest Biomass, Carbon Neutrality and Climate Change Mitigation» en *From Science to Policy* 3. European Forest Institute.
- [7] Panel Solar Híbrido Ecomesh. EndeF. Zaragoza (ES). 2017.
- [8] DECRETO 51/2006, de 21 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba definitivamente el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de los Valles, Fago, Aísa y Borau. Boletín Oficial de Aragón (BOA) núm. 29 de 10 de marzo de 2006. Disponible en: [http://www.boa.aragon.es/cgi-bin/EBOA/BRSCGI?CMD=VERDOC&BASE=BOLE&PIECE=BOLE&DOCS=1-132&DOCR=7&SEC=BUSQUEDA\\_FECHA&RNG=200&SEPARADOR=&SECC-C=&PUBL-C=&PUBL=20060310&@PUBL-E=](http://www.boa.aragon.es/cgi-bin/EBOA/BRSCGI?CMD=VERDOC&BASE=BOLE&PIECE=BOLE&DOCS=1-132&DOCR=7&SEC=BUSQUEDA_FECHA&RNG=200&SEPARADOR=&SECC-C=&PUBL-C=&PUBL=20060310&@PUBL-E=).
- [9] Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1, MIE-APQ-2, MIE-APQ-3, MIE-APQ-4, MIE-APQ-5, MIE-APQ-6 y MIE-APQ-7. Boletín Oficial del Estado (BOE) núm. 112 de 10 de mayo de 2001. Disponible en: <https://boe.es/boe/dias/2001/05/10/pdfs/A16838-16929.pdf>.
- [10] Rosas Echeverría, J.J. (2015). *Sistema de generación y suministro eléctrico basado mayoritariamente en energías renovables para una comunidad isleña*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Pública de Navarra, Acciona Energía.
- [11] Generator Set CTM-30 LI. Carod SL. Zaragoza (ES). 2009.
- [12] Mitsubishi S4L2-SD. SDMO Industries. Brest (FR). 2014.
- [13] Sivasankaran, G. A. y Jain S. K. (1988). «A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK» en *Defence Science Journal* 38, pág. 301-313.
- [14] Catálogo-Tarifa 2013. Grupo Saltoki. Zaragoza (ES). 2013.
- [15] Chabert A. y Bourasseau C. (2017). *Business Case Analysis. Business Case 1: Isolated Site Electrification*. PEM Electrolyser for Operation with Offgrid renewables facilities (ELY4OFF). FCH JU Project.

- [16] Guinot B. et al. (2015). «Techno-economic study of a PV-hydrogen-battery hybrid system for off-grid power supply: Impact of performances' ageing on optimal system sizing and competitiveness» en *International Journal of Hydrogen Energy* 40, pág. 623-632.
- [17] Paneles SCL-150. Saclima Solar Fotovoltaica S.L. Valencia (ES). 2017.
- [18] European Commission Joint Research Centre. (2017). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Disponible en: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>. [Consulta: 14 de abril de 2018].
- [19] Repsol S.A. (2016.) *Ficha de datos de seguridad. Propano Comercial*. Disponible en: [https://www.repsol.es/imagenes/repsolpores/es/FDS\\_Propano\\_Comercial\\_tcm19-66715.pdf](https://www.repsol.es/imagenes/repsolpores/es/FDS_Propano_Comercial_tcm19-66715.pdf). [Consulta: 19 de mayo de 2018].
- [20] Wikipedia (2018). *Pellet Fuel*. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pellet\\_fuel](https://en.wikipedia.org/wiki/Pellet_fuel). [Consulta: 18 de abril de 2018.]
- [21] Himoinsa HYW-35 T5. Himoinsa Headquarters. Murcia (ES). 2018.
- [22] Himoinsa HLA1-10 T5. Himoinsa Headquarters. Murcia (ES). 2018.
- [23] Vitoplex 300 115 kW. Viessmann SL. Pinto (ES). 2017. Disponible en: [https://www.viessmann.es/content/dam/vi-brands/ES/PDFs/Calderas\\_gas/5798247\\_1\\_vdp\\_000\\_Vitoplex300\\_90a500kW\\_DT\\_pdfonline.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original.media\\_file.download\\_attachment.file/5798247\\_1\\_vdp\\_000\\_Vitoplex300\\_90a500kW\\_DT\\_pdfonline.pdf](https://www.viessmann.es/content/dam/vi-brands/ES/PDFs/Calderas_gas/5798247_1_vdp_000_Vitoplex300_90a500kW_DT_pdfonline.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/5798247_1_vdp_000_Vitoplex300_90a500kW_DT_pdfonline.pdf). [Consulta: 02 de junio de 2018].
- [24] Baxiroca CML-10. Baxi. Barcelona (ES). 2018. Disponible en: <https://www.baxi.es/-/media/inriver/30388-10616.pdf>. [Consulta: 25 de mayo de 2018].
- [25] Fundación Hidrógeno Aragón (2015). *Market study report and implementation plan. Fluid management component improvement for back up fuel cell systems (FlumaBack)*. FCH JU Project.
- [26] Llera E. M. y Zabalza I. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- [27] Schmidt O. et al. (2017). «Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study» en *International Journal of Hydrogen Energy* 42, pág. 30470-30492.
- [28] 4 kW hydrogen fuel cell power module. Hydrogenics Corporation. Ontario (CA). 2010.
- [29] Nedstack Fuel Cell Technology BV. (2011). *PEMFC lifetime and durability, an overview*. Disponible en: [https://www.sintef.no/globalassets/upload/materialer\\_kjemi/energikonvertering-og-materialer/bilder/pemfc-overview-thessaloniki-fa-debruijn---f.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/upload/materialer_kjemi/energikonvertering-og-materialer/bilder/pemfc-overview-thessaloniki-fa-debruijn---f.pdf). [Consulta: 05 de junio de 2018].
- [30] ElectroPS (2015). *Computer model updated* (confidencial). Fluid management component improvement for back up fuel cell systems (FlumaBack). FCH JU Project.

- 
- [31] Salas, V., Suponthana W. y Salas A.R. (2015). «Overview of the off-grid photovoltaic diesel batteries systems with AC loads» en *Applied Energy* 157, pág. 195-216.
- [32] Yilmaz S. y Dincer F. (2017). «Optimal design of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated lands: A case study for Kilis, Turkey» en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, pág. 344-352.
- [33] Bayod Rújula, A. A. et al. *Guía de las energías renovables aplicadas a PYMES*. Confederación de la Pequeña y Mediana Empresa Aragonesa (CEPYME Aragón). Disponible en: [http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/4bib\\_arch.pdf](http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/4bib_arch.pdf).



## A. Anexo I. Parámetros Lizara.

En este anexo se presentan todas aquellas variables consideradas para la modelización de la microrred y que, de un modo u otro, afectan a los resultados obtenidos en el refugio de Lizara. Por tanto, se presentan y justifican todos aquellos valores relacionados con costes, eficiencias o recursos renovables que permiten entender en profundidad los análisis realizados.

### A.1. Generadores diésel y caldera de condensación

En cuanto a los generadores diésel, se han tenido en cuenta una serie de parámetros con respecto a su uso y funcionamiento. Con respecto al generador de 22,4 kW, los datos de coste del equipo y de instalación se han obtenido a través de la factura real proporcionada por la FAM. Respecto al generador de 12,8 kW, no se ha podido acceder a la factura real pero, a través de la factura de un equipo de potencia parecida instalado en el refugio de Cap de Llauset y los costes de instalación del generador grande, se han extrapolado los precios de equipo e instalación. Ambos generadores producen corriente alterna (AC). Los valores de coste de operación y mantenimiento están basados en Rosas Echeverría [10] así como la carga mínima de operación y la vida útil. La Tabla 9 muestra los valores introducidos para los generadores diésel en Lizara, valores que han permanecido constantes a lo largo de todo el análisis. O&M hace referencia a los costes de «Operación y Mantenimiento» así como CMO hace referencia a la «Carga Mínima de Operación».

En cuanto al rendimiento, para el generador de mayor potencia se ha obtenido a partir del consumo detallado en las especificaciones técnicas de su catálogo [11] y para el de menor potencia a partir de las especificaciones técnicas de un generador de potencia similar instalado en otro refugio del Pirineo [12]. Por otro lado, es conocido que la altitud afecta a la eficiencia de los generadores debido a la menor concentración de oxígeno, lo que implica que el rendimiento de los generadores situados en refugios de montaña sea menor que en condiciones de altitud sobre nivel del mar. Conociendo la ecuación que utiliza el *software* HOMER para calcular el rendimiento a partir del consumo a distinta carga de operación y basando la pérdida de rendimiento en Sivasankaran y Jain [13] que considera que la eficiencia de un generador diésel disminuirá un 1 % cada 100 metros de altitud a partir de los 1000 metros, las Figuras 28 y 29 muestran el rendimiento de ambos generadores a nivel del mar y a la altitud del refugio. En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de los generadores, estas son calculadas por HOMER a partir de parámetros como la eficiencia de los generadores, las características del combustible y el porcentaje de combustión

Genset	Potencia [kW]	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€/h]	Vida Útil [h]	CMO [%]
Carod CTM-30 LI	22,40	11 234	10 290	0,17	30 000	30
Mitsubishi S4L2-SD	12,80	9591	8647	0,15	30 000	30

Tabla 9: Variables utilizadas para los generadores diésel de Lizara.

completa, entre otros.

Con respecto a la caldera de condensación de gas propano, el valor demandado por HOMER es simplemente la eficiencia del equipo, si bien para este trabajo se ha documentado el precio de la instalación de la caldera de condensación y el acumulador de cara a un mayor ajuste de los costes finales. Las marcas y modelos de la caldera y el acumulador no son conocidos si bien se han utilizado modelos muy parecidos a los existentes en el catálogo de Grupo Saltoki [14], utilizado frecuentemente por la FAM para adquirir los equipos que instala en los refugios. Así, la Tabla 10 muestra las características de la caldera y el acumulador del sistema térmico si bien el precio total no ha sido introducido en HOMER por lo que no es una variable del problema.

## A.2. Baterías e inversor

Tanto las baterías como el inversor son instalaciones previas a la propuesta de este trabajo si bien, como se ha detallado durante la memoria, el estado de la bancada de baterías era muy negativo, siendo necesaria su completa sustitución.

La Tabla 11 muestra la marca y modelo de las baterías así como sus respectivos costes basados en una factura emitida a la FAM de sustitución de vasos de baterías en Lizara durante 2018, lo que implica que los valores son completamente vigentes. En cuanto al coste de operación y mantenimiento de la tecnología se ha considerado el 3% total de la inversión a lo largo de la vida útil, basado principalmente en Chabert y Bourasseau [15]. Con respecto a la instalación, se han considerado configuraciones de *strings* de 24 baterías, manteniendo así la configuración inicial y asegurando un voltaje de salida óptimo para el inversor instalado. La marca y modelo de baterías ya están incluidas en la base de datos de HOMER no siendo necesario detallar su configuración técnica.

En cuanto al inversor instalado, los detalles de marca y modelo se muestran en la Tabla 11, mostrándose el resto de parámetros técnicos en la Tabla 12. Todas las variables han sido extraídas de la ficha técnica del inversor y los costes, al no ser posible el acceso a la factura, se han extrapolado a partir de información ofrecida por la FAM en relación a inversores de otros refugios.

## A.3. Tecnología PV e híbrida

Si bien el dimensionamiento de la tecnología PV ha sido realizado usando el programa HOMER, la evaluación de la tecnología híbrida térmica-PV se ha realizado mediante el programa EES.

En cuanto a la tecnología fotovoltaica los precios han sido extraídos de una factura real

Tecnología	Marca/Modelo	Potencia [kW]	Rendim. [%]	Capacidad [l]	Precio [€]
Caldera	De Dietrich Vivadens MCR 30/35 MI	30/34	89	-	1245
Acumulador	GreenHeiss DPV/I/ES 300	-	-	300	2521

Tabla 10: Variables utilizadas para el sistema de calefacción de Lizara.

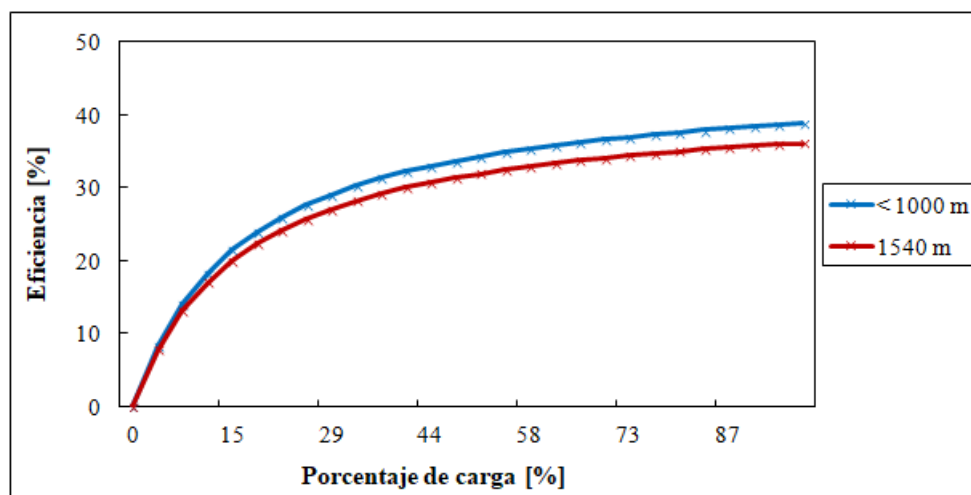


Figura 28: Rendimiento del generador de 22,4 kW instalado en Lizara.

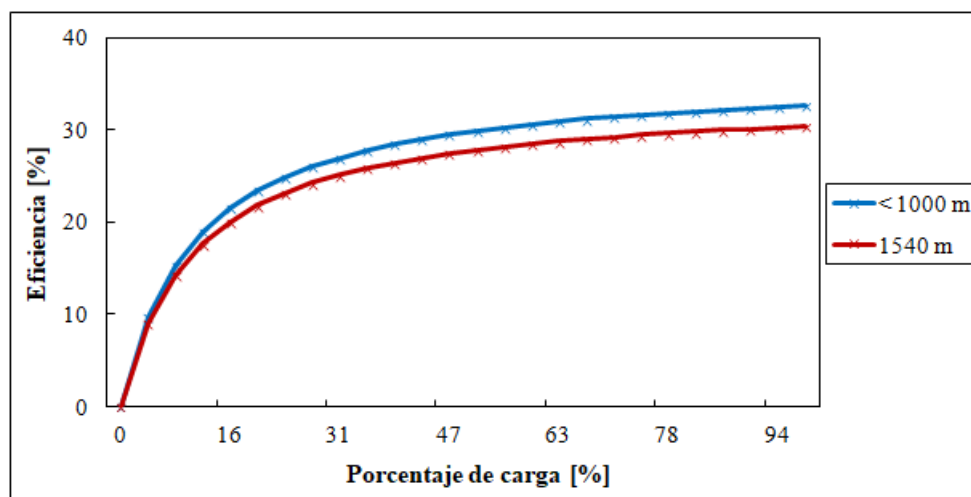


Figura 29: Rendimiento del generador de 12,8 kW instalado en Lizara.

Tecnología	Marca/modelo	Potencia	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€/año]
Baterías (6 unidades)	Hoppecke 8 OPzS 800	2V 800 Ah (C10)	2386	2386	4
Inversor	Xtender XTH 8000-48	8 kW	6149	5250	0

Tabla 11: Modelos y precios de baterías e inversor de Lizara.

Tecnología	Vida Útil [años]	Efic. Inversor [%]	Capac. Relativa Inversor [%]	Efic. Rectificador [%]
Inversor	20	96	100	96

Tabla 12: Parámetros del inversor de Lizara.

de instalación de paneles fotovoltaicos en Lizara en 2018, si bien los costes O&M se han considerado, como indican Guinot B. et al. [16], el 2,12 % de la inversión de la tecnología cada año. Como la marca y el modelo de los paneles a instalar es conocida gracias a entrevistas con la FAM, SCL 150W [17], los parámetros técnicos demandados se han basado en las especificaciones técnicas y, cuando estos no estaban definidos en la ficha técnica, en el conocimiento de la instalación. La Tabla 13 y 14 muestran las especificaciones técnicas de los paneles PV solicitadas por HOMER (mencionar que la inclinación es analizada durante la memoria) y la Tabla 15 la inversión económica de la tecnología. «Eficiencia CN» hace referencia a la eficiencia bajo condiciones normales de operación, mostrado en las especificaciones técnicas de la tecnología, y «DC» a la corriente continua.

Con respecto a la tecnología híbrida térmica-PV, como se ha expuesto anteriormente, el desarrollo no se ha hecho mediante HOMER por no existir la opción dentro del *software*. Así, basándose en el trabajo *Análisis de una instalación solar híbrida fotovoltaico-térmica*, realizado en la asignatura Ampliación de la Energía Solar, se ha desarrollado un modelo con el programa EES que permite el análisis de esta tecnología así como su aportación horaria a los sistemas térmicos y eléctricos en un día medio de cada mes. Una vez conocida su aportación, se han modificado los perfiles horarios de demanda introducidos en HOMER teniendo en cuenta esta producción. La Figura 30 muestra el perfil de producción de ACS de los paneles híbridos así como la Figura 31 muestra la producción eléctrica de esta. Solo se muestran tres meses al considerar que la representación es estacional (se presenta el mes de mayo por ser el utilizado para el análisis del dimensionamiento).

Los parámetros de la tecnología instalada así como su coste han sido extraídos del catálogo de los paneles utilizados, los paneles Ecomesh de la empresa EndeF [7], que incluyen una estimación del precio de la configuración estimada para distintos ámbitos. Los distintos parámetros técnicos de los paneles se presentan en las Tablas 16, 17 y 18 para los parámetros generales, térmicos y eléctricos respectivamente (mostrándose la eficiencia térmica de los paneles en la Figura 32) así como los costes considerados (para 15 paneles) se presentan en la Tabla 15, donde el precio de operación y mantenimiento se ha considerado, por simplicidad, equivalente al de los paneles fotovoltaicos.

Con respecto a la caldera eléctrica que completa la instalación, se ha supuesto equivalente a la instalada en el refugio de Bachimaña puesto que está bien documentada. Durante la subsección B.4 del Anexo B se detallará esta tecnología y su modo de funcionamiento.

#### A.4. Termochimenea e intercambiadores térmicos

Con respecto a la termochimenea, se ha comentado anteriormente que es una acción ya considerada previamente por la Federación Aragonesa de Montañismo a fin de obtener un mayor rendimiento térmico de la madera por ser un recurso renovable y económicamente muy accesible. Por esto, y gracias a que esta acción ya fue ejecutada por la FAM durante el año 2017, se ha podido acceder a las características técnicas de la termochimenea.

Generación	Vida útil [años]	Reflectancia del suelo [%]	Orientación [° sur]
DC	25,0	0,0	0,0

Tabla 13: Especificaciones técnicas de los paneles PV de Lizara.

Factor de pérdidas	Coef. de T <sup>a</sup>	T <sup>a</sup> Operación Nominal	Eficiencia CN
[%]	[%/C°]	[°C]	[%]
80,0	-0,4	47,0	15,6

Tabla 14: Especificaciones técnicas de los paneles PV de Lizara.

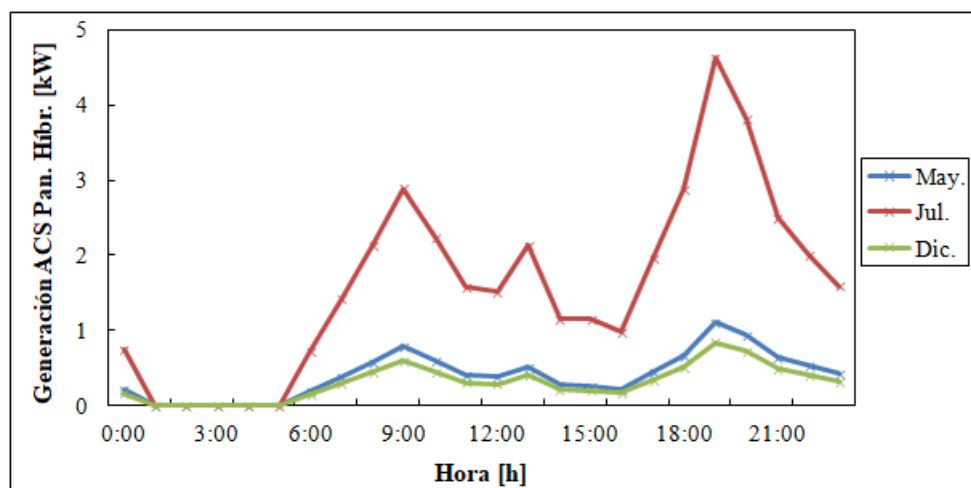


Figura 30: Generación ACS de la instalación de paneles híbridos.

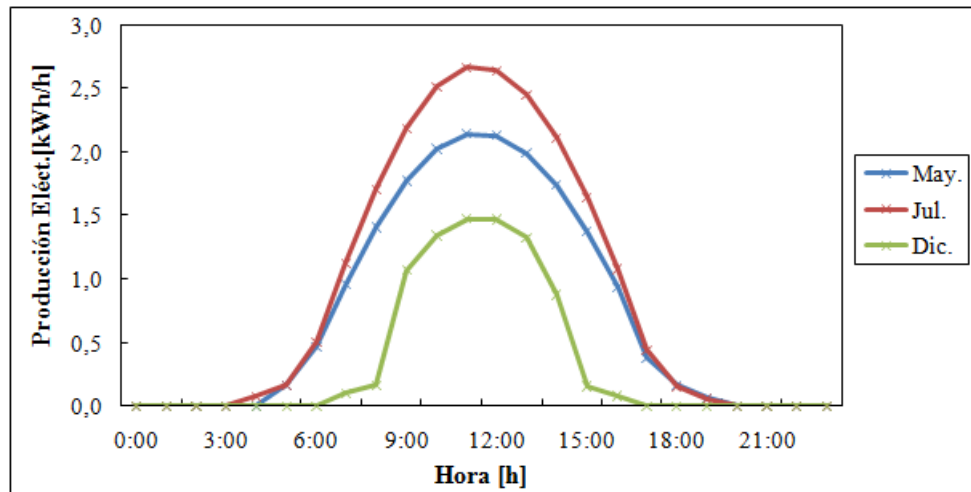


Figura 31: Generación eléctrica de la instalación de paneles híbridos.

Tecnología	Marca/modelo	Potencia [W]	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€/año]
PV	SCL 150W	150	237	151	3
Híbrida	Ecomesh	240	28 800	26 300	45

Tabla 15: Modelos y precios de PV y paneles híbridos de Lizara.

Generación Eléct.	Vida útil [años]	Superficie de Captación [m <sup>2</sup> ]	Orientación [° sur]
DC	25,0	1,64	0,00

Tabla 16: Especificaciones técnicas generales de los paneles híbridos de Lizara.

$\eta_0$ [%]	$a_1$ [W/m <sup>2</sup> K]	$a_2$ [W/m <sup>2</sup> K]	Capacidad [l]
0,51	4,93	0,02	2,30

Tabla 17: Especificaciones térmicas de los paneles híbridos de Lizara.

Potencia [W]	Rendimiento Elect. [%]	Coef. de T <sup>a</sup> [%/C°]	T <sup>a</sup> Operación Nominal [°C]
240,00	14,14	-0,43	47,00

Tabla 18: Especificaciones eléctricas de los paneles híbridos de Lizara.

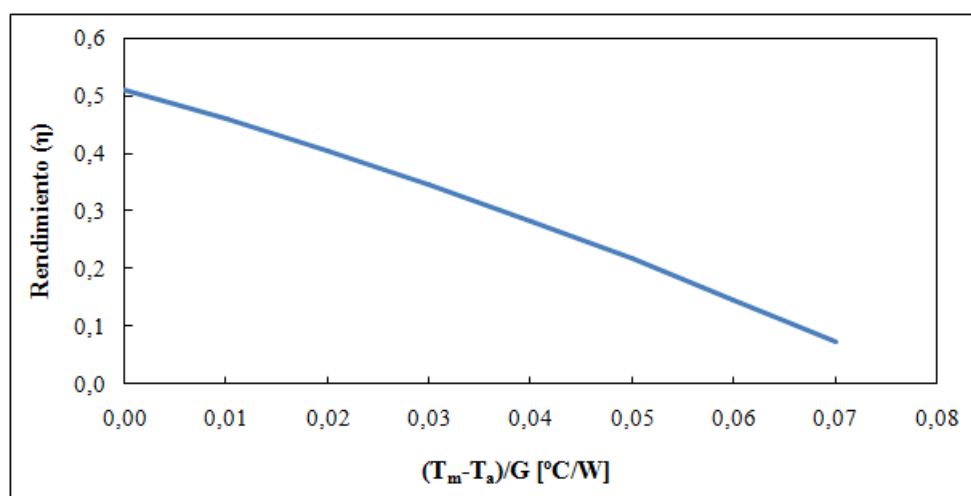


Figura 32: Rendimiento térmico de los paneles Ecomesh.

nea así como a su coste. La termochimenea es el modelo Idro 70 de la marca EdilKamin [4], de cuya ficha técnica se han obtenido los parámetros necesarios para la evaluación de esta acción, mostrados en la Tabla 19. La inversión, mostrada en la Tabla 20, ha sido obtenida analizando la factura real de instalación y los costes O&M a través de conversaciones con los guardas.

En cuanto a la evaluación de esta tecnología, al no existir la posibilidad de incluirla en HOMER, su dimensionamiento se ha realizado mediante hojas de cálculo Excel y la modificación del perfil de consumo de calefacción, introduciendo este posteriormente como *input* en HOMER, de tal forma que la demanda térmica introducida tras la implementación de esta mejora disminuye.

Los intercambiadores de calor introducidos, aunque finalmente no han sido considerados una opción viable, se han modelado mediante HOMER debido a que el aprovechamiento térmico de los generadores diésel sí es ofrecido por el programa, por lo que ningún dimensionamiento energético externo ha tenido que ser realizado. En cuanto al coste, al no tener información ni bibliografía variada donde comparar precios de intercambiadores, se ha procedido a la consulta por la red de este tipo de tecnología. Los resultados, mostrados en la Tabla 20, implican un coste relativamente bajo de la tecnología pero muy elevado de la instalación debido a la gran longitud que deberían de recorrer los tubos de agua caliente desde su generación hasta el refugio (Figura 11), uno de los motivos por los que esta tecnología es inviable. La vida útil considerada de esta tecnología ha sido de unos 15 años aproximadamente.

#### A.5. Perfiles de consumo

Los perfiles de consumo del refugio de Lizara han sido desarrollados en función de la accesibilidad de las distintas variables. Gracias al proyecto LIFE+ SustainHuts que instaló un *data logger* de consumo para monitorizar lo flujo eléctricos en el refugio, se ha podido conocer el perfil eléctrico del edificio. Así, como se mostró durante la memoria, la Figura 2 muestra el perfil eléctrico para los meses de abril, julio y diciembre.

Por otro lado, el perfil térmico del edificio ha debido ser extrapolado a partir de distintas fuentes debido a la ausencia de medidas experimentales. Este ha sido dividido en tres: el consumo de ACS, el consumo de calefacción y el consumo de la termochimenea.

El perfil de ACS ha sido calculado siguiendo, como se ha expuesto en la memoria, el dimensionamiento realizado mediante EES en el trabajo *Cálculo dinámico de una instalación solar térmica de baja temperatura para ACS* de la asignatura Ampliación de la Energía Solar. Así, considerando las especificaciones mostradas en la Tabla 21, basadas en el *Código Técnico de Edificación. Documento Básico HE4, contribución solar mínima de agua caliente sanitaria* [3] e información aportada por la FAM, se ha podido extraer el perfil ACS del refugio basado en el perfil FF-Chart (Figura 33). El perfil de consumo ACS en el refugio se muestra en la Figura 34 para los meses de abril, julio y diciembre. Es importante mencionar

Potencia	Rendimiento	Consumo	Volumen Calentable	Vida Útil
[kW]	[%]	[kg/h]	[m <sup>3</sup> ]	[años]
8,0/23,0	78,3	2,6/7,0	600,0	30,0

Tabla 19: Parámetros técnicos de la termochimenea instalada en Lizara.

Tecnología	Marca/modelo	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€/kWh]
Termochimena	EdilKamin Idro 70	5970	4761	0,0004
Intercambiadores	-	21 900	200	-

Tabla 20: Modelos y precios de termochimenea e intercambiadores de Lizara.

que cuando el perfil de ACS se introduce en el consumo eléctrico del refugio debido a la electrificación de la caldera, este es introducido como una carga programable, es decir, se introducen los valores diarios de consumo de ACS y el programa gestiona, en función de los flujos energéticos, el mejor momento de aportar esa energía. Esta acción se considera más cercana a la situación real puesto que el agua caliente sale del acumulador y es posible mantener el agua a una temperatura durante un cierto tiempo.

En cuanto al perfil de demanda de calefacción, este se ha basado en un perfil extraído del programa HOMER Pro (versión 3.11.6, 2018) para una caldera de la potencia de la instalada en el refugio y posteriormente se ha modificado a partir de ciertos patrones de comportamiento y consumos aportados por los guardas durante las entrevistas, además de bibliografía sobre la temática [1]. Así, finalmente, se ha obtenido el perfil de consumo térmico de calefacción mostrado en la Figura 35. Por último y en cuanto al perfil de consumo de la chimenea inicial y la termochimenea final (se ha considerado el mismo para ambos) no se han encontrado datos bibliográficos ni documentación profunda por lo que, a partir de datos de consumo de madera y el conocimiento de las costumbres de los guardas, se ha desarrollado el perfil de consumo mostrado en la Figura 36.

## A.6. Recursos energéticos

Para la generación renovable ha sido necesario introducir la irradiación solar existente en la ubicación así como la temperatura media del mes, ya que esta afectará directamente a la generación fotovoltaica y solar térmica. Puesto que no existe una base de datos en el refugio que permita conocer ambos parámetros *in situ*, estos han sido extraídos de la base de datos PVGIS, desarrollada por el *European Commission Joint Research Centre* [18] y que permite el conocimiento de varios parámetros ambientales como los solicitados. Los datos solicitados como *inputs* en HOMER son datos mensuales de irradiación diaria y temperatura para un día medio de cada mes si bien, en el programa desarrollado en EES para el cálculo de generación térmica ACS, los valores introducidos son horarios para un día medio de cada mes. Por simplicidad, la Tabla 22 muestra los valores diarios para un día medio de cada mes de irradiación y temperatura y las Figuras 37 y 38 los valores horarios de irradiación y temperatura para un día medio de los meses de abril, julio y diciembre.

## A.7. Combustibles

Tres tipos de combustible son utilizados en el refugio de Lizara: diésel, gas propano y madera. Las propiedades de cada uno de ellos se han obtenido de distintas fuentes, la base de datos por defecto de HOMER para el diésel, las características propias incluidas en la hoja técnica del proveedor para el gas propano [19] y bibliografía para el consumo de



	Altitud [m]	Demanda [l/pers.día]	Tª Demandada [°C]
	1540	24	45

Mes	Tª Red Huesca [°C]	Tª Red Lizara [°C]	Huéspedes [per./día]	Caudal [l/día]
Enero	7,0	-3,6	10	309,1
Febrero	8,0	-2,6	5	162,3
Marzo	10,0	-0,6	13	422,9
Abril	11,0	5,7	6	199,0
Mayo	14,0	8,7	7	239,6
Junio	16,0	10,7	14	473,8
Julio	19,0	13,7	32	1122,5
Agosto	18,0	12,7	34	1183,8
Septiembre	17,0	11,7	18	615,1
Octubre	13,0	2,4	11	365,4
Noviembre	9,0	-1,6	3	88,8
Diciembre	7,0	-3,6	9	268,5

Tabla 21: Parámetros utilizados para el cálculo de la demanda ACS en Lizara.

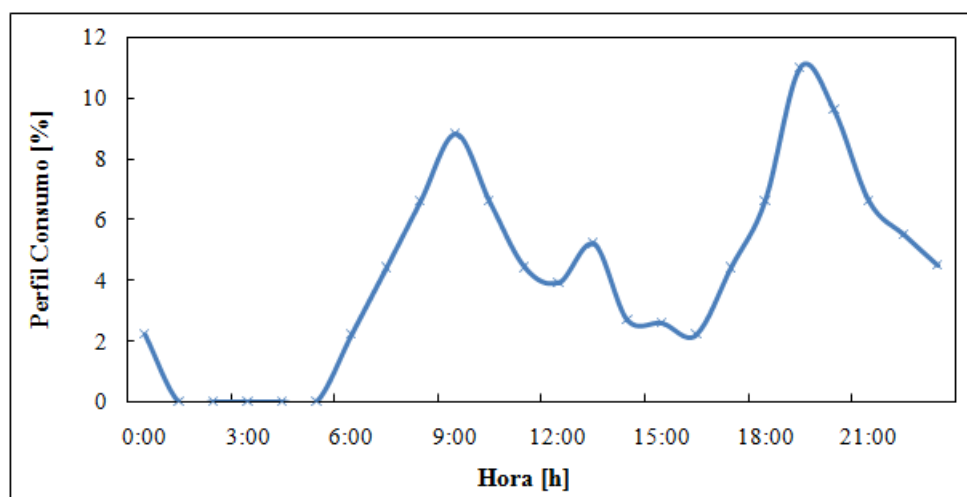


Figura 33: Perfil FF-Chart para el desarrollo de ACS.

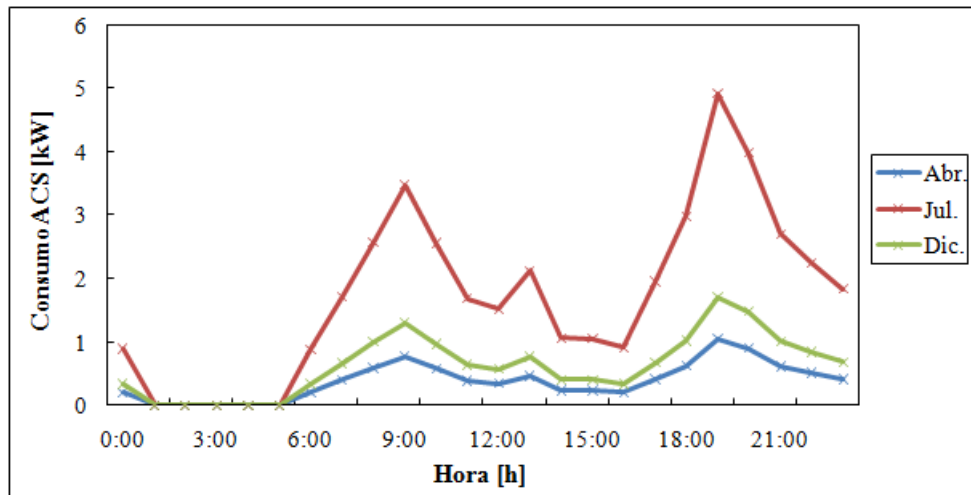


Figura 34: Perfil de consumo ACS en el refugio de Lizara.

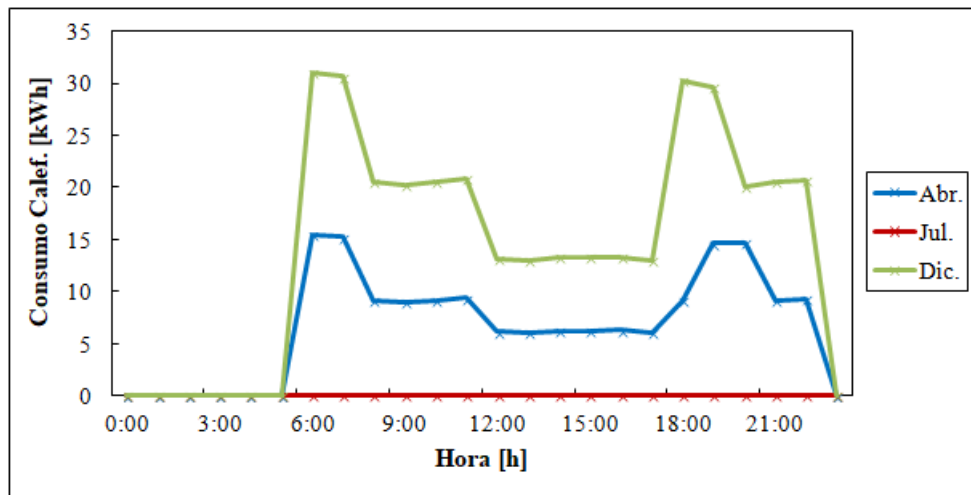


Figura 35: Perfil de consumo de calefacción en el refugio de Lizara.

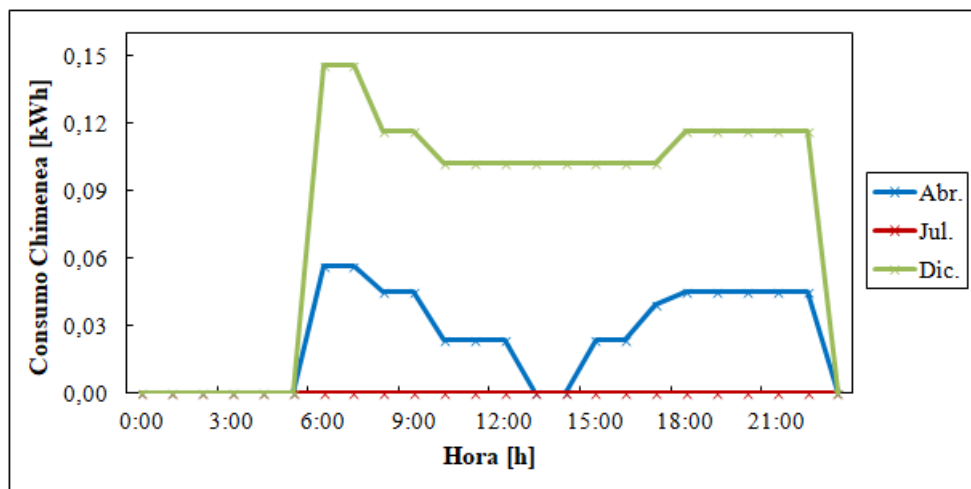


Figura 36: Perfil de consumo inicial de la chimenea en el refugio de Lizara.

Mes	Irradiación Solar [kWh/m <sup>2</sup> d]	Temperatura [°C]
Enero	1,61	-0,3
Febrero	2,39	-2,0
Marzo	3,85	1,7
Abril	4,46	5,0
Mayo	5,67	7,8
Junio	6,60	12,4
Julio	6,87	15,4
Agosto	5,86	15,3
Septiembre	4,51	11,7
Octubre	3,00	8,0
Noviembre	1,83	3,0
Diciembre	1,39	0,8

Tabla 22: Valores de irradiación y temperatura en el refugio de Lizara.

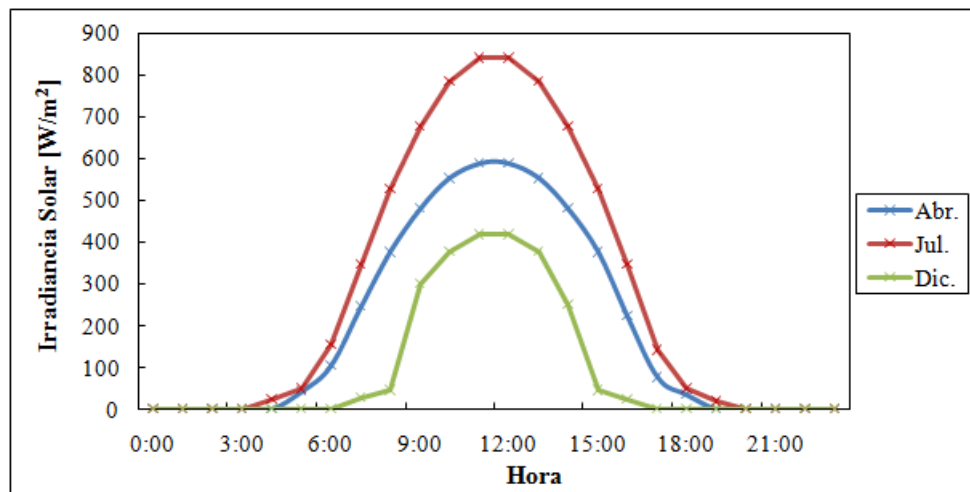


Figura 37: Irradiación horaria en el refugio de Lizara.

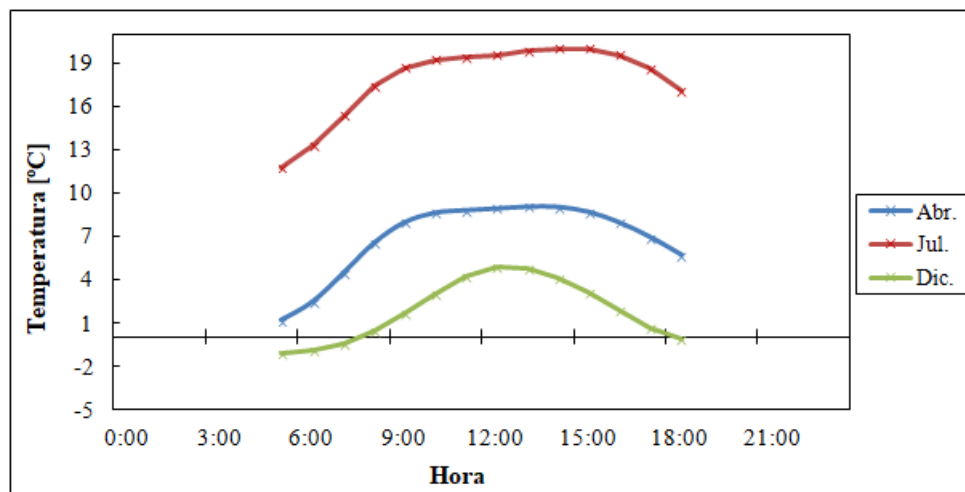


Figura 38: Temperatura horaria en el refugio de Lizara.

madera [20]. En la Tabla 23 se muestran las propiedades de cada uno de los combustibles. Por otro lado, el consumo anual y el precio del combustible se ha podido conocer gracias a diversas entrevistas con los guardas del refugio, debido a que son ellos los encargados de abastecerse y pagar los combustibles. Así, mediante las facturas de los últimos años se ha podido obtener la información mostrada en la Tabla 24, donde se incluyen los valores de precio y consumo de los combustibles al inicio de las modelizaciones, utilizados para la evaluación de los consumos energéticos del refugio.

#### A.8. Otros

Finalmente, otros valores han sido introducidos en el programa HOMER de cara a una mayor aproximación de la modelización a la situación real del refugio. Al ser datos de simulación no han sido consultados ni con los guardas de los refugios ni con la FAM, de modo que se ha seguido el conocimiento del refugio, del *software* y de las modelizaciones para evaluar los valores correctos. La Tabla 25 muestra todos los *inputs* necesarios que no se relacionan con ninguna de las subsecciones anteriores.

Combustible	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Poder Calorífico [MJ/kg]	Contenido en Carbono [%]
Diésel	820,0	43,2	88,0
Gas Propano	502,0	45,2	84,0
Madera	600,0	18,0	-

Tabla 23: Propiedades de los combustibles usados en Lizara.

Combustible	Consumo Anual Aprox.	Precio Final	Proveedor
Diésel	4500/5000 l/año	0,85 €/l	Repsol
Gas Propano	6000 m <sup>3</sup> /año	1,62 €/kg	Repsol
Madera	350 kg/año	0,02 €/kg	Ayuntamiento de Aragües del Puerto

Tabla 24: Precio y consumo de los combustibles usados en Lizara.

Vida útil	[Años]	30
Tasa Anual Equivalente	[ %]	3,0
Capacidad Anual de Escasez	[ %]	0,5
Margen de Carga Horaria	[ %]	10,0

Tabla 25: Otros valores necesarios para la simulación.

## B. Anexo II. Parámetros Bachimaña.

En este anexo se presentan todas aquellas variables consideradas para la modelización de la microrred y que, de un modo u otro, afectan a los resultados obtenidos en el refugio de Bachimaña. Por tanto, se presentan y justifican todos aquellos valores relacionados con costes, eficiencias o recursos renovables que permiten entender en profundidad los análisis realizados.

### B.1. Generadores y caldera diésel

Como se ha comentado anteriormente, el refugio de Bachimaña cuenta con dos generadores diésel de 26,8 kW y 7,9 kW que solamente son utilizados durante los meses en los que la disponibilidad de agua turbinable es muy baja o nula. Aunque la marca de ambos es conocida, Himoina, solo se han podido conseguir los costes de equipo e instalación reales del mayor de ellos, debido a que la factura del generador de 7,9 kW no ha podido ser facilitada por la FAM. Por tanto, los costes del equipo de menor potencia han sido extrapolados a partir del generador de potencia similar instalado en el refugio de Estós, manteniendo el coste de instalación y mantenimiento de la factura del generador de 26,8 kW. En cuanto a otros parámetros como vida útil o costes de O&M, las mismas referencias y evaluaciones que en el caso de los generadores de Lizara han sido utilizadas. Así, la Tabla 26 muestra las características de los generadores diésel del refugio de Bachimaña.

El rendimiento de los generadores diésel se ha calculado de nuevo en función del consumo de diésel especificado en las respectivas fichas técnicas ([21, 22]) y siguiendo el mismo ajuste de rendimiento por altitud especificado previamente en el refugio de Lizara. Las Figuras 39 y 40 presentan el rendimiento de ambos generadores por debajo de mil metros y a la altitud del refugio de Bachimaña. En cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub>, ningún *input* es necesario debido a lo previamente expuesto para el refugio de Lizara.

Por último, la información de la caldera diésel ha sido aportada a este trabajo por la Federación Aragonesa de Montañismo. La caldera es el modelo Vitoplex 300 (115 kW) de la marca Viessmann cuyo único parámetro técnico introducido en HOMER es el rendimien-

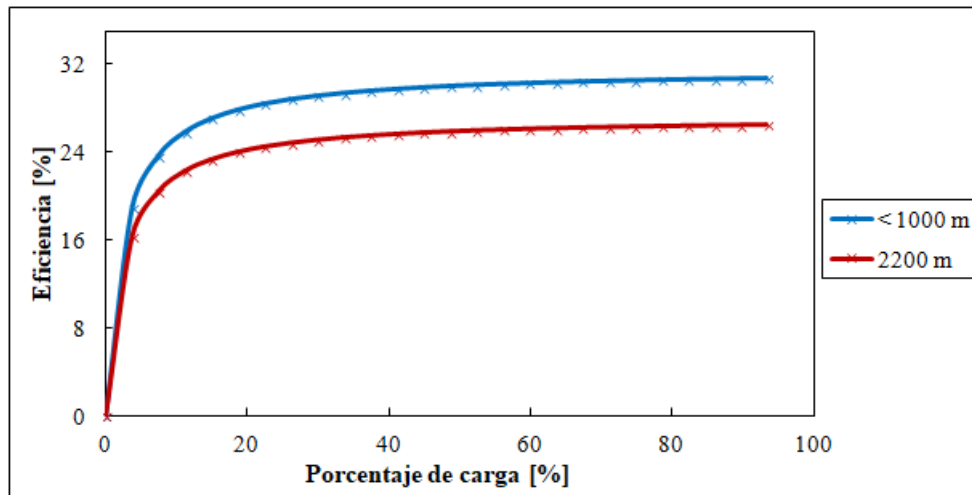


Figura 39: Rendimiento del generador de 26,8 kW instalado en Bachimaña.

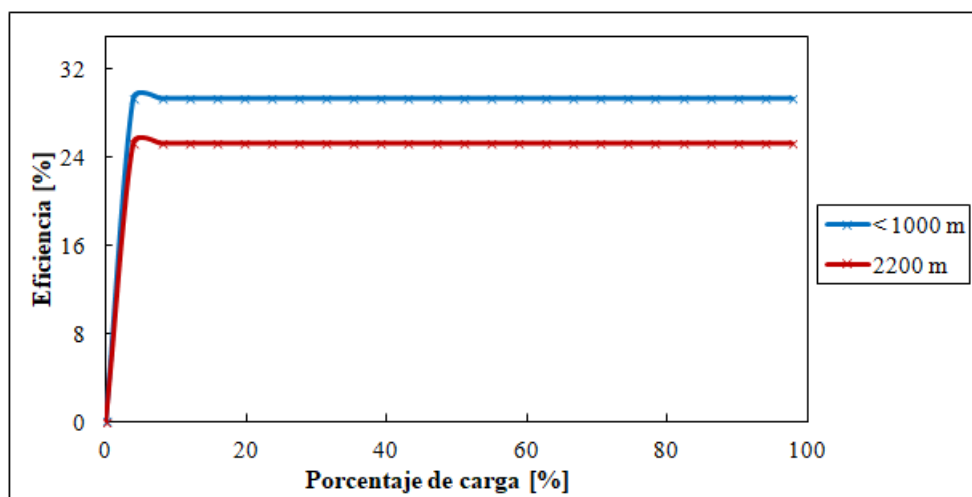


Figura 40: Rendimiento del generador de 7,9 kW instalado en Bachimaña.

to, en este caso, un 90 % [23]. El precio de la caldera se ha obtenido gracias a la factura de instalación aportada a este trabajo por la FAM y, aunque no es una variable del trabajo, se conoce que es de un total de 11 422 €. La vida útil considerada ha sido, por simplicidad, la del proyecto, 30 años.

## B.2. Turbina

La turbina de generación hidroeléctrica de Bachimaña es la mayor fuente de generación del refugio ya que, gracias a sus 30 kW de potencia, permite abastecer un alto porcentaje de la energía del refugio, lo que le aporta unas características únicas de interés para este TFM. Gracias a la generosidad de Fernando Garcés, de la Federación Aragonesa de Montañismo, se ha tenido acceso tanto al proyecto técnico como al presupuesto de la turbina, lo que permite definirla con exactitud en el *software* HOMER. El proyecto está firmado por la empresa Saltos del Pirineo en el año 2006 y tiene un presupuesto total de 105 000 €, si bien este dato no ha sido necesario introducirlo en HOMER puesto que ya está construida y, dado que se ha supuesto una vida útil de 30 años, no sería necesario el reemplazo de esta fuente de generación. El coste de mantenimiento se ha considerado en 50 € anuales basándose en información cualitativa obtenida tras conversaciones con los guardas del refugio.

Así, basándose en la información del proyecto se ha completado la Tabla 27 en la que se muestran las características de la turbina introducidas en HOMER.

## B.3. Baterías e inversor

En cuanto a las baterías instaladas, gracias a la información aportada por los guardas del refugio, se ha podido conocer que son del modelo 12 OPzS 1500 de la marca Hoppecke, cuyas características ya se encuentran introducidas en HOMER. En este caso no se tienen facturas de la inversión realizada en las baterías de este refugio, por lo que se han extrapolado los precios de las baterías instaladas en Lizara, teniendo en consideración que en Bachimaña tienen una mayor capacidad de almacenaje. En cuanto a los costes de mantenimiento y a la configuración en *strings* se mantiene la coherencia con los expresado en la subsección A.2 del refugio de Lizara. La Tabla 28 muestra los valores de coste introducidos para las baterías instaladas en Bachimaña recordando que, aunque están actualmente en buen estado de conservación, se ha propuesto su sustitución para dar coherencia a la configuración y contar su vida útil desde el inicio.

Es importante mencionar que, durante el análisis de la posibilidad de autoabastecimiento

Genset	Potencia [kW]	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€/h]	Vida Útil [h]	CMO [%]
Himoinsa HYW-35 T5	26,80	13 354	12 862	0,22	30 000	30
Himoinsa HLA1-10 T5	7,90	8357	7865	0,14	30 000	30

Tabla 26: Variables utilizadas para los generadores diésel de Bachimaña.

Variable	Unidad	Valor
Generación	-	AC
Cabezal hidráulico	[m]	12
Caudal nominal	[l/s]	280
Mínimo caudal turbinable	[%]	40
Máximo caudal turbinable	[%]	100
Rendimiento nominal	[%]	90
Pérdida en Cabeza de Tubo	[%]	3

Tabla 27: Características de la turbina hidráulica instalada en Bachimaña.

en el refugio, se ha valorado la posibilidad de obtener ese autoabastecimiento mediante el uso de baterías, ya sea de forma individual o complementada con otra tecnología. Así, se ha propuesto la instalación de las baterías Hoppecke 24 OPzS 3000, también incluidas en la base de datos de HOMER. Su precio se ha obtenido a partir de una búsqueda variada de proveedores en internet, el precio de las baterías instaladas en Lizara y un pequeño aumento por instalación basado en otras facturas genéricas del refugio, de forma que se ha asegurado la coherencia en el precio de las baterías. Tanto los costes de O&M como la configuración siguen el razonamiento expuesto en el anterior refugio. De nuevo, la Tabla 28 muestra los valores técnicos y económicos de las baterías propuestas.

En cuanto al inversor, este no es conocido para el caso del refugio de Bachimaña más allá de su potencia nominal, por lo que se han supuesto costes idénticos a los de Lizara. Esta suposición se basa en el hecho de que la marca es la misma puesto que FAM suele abastecerse del mismo proveedor y, aunque el inversor de Bachimaña tiene menos potencia, el transporte al refugio eleva el coste inicial. Por tanto, y en busca de simplicidad, se ha considerado que el precio del inversor de Bachimaña es idéntico al inversor instalado en Lizara. La Tabla 28 muestra los costes del inversor considerado y la Tabla 12 muestra aquellas variables técnicas que han sido tenidas en cuenta.

Tecnología	Marca/modelo	Potencia	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€/año]
Baterías (6 unidades)	Hoppecke 8 OPzS 800	2V 800 Ah (C10)	4100	4100	6
Baterías (6 unidades)	Hoppecke 24 OPzS 83000	2V 3000 Ah (C10)	8500	7800	13
Inversor	Xtender XTH 8000-48	6 kW	6149	5250	0

Tabla 28: Modelos y precios de baterías e inversor de Bachimaña.



#### B.4. Caldera eléctrica y acumuladores

La principal acción propuesta en el refugio de Bachimaña es la instalación de una caldera eléctrica y acumuladores que sustituyan la generación térmica de la caldera diésel por generación térmica mediante electricidad. Como se ha indicado previamente, esta medida ya había sido identificada por la FAM y los guardas del refugio siendo recientemente ejecutada, lo que permite hacer un mejor análisis debido a la posibilidad de acceder a datos y facturas reales.

Así, se ha considerado la instalación de una caldera de 10 kW de la marca Baxi que permite su utilización en tres modos gracias a sus tres resistencias de 3,3 kW [24]. En cuanto a los acumuladores, uno de ellos ya estaba instalado previamente y se plantea la instalación de dos más, todos ellos de la marca Baxi, de 300 litros y resistencias de 2,5 kW cada una, lo que permite mantener la suficiente agua caliente para abastecer al refugio de su consumo térmico.

El modo de dimensionamiento de esta acción, como se ha explicado anteriormente, ha consistido en su inclusión como cargas programables. Estas cargas son consumo eléctrico diario que se introduce en el programa con la consideración de que no responden a la demanda horaria si no que se proveen cuando el balance de energía es positivo, existiendo así un almacenamiento y permitiendo una mayor gestión de la energía puesto que se proveerá a las cargas cuando haya excedente o los generadores tengan posibilidad de trabajar a potencia nominal. Así, los únicos *inputs* solicitados en HOMER son la carga máxima y mínima de la que se dispone, siendo en este caso 17,5 y 2,5 kW respectivamente. En cuanto al almacenamiento energético de los acumuladores, al ser un dato desconocido, se ha supuesto 500 kWh siguiendo el conocimiento general del refugio.

Otro factor importante a tener en cuenta con respecto a las calderas es su precio, ya que supondrá una inversión inicial que será amortizada con el tiempo debido al coste casi nulo de la generación hidráulica. Así, basado en facturas de la instalación aportadas por la Federación Aragonesa de Montañismo, el coste inicial de esta acción es de 11 424 €, incluyendo la caldera, los acumuladores, la instalación y el transporte al refugio.

#### B.5. Almacenamiento de hidrógeno

Una de las soluciones propuestas para el abutobastecimiento de Bachimaña es la instalación de un sistema que permita la generación de hidrógeno y su almacenamiento durante gran parte del año y lo utilice para producir electricidad durante aquellos meses en los cuales no hay energía hidráulica producida. Así, se ha dimensionado un sistema de almacenamiento de hidrógeno compuesto por tres elementos principales: electrolizador, almacenamiento a presión y pila de combustible.

El electrolizador es el encargado de generar el hidrógeno a través de la energía eléctrica sobrante en el refugio por lo que constará de menor potencia para posibilitar un trabajo continuado. El precio considerado para el electrolizador está basado en una oferta real hecha por la empresa Hidrógena Desarrollos Energéticos S.L. a la Fundación Hidrógeno de Aragón por un electrolizador de 3 kW con las características del que haría falta en el refugio. Los costes de O&M se han basado en la misma bibliografía que los de la pila de combustible [25]. Así, aunque HOMER no establece esto como un *input*, se considera que la tecnología de electrolizador necesaria sería PEM (*Proton Exchange Membrane*), debido a la eliminación del uso de un electrolito alcalino, menores temperaturas de trabajo y mayor

pureza del hidrógeno resultante. La oferta ya contaría con un purificador de agua para la fase anterior a la electrólisis. Así, la Tabla 29 muestra los valores de costes estimados para el electrolizador de Bachimaña.

En cuanto a las características técnicas del electrolizador, el rendimiento medio del equipo se ha obtenido de *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos* [26], si bien la vida útil y la carga mínima de operación se han basado en el estudio realizado por Schmidt O. et al. [27]. Con respecto a la temperatura del entorno, esta no debería ser inferior a 12 °C pero, puesto que no es un *input* del programa, solo debería tenerse en cuenta en la etapa de funcionamiento manteniendo la temperatura a través de algún aparato de calefacción. La Tabla 30 muestra las características técnicas del electrolizador consideradas en la evaluación energética de esta tecnología.

Con respecto al sistema de almacenamiento de hidrógeno a presión en Bachimaña, se ha escogido una solución en forma de *racks* de hidrógeno a 200 bar de presión que permitiría disminuir el espacio de almacenamiento sin recurrir a grandes presiones (400 o 700 bares) que implicarían una tecnología más costosa y problemática. El coste de esta tecnología se ha basado, de nuevo, en información aportada por la Fundación Hidrógeno de Aragón y contaría, además, con un coste extra de alrededor de 10 000 € en un compresor, coste sumado a la inversión inicial. El gasto en O&M de los *racks* de hidrógeno considerados es, principalmente, el mantenimiento del compresor, si bien el valor introducido ha sido el equivalente para un solo *rack* de hidrógeno. La Tabla 29 muestra los costes introducidos en el *software*.

Por otro lado, y buscando una mayor simplicidad, la vida útil de los *racks* se ha considerado la del proyecto (Tabla 30). Por último, es importante mencionar que para la parte del almacenamiento deben ser tenidos en cuenta una serie de factores de seguridad e impacto visual que en este proyecto no se han tenido en cuenta por ser una evaluación técnica. Como se ha mencionado durante la memoria, la cantidad necesaria de hidrógeno en Bachimaña coloca la instalación en nivel 4 del *Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias* [9], por lo que una serie de actuaciones en el ámbito de la seguridad deberían ser ejecutadas. En cuanto al impacto visual, este también podría suponer un inconveniente, si bien esta interpretación se ha dejado fuera del objetivo de este proyecto.

Por último, en cuanto a la pila de combustible, diversos parámetros tanto técnicos como económicos han sido tenidos en cuenta suponiendo que la tecnología, debido a los argumentos previamente expuestos para el electrolizador, sería PEM. Así, los costes de la FC han sido extraídos del estudio *Fluid Management component improvement for Back up fuel cell systems* [25], realizado como parte del proyecto FlumaBack FCH-JU, donde se presenta un rango de coste de la tecnología que, en función del conocimiento del estado del arte actual, ha sido ajustado para este trabajo. La Tabla 29 muestra tanto los valores de inversión inicial (incluyendo el precio del transporte al refugio e instalación), como los de reemplazamiento y O&M, basados en la misma referencia.

En cuanto a diversos parámetros técnicos, la temperatura de trabajo y la carga mínima de operación de la pila se han obtenido de la ficha técnica de una FC de características similares [28] y la vida útil de la pila se ha basado en el informe *PEMFC Lifetime and Durability, an overview* [29] presentado por la empresa de pilas de combustible NedStack. Los parámetros introducidos se muestran en la Tabla 30.

Como en el caso de los generadores diésel, el rendimiento de la pila no es un valor cons-

tante si no una función de trabajo a distintas cargas. Basándose de nuevo en la ficha técnica de la pila de combustible de la marca Hydrogenics [28], se ha desarrollado la función de rendimiento de una pila de combustible de la potencia demandada, como se muestra en la Figura 41. Por otro lado, manteniendo el paralelismo con los generadores diésel, se ha analizado la dependencia de la potencia de salida de la FC en función de la pérdida de presión por altitud, que provoca la existencia de una menor concentración de oxígeno. Utilizando como referencia el informe *Computer model updated* [30] realizado por el proyecto FlumaBack FCH-JU en el que se analiza el funcionamiento de pilas de combustible en función de diversos parámetros, se ha podido analizar la dependencia de la potencia de salida con respecto a la altitud en el caso del refugio de Bachimaña, obteniendo así la Figura 42, en la que se muestra que la pérdida de potencia para los fines de este proyecto no es significativa a 2200 metros (0,8 atm.) y, por tanto, no es necesario tenerla en cuenta.

### B.6. Perfiles de consumo

Como en el caso del refugio de Lizara, en el análisis de Bachimaña también se han evaluado y desarrollado perfiles de consumo horarios. En este caso el proceso seguido ha sido el mismo que en el refugio de Lizara, por lo que no se expone la evaluación de los perfiles al haber sido previamente comentada. Como en el caso anterior, el perfil eléctrico ha sido medido en el refugio mediante un *data logger* instalado por la Fundación Hidrógeno Aragón, el perfil de calefacción mediante el perfil de HOMER Pro, entrevistas con los guardas y bibliografía [1] y el perfil de ACS mediante el trabajo realizado en la asignatura Ampliación de la Energía Solar y el Código Técnico de Edificación. Tras la implementación de la mejora, tanto calefacción como ACS pasan a formar parte del consumo eléctrico si bien lo hacen como consumo programable.

La única diferencia con el caso de Lizara es el consumo eléctrico del refugio, mucho mayor que en el caso anterior. Esto es debido al uso y costumbre de los guardas que, si bien la calefacción y el ACS se genera mediante la caldera diésel, evitan al máximo ponerla y, en la medida de lo posible, calientan el refugio mediante estufas eléctricas que permiten reducir el consumo de diésel. Este es el motivo por el que el perfil eléctrico del refugio de Bachimaña no guarde relación con el del refugio de Lizara.

Así, tras lo anteriormente mencionado, la Figura 6 muestra el perfil eléctrico de Bachimaña, la Figura 43 el perfil de calefacción y la Figura 44 el perfil de ACS, mostrándose el consumo térmico total en la Figura 7. Así, la Tabla 31 muestra los parámetros utilizados para el cálculo del consumo de ACS basados en el Código Técnico de Edificación.

Tecnología	CAPEX [€]	Reemplazo [€]	O&M [€]
Electrolizador	50 000	45 000	300,00 €/año
Almacenamiento	10 500	9200	20,00 €/año
Pila de combustible	22 000	20 000	0,29 €/hora

Tabla 29: Costes del almacenamiento de hidrógeno en Bachimaña.

Tecnología	Generación	Vida Útil	Eficiencia [%]	CMO [%]
Electrolizador	DC	15 años	60	10
Almacenamiento	-	35 años	-	-
Pila de combustible	DC	50 000 horas	-	20

Tabla 30: Características técnicas del almacenamiento de hidrógeno en Bachimaña.

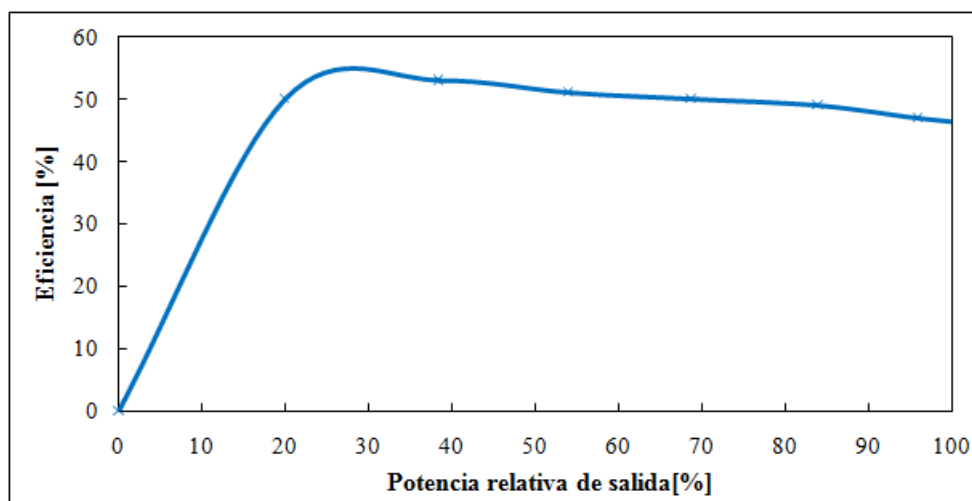


Figura 41: Rendimiento de una pila de combustible en función de su potencia de salida.

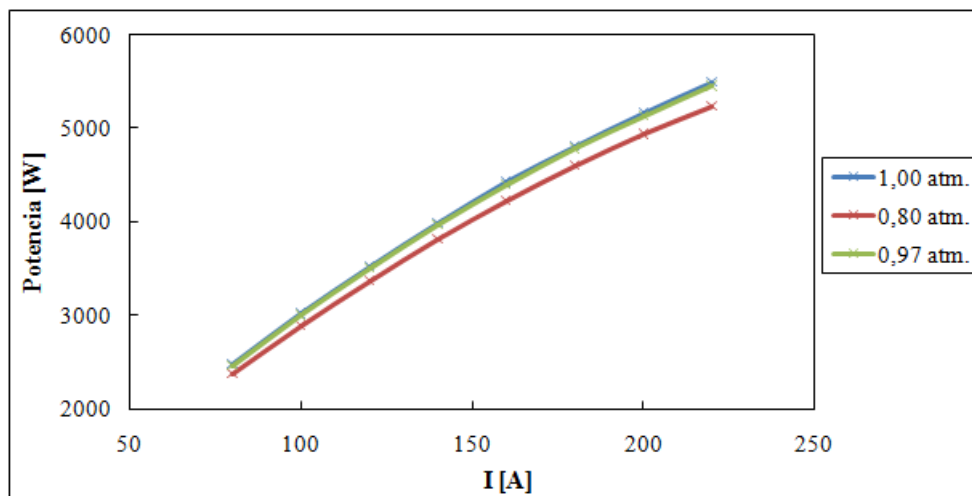


Figura 42: Pérdida de potencia por pérdida de presión en pilas de combustible.

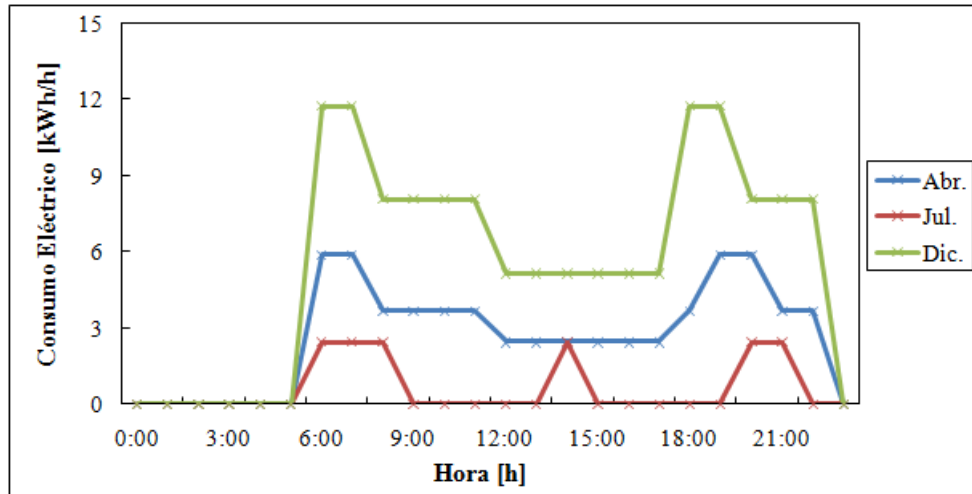


Figura 43: Perfil de consumo de calefacción en el refugio de Bachimaña.

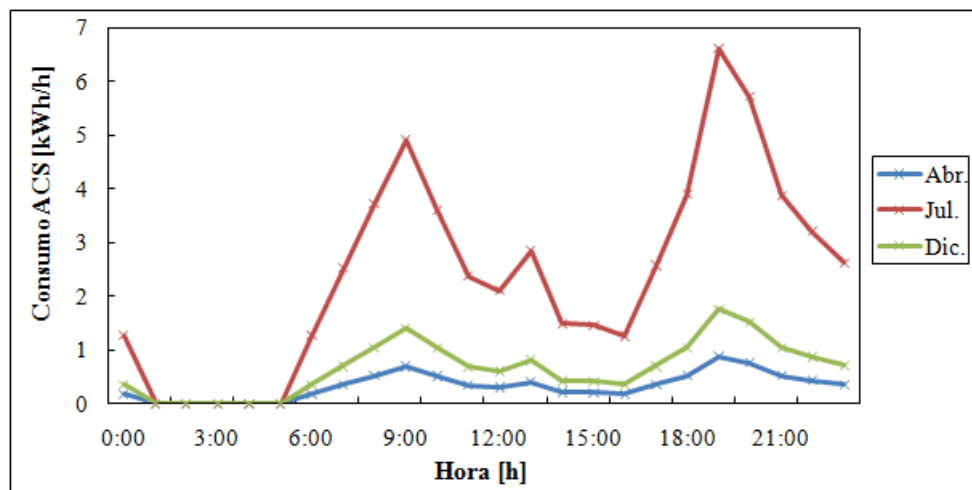


Figura 44: Perfil de consumo de ACS en el refugio de Bachimaña.

	Altitud [m]	Demanda [l/pers.día]	Tª Demandada [°C]		
	2200	24	45		
Mes	Tª Red Huesca [°C]	Tª Red Bachimaña [°C]	Huéspedes [per./día]	Caudal [l/día]	
Enero	7,0	-10,2	3	117,2	
Febrero	8,0	-9,2	4	144,5	
Marzo	10,0	-7,2	10	321,0	
Abril	11,0	2,4	4	159,0	
Mayo	14,0	5,4	5	183,6	
Junio	16,0	7,4	14	492,5	
Julio	19,0	10,4	41	1420,8	
Agosto	18,0	9,4	55	1902,9	
Septiembre	17,0	8,4	21	743,3	
Octubre	13,0	-4,2	17	561,8	
Noviembre	9,0	-8,2	3	114,9	
Diciembre	7,0	-10,2	8	248,1	

Tabla 31: Parámetros utilizados para el cálculo de la demanda ACS en Bachimaña.

### B.7. Recursos energéticos

En el caso de los recursos energéticos disponibles para el refugio de Bachimaña solamente ha sido necesario introducir el caudal de agua turbinable puesto que, al no tener instalada tecnología solar térmica o fotovoltaica, la temperatura no afecta a ningún proceso energético del refugio.

En este caso, y debido a que no existen ningún tipo de medidas experimentales de caudal turbinado o turbinable en el refugio, se ha procedido a una evaluación cualitativa de este parámetro. Como se explica en la memoria, se ha supuesto, por simplicidad, que durante 10 meses al año el caudal disponible es suficiente para que la turbina hidroeléctrica pueda generar a potencia nominal, existiendo un periodo de dos meses (abril y mayo) en los cuales el caudal turbinable es nulo o muy bajo. Por tanto, se ha considerado que el caudal turbinable durante 10 meses es aquel que permite generación a potencia nominal, siendo 0 los dos meses sin posibilidad de turbinar. Esta distribución, aunque no deja de ser una aproximación, se asemeja bastante a la situación real puesto que la regulación de la generación de la turbina depende más de la disponibilidad de agua turbinable que del caudal en sí. La Figura 45 muestra la distribución de caudal introducida en la simulación.

### B.8. Combustibles

En el refugio de Bachimaña el único combustible fósil utilizado es el diésel consumido tanto para la generación eléctrica como para la generación térmica. Las características de este combustible, como en el caso de Lizara, ya están incluidas en la base de datos de

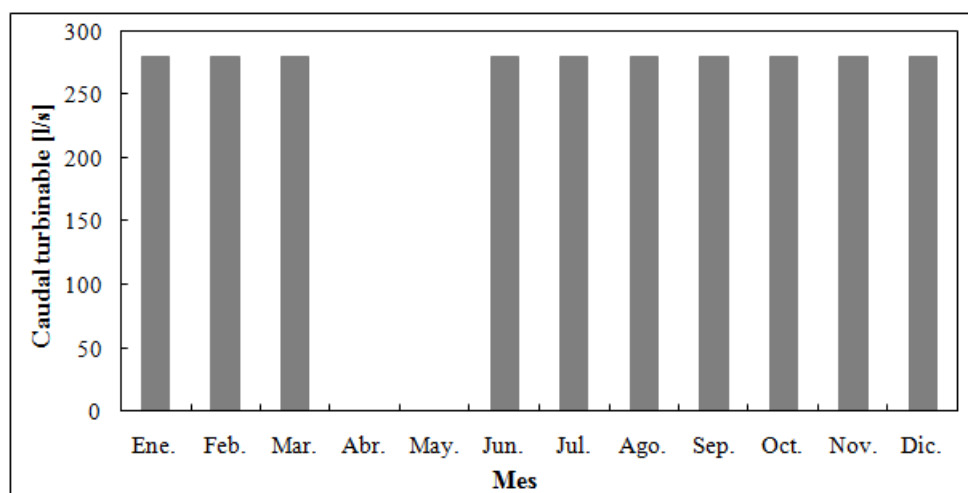


Figura 45: Recurso hidráulico del refugio de Bachimaña.

HOMER y especificadas en la Tabla 23. En cuanto a su coste, no se ha podido conocer el proveedor del combustible pero, a través de entrevistas con los guardas del refugio, se ha estimado el consumo anual antes de la instalación de la caldera eléctrica así como el precio del combustible, ambos datos mostrados en la Tabla 32. Es importante mencionar que el precio del combustible es algo más alto que en el refugio de Lizara debido a que tiene que ser transportado en helicóptero hasta el refugio, lo que supone un sobrecoste de 300 € por cada 800 litros de combustible, suponiendo un complemento unitario extra de 0,38 €/l.

### B.9. Otros

Por último, como en el caso del refugio de Lizara, se han introducido una serie de parámetros en la modelización que, si bien no tienen correspondencia directa con el refugio, son importantes para la simulación. Así, igual que en el refugio anterior, la Tabla 25 muestra los parámetros introducidos que no tienen relación con ninguna subsección de las previamente desarrolladas.

Combustible	Consumo Anual Aprox.	Precio Final	Proveedor
Diésel	5000/5500 l/año	1,28 €/l	-

Tabla 32: Precio y consumo del diésel usado en Bachimaña.

## **C. Anexo III. Otros resultados.**

En este anexo se muestran aquellos resultados que, aunque no se consideran especialmente aclaratorios para ser introducidos en la memoria, presentan resultados analizados y relacionados con los análisis llevados a cabo en los refugios.

### **C.1. Optimización en función de la inclinación de los paneles fotovoltaicos**

En las Figuras 46 y 47 se muestra la variación del NPC con respecto a la potencia PV instalada en función de distintos grados de inclinación de los paneles.

### **C.2. Optimización en función del precio del diésel**

En las Figuras 48 y 49 se muestra la variación del NPC con respecto a la potencia PV instalada en función de distintos precios del diésel consumido.

### **C.3. Optimización en función del precio PV**

En las Figuras 50 y 51 se muestra la variación del NPC con respecto a la potencia PV instalada en función de distintos precios de la tecnología fotovoltaica.



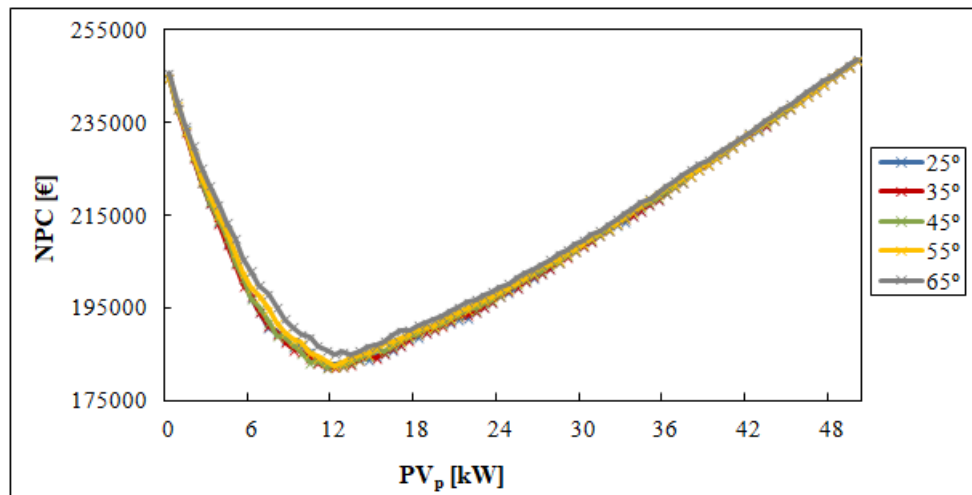


Figura 46: Optimización de la inclinación PV para ACS con caldera de propano.

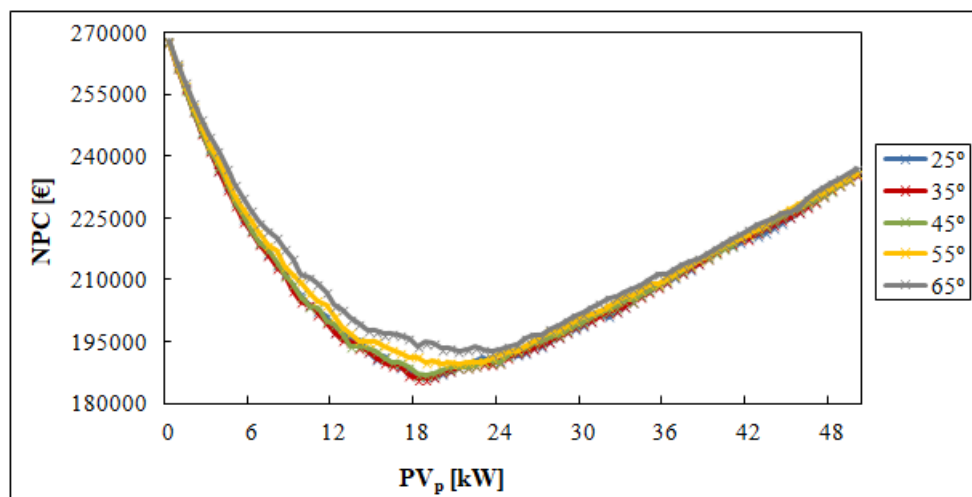


Figura 47: Optimización de la inclinación PV para ACS con caldera eléctrica.

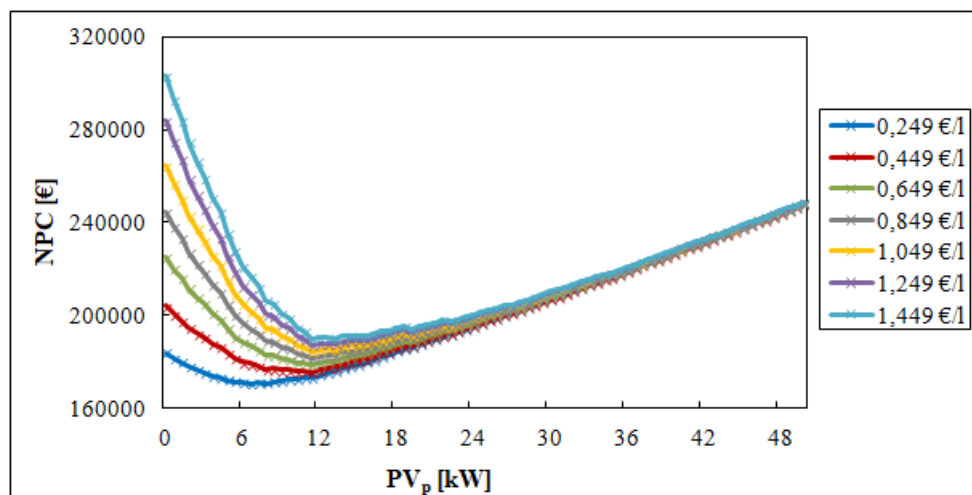


Figura 48: Configuración más óptima en función del precio del diésel («Cald.»).

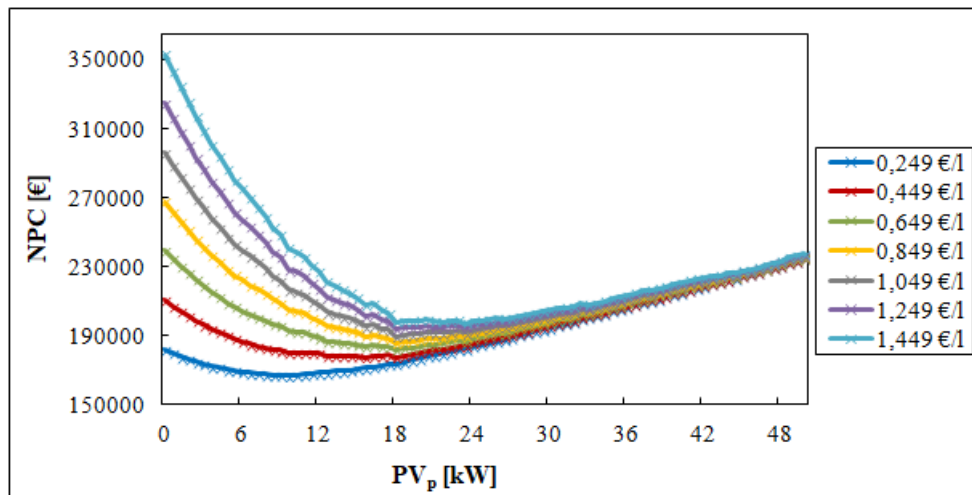


Figura 49: Configuración más óptima en función del precio del diésel («Elect.»).

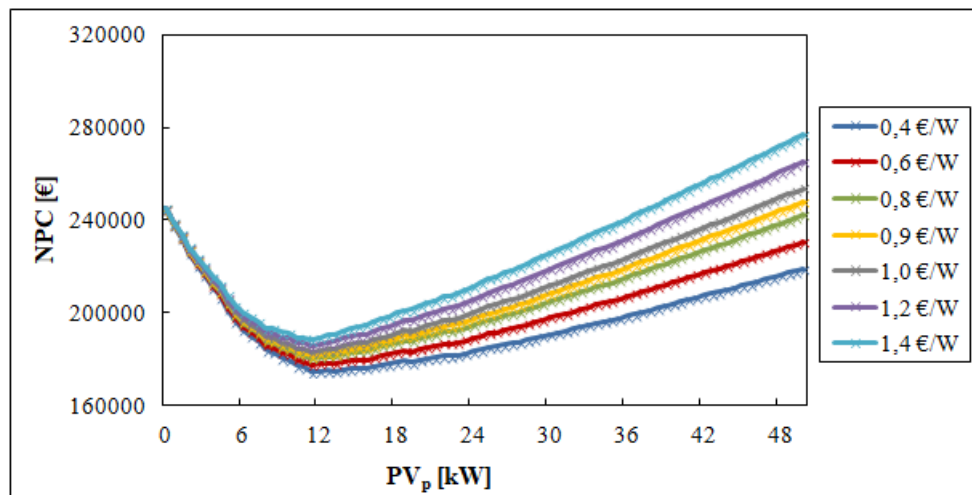


Figura 50: Configuración más óptima en función del precio PV («Cald.»).

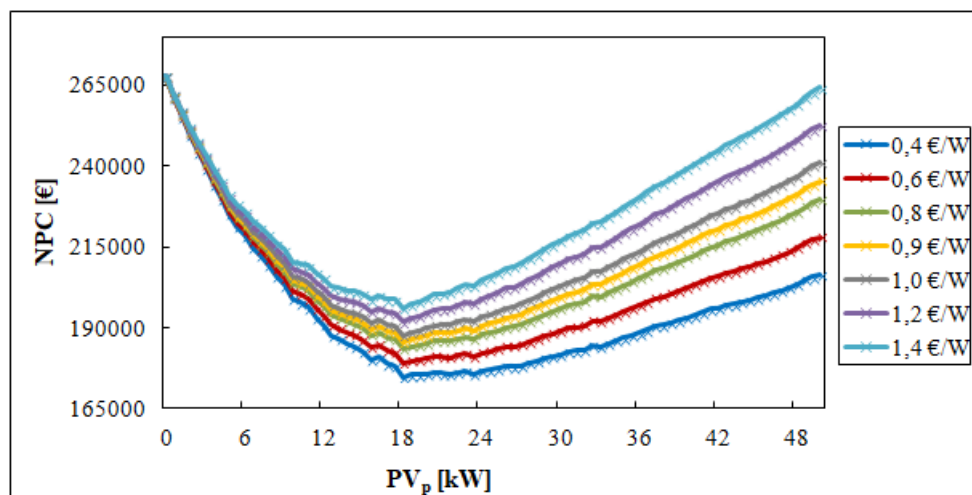


Figura 51: Configuración más óptima en función del precio PV («Elect.»).