



Proyecto Trabajo Final De Grado

**ESTUDIO DE
OPTIMIZACIÓN DE LA
ALIMENTACIÓN
ELÉCTRICA A UN REFUGIO
DE MONTAÑA**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

**AUTOR : PEDRO GIL CORRÉN
DIRECTOR: RODOLFO DUFO LÓPEZ
06/01/2015**



TFG RESUMEN

El trabajo desarrollado ha consistido en el análisis y optimización de la alimentación eléctrica del refugio de montaña de Respomuso, en el Pirineo Oscense. Dado que es un sistema aislado de la red, la alimentación eléctrica puede realizarse mediante fuentes renovables (fotovoltaica, eólica, minihidráulica), generador diésel y almacenamiento energético en baterías. El sistema actual consta de una microcentral hidroeléctrica, generador diésel, paneles fotovoltaicos y baterías. Existen infinidad de combinaciones de sistemas que pueden cubrir el consumo eléctrico, siendo el objetivo fundamental de este trabajo la obtención del sistema económico óptimo (menor coste neto actualizado de la energía generada). La simulación del sistema actual así como la optimización y los análisis de sensibilidad se han realizado mediante el software iHOGA.

Los gráficos de consumo por horas se han realizado a partir de los datos facilitados por el refugio y posteriormente se ha realizado la simulación de la situación actual de la alimentación eléctrica del refugio, que luego se compara con simulaciones de otras combinaciones de sistemas para estudiar la rentabilidad y buscar el óptimo.

Se han estudiado diferentes casos de optimización de la alimentación eléctrica del refugio, añadiendo paneles fotovoltaicos, baterías, un aerogenerador o combinaciones entre ellos.

Finalmente, se llega a la conclusión que la mejor opción (óptimo económico) implica añadir un aerogenerador a la situación actual, obteniéndose un importante ahorro de gasoil y un precio del kWh generado significativamente menor. Se han realizado varios análisis de sensibilidad para ver el efecto de la variación de las variables más importantes en el sistema. Se propone también en el proyecto una optimización de energía para calentar el agua caliente sanitaria que supone un gran ahorro tanto energético como económico.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 SITUACIÓN.....	3
1.3 PROGRAMA iHOGA	3
2. ENERGÍAS RENOVABLES	4
2.1 FOTOVOLTAICA	4
2.2 ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS.....	5
2.3 MINIHIDRÁULICA.....	5
2.4 EÓLICA	5
3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DEL ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO.....	6
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL REFUGIO	6
3.2 SISTEMA ACTUAL.....	8
4. ALTERNATIVAS PROPUESTAS. CASOS DE ESTUDIO.....	10
4.1 ALTERNATIVAS	10
4.2 CASOS DE ESTUDIO	10
4.2.1 Situación actual	11
4.2.2 Aumento del número de paneles solares	13
4.2.3 Aumento del número de paneles solares y el número de baterías.....	15
4.2.4 Instalación de un aerogenerador en el sistema.....	17
4.2.5 Predimensionado	19
5. AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE APROVECHAMIENTO DEL EXCESO DE ENERGÍA.....	21
7. CONCLUSIONES.....	25
8. BIBLIOGRAFÍA	26
9. ANEXOS	26



1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es el estudio de la optimización de la alimentación eléctrica a un refugio de montaña, concretamente al refugio de Respomuso en el pirineo Oscense. En dicho refugio no hay posibilidad de conexión eléctrica por lo que la instalación es aislada.

Actualmente el refugio se alimenta eléctricamente mediante una microcentral hidráulica, la cual deja de funcionar en los meses de invierno debido a la congelación del barranco de donde proviene el agua a la misma, un grupo electrógeno, un banco de 24 baterías de plomo-ácido y 12 paneles solares fotovoltaicos. Se estudiarán diferentes situaciones para la alimentación energética del refugio de la mayor eficiencia y menor coste posible. Para ello estudiaremos la rentabilidad del sistema combinando diferentes posibilidades añadiendo paneles fotovoltaicos, baterías y un aerogenerador.

1.2 SITUACIÓN

El refugio de Respomuso se encuentra en el pirineo oscense, término municipal de Sallent de Gállego, provincia de Huesca. Se sitúa a orillas del ibón con el mismo nombre.

LATITUD: 42,82º

LONGITUD: -0,29º

ALTURA: 2200m

1.3 PROGRAMA iHOGA

Para realizar el estudio de optimización se utilizará el software iHOGA [1]. El programa realiza la simulación horaria del funcionamiento de las distintas combinaciones de componentes y ordena las diferentes alternativas según los costes

totales del sistema a lo largo de su vida útil, trasladados o actualizados al momento inicial de la inversión (Valor Actual Neto, VAN).

2. ENERGÍAS RENOVABLES

2.1 FOTOVOLTAICA

Los módulos fotovoltaicos están formados por células fotovoltaicas que captan los fotones transmitidos por la radiación solar para transformarlos en una corriente continua de electrones, es decir, en electricidad [2].

Los módulos se colocan en serie y/o paralelo. La orientación de los paneles viene definida por el ángulo de acimut α (Figura 2.a) y por el ángulo de inclinación (Figura 2.b). El acimut óptimo en el hemisferio norte es 0° (orientación sur) y la inclinación óptima en sistemas aislados (para maximizar la producción en el peor mes, que en nuestro entorno es Diciembre) suele ser la latitud + 15 o 20° (unos 55 o 60° en Aragón).

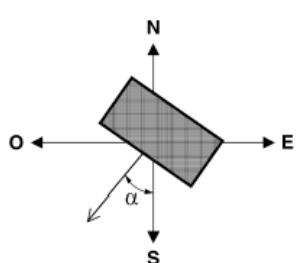


Figura 2.a

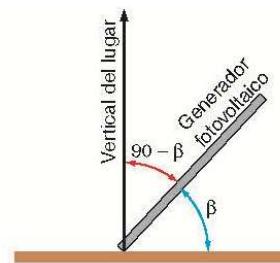


Figura 2.b

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La radiación global está compuesta por la radiación directa, la difusa y la reflejada (albedo). La radiación global es la que interesa conocer en las aplicaciones fotovoltaicas, pudiendo obtenerse de la web de la NASA Surface meteorology and solar energy [3].



2.2 ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS

Debido a la disponibilidad y aleatoriedad de la radiación solar y el viento, la energía instantánea producida por los paneles fotovoltaicos y por los aerogeneradores en muchas ocasiones no coincide con la energía requerida por las cargas del sistema. Se necesita un dispositivo que acumule la energía cuando se genere más de la que se consume, y que ceda la energía acumulada cuando la demanda sea mayor a la producción [4].

Para realizar este balance de energía en el sistema se utilizan las baterías o acumuladores. Las hay de varios tipos, aunque para sistemas aislados los más comunes son los acumuladores de plomo-ácido y las baterías de ion de litio. Debido al elevado precio de las segundas, y a que todavía están en desarrollo, las más utilizadas para instalaciones aisladas son los acumuladores de plomo-ácido.

2.3 MINIHIDRÁULICA

La energía mini hidráulica se genera utilizando la energía cinética y potencial del agua provocada por la gravedad, aprovechando los desniveles de los ríos o generando estos desniveles de manera artificial mediante presas [5]. El agua es canalizada por tuberías hasta una turbina, la cual transforma la energía cinética del agua en electricidad. Se suele considerar centrales minihidráulicas las que tienen una potencia instalada inferior a los 10 MW.

Se consideran microcentrales si la potencia generada es menor de 100 kW. Generalmente, son instalaciones que deben satisfacer las necesidades de núcleos aislados tales como granjas, chalets, refugios de montaña o similares.

2.4 EÓLICA

La energía eólica es una fuente de energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para la obtención de dicha energía es a través de aerogeneradores [6]. Estos consisten en un generador eléctrico que es movido por una turbina, la cual posee unas aspas que son movidas por la energía cinética del viento.



Los inconvenientes principales son el ruido que producen los aerogeneradores durante su funcionamiento y la baja previsibilidad del viento.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DEL ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL REFUGIO

El refugio, que está abierto todo el año, cuenta con 90 plazas. Se distribuyen en varias habitaciones con baño independiente. Además cuenta con un bar, un gran salón y cocina.

Se facilita más información acerca del refugio Respomuso en el **Anexo I**.

En cuanto a los consumos, datos proporcionados por el propio refugio, son los siguientes:

- 6 acumuladores de calefacción → 2000 W cada uno.
- Cámara de mantenimiento (5,7°C) → 900 W
- Termo de agua caliente para la cocina → 1500 W
- 3 refrigeradores (helados y pequeñas comidas), que solo funcionan en los meses más calurosos de verano → entre 150 – 200 W cada uno.
- Cámara de congelado (-19,7°C) → 1000 W
- Lavadora y secadora → 2000W cada una
- Microondas → 1000W
- Luz → 1000 W

El mayor consumo es el de los acumuladores de calefacción, ya que son 6 de 2000 W cada uno. Se suelen cargar a determinadas horas de la mañana y mediodía cuando no hay casi afluencia de gente en el refugio, para que posteriormente suelten el calor a final de la tarde que es cuando empieza a llegar la gente al refugio para pasar la noche. Funcionan durante los meses de invierno.

Hay otros consumos que son bastante relativos, como el microondas que se enciende unos pocos minutos, la lavadora y la secadora o las cámaras frigoríficas que se conectan y desconectan para mantener la temperatura deseada.

Con los datos suministrados por los responsables del refugio se ha obtenido la curva de demanda de energía eléctrica para los distintos días típicos (entre semana y fin de semana) y para los distintos meses del año. La energía total demandada es de 13415 kWh/año.

Los siguientes gráficos nos muestran como varían los consumos. En el gráfico 3.1 podemos observar los consumos a lo largo de tres días de invierno. Se observa un aumento de consumo en el tercer día, el 15 de enero, causado por el aumento de afluencia de gente en el refugio durante el fin de semana.

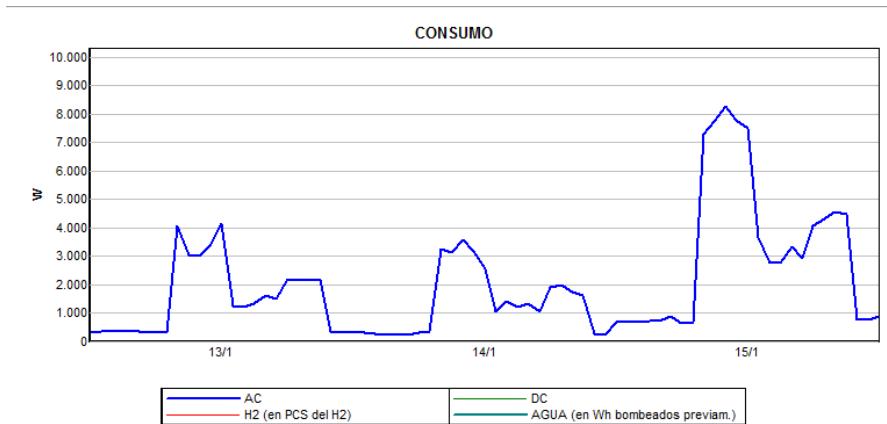


Gráfico 3.1

En el gráfico 3.2 se observan los consumos de tres días de verano. La cantidad de energía consumida es menor ya que los acumuladores, que es el mayor gasto energético, están parados. Se observa, en el día 5 de junio, que al igual que sucede en los meses de invierno, hay aumento de consumo debido al fin de semana.

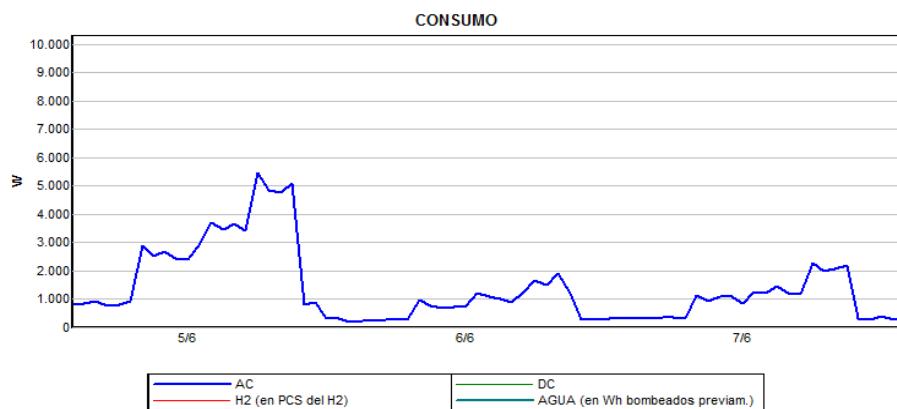


Gráfico 3.2



3.2 SISTEMA ACTUAL

Actualmente para la alimentación eléctrica el refugio cuenta con los siguientes elementos. Se puede encontrar más información en el **Anexo II**:

- **Micro central hidráulica**

Situada en una pequeña caseta bajo el refugio. El agua para el abastecimiento de la turbina es canalizada desde un barranco adyacente al refugio hasta la turbina.



Foto A.2.1

La diferencia de alturas desde donde es captada el agua hasta la turbina es de 60m, con un caudal entrante medio de 60 l/s.

La turbina es de tipo Pelton, la cual tiene acoplado un generador síncrono trifásico de 24 kW para producir la electricidad.

- **Grupo electrógeno**

Solo se enciende en los meses de invierno, cuando la microcentral está inutilizada debido a que las bajas temperaturas congelan el barranco.

La potencia de dicho generador es de 40 kVA. Utiliza combustible diésel para su funcionamiento.

- **Banco de baterías de plomo-ácido**

Se dispone en una pequeña habitación del refugio un banco de 24 baterías de plomo-ácido OPZS (placas tubulares, optimizadas para aplicaciones



solares) conectadas en serie. El modelo de baterías es Batería solar Hawker - Powersafe TYS-8 8OPZS, capacidad nominal de 1220Ah a C100, 2V de tensión nominal.

Al haber 24 baterías en serie, el conjunto suministra 48 V, siendo la capacidad total de 1220 Ah, equivalente a 58,56 kWh.

- **Paneles fotovoltaicos**

El refugio actualmente cuenta con 12 paneles (6 grupos en paralelo de 2 en serie) colocados en el balcón del refugio como se muestra en la figura 3.1. Están enfocados hacia el sur, es decir, con acimut 0º, y una inclinación de 60º. Dicho dimensionamiento se realiza para el mes más desfavorable, que en nuestro caso es Diciembre.



Figura 3.1

La potencia pico fotovoltaica instalada es $195 \times 12 = 2340$ Wp.

Dichos paneles necesitan de un soporte para ser colocados. Para realizar las simulaciones se ha añadido el precio de los soportes al precio de los paneles.

- **Inversor y regulador de carga**

El inversor utilizado en el refugio hace funciones de inversor y de cargador. Su función es convertir la corriente continua (DC) proveniente de las baterías y de los paneles fotovoltaicos a corriente alterna (AC). Como también tiene funciones de cargador, controla la carga y descarga de las baterías.



4. ALTERNATIVAS PROPUESTAS. CASOS DE ESTUDIO

4.1 ALTERNATIVAS

En la alimentación eléctrica del refugio hay que distinguir dos situaciones diferentes. En la primera, que se da en los meses más cálidos, obtenemos toda la energía eléctrica de la microcentral, con un poco de aportación de los paneles fotovoltaicos. Cabe destacar que la micro turbina está sobredimensionada, generando mucha más energía de la necesaria. Por otro lado, la segunda situación se produce en los meses más fríos (desde Noviembre hasta Febrero, ambos inclusive), en los que el torrente de agua que abastece a la microturbina se congela, dejando a esta completamente inutilizada. La energía necesaria para el abastecimiento del refugio durante los meses de invierno proviene de los paneles solares fotovoltaicos y, en mayor medida, del grupo electrógeno, conllevando un gran gasto económico debido al precio del gasoil. Para las simulaciones hemos tenido en cuenta un precio de 1,57 €/l, ya que al precio base que hemos tomado de 1,30 €/l hay que añadirle el coste de transporte de helicóptero, que aumenta el coste en 0,27 €/l. Se detalla más información acerca del precio del combustible en el **Anexo III**.

Las alternativas que se estudian para intentar reducir el uso del grupo electrógeno, y por tanto el consumo de diésel es la utilización de energías renovables. Se estudiarán medidas como el aumento de paneles fotovoltaicos y de baterías así como la posibilidad de la instalación de un aerogenerador (en el refugio suele haber un viento fuerte y constante).

4.2 CASOS DE ESTUDIO

En primer lugar hemos simulado la situación actual del refugio, que luego compararemos con los diferentes casos estudiados para ver si hemos conseguido la optimización del sistema.

4.2.1 Situación actual

12 paneles solares (potencia pico total de 2340 Wp), 24 baterías (capacidad de almacenamiento de 58,56 kWh) y la micro turbina de 24 kW (funcionando desde Marzo hasta Octubre). El inversor es el XTH 6000-48V. La figura 4.1 nos muestra el esquema de la configuración del sistema actual, obtenido del programa iHOGA.

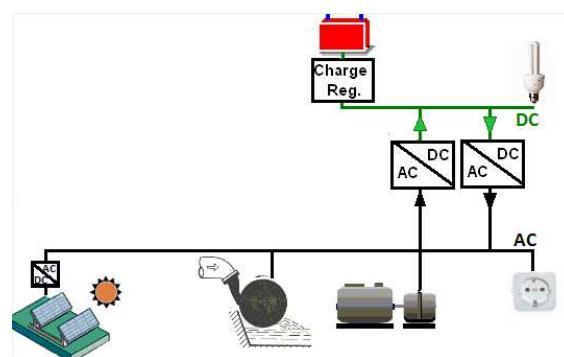


Figura 4.1

Los detalles de los datos utilizados en las simulaciones de la situación actual se muestran en el **Anexo IV**.

Los resultados obtenidos en la simulación de la situación actual se muestran en la tabla 4.1.

Simulación	Situación actual
VAN (€)	540240
Coste actualizado de la energía suministrada (€ /kWh)	1,61
Energía producida por los paneles fotovoltaicos (kWh/año)	2716
Energía producida por la turbina (kWh/año)	83543
Energía producida por el generador (kWh/año)	13184
Horas de funcionamiento del generador AC (h/año)	971
Consumo de diésel generador AC (litros/año)	6400

Tabla 4.1

Mediante los siguientes gráficos de simulación podemos ver cómo se comporta el sistema:

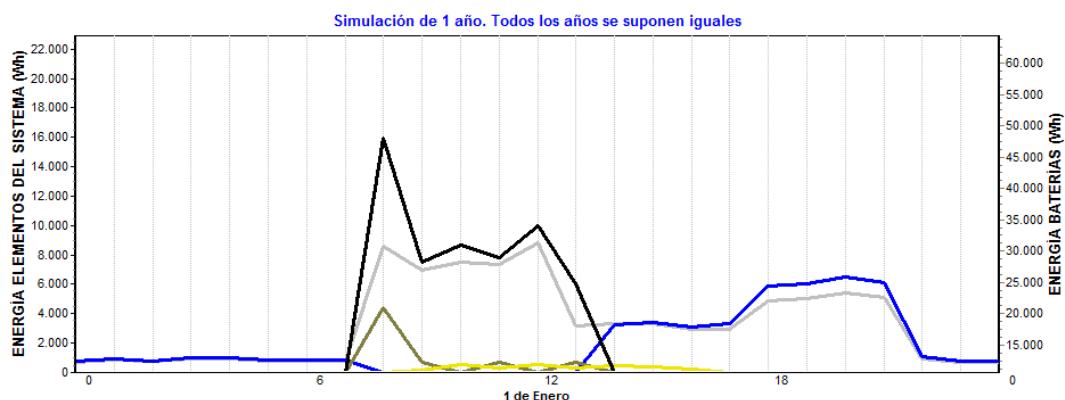


Gráfico 4.1

El gráfico 4.1 nos muestra el comportamiento del sistema en un día de invierno, concretamente el 1 de Enero.

Se observa el consumo total,(línea gris), que empieza a tener importancia a las siete de la mañana que es cuando la gente se levanta. Para satisfacer este consumo, y dado que la microturbina esta inhabilitada, podemos apreciar como casi toda la energía proviene del grupo electrógeno (línea negra). Además, una parte de la energía, aunque muy pequeña es aportada por los paneles (línea amarilla). Dado que se genera más energía que la consumida, se aprovecha ésta para cargar las baterías (línea marrón).

Cuando ya es por la tarde, el consumo no es muy elevado, los acumuladores, que consumen gran parte de la energía están ya cargados, por lo que el grupo electrógeno se desconecta y se abastece al refugio con la energía almacenada en las baterías (línea azul).

El comportamiento del sistema en verano es el que se muestra en el gráfico 4.2:

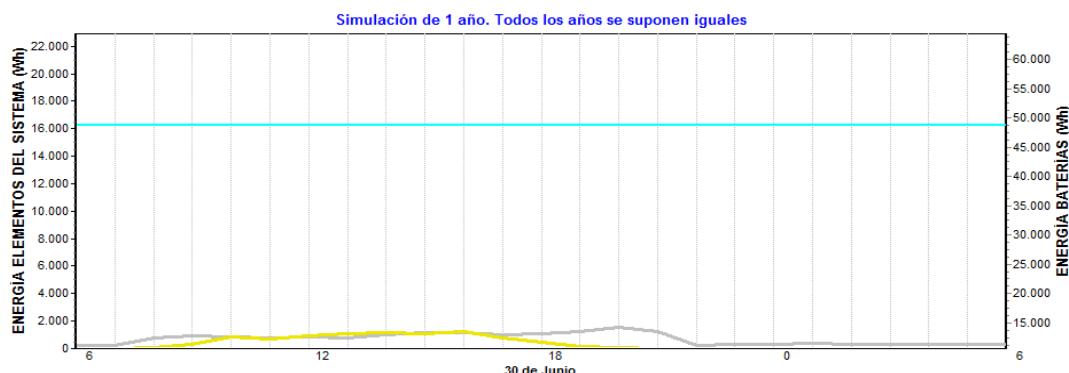


Gráfico 4.2

La línea más alta, de color azul verdoso, indica la energía que genera la microturbina. Vemos que es mucho mayor que el consumo (línea gris), por lo que se puede abastecer la demanda energética con la microturbina en los meses en los que ésta pueda funcionar sin necesidad del grupo electrógeno.

Nuestro objetivo se centra entonces en los meses de invierno, cuando la microturbina este inhabilitada y tengamos que generar electricidad con el grupo electrógeno.

4.2.2 Aumento del número de paneles solares

En las siguientes pruebas se estudió la viabilidad de la instalación aumentando el número de paneles. Se incorporó en las posibilidades dos inversores de mayor potencia que el actual, el XTH 8000-48 V y el XTH 1000-48V. En el **Anexo V** se encuentra la información de dichos componentes. Este cambio se realizó para que el



inversor no limite el intercambio de potencia con las baterías. Éste cambio cobra aún más sentido cuando aumentamos el número de baterías, como se hace en pruebas posteriores.

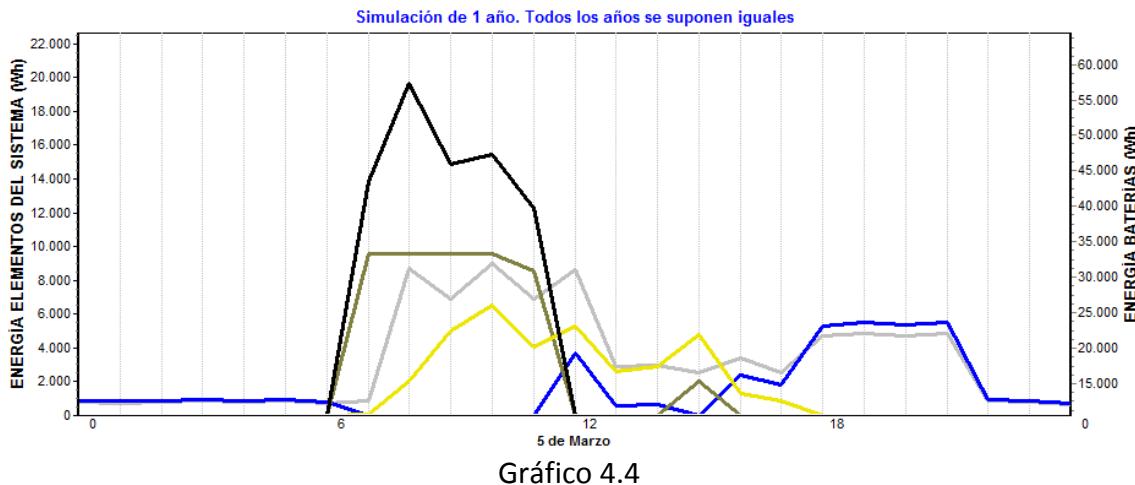
Simulación	24 p. solares	48 p. solares	96 p. solares
VAN (€)	366403	315104	250543
Coste actualizado de la E. suministrada (€ /kWh)	1,09	0,94	0.75
Energía producida por los paneles (kWh/año)	5433	10867	21735
Energía producida por la turbina (kWh/año)	83543	83543	83543
Energía producida por el generador (kWh/año)	7539	5349	2313
Horas de funcionamiento del generador AC (h/año)	523	387	167
Consumo de diésel generador AC (litros/año)	3558,7	2576,7	1113,3

Tabla 4.2

Como podemos observar en la tabla 4.2, con el aumento de paneles reducimos considerablemente el coste del kWh. Se reduce también el número de horas de funcionamiento del grupo electrógeno, y por tanto, se reduce también el consumo de combustible diésel. El inconveniente es que la instalación de muchos paneles fotovoltaicos requiere de una gran infraestructura que causaría un gran impacto visual.

En todas las pruebas se utiliza como mejor opción el inversor el XTH 1000-48V.

El gráfico 4.4 representa la simulación de la instalación aumentando el número de paneles, concretamente con 48 (2 serie x 24 en paralelo).



La energía generada por los paneles solares (línea amarilla) ahora es mucho mayor que en la situación actual. Sin embargo aún no es suficiente, y se sigue necesitando una gran cantidad de energía aportada por el grupo electrógeno (línea negra).

4.2.3 Aumento del número de paneles solares y el número de baterías.

Al ir aumentando el número de paneles solares, es interesante comprobar si añadiendo baterías se optimizaría el sistema, ya que al estar generando más energía es posible que no sea suficiente almacenamiento el proporcionado por las baterías actuales.

Los resultados de dichas comprobaciones se muestran en la tabla 4.3.



Simulación	48 p. solares y 48 baterías	96 p. solares y 48 baterías
VAN (€)	390983	265980
Coste actualizado de la E. suministrada (€ /kWh)	1,17	0,79
Energía producida por los paneles (kWh/año)	10867	21735
Energía producida por la turbina (kWh/año)	83543	83543
Energía producida por el generador (kWh/año)	9400	2949
Horas de funcionamiento del generador AC (h/año)	380	119
Consumo de diésel generador AC (litros/año)	3550,5	1113,3

Tabla 4.3

Se deduce de los resultados que aumentando el número de baterías se encarece la inversión. El coste actualizado de la energía suministrada en kWh disminuye aunque no a valores realmente significantes para la inversión a realizar. Esta disminución se debe más al aumento de paneles fotovoltaicos que al aumento de baterías.

4.2.4 Instalación de un aerogenerador en el sistema.

La instalación de un aerogenerador puede ser una opción muy interesante. Nuestro objetivo es generar la mayor cantidad de energía renovable posible para así tener que utilizar menos el grupo electrógeno, y por tanto reducir el consumo de combustible, siempre que resulte rentable desde un punto de vista económico.

En el refugio normalmente hay una gran cantidad de viento que podría ser aprovechada para generar energía. La información sobre los datos de viento se puede encontrar en el **Anexo VI**. Además, el viento se intensifica en el invierno, lo cual favorece nuestro objetivo, ya que el funcionamiento del grupo electrógeno es durante los meses de invierno.

Para las simulaciones hemos tomado 3 tipos de aerogeneradores, todos ellos de eje horizontal.

Aerogeneradores:

- HUMMER 10 kW.
- HUMMER 20 kW.
- Aerogenerador ENAIR 160, con una potencia de 7,5 kW.

La figura 4.3 nos muestra el esquema de la configuración del sistema al añadir el aerogenerador, que está conectado directamente al bus de alterna.

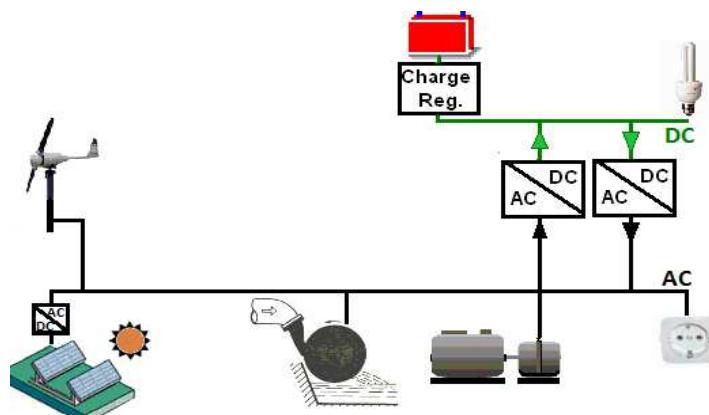


Figura 4.3



Los resultados obtenidos para dichas simulaciones se muestran en la siguiente tabla 4.4:

Simulación	HUMMER 10 kW	HUMMER 20 kW	ENAIR 160
VAN (€)	170451	170416	185639
Coste actualizado de la E. suministrada (€ /kWh)	0,51	0,51	0,55
Energía producida por los paneles (kWh/año)	2716	2716	2716
Energía producida por la turbina (kWh/año)	83543	83543	83543
Energía producida por el aerogenerador (kWh/año)	27936	52277	22149
Energía producida por el generador (kWh/año)	709	352	762
Horas de funcionamiento del generador AC (h/año)	60	32	58
Consumo de diésel generador AC (litros/año)	370	190,9	376,5

Tabla 4.4

Para estas simulaciones con aerogenerador hemos considerado la situación actual, es decir, 12 paneles solares colocados 2 en serie por 6 en paralelo, y el inversor XTH 6000-48V.

Veamos los cambios al añadir un aerogenerador mediante la simulación. El gráfico 4.5 hace referencia a una instalación como la actual, pero añadiendo un aerogenerador, en este caso, un aerogenerador Hummer 20 kW.

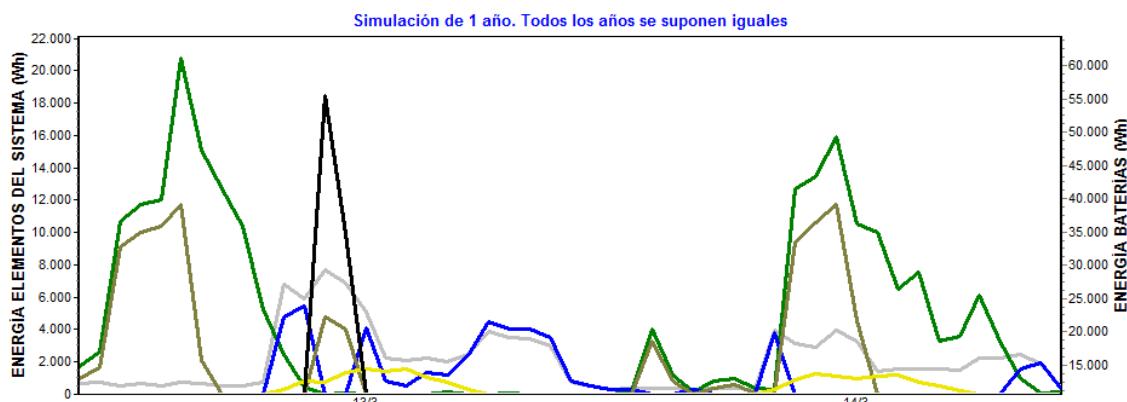


Gráfico 4.5

Se observa la gran reducción de la energía producida por el grupo electrógeno (línea negra), debido a que ahora es el aerogenerador (línea verde) el que nos aporta gran parte de la energía necesaria para satisfacer el consumo total (línea gris). Se dan situaciones algunos días en los que no es necesario el aporte de energía por parte del grupo electrógeno como podemos observar en el gráfico el día 14 de marzo. En cuanto a la carga y descargue de las baterías siguen la misma metodología que en casos estudiados anteriormente.

4.2.5 Predimensionado

Mediante la función “predimensionar” obtenemos los tamaños máximos (y el número máximo de componentes en paralelo) recomendados para los distintos componentes (baterías, paneles y aerogeneradores), teniendo en cuenta las potencias de los mayores componentes seleccionados y cuatro días de autonomía (por defecto).

Los resultados del predimensionado son los siguientes:



Baterías en paralelo: Min: 1 Max: 6

Paneles en paralelo: Min: 6 Max: 74

Aerogeneradores en paralelo: Min: 1 Max: 1

Se ha realizado la optimización del sistema, obteniendo los resultados de la tabla 4.5.

Simulación	2º Mejor opción	Mejor opción	Selección Final
VAN (€)	169592	168738	170416
Coste actualizado de la E. suministrada (€ /kWh)	0,51	0,5	0,51
Energía producida por los paneles (kWh/año)	4528	3622	2716
Energía producida por la turbina (kWh/año)	83543	83543	83543
Energía producida por el aerogenerador (kWh/año)	27936	27986	52277
Energía producida por el generador (kWh/año)	448	0	352
Horas de funcionamiento del generador AC (h/año)	43	0	32
Consumo de diésel generador AC (litros/año)	262,4	0	190,9

Tabla 4.5

2º mejor opción: Aerogenerador Hummer 10 kW, inversor XTH 6000-48V, 2s x 10 Paneles paralelo y 24 baterías.

Mejor opción (de la optimización): Aerogenerador Hummer 10 kW, inversor XTH 6000 48V, 2s x 9 Paneles paralelo y 48 baterías.



Selección Final: Situación actual + Aerogenerador Hummer 20 kW

El programa ha dado como mejor solución la combinación de un aerogenerador Hummer 10 kW, un inversor XTH 6000-48V, 9 paneles paralelo y 48 baterías, con coste actualizado de la energía suministrada de 0.5 €/kWh. Aunque en esta simulación no haría falta grupo electrógeno, siempre deberemos de contar con un equipo similar para generar energía cuando no sea posible por medios renovables.

La segunda mejor opción tiene un coste actualizado de la energía suministrada de 0.51 €/kWh, muy similar a la mejor opción. En esta situación se reduce el número de paneles a 10 y se instala un aerogenerador. Como la instalación actual tiene más paneles fotovoltaicos, no tiene sentido quitarlos una vez ya están colocados. Por eso, nos centramos en la situación actual añadiendo un aerogenerador. Además, el coste actualizado de la energía suministrada no sufre variación.

Una vez se ha elegido el esquema de la instalación, solo queda decidir el modelo de aerogenerador. Comparado los dos Hummer, que generar el mismo coste actualizado de la energía, se aprecia que con el Hummer 20 kW, además de que el VAN es menor, el aerogenerador suministra mucha más energía que el Hummer 10, disminuyendo el número de horas de funcionamiento y el consumo del grupo electrógeno.

5. AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE APROVECHAMIENTO DEL EXCESO DE ENERGÍA

Como ya se ha comentado anteriormente, la microturbina está sobredimensionada, generando un gran exceso de energía. Para aumentar la optimización energética del refugio se propone utilizar la energía en exceso que se disipa por las resistencias para calentar el agua caliente sanitaria del refugio. Se podría obtener un ahorro de 32,42 € al día cuando el refugio se encuentra a máxima capacidad (90 personas). Se detalla más información y los cálculos en el **Anexo VII**.



6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se ha realizado varios análisis de sensibilidad para ver cómo afectarían los cambios en algunas variables al sistema de optimización final seleccionado (situación actual más un aerogenerador Hummer 20 kW). Los diferentes análisis de sensibilidad que se han evaluado son:

- 1- Variación del precio del kWh en función de la inflación del precio de combustible del generador AC (gráfico 6.1).
- 2- Variación del precio del kWh en función de la variación de la irradiación solar media (gráfico 6.2).
- 3- Variación del precio del kWh en función de la variación de la velocidad media del viento (gráfico 6.3). Para analizar en profundidad el análisis de sensibilidad debido a la variación del viento se ha realizado otra simulación (gráfico 6.4), que representa la energía generada por los aerogeneradores en función de la variación del viento.

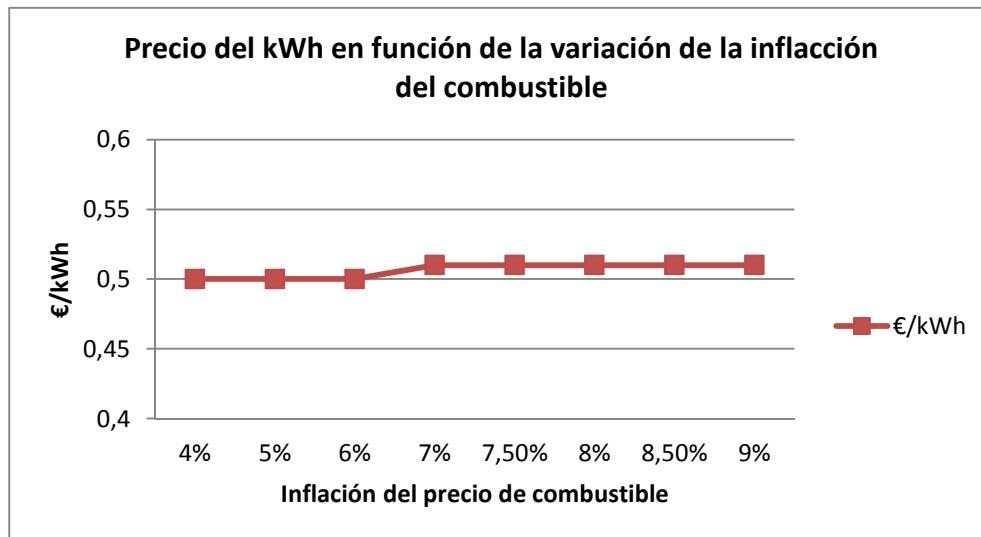


Gráfico 6.1

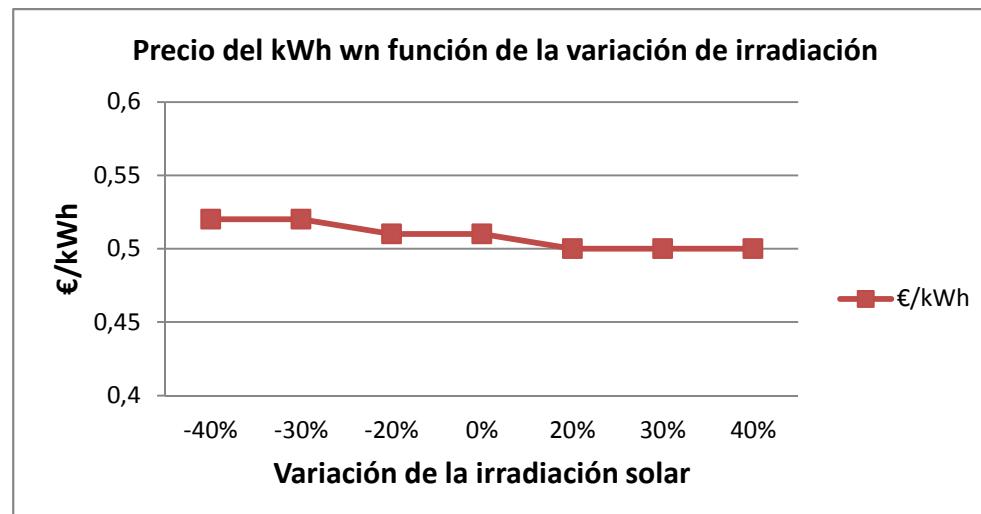


Gráfico 6.2

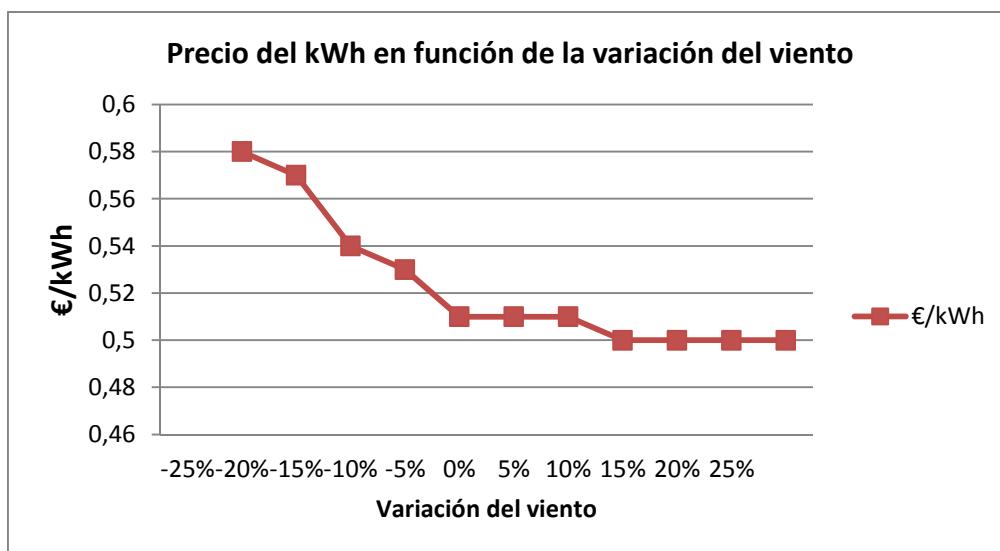


Gráfico 6.3

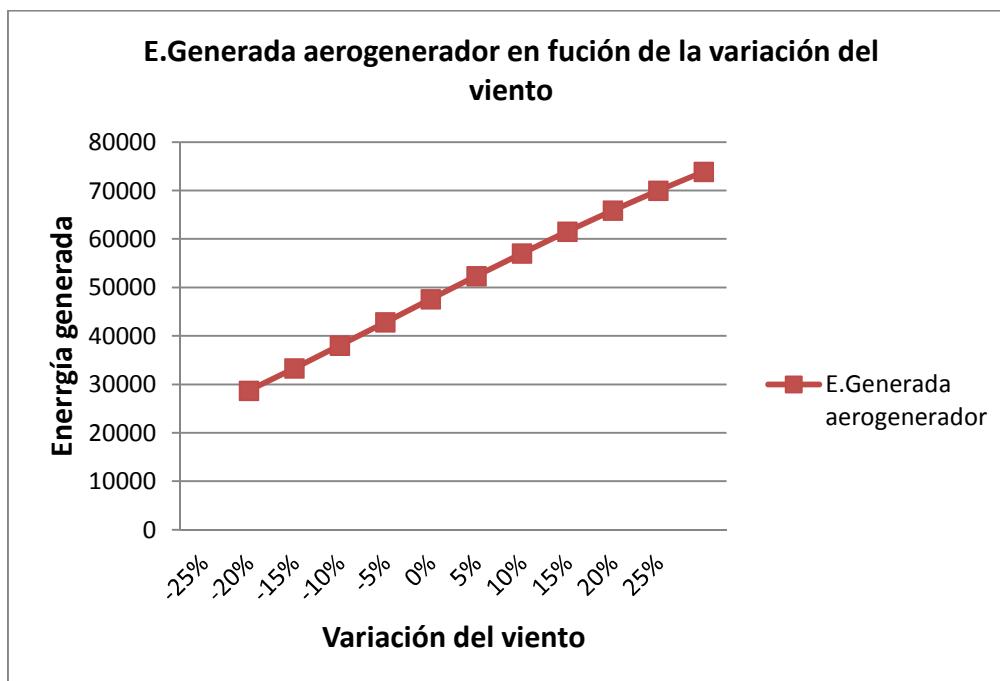


Gráfico 6.4

En el **Anexo VIII** se detalla la información acerca de los análisis de sensibilidad.



7. CONCLUSIONES

Para la optimización de la alimentación eléctrica del refugio de Respomuso se han realizado varias simulaciones con el programa iHOGA. Se han simulado varias situaciones aumentando el número de paneles fotovoltaicos, número de baterías, instalación de un aerogenerador y combinaciones entre ellas.

Como mejor opción (óptimo económico, minimizando el coste total actual neto) se propone la instalación de un aerogenerador Hummer 20kW a la instalación actual, reduciendo el coste actualizado de la energía suministrada de **1,61 €/kWh** de la situación actual a **0,51 €/kWh**.

Para ver cómo afectarían al sistema óptimo futuros cambios en algunas variables se ha realizado varios análisis de sensibilidad, deduciendo que solo una gran disminución de la velocidad media del viento aumentaría el coste actualizado de la energía, que pasaría de **0,51 €/kWh** a **0,58 €/kWh**, aumento de precio insignificante si lo comparamos con el que tenemos en la situación actual.

Para aumentar la optimización y el ahorro se propone utilizar la energía en exceso de la micro turbina para abastecer ACS al refugio, lo que implicaría un ahorro de **32,42 € al día** cuando el refugio se encuentra a máxima capacidad, es decir, con 90 personas.



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?lang=es>
- [2] Electricidad solar ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. Eduardo Lorenzo Pigueiras. Editorial Progensa, 1994. ISBN 9788486505455.
- [3] <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rdufo%40unizar.es&step=1&lat=42.82&lon=-0.29&submit=Submit>
- [4] Fotovoltaica para profesionales: Diseño, Instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas. Antony Falk, Christian Durscher, Karl-Heinz Remmers. Editorial Progensa, 2006. ISBN 9788495693358.
- [5] Energía Hidroeléctrica. José Francisco Sanz Osorio. PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA, 2008. ISBN 9788492521203
- [6] Desarrollo de proyectos de instalaciones de energía mini-eólica aislada. Equipo INIECO. Editorial Vértice, 2012. ISBN: 9788499312606.

9. ANEXOS

Anexo I: Información del refugio Respomuso.

El siguiente enlace pertenece a la página web del refugio.

Web: <http://www.alberguesyrefugiosdearagon.com/webcam.php?id=9>

Dicha página nos ofrece información acerca del refugio, lista de precios, galería de fotos y la información de contacto del refugio.

Se adjuntan unas fotos del refugio que yo mismo realicé.



Fotos del refugio:



Refugio visto desde delante



Refugio parte posterior. Se aprecia en la foto el tubo que canaliza el agua hasta la micro turbina.



Comedor y bar al fondo.



Habitaciones



Baño de las habitaciones

Anexo II: Información de los elementos que componen la situación actual

Las fotos que se adjuntan las realice yo mismo en la visita al refugio.

- Micro turbina:



Foto A.2.1

Como hemos dicho anteriormente, se trata de una turbina tipo Pelton. En la foto A.2.1 podemos ver como es la micro turbina. El agua que entra en la micro turbina pasa a través de unas toberas que inyectan agua a unos cangilones, que al estar amarrados al eje produce un movimiento rotativo en el mismo.



Las siguientes fotos A.2.2 son de la placa características de la turbina y del generador. Como no se aprecian muy bien los datos, se adjuntan en la tabla A.2.1 los datos de la microturbina y en la tabla A.2.2 los datos del generador acoplado a la microturbina.



Foto A.2.2

Grupo Turbina	Turbina Pelton
Tipo	M75-200 V3
Salto nominal (H)	60 metros
Caudal nominal (Q)	60 l/s
Velocidad de rotación	1500 rpm
Velocidad de fuga	2700 rpm

Tabla A.2.1

Generador	Generador síncrono trifásico auto excitado
Tensión	220 / 380 V
Corriente	36.5 A
Conexión	Triángulo/ estrella a tierra
Frecuencia	50 Hz
Velocidad de rotación	1800 rpm

Tabla A.2.2



- Grupo electrógeno:



Foto A.2.3

La foto A.2.3 muestra el grupo electrógeno del refugio. Es un motor que funciona con combustible diésel al que se le ha acoplado un generador eléctrico de 40 KVa.

- Banco de baterías



Foto A.2.4

La foto A.2.4 nos muestra el banco de baterías, alojadas en una pequeña habitación en el sótano del refugio.



La tabla A.2.3 muestra los datos de la ficha técnica de las baterías.

Marca	Enersys
Modelo	PowerSafe
Referencia	TYS-8/ 8-OPzS-800
Aplicaciones	Solar/ Eólica/ Suministro Energía
Tipo	Estacionaria
Voltios	2
Amperios (Ah)	1200
Amperios en 100 h	1200
Tipo de placa	Tubular
Tecnología	Plomo Abierto Con Mantenimiento
Tipo de recipiente	Monobloc Transparente
Largo (mm)	191
Ancho (mm)	210
Alto (mm)	684
Medida (mm)	191x210x684
Peso (Kg)	62,70
Garantía (meses)	24
Pack:	6 unidades
Precio	2 395,90 €
Precio Unidad	400 €

Tabla A.2.3

- Inversor Cargador

En la misma habitación donde están alojadas las baterías se encuentra el inversor cargador. En la tabla A.2.4 encontramos la información más relevante del inversor.

Modelo	Tensión/ Frecuencia de salida	Tensión de batería	Corriente de carga	Corriente máxima	Potencia P30 / Pnominal
XTH6000-48	230 Vac/50Hz	48 Vdc	100Adc	50 Aac	6000/5000 VA

Tabla A.2.4



En la foto A.2.5 se muestra como es el inversor.



Foto A.2.5

- **Paneles fotovoltaicos**

Los paneles fotovoltaicos están colocados en el balcón del refugio. Es el mejor sitio para ubicarlos ya que están mirando hacia el sur (Acimut 0º), y además están protegidos de la afluencia de gente.

Las características de los mismos se encuentran en la tabla A.2.5

Modelo	LDK 195D – 24 (S)
Potencia pico	195 Wp
Tensión de máx. Potencia	36,4 V
Corriente de máx. Potencia	5,37 A
Tensión de circuito abierto Voc	45,2 V
Corriente de cortocircuito Isc	5,74 A

Tabla A.2.5



- Soportes para módulos fotovoltaicos.

Para colocar los paneles fotovoltaicos se necesitan unas estructuras o soportes como el de la foto A.2.6



Foto A.2.6

Bibliografía del Anexo II:

Página Web baterías:

<http://bateriastotal.com/bat/es/enersys-hawker-opzs/1077-bateria-8-opzs-800-tys-8-2v-1200ah-solar-powersafe-hawker.html>

Se puede consultar la ficha técnica en dicha web.

Página Web inversor:

<http://www.sol-i-vent.es/inversor--cargador-studer-xtender-xth-600048-6000w-48v-cargador--100a-p-1-50-434/>

Se puede consultar la ficha técnica en dicha web.

Página web de los módulos fotovoltaicos:

<http://www.tutiendasolar.es/Placas-solares-Placa-solar-fotovoltaica-185W-LDK-185D--24V-LDK.html>

Se puede consultar la ficha técnica en dicha web.



Página web de los soportes para paneles fotovoltaicos.

https://autosolar.es/estructuras-paneles-solares/estructura-paneles-solares-columna-1-ud-200w-24v_precio

Anexo III: Detalles del precio del gasóleo y porcentaje de inflación:

El precio base del gasóleo que se ha tomado para las simulaciones es de 1.30 €/l. A este precio hay que añadirle el coste de trasporte en helicóptero hasta el refugio.

Según información de los propios responsables del refugio, el coste de trasladar 1000 Kg en helicóptero hasta el refugio asciende a 320 €.

Sabiendo que la densidad del gasoil es de $d = 0,8453$ Kg/l, obtenemos que el coste de transporte es de 0,27 €/l.

Por lo tanto, el precio total del combustible diésel es:

$$Pt = 1.30 + 0.27 = 1.57 \text{ €/l}$$

Para calcular la inflación del precio del gasóleo se tomó la variación del precio del combustible desde el año 2001 hasta el 2010, datos de la tabla A.3.1, obtenida de fuentes de Repsol, Capmsa, Minetur e INE, como pone al pie de la misma.

CUADRO 1 PRECIOS MEDIOS ANUALES DEL GASÓLEO DE AUTOMOCIÓN EN ESPAÑA (PENÍNSULA Y BALEARES) 1960-2011 PVP/LITRO, IMPUESTOS INCLUIDOS								
Año	Precios nominales (PTA y c€) Orden cronológico			Precios nominales (c€) Ordenados crecientemente			Precios reales (c€ 2010) Ordenados crecientemente	
	Med. anual	Moneda	Med. anual	Año	Med. anual	Año	Med. anual	Año
1998	88,9	PTA	56,4	1997	100,0	1981	130,3	1981
1999	95,0	PTA	57,1	1999	100,6	1984	131,0	1984
2000	116,7	PTA	69,5	2002	101,1	2005	131,6	2005
2001	116,3	PTA	69,9	2001	101,3	1983	131,9	1983
2002	69,5	c€	70,2	2000	102,4	2007	133,4	2007
2003	70,4	c€	70,4	2003	103,9	2006	135,4	2006
2004	75,9	c€	75,9	2004	107,5	2010	140,0	2010
2005	90,0	c€	90,0	2005	110,9	1964	144,5	1964
2006	95,7	c€	91,2	2009	115,8	2008	150,8	2008
2007	97,0	c€	95,7	2006	118,5	1963	154,4	1963
2008	114,1	c€	97,0	2007	122,8	2011	159,9	2011
2009	91,2	c€	107,5	2010	128,9	1962	167,9	1962
2010	107,5	c€	114,1	2008	136,2	1961	177,4	1961
2011	126,7	c€	126,7	2011	137,3	1960	178,8	1960

FUENTE: Campsa, Repsol, Minetur, INE y elaboración propia.

Tabla A.3.1



Con los datos de la tabla anterior se obtiene un porcentaje de inflación del precio del combustible del 7,5%.

Anexo IV: Detalles de los datos utilizados en las simulaciones de la situación actual.

Para generar la simulación actual, además de todos los datos referentes a los equipos existentes, que ya se han detallado en el Anexo II, el precio e inflación del combustible, detallados en el Anexo III, necesitamos introducir otros datos como la irradiación solar. La web de donde se han obtenido los datos se encuentra en la bibliografía [3].

En la tabla de la figura A.4.1 aparece la irradiación solar diaria media mensual, en kWh/m²/día para todos los meses del año. Los datos que tenemos que introducir en el programa son los de la columna de “Daily solar radiation – horizontal”.

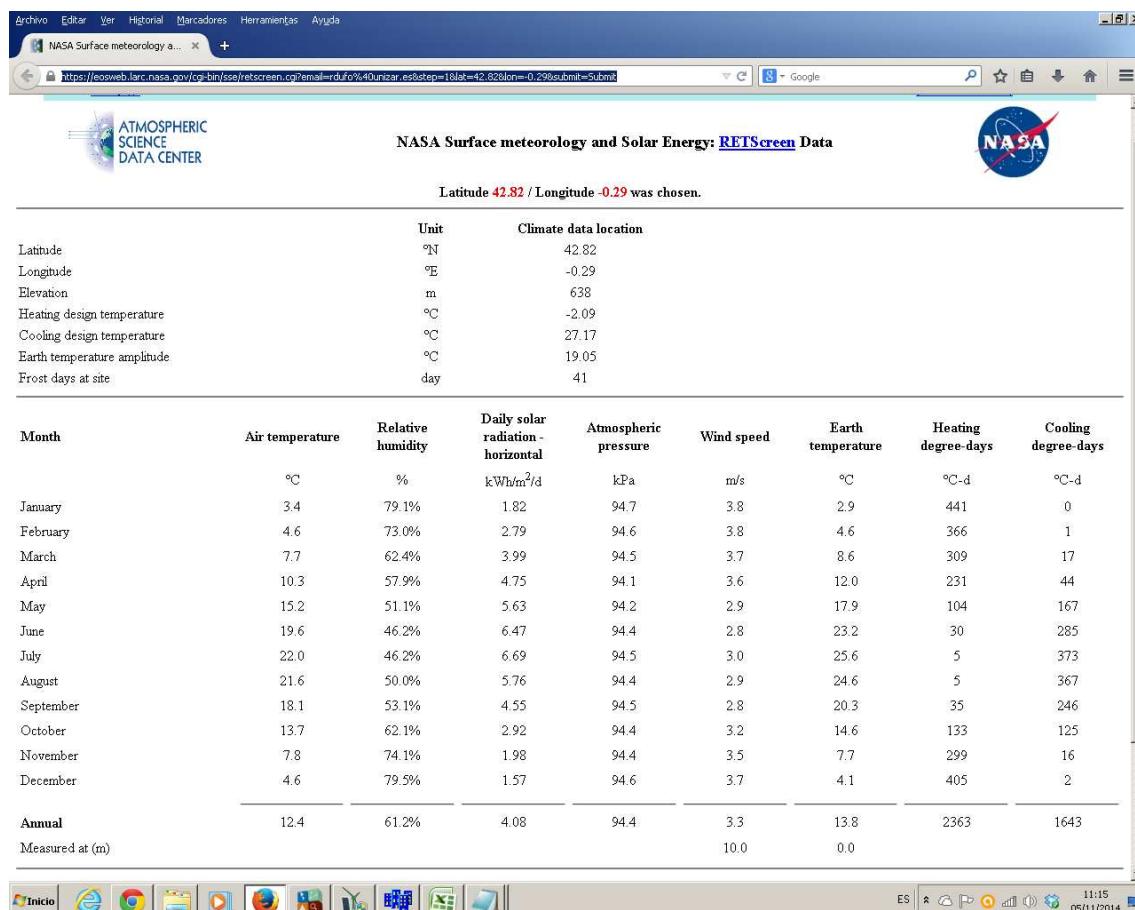


Figura A.4.1

Otros datos que tenemos que introducir son los cálculos de sombreado. El refugio, que se encuentra en el circo de Piedrafita, tiene varias montañas por delante que crean sombras en los paneles fotovoltaicos. Éste efecto se ha de tener en cuenta ya que estos producen mucha menos energía si les afectan las sombras.

En el mapa de la figura A.4.2 se puede ver la cordillera que crea sombra en el refugio, sobre todo las grandes elevaciones como el pico Musales.

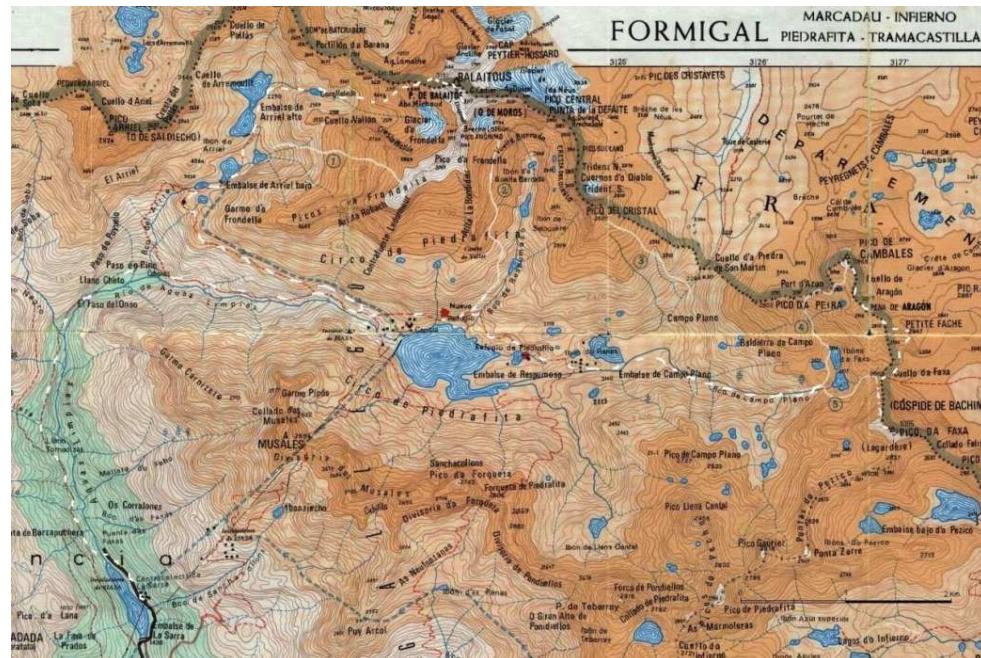


Figura A.4.2

Se ha realizado unos cálculos a Excel para calcular los grados de elevación de obstáculos, que posteriormente se introducen en el programa como se muestra en la figura A.4.3

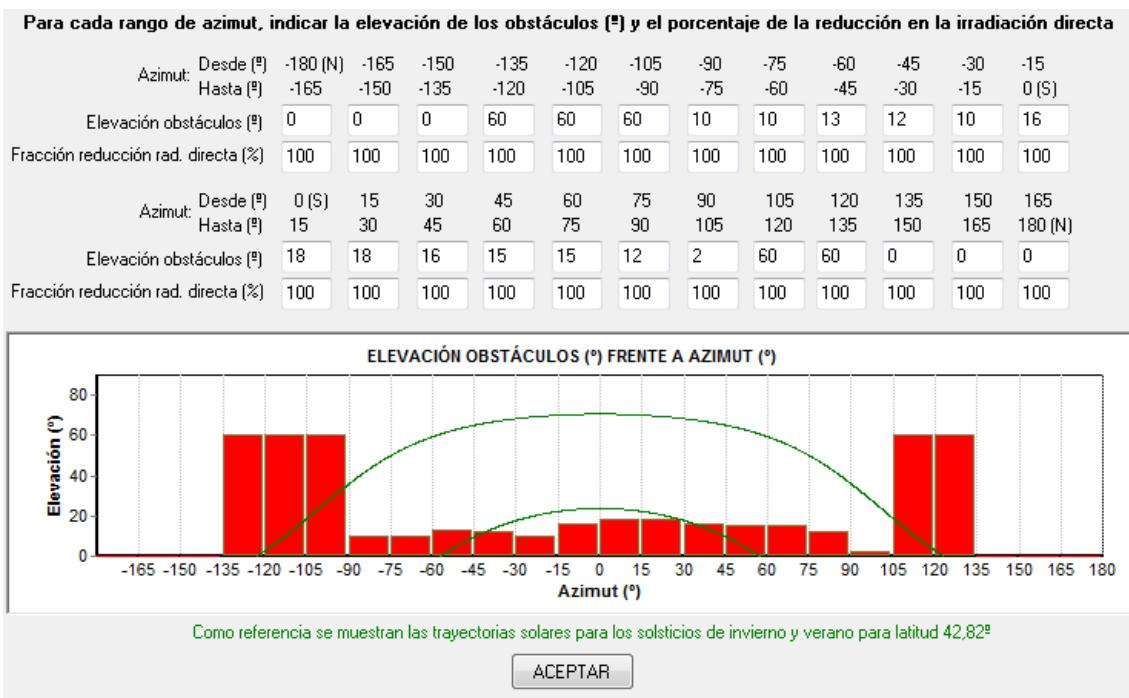


Figura A.4.3

Anexo V: Detalles de los datos componentes utilizados en las simulaciones de aumento de paneles y baterías.

En las tablas A.5.1 y A.5.2 se muestran las características de los inversores.

INVERSOR XTH 8000

Modelo	Tensión/ Frecuencia de salida	Tensión de batería	Corriente de carga	Corriente máxima	Potencia P30 / Pnominal
XTH8000-48	230 Vac/50Hz	48 Vdc	120Adc	50 Aac	8000/7000 VA

Tabla A.5.1



INVERSOR XYH 10000

Modelo	Tensión/ Frecuencia de salida	Tensión de batería	Corriente de carga	Corriente máxima	Potencia P30 / Pnominal
XTH10000-48	230 Vac/50Hz	48 Vdc	200Adc	50 Aac	10000/ 9000 VA

Tabla A.5.2

Anexo VI: Información de los datos de viento

Los datos de viento necesarios para las simulaciones se han obtenido de la página web de meteorología:

<https://www.meteoblue.com/es/espa%C3%B1a/tiempo-ib%C3%B3n-de- respomuso/archive>

En dicha página encontramos un archivo con todos los datos de viento, temperatura y precipitaciones de refugio.

Tomaremos los datos de viento, la media del mes, y la temperatura. En el programa se puede introducir la temperatura para que tenga en cuenta la densidad del aire y realizar los cálculos de una manera más exacta.

Un ejemplo de cómo se muestran los datos en la página lo encontramos en la figura A.6.1, que muestra los datos de temperatura, precipitación y viento del mes de octubre de 2014.

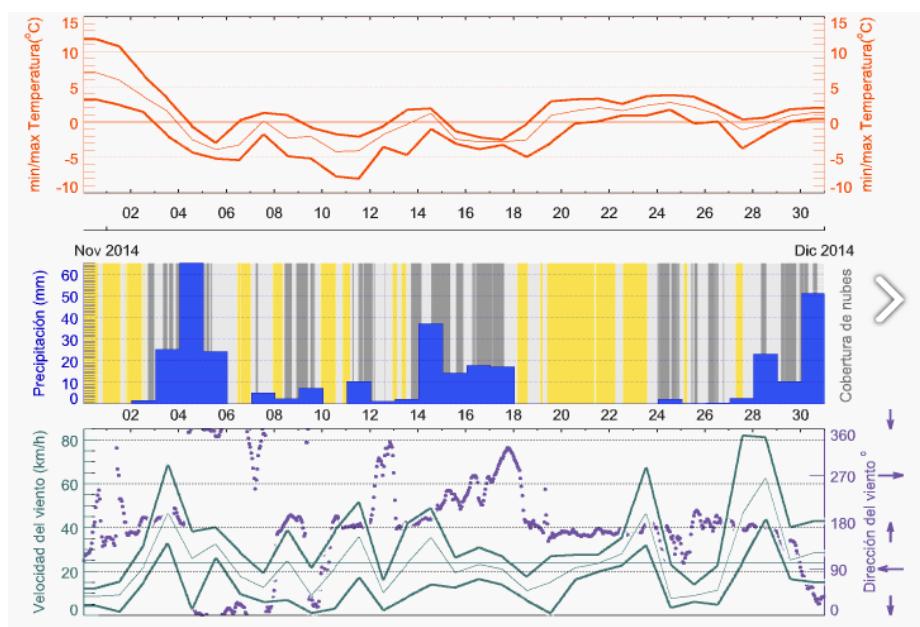


Figura A.6.1

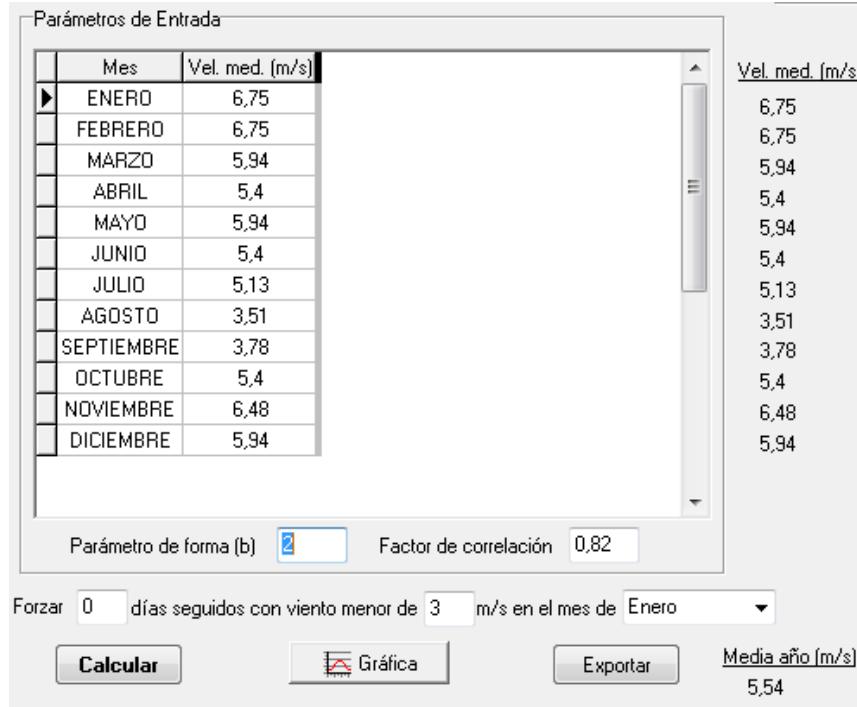


Figura A.6.2

La figura A.6.2 pertenece al programa iHOGA. Es la tabla donde se introducen los datos de viento mensuales en m/s.

Anexo VII: Cálculos e información del ahorro energético mediante el aprovechamiento del exceso de energía.

En el gráfico A.7.1, que muestra todas las energías anuales obtenidas en la simulación del sistema actual, se observa que la turbina está sobredimensionada, produciendo un gran exceso de energía. Los paneles fotovoltaicos y la baterías generan muy poca de la energía necesaria, siendo el grupo electrógeno el segundo que más abastece al refugio.

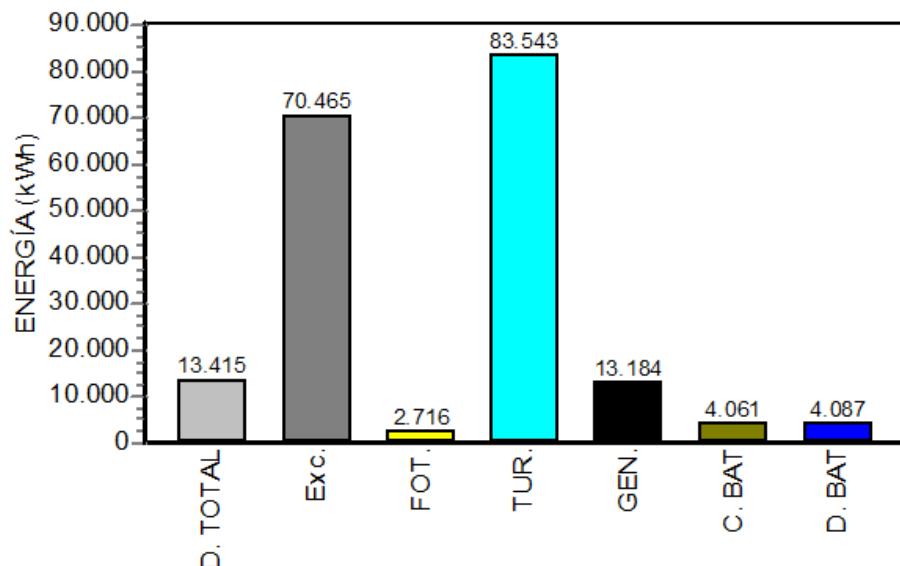


Gráfico A.7.1

Casi todo el exceso de energía proviene de la micro turbina. Ésta es disipada mediante unas resistencias que calientan agua, que posteriormente se tira al río. En la figura A.7.1 se muestran dichas resistencias, que disipan la energía producida en exceso calentando el agua que las rodea, vertiéndola al río sin darle ninguna utilidad.

En la figura A.7.2 se muestran los dispositivos electrónicos que detectan el exceso de energía y la envían a las resistencias para que sea disipada.

Hay que destacar que esta situación solo se produce en los meses de verano, cuando la micro turbina está funcionando.



Figura A.7.1



Figura A.7.2

Sin embargo, el refugio cuenta con una caldera diésel para calentar el agua caliente sanitaria de las habitaciones.

La mejora que se propone, para aumentar la optimización de la instalación, es utilizar esa agua caliente residual para abastecer el ACS del refugio.

Tomando una energía en exceso de 70.465 kW/año, que es lo que se obtiene en la simulación (gráfico A.7.1), y considerando un consumo diario por persona de 30 litros, podríamos abastecer con ACS calentada con el exceso de energía de la micro turbina a 153 personas al día (Caso 1). Como el máximo de plazas del refugio es de 90, se ha calculado el ahorro que supondría abastecer con ACS un día de máxima ocupación (Caso 2).

Caso 1: Cálculo de personas que se podría abastecer con el exceso de energía.

Como ya hemos dicho, y según el gráfico A.7.1, el exceso de energía considerado es de 70465 kWh/año.

Suponiendo que la turbina trabaja 7 meses por 30 días cada mes:

Días trabajados turbina = $7 * 30 = 210$ días.

La energía al día es: $70465 / 210 = 335.5$ kWh/día



Ésta energía la pasamos a Kcal/día:

$$E = 335.5 \text{ kWh/día} * 860 \text{ Kcal/1kWh} = 288530 \text{ Kcal/día}$$

Suponiendo una eficiencia del 0.8, debido a las pérdidas en los cables y en el termo:

$$E = 288.530 * 0.8 = 230824 \text{ Kcal/día}$$

Cálculo del número de personas

$$Dacs = \text{número de personas máximo} * \text{demanda día} * Cp * \Delta T$$

- $Cp \rightarrow$ Calor específico del agua = 1Kcal/Kg $^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta T \rightarrow$ Salto térmico del fluido (Consideramos que el agua entra a 10 $^{\circ}\text{C}$ y sale a 60 $^{\circ}\text{C}$)
- Demanda día \rightarrow Se considera 30 l/persona

** Dacs \rightarrow Demanda de Agua Caliente Sanitaria

$$\text{Número p. máx} = \frac{Dacs}{\text{demanda día} * Cp * \Delta T}$$

$$\text{Número p. máx} = \frac{230824 \text{ kcal}}{30 \frac{l}{\text{día}} * \frac{1Kcal}{Kg^{\circ}\text{C}} * (60 - 10)}$$

Numero p. máx. = 153.88 personas \rightarrow 153 personas pueden utilizar agua caliente sanitaria (ACS) calentada con la energía generada en exceso por la micro turbina durante los meses de verano considerando una media de consumo de 30 l/persona.



Caso 2: Cálculo del ahorro al abastecer ACS para 90 personas (con el refugio completo) con el exceso de energía.

Dacs = número de personas máximo * demanda día * Cp * ΔT

- Cp → Calor específico del agua = 1Kcal/Kg °C)
- ΔT → Salto térmico del fluido (Consideramos que el agua entra a 10 °C y sale a 60 °C)
- Demanda día → Se considera 30 l/persona

Dacs = 90 personas * 30 l/día * 1Kcal/Kg °C *(60 °C – 10 °C)

Dacs = 135000 Kcal/día * 1 kWh/860 Kcal = 156.97 kWh/día

Suponiendo pérdidas en los cables y termo del 20%, es decir, una eficiencia del 0.8, la energía que necesito de la turbina es:

E = 156.97 / 0.8 = 196.22 kWh/día

Suponiendo que la turbina trabaja 7 meses por 30 días cada mes:

Días trabajados turbina = 7 * 30 = 210 días.

La energía al día es: 70465/210 = 335.5 kWh/día

En la turbina tengo un excedente de 335.5 kWh/día, y necesito 196.22 kWh/día.

Hay energía disponible de sobras (ya se había comprobado en el caso uno que daba para abastecer a 153 personas)

Calculamos ahora el ahorro en combustible diésel.

Dacs = 156.97 kWh/día

Teniendo en cuenta el rendimiento de la caldera de 0.9:

$$P = \frac{156.97 \text{ kWh/día}}{0.9}$$

P = 174.41 kWh/día



El PCI (Poder Calorífico Inferior) del gasóleo es 9.994 kWh/ Kg

$$\text{Kg (en gasóleo)} = \frac{174.41 \text{KWh/día}}{9.994 \text{Kg/l}}$$

17.45 Kg/ día

Calculamos el volumen de gasóleo consumido.

La densidad del gasóleo es:

$$\rho = 0.845 \text{ Kg/l}$$

$$\text{Volumen (l)} = \frac{17.45 \text{ Kg/día}}{0.845 \text{ Kg/l}}$$

Volumen = 20.65 l/día

Considerando un precio del gasóleo en el refugio de 1.57 €/l

El ahorro será:

$$\text{Ahorro (€)} = 20.65 \text{ l} * 1.57 \text{ €/l} = 32.42 \text{ € /día}$$

Como resultado obtenemos un ahorro de **32,42 € al día** en los días en los que el refugio este completo.

Anexo VIII: Información acerca de los análisis de sensibilidad.

1- Variación del precio del kWh en función de la inflación del precio de combustible del generador AC.



En el gráfico 6.1 se muestra la variación del coste actualizado de la energía suministrada en función de la variación de inflación del combustible diésel.

Para las simulaciones se había calculado una inflación del 7.5%, y lo hemos variado desde un 4% hasta un 9%. El resultado del análisis es que aunque varíe la inflación del precio de combustible el coste del kWh prácticamente no varía. Esto es debido a que, al instalar el aerogenerador, el consumo del grupo electrógeno se ha reducido mucho, tan solo trabaja unas pocas horas al año. Por lo tanto, aunque haya mucha variación del precio de combustible, como el consumo es tan pequeño, no afecta al precio del kWh.

2- Variación del precio del kWh en función de la irradiación solar (gráfico 6.2).

La variación del coste del kWh en función de la irradiación se muestra en el gráfico 6.2.

Se ha variado la irradiación solar desde un 40% menos de la irradiación actual hasta un 40% más. La variación del precio del kWh no sufre prácticamente variación ya que la energía que suministran los paneles es muy pequeña, por tanto aunque esta sufra variaciones muy grandes, respecto a la energía total del refugio es muy pequeña.

3- Variación del precio del kWh en función de la variación del viento (gráfico 6.3). Para analizar en profundidad el análisis de sensibilidad debido a la variación del viento se ha realizado otra simulación (gráfico 6.4), que representa la energía generada por los aerogeneradores en función de la variación del viento.

El tercer análisis de sensibilidad, que relaciona el precio del kWh con la variación del viento sí que tiene bastante relevancia como se puede apreciar en el gráfico 6.3.

En este caso, la energía que produce el aerogenerador sí que es relevante frente a la energía total del refugio, como se aprecia en el gráfico A.8.1.

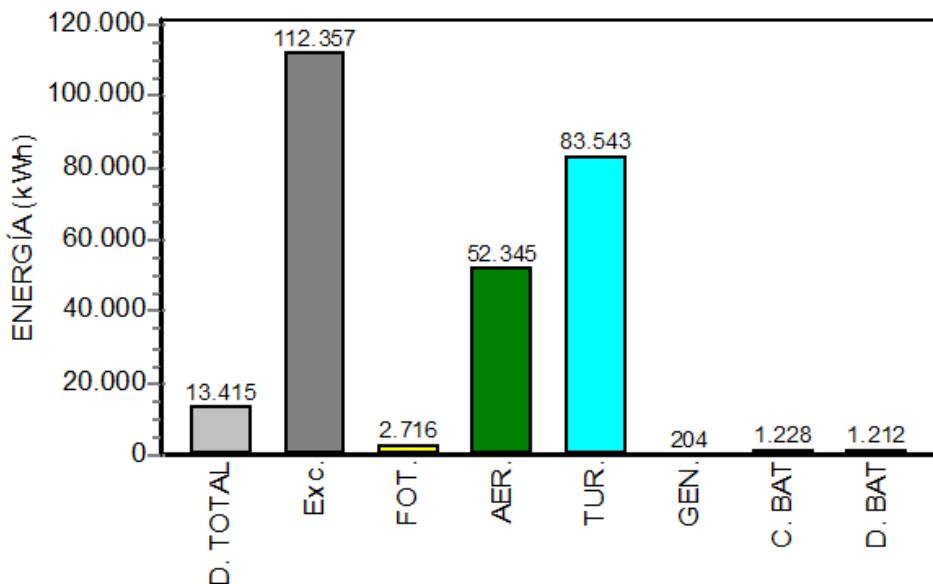


Gráfico A.8.1

Se han realizado simulaciones con variaciones de viento desde un 25% de la situación actual hasta un 25% más. La variación de precio del kWh obtenido tiene cierta importancia, ya que cuando hay una disminución de viento del 25% el precio del kWh aumenta hasta en 7 céntimos. Pasa de 0.51 €/kWh de la situación actual a 0.58 €/kWh. Sin embargo, aunque el viento aumente hasta el 25% (máximo valor analizado), la disminución del coste del kWh es tan solo de 1 céntimo.

Para analizar la simulación con mayor detalle se ha hecho una gráfica de la variación de la energía generada por el aerogenerador respecto a la variación del viento.

Como se muestra en el gráfico 6.4, la energía sufre una variación prácticamente lineal respecto a la variación de viento.

Por lo tanto, si baja mucho la velocidad de viento, el aerogenerador generará mucha menos energía, que tendrá que ser generada por el grupo electrógeno, aumentando consecuentemente el precio de la energía.