



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Modelado y simulación de un  
*Energy Hub* residencial  
Modeling and simulation of a residential  
Energy Hub

Autor/es

Javier Fernández Domínguez

Director/es

Ángel Antonio Bayod Rújula

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2019





## 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>. Javier Fernández Domínguez,

con nº de DNI 72799354F 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)  
Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Modelado y simulación de un Energy Hub residencial

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

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

Zaragoza, 24 de Junio de 2019

Fdo: Javier Fernández Domínguez



## Modelado y simulación de un *Energy Hub* residencial. Resumen

Este trabajo presenta el modelado y la simulación de un Energy Hub. Un Energy Hub es un lugar donde la producción, conversión, almacenamiento y consumo de energía tiene lugar. El sistema contará dos *inputs*: energía eléctrica de la red y gas natural, dos *outputs*: energía eléctrica y calor. Los elementos que contendrá serán: paneles fotovoltaicos, bomba de calor y quemador, en el primer modelo. Posteriormente se añadirá una batería.

Una vez obtenido el modelo, se analizará cómo afectan en el desempeño del Energy Hub variaciones en diferentes constantes parámetros, como el precio de la energía, los paneles fotovoltaicos, la batería...



## Contenido

Modelado y simulación de un <i>Energy Hub</i> residencial. Resumen .....	5
Introducción .....	9
Estado del arte del Energy Hub .....	11
Caso de estudio .....	12
Demandas .....	12
Precio .....	15
<i>Impuestos</i> .....	16
Radiación solar .....	16
Temperatura .....	17
Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	17
<i>Red eléctrica</i> .....	17
<i>Gas natural</i> .....	18
Energy Hub con panel fotovoltaico, bomba de calor y quemador de gas .....	18
Realización del programa en MatLab .....	19
Nomenclatura: .....	19
Resultados .....	24
Consumos de electricidad y gas .....	26
Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	28
Incluyendo venta a la red .....	29
Consumo de electricidad .....	30
Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	30
Variación de parámetros .....	31
Sin uso de gas natural .....	31
Precio del gas .....	32
Importancia del COP de la bomba de calor .....	33
Precio del panel fotovoltaico .....	34
Energy Hub con panel fotovoltaico, bomba de calor, quemador de gas y batería .....	36
Realización del programa en MatLab (modificación). .....	37
Nomenclatura (ampliación): .....	37
Resultados .....	38
Consumo de la batería .....	39
Consumo de electricidad y gas .....	41
Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	43

Incluyendo venta a la red .....	44
Variación de parámetros .....	44
Precio de la batería .....	44
Precio de la energía eléctrica de la red.....	46
Funcionamiento simple de la batería .....	47
Dimensionamiento para autoconsumo y 0 emisiones .....	50
Tabla Resumen.....	52
Conclusiones .....	54
Conclusiones del trabajo realizado.....	55
Bibliografía .....	56
Índice de figuras .....	58
Índice de tablas .....	59
Anexo I: Programa MatLab. Bomba de calor + PV .....	60
Anexo II: Programa MatLab. Bomba de calor + PV + Batería .....	63
Anexo III: Datos de demanda de electricidad .....	68
Anexo IV: Datos de demanda de calor .....	69
Anexo V: Datos de radiación solar.....	70
Anexo VI: Datos de temperatura.....	71

## Introducción

El objeto del trabajo es analizar la viabilidad de la incorporación de un Energy Hub en un edificio residencial. Un Energy Hub es un lugar donde la producción, conversión, almacenamiento y consumo de energía tiene lugar. Gracias a él es posible gestionar de una manera más eficiente los flujos energéticos que entran en una vivienda para adaptarlos a las necesidades de demanda de una forma óptima.

El modelado del sistema se realizará en lenguaje de MatLab y posteriormente se ejecutarán las simulaciones necesarias para analizar cuál es sería el dimensionamiento óptimo y si finalmente se consigue un ahorro económico con su implementación. Además de un beneficio económico, también se persigue un beneficio medioambiental y se estudiará cómo se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Un Energy Hub puede llegar a ser un sistema multienergético muy complejo, en este trabajo se estudiará un sistema que contará dos *inputs*: energía eléctrica de la red y gas natural, y dos *outputs*: energía eléctrica y calor. Los elementos que contendrá serán: paneles fotovoltaicos, bomba de calor y quemador, en el primer modelo. Posteriormente se añadirá una batería.

Se va a comenzar realizando un pequeño resumen del estado del arte del Energy Hub. Aquí se expondrá la necesidad de integrar en los hogares sistemas como el Energy Hub para hacer más eficiente la gestión de diferentes fuentes de energía así como las implicaciones medioambientales que esto conlleva. También enumerarán los diferentes inputs, outputs y elementos de conversión que se pueden tomar a la hora de construirlo, sugerencias que se encuentran en la literatura de los Energy Hubs.

En el siguiente apartado se expondrá el caso de estudio y se enunciarán todos los datos que se van a tener en cuenta para el posterior modelado del Energy Hub. Aquí se encuentran los perfiles de demanda eléctrica y de calor diarios de un hogar medio, especificados por hora y por mes. También, se muestran los datos de temperatura y radiación solar en la ciudad de Zaragoza, disgregados de la misma forma y obtenidos utilizando la herramienta online PVGIS. Por otra parte, se enumerarán los precios, tarifas e impuestos, tanto del gas natural como de la electricidad que se tendrán en cuenta para el cálculo de costes. También los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> que tiene cada tipo de energía utilizada.

Tras la presentación de los datos, se realizará el modelado y posterior análisis de resultados del Energy Hub con bomba de calor y paneles fotovoltaicos. Primero se mostrará un esquema del mismo y una descripción de sus elementos. A continuación se presentará una lista con la explicación de la nomenclatura usada en el programa y se expondrá el funcionamiento del programa realizado en MatLab parte por parte.

Tras ello, se procederá al análisis de resultados, entre los que se encuentran el dimensionamiento de los elementos que forman parte del Energy Hub, los consumos de energía de la red y de gas natural, los nuevos costes de la energía y las nuevas emisiones de CO<sub>2</sub>. También se analizará el caso en que los excedentes energéticos puedan venderse a la red.

Una vez hecho esto, se realizarán pequeñas modificaciones en el programa para ver cómo responde el Energy Hub a variaciones en distintos parámetros. Estas modificaciones son:

- La eliminación del uso del gas natural
- Cambios en el precio del gas
- Variaciones en el COP de la bomba de calor
- Cambios en el precio del panel fotovoltaico

Se continuarán los análisis añadiendo una batería al Energy Hub anterior. De nuevo, se mostrará un esquema del nuevo modelo, se describirán los nuevos elementos con su funcionamiento y se explicará la nueva nomenclatura que aparezca en el nuevo programa. Se expondrá el funcionamiento de las modificaciones al programa principal para añadir la batería y comenzará un nuevo análisis de resultados.

Del mismo modo que antes, se mostrará cuál es el dimensionamiento correcto de este Energy Hub, así como consumos, emisiones y costes. Se analizarán dos modos diferentes de funcionamiento de la batería a continuación las variaciones en distintos parámetros. En este caso:

- Variación en el precio de la batería
- Variación en el precio de la energía de la red eléctrica

También cómo debería estar dimensionado el Energy Hub para tener autoconsumo y por tanto, tener 0 emisiones.

Por último aparecerán las conclusiones finales del trabajo y una serie de anexos donde se pueden encontrar los programas de MatLab completos y los datos en bruto de demandas de energía eléctrica y calor, radiación solar y temperatura.

## Estado del arte del Energy Hub

Las energías fósiles son la principal fuente de energía mundial. Sin embargo su utilización es muy poco eficiente desde el punto de vista energético y además producen efectos negativos sobre el medio ambiente, debido a la emisión de gases de efecto invernadero. Es por ello, que surge la necesidad de mejorar su eficiencia y reducir su consumo.

Algunas propuestas son la sustitución de las energías fósiles por energías renovables, como la solar térmica y fotovoltaica, o la eólica, entre otras. También el uso de sistemas de cogeneración, para aprovechar tanto la energía eléctrica como la térmica, puede ser un buen ejemplo a la hora de mejorar la eficiencia.

El problema principal de la integración de las energías renovables es la dificultad de integración de éstas con la red, ya que resulta complicado coordinar su producción irregular con las necesidades concretas de los demandantes <sup>(1) (2)</sup>.

Una posibilidad para poder encajar la curva de demanda y de producción es la utilización de sistemas de almacenamiento, aunque debido al alto precio de la tecnología es necesaria una buena gestión de la energía así como una red eléctrica preparada para su correcta integración, por lo que su rentabilidad de forma individual no está clara.

Como respuesta a estos problemas surge el Energy Hub, lugar donde la producción, conversión y almacenamiento de diferentes portadores de energía tiene lugar. De esta forma, el Energy Hub se convierte en una opción prometedora para la integración de sistemas multienergéticos.

Para una demanda energética dada (output), ya sea calor o energía eléctrica, el Energy Hub realizará las transformaciones necesarias para consumir de las fuentes energéticas de entrada (inputs), ya sea energía de la red o gas, la cantidad óptima. Estas transformaciones las realizarían elementos como bombas de calor, sistemas de cogeneración... También se incluirían los sistemas de almacenamiento y la producción renovable, que condicionaría su actividad.

Los componentes del Energy Hub pueden ser muy diversos y los tipos de energía que pueden transformar muy diferentes. El más apropiado y el correcto dimensionamiento dependerá del tipo de demanda al que esté dirigido así modo de los recursos disponibles.

En la literatura, encontramos que los tipos de input más usuales son la energía de la red, el gas natural de la red, la energía solar y la energía eólica. En menor medida también se sugiere el uso de la calefacción urbana, biomasa, energía hidráulica y energía nuclear.

Del mismo modo encontramos que los convertidores más utilizados son el ciclo combinado, quemadores de gas, enfriadores, placas fotovoltaicas, turbinas eólicas e intercambiadores de calor. Menos usuales, pero también posibles son las pilas de combustible, colectores solares, bombas de calor, etc. Entre los sistemas de almacenamiento, el almacenamiento térmico, eléctrico y el uso del vehículo eléctrico enchufable (PEV) son las opciones más comunes.

Por último, los outputs más tenidos en cuenta son la electricidad y el calor, aunque, en la literatura, también se plantea el uso de líneas de frío, hidrógeno o agua, entre otros <sup>(3)</sup>.

## Caso de estudio

Tenemos un edificio residencial de 3 plantas que cuenta con 5 apartamentos por planta. Se supondrá que el edificio se encuentra en la ciudad de Zaragoza. Se va a realizar el modelado de un Energy Hub para dicho edificio teniendo en cuenta diferentes combinaciones de los elementos que pueden formar parte de éste, para averiguar cuál es la disposición más eficiente.

Se analizará la evolución de los costes y consumos energéticos en relación a la demanda de las viviendas. El estudio tendrá en cuenta el dimensionado del Energy Hub así como las variables externas que puedan afectar a éstos.

## Demandas

Como fuentes energéticas de consumo, se va a tomar la electricidad proveniente de la línea eléctrica y el gas natural. Las viviendas demandarán calor y energía eléctrica.

En los hogares españoles, se demandan de media 3272 kWh al año<sup>(4)</sup> de electricidad (aprox. 9 kWh al día). Tomando como perfil de consumo un día medio de cada mes (el día 15 en 2018)<sup>(5)</sup> se obtiene la siguiente curva de demanda eléctrica horaria (mes de Marzo en la [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#)).

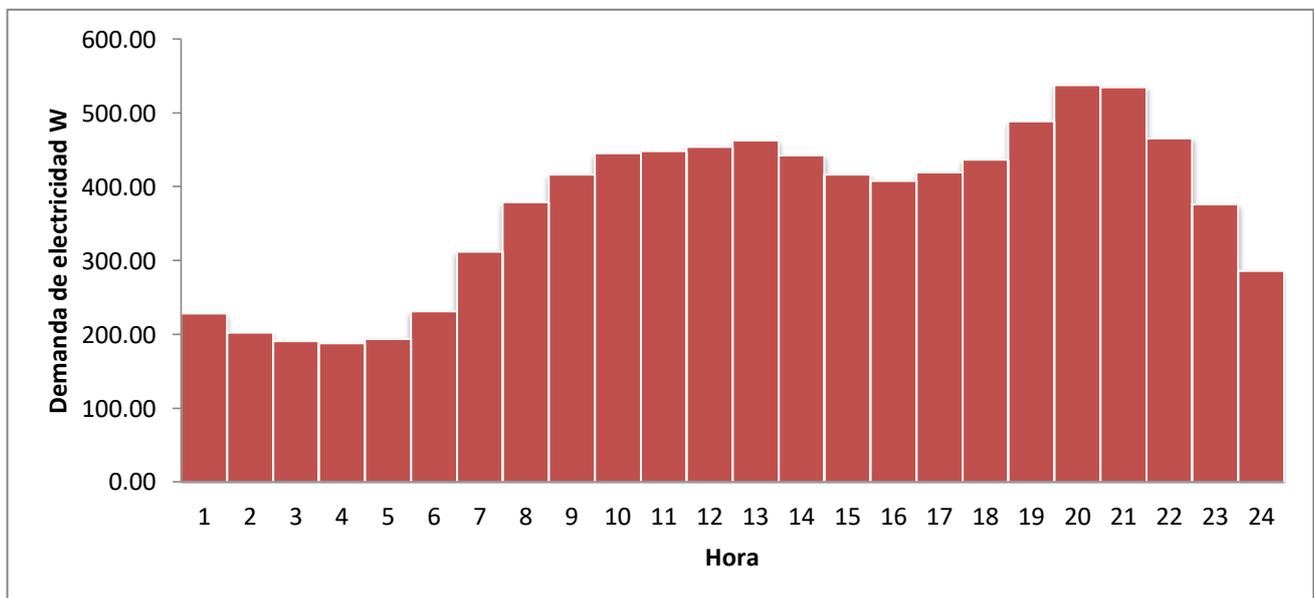


Figura 1. Perfil de demanda eléctrica horaria en un día medio de Marzo.

A lo largo del año, la demanda de energía varía según el mes. Como se muestra en la **Figura 2**.

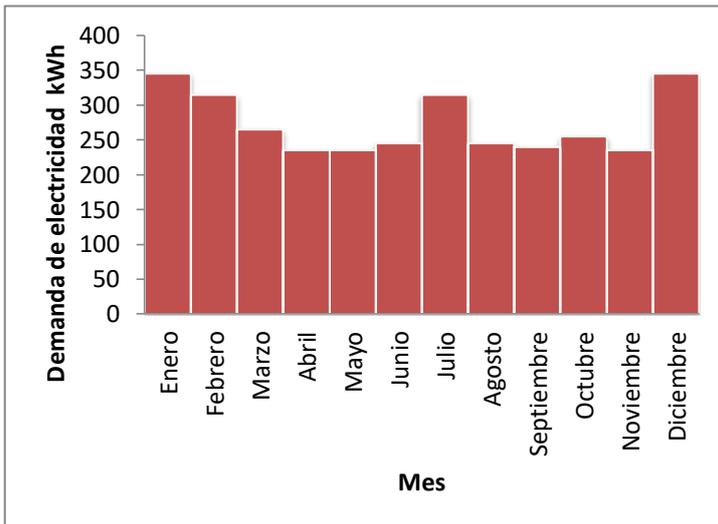


Figura 2. Demanda mensual de electricidad en un hogar medio.

Extrapolando los datos de demanda mensual a cada curva de consumo de un día medio de cada mes, se obtiene la demanda horaria de un día medio de cada mes del año, como se muestra en la **Figura 3**.<sup>1</sup>

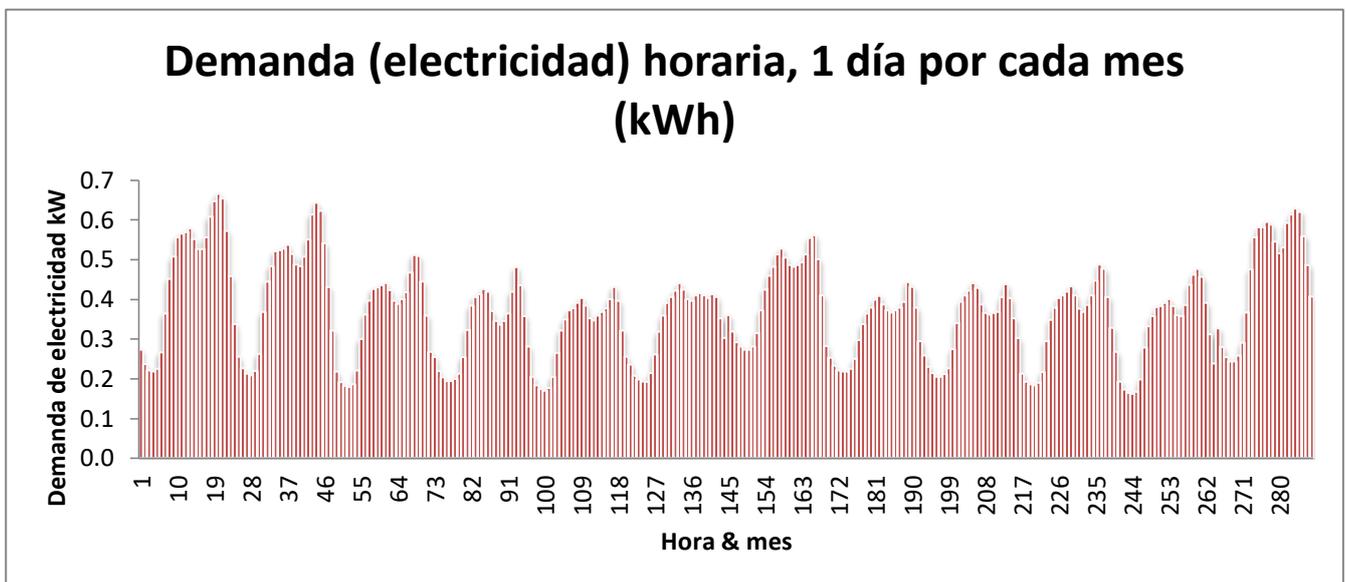


Figura 3. Demanda eléctrica horaria, se muestra un día por cada mes del año.

Estos serán los valores que se introducirán en el modelo del Energy Hub.

En cuanto a la demanda de calor, un hogar medio consume al año unos 5050 kWh<sup>(6)</sup>. Existe mucha diferencia entre los meses de invierno y verano. A lo largo del año, la distribución mensual queda expuesta en la **Figura 4**<sup>(7)</sup>:

<sup>1</sup> Este tipo de gráfico puede resultar confuso al principio. En él, se muestra de forma horaria, la demanda durante un día representativo de Enero del valor 1 al 24; justo después se muestra la de un día de Febrero del 25 al 48 (donde el 25 correspondería a la 1h de la mañana y el 48 a las 24h); tras ello un día de Marzo, del 49 al 72, etc. Así hasta llegar al día representativo de Diciembre que iría del 265 al 288 (1h y 24h respectivamente).

Esta forma de representar los datos se repetirá de forma similar a lo largo del trabajo.

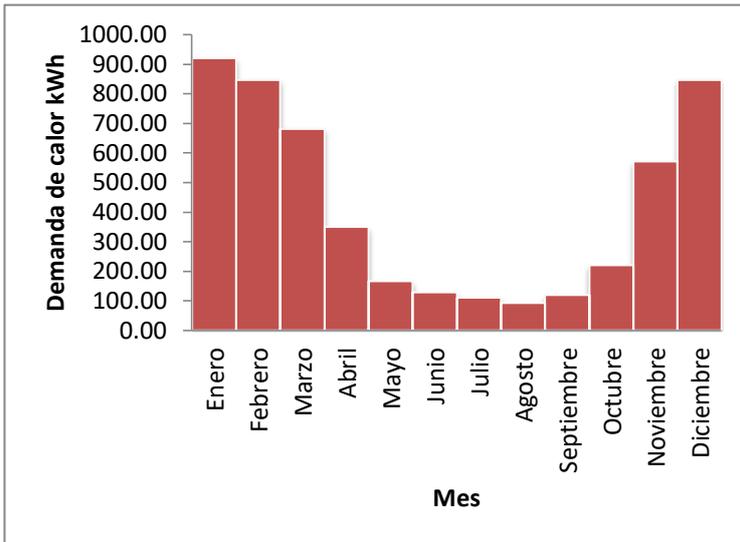


Figura 4. Demanda mensual de calor en un hogar medio.

La curva diaria de demanda en un día medio de Marzo <sup>(8)</sup> se muestra en la **Figura 5**.

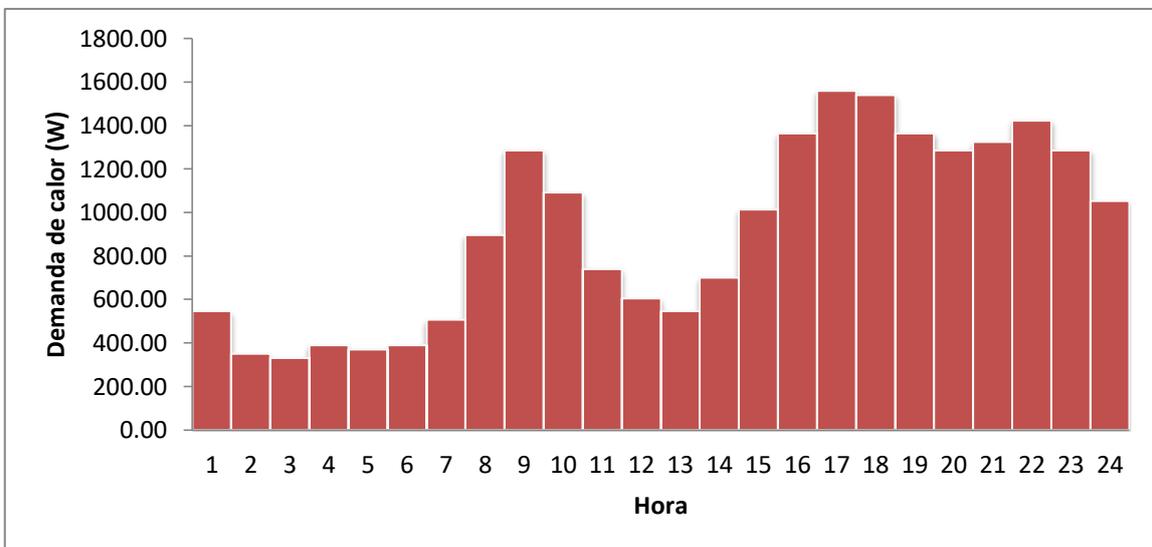


Figura 5. Perfil de demanda de calor horaria en un día medio de Marzo.

Del mismo modo que con la demanda de energía eléctrica, la demanda de calor, especificando por horas un día medio de cada mes quedaría como en la **Figura 6**.

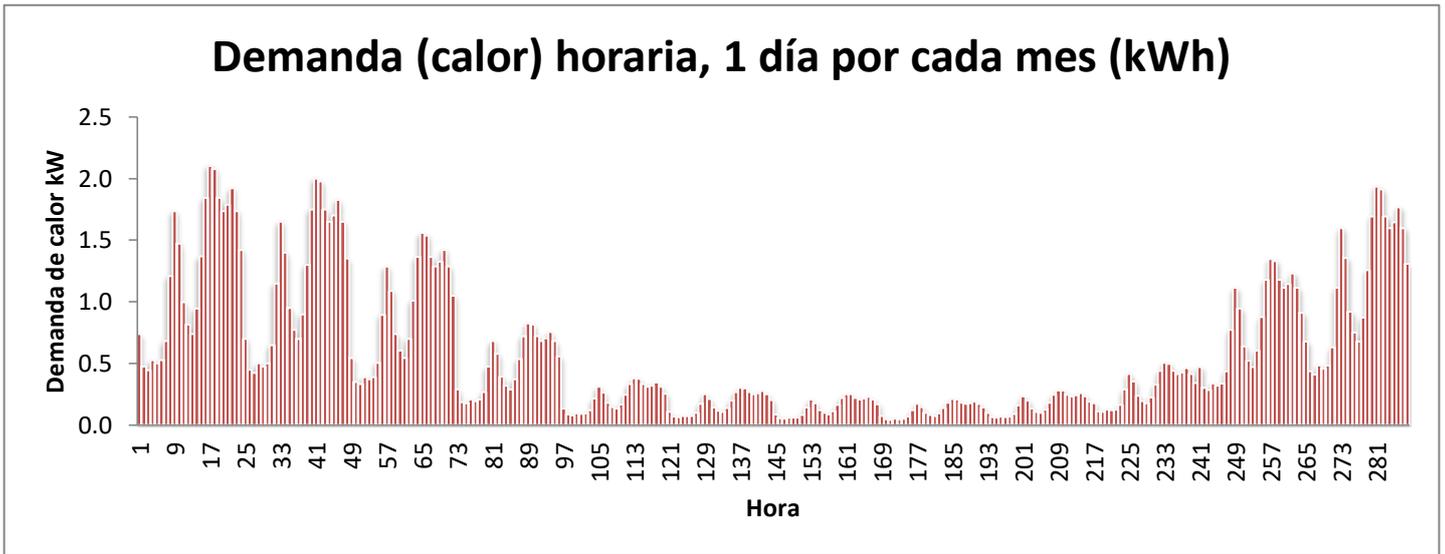


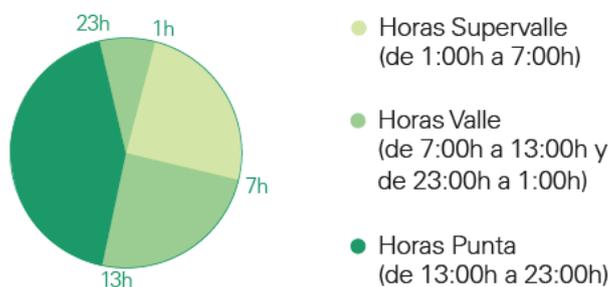
Figura 6. Demanda de calor horaria, se muestra un día por cada mes del año.

## Precio

El precio de la energía eléctrica fijo para el peaje 2.0 es de aproximadamente 0,12 €/kWh.

En el caso de tarifa nocturna, el precio sería de 0,08 €/kWh en periodo valle y 0,16 €/kWh en punta. El período valle corresponde a las horas comprendidas entre las 22.00h y 12.00h en invierno, y a las comprendidas entre las 23.00h y 13.00h en verano.

Por último, la tarifa supervalle tiene un precio de 0,071 €/kWh en periodo supervalle, 0,093€/kWh en periodo valle y 0,162€/kWh en periodo pico. <sup>(9)</sup> El horario se muestra en la **Figura 7**.



Fuente: Endesa

Figura 7. Horarios de los periodos de la tarifa supervalle.

El precio del término de potencia es de 0,1042€/kWdía <sup>(10)</sup>

El precio del gas natural es de 0,059 €/kWh <sup>(11)</sup>.

El precio del término fijo del gas es de 0,27€/día <sup>(12)</sup> contratando la tarifa TUR 2 para toda la comunidad.

## Impuestos

Al precio de la electricidad hay que añadirle un 5,1127% del impuesto eléctrico.

Al precio del gas hay que añadirle un 0,00234 €/kWh del impuesto especial sobre los hidrocarburos.

Al precio final de ambos, se debe añadir un 21% de IVA.

Tabla 1. Precios e impuestos de la energía.

Precios	Fijo (€/kWh)	Nocturna (€/kWh)	Supervalle (€/kWh)	Término fijo	Impuesto especial	IVA
Electricidad	0.12	0.08 0.16	0.071 0.093 0.162	0.1042 €/kWdía	5.11%	21%
Gas	0.059			0.27 €/día	0.00234 €/kWh	21%

## Radiación solar

Para los paneles fotovoltaicos hay que tener en cuenta el nivel de radiación solar en la zona. En el mes de Marzo en Zaragoza, el perfil es mostrado en la **Figura 8**<sup>(13)</sup>.

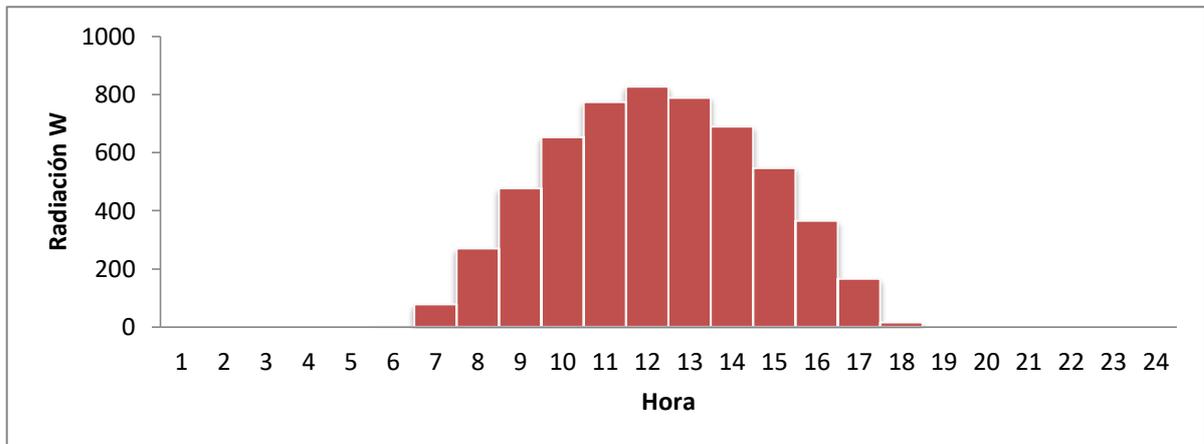


Figura 8. Perfil de radiación horario en un día medio de Marzo en Zaragoza.

La radiación solar también varía a lo largo del año, En la **Figura 9** se muestra la energía que recibe un m<sup>2</sup> cada mes.

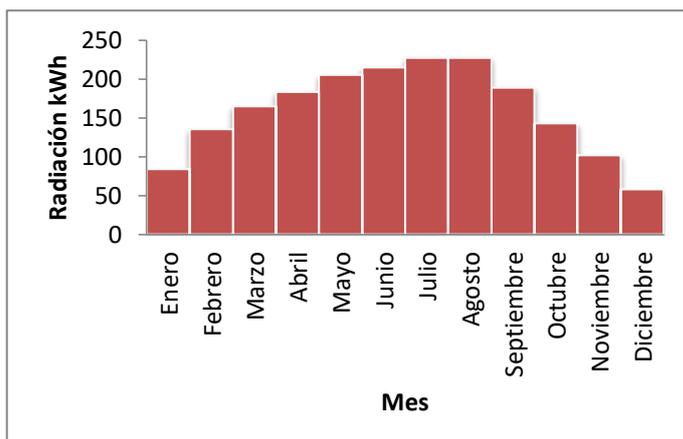


Figura 9. Radiación mensual en Zaragoza.

La radiación, tomando un día medio de cada mes a lo largo del año, se muestra en la **Figura 10**.

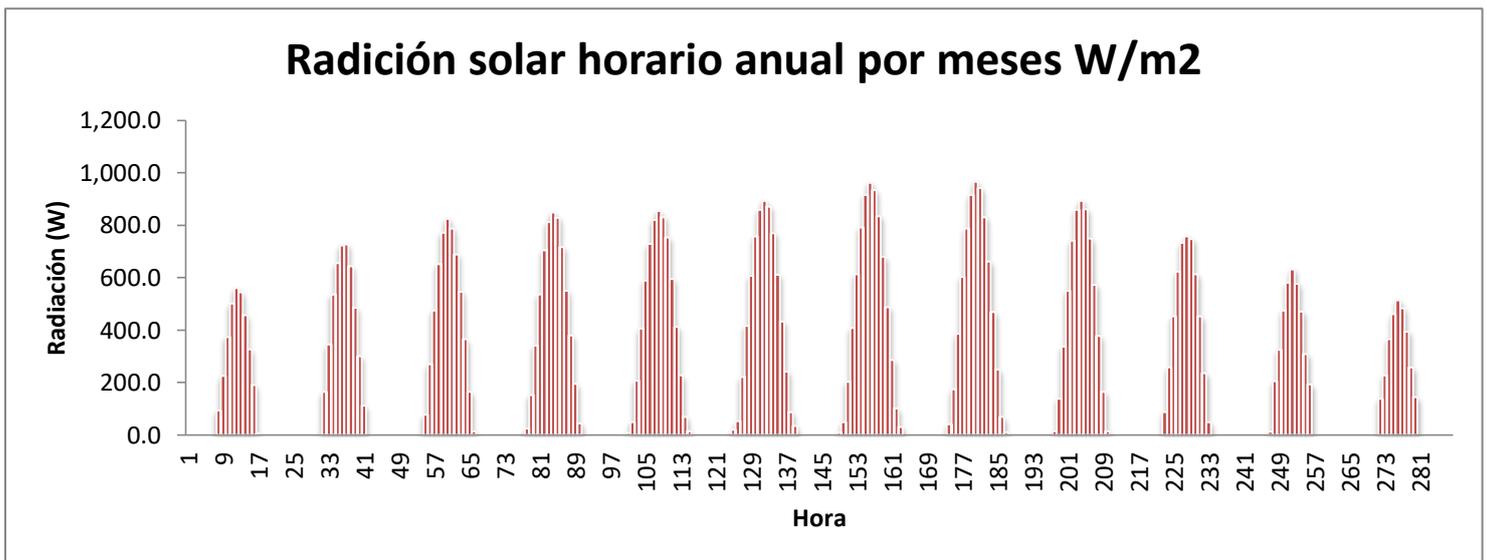


Figura 10. Radiación horaria en Zaragoza, tomando un día por cada mes.

## Temperatura

La temperatura ambiente es importante para calcular de una forma más precisa el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Queda desglosada de la misma forma que en figuras anteriores en la **Figura 11**.

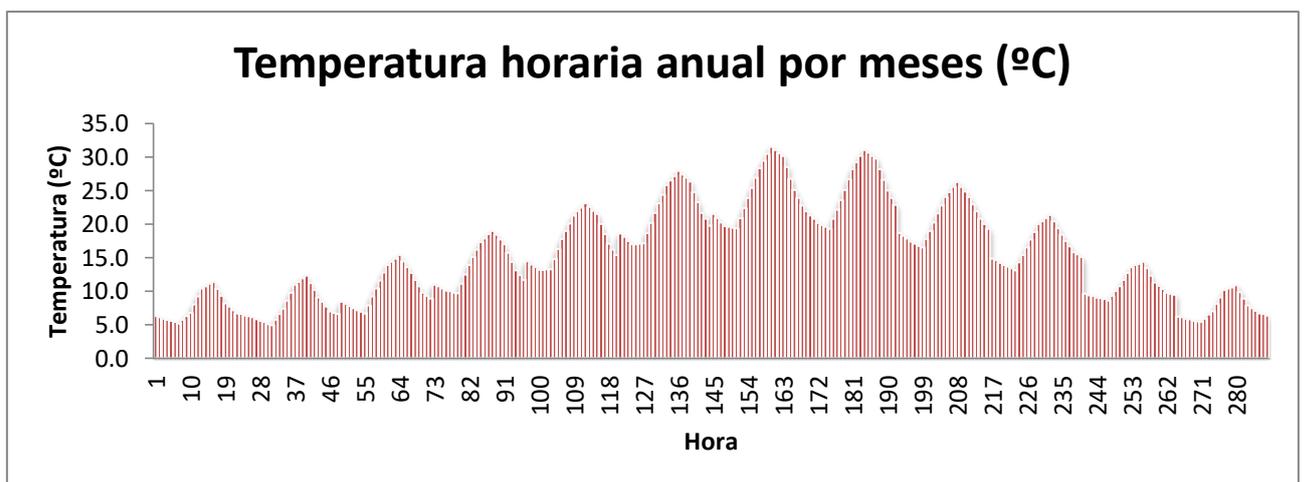


Figura 11. Temperatura horaria, tomando un día de cada mes del año.

## Emisiones de CO<sub>2</sub>

### Red eléctrica

Las emisiones de CO<sub>2</sub> de la red eléctrica española en 2018 fueron de **media de 0,246 kgCO<sub>2</sub>/kWh** <sup>(14)</sup>. Este número se va a tomar como referencia a lo largo del trabajo, pero se debe tener en cuenta que en las zonas insulares las emisiones son bastante superiores a la media, siendo en Canarias 0,649 kgCO<sub>2</sub>/kWh y en Baleares 0,822 kgCO<sub>2</sub>/kWh, por lo que el impacto en la reducción de emisiones sería muy superior en estas regiones.

### Gas natural

Las emisiones de CO<sub>2</sub> del **gas natural** son de **0,204 kgCO<sub>2</sub>/kWh** <sup>(15)</sup>. Es el hidrocarburo que menos emisiones produce. Siendo superado por el gasóleo con 0,287 kgCO<sub>2</sub>/kWh y, el propano y el butano 0,244 kgCO<sub>2</sub>/kWh.

## Energy Hub con panel fotovoltaico, bomba de calor y quemador de gas

El primer modelo a estudiar va a ser el más sencillo. Se tienen dos inputs, la energía de la red eléctrica y el gas natural de la red de gas. Los outputs son la energía eléctrica y el calor que requiere el edificio.

Las funciones de los componentes del Energy Hub son las siguientes:

- **Panel fotovoltaico:** Transformar la energía solar en energía eléctrica, disminuyendo la cantidad que se necesita tomar de la red.
- **Bomba de calor:** Puede transformar la energía eléctrica en calor. De esta forma no sería necesario utilizar el gas natural.
- **Quemador de gas:** Transforma el gas natural en calor.

El esquema del Energy Hub sería el que aparece en la Figura 12.

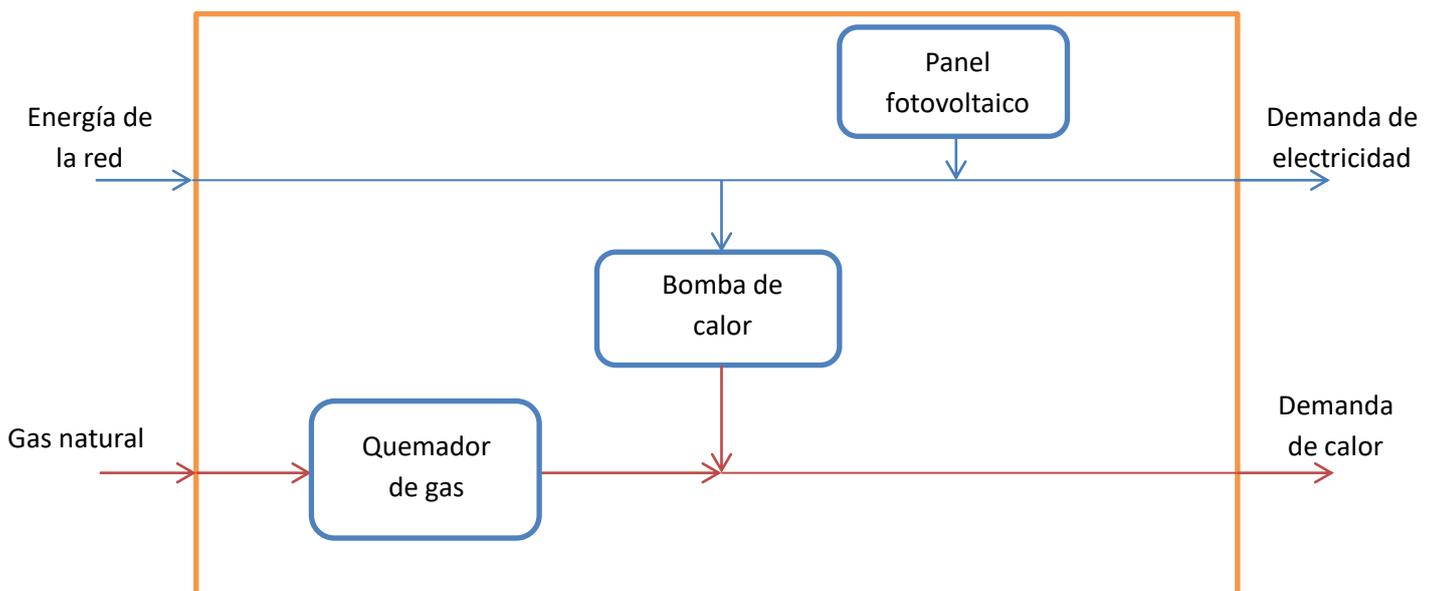


Figura 12. Esquema de un Energy Hub con bomba de calor y panel fotovoltaico.

Para poder analizar los costes se deben conocer las características de los elementos del Energy Hub, como son el precio por kW de potencia, la vida útil y el rendimiento, así como los costes de instalación. Éstos aparecen recogidos en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Características de los elementos del Energy Hub de la Figura 12.

Elemento	Precio (por m <sup>2</sup> o kW)	Vida útil (años)	Rendimiento
Panel fotovoltaico <sup>(16)</sup>	600€ a 800€ <sup>(17)</sup>	25	17 %
Bomba de calor <sup>(18) 2</sup>	Aprox. 1000€	20	COP medio 3,4
Quemador de gas natural	Aprox. 800€ <sup>(19)</sup>	20	98 %

## Realización del programa en MatLab.

### Nomenclatura:

CapBomba	Capacidad de la bomba de calor (kW)
CapPV	Capacidad de la placa fotovoltaica (m <sup>2</sup> )
CapQuema	Capacidad del quemador (kW)
ConsElec(h)	Consumo de electricidad (kW)
ConsGas(h)	Consumo de gas (kW)
CosteTotal	Coste del sistema
DCalor(h)	Demanda de calor (kW). Edificio
DCalorVivienda(h)	Demanda de calor (kW). Una vivienda
DElec(h)	Demanda de electricidad (kW). Edificio
DElecVivienda(h)	Demanda de electricidad (kW). Una vivienda
EmiCO2final	Emisiones de CO2 finales
EmiCO2elec	Emisiones de CO2 (kg por kWh de electricidad)
EmiCO2gas	Emisiones de CO2 (kg por kWh de gas natural)
EfPanel	Eficiencia del panel (sin temperatura)
h	Hora del día
i	Parámetro iterativo, referente a las horas
ImpElec	Impuestos a la electricidad
ImpGas	Impuestos al gas
j	Parámetro iterativo, referente a la capacidad de la bomba de calor
k	Parámetro iterativo, referente a la capacidad de los paneles fotovoltaicos
MatrizCoste	Matriz con todas las combinaciones de costes
MatrizEmisiones	Matriz con todas las combinaciones de CO2
minimo	Coste mínimo
PBomba	Precio de la bomba de calor
PElec	Precio de la electricidad (por kWh)
PGas	Precio del gas (por kWh)
PPV	Precio de los paneles fotovoltaicos (por m <sup>2</sup> )
PQuema	Precio del quemador (por kW)
PrecioAnual	Precio de la energía del edificio durante un año
Radiacion(h)	Radiación solar
RendBomba	Rendimiento de la bomba de calor
RendPV	Rendimiento de la instalación fotovoltaica
RendPVDir	Rendimiento del panel fotovoltaico
RendQuema	Rendimiento del quemador

<sup>2</sup> Los valores de las bombas de calor son aproximados y dependen del modelo, COP y potencia nominal, así como de la temperatura exterior.

<b>Tc</b>	Temperatura de trabajo de la celda fotovoltaica
<b>Temperatura</b>	Temperatura ambiente
<b>TerFijoGas</b>	Término fijo de la factura del gas
<b>TerPotencia</b>	Término de potencia de la factura eléctrica
<b>TVBomba</b>	Tiempo de Vida de la bomba de calor
<b>TVPV</b>	Tiempo de Vida de los paneles fotovoltaicos
<b>TVQuema</b>	Tiempo de Vida del quemador
<b>vectormin</b>	Vector que guarda los valores de capacidad mínimos
<b>ViviendasEdificio</b>	Número de viviendas en el edificio
<b>VRed</b>	Precio de venta de energía a la red (0 si no hay recompra)

### 1. Se establecen las constantes

```

%Las demandas de un día medio kW
DCalorVivienda=[];
DElecVivienda=[];
ViviendasEdificio=15;
DElec=DElecVivienda*ViviendasEdificio;
DCalor=DCalorVivienda*ViviendasEdificio;

%Radiacion solar un día medio kW
Radiacion=[];
Radiacion=0.001*Radiacion;
Temperatura=[];

%Precios energía (Euros)
PElec=0.12;
ImpElec=1.051127*1.21;
PElec=PElec*ImpElec;
TerPotencia=0.1042; %€/kWhDía
PGas=0.059+0.00234; %Suma el impuesto sobre los hidrocarburos
ImpGas=1.21;
PGas=PGas*ImpGas;
TerFijoGas=0.27; %€/día
VRed=0; %0.055*ImpElec Precio de venta a la red (0 si no hay venta)

%Constantes generales
EmiCO2elec =0.246; %kgCO2/kwh
EmiCO2gas =0.2040; %kgCO2/kwh

%Precios Aparatos

PBomba =1000;
PPV =700;
PQuema =800;

%Rendimientos
RendBomba =3.4;
RendQuema =0.98;

%Rendimiento fotovoltaica
RendPV = 0.86; %Rendimiento instalacion
Tc=Temperatura+(47-20)/0.8*Radiacion; %Temperatura de trabajo
EfPanel=0.17;
RendPVDir=EfPanel*(1-0.005*(Tc-25)); %Rendimiento panel

%Tiempo de vida (años)
TVBomba =20;
TVPV =25;
TVQuema=20;

```

```
%Inicializacion
CosteTotal=0;
minimo=1000;
```

## 2. Inicio de los bucles

Se establecen 3 bucles. Uno de ellos para analizar qué sucede a cada hora del día y los otros dos para analizar todas las combinaciones de capacidad de la bomba de calor y paneles fotovoltaicos.

```
for j=1:150 %filas
    CapBomba=(j-1)*0.1;
    for k=1:150 %columnas
        CapPV=(k-1);
    CosteTotal=0;

for i=1:288
    h=i;
```

Se resta 1 a cada parámetro para que también quede representado el valor 0. Por tanto a los resultados habrá que restar también 1 para obtener el dimensionamiento real.

## 3. Ecuación del flujo eléctrico

```
ConsElec(h)=CapBomba-Radiacion(h)*RendPV*RendPVDir(h)*CapPV+DElec(h);
```

## 4. Ecuación del flujo de calor

```
ConsGas(h)=(DCalor(h)-CapBomba*RendBomba)/RendQuema; %El consumo Gas =Cap quemador
```

```
if ConsGas(h)<0 %Asegurar que el Consumo no es negativo
    ConsGas(h)=0;
```

```
    CapBomba2=DCalor(h)/RendBomba; %La bomba consume lo necesario para que sea
0 el consumo de gas
    ConsElec(h)=CapBomba2-Radiacion(h)*RendPV*RendPVDir(h)*CapPV+DElec(h); %Se
recalcula el consumo eléctrico con la nueva potencia de la bomba
```

```
end
```

```
CapQuema=max(ConsGas); %Recordamos
```

Si se produce más calor que el que va a ser necesario (el consumo es menor que cero), el consumo de gas es 0 y se recalcula el consumo de electricidad, ya que la bomba de calor no trabajará a potencia máxima y solo consumirá lo necesario.

La capacidad del quemador, será igual a la potencia máxima de consumo de gas.

## 5. Costes

```
%En el coste se incluyen precios de las energías y aparatos (incluida la
%instalacion
    if ConsElec(h) < 0
        Coste(h) = ConsElec(h) * VRed + ConsGas(h) * PGas + PBomba * CapBomba / TVBomba / 365 / 24 + P
        PV * CapPV / TVPV / 365 / 24;
    else
        Coste(h) = ConsElec(h) * PElec + ConsGas(h) * PGas + PBomba * CapBomba / TVBomba / 365 / 24 +
        PPV * CapPV / TVPV / 365 / 24;
    end
CosteTotal = CosteTotal + Coste(h);

%Se organiza en una matriz los precios en funcion de las capacidades de
%la bomba (filas) y la PV (columna)
MatrizCoste(j,k) = CosteTotal;
end

%Se añade el precio del quemador, el máximo del consumo. También el término
fijo
%del gas y el término de potencia de la energía
MatrizCoste(j,k) = MatrizCoste(j,k) + PQuema * CapQuema / TVQuema / 365 / 24 + TerFijoGas + Te
rPotencia * max(ConsElec);

%Para calcular las emisiones CO2 más adelante (si no hay venta a la red)...
    if ConsElec(h) < 0
        ConsElecEmisiones(h) = 0;
    else
        ConsElecEmisiones(h) = ConsElec(h);
    end
```

Se toma el coste horario y se suma. En el caso de que el consumo de electricidad sea negativo (excedente de energía eléctrica) el precio a pagar por ella será 0€ si no se vende energía a la red, o tomará un valor diferente al precio de compra dependiendo a cuánto la compre el sistema eléctrico.

Después se coloca ese valor en una matriz que tendrá todas las combinaciones de precios. Fuera del bucle horario, hay que añadir el precio del quemador, del que se desconoce su capacidad (el máximo del consumo) hasta que se han analizado todas las horas así como los términos fijos.

## 6. Emisiones de CO2

```
%Calculadora CO2 anual
EmiCO2 = (EmiCO2elec * sum(ConsElecEmisiones) + EmiCO2gas * sum(ConsGas)) * 30.5;
MatrizEmisiones(j,k) = EmiCO2;
```

Si no hay venta a la red, se calculará con el vector “ConsElecEmisiones” en el que están los valores de consumo negativo descritos como “0”. Si hubiese venta, se haría con el vector “ConsElec”, en el que estos valores negativos restarían emisiones al total.

### 7. Buscador del mínimo y de estado

```
%Buscador del mínimo
    if MatrizCoste(j,k)<minimo
        minimo=MatrizCoste(j,k);
        vectormin=[j,k];
        EmiCO2final=MatrizEmisiones(j,k);
    end
%Buscador de estado
    if j==68 && k==95
        %dato=ConsElec
        %CapQuema
        %plot(dato);
    end
```

Debido al gran número de valores en la MatrizCoste, para no buscar el mínimo manualmente, se programa un buscador del mínimo.

Además, para analizar fácilmente datos en un estado concreto (por ejemplo, dibujar la gráfica del consumo eléctrico para 6,8 kW de bomba y 95 m<sup>2</sup> de panel) se programa el buscador de estado.

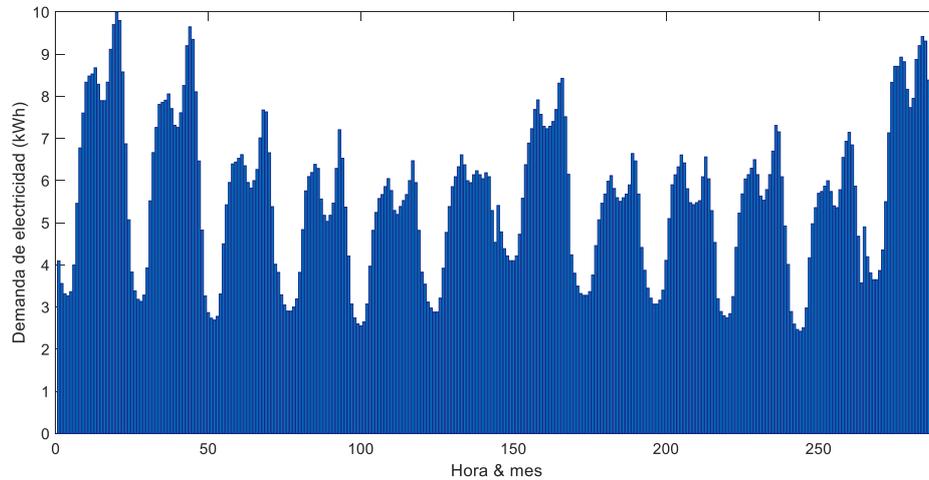
### 8. Fin del programa

```
end
end
MatrizCoste;
MatrizCosteAnual=MatrizCoste*30.5;
MatrizEmisiones;
PrecioAnual=minimo*30.5
minimo
vectormin
EmiCO2final
```

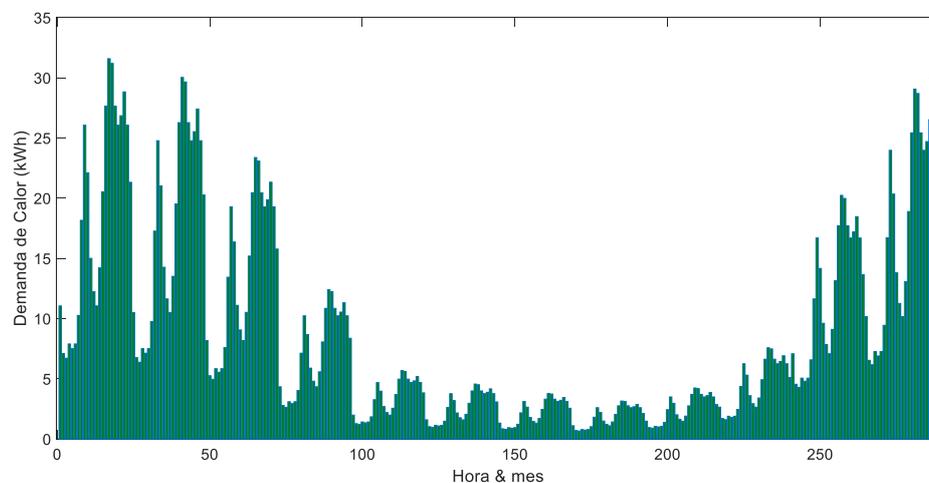
Fin de los bucles y muestra de resultados.

## Resultados

La demanda de las 15 viviendas aparece en la **Figura 13** y **Figura 14**.



**Figura 14.** Demanda de electricidad del edificio.



**Figura 13.** Demanda de calor del edificio.

En la **Figura 13** y **Figura 14** se muestra un día representativo de cada mes del año, dividido en sus 24 horas. Con estas demandas, el coste de la energía **sin Energy Hub** sería de **13236 €**.

Sin embargo, tras un dimensionamiento adecuado de la bomba de calor y los paneles fotovoltaicos, es posible reducir significativamente este valor.

El programa da como resultado de mayor eficiencia:

- Bomba de calor: **7,6 kW**.
- Paneles fotovoltaicos: **72 m<sup>2,3</sup>**

El precio anual de la energía, para el total del edificio con 15 viviendas, es de **10493 €/año**, lo

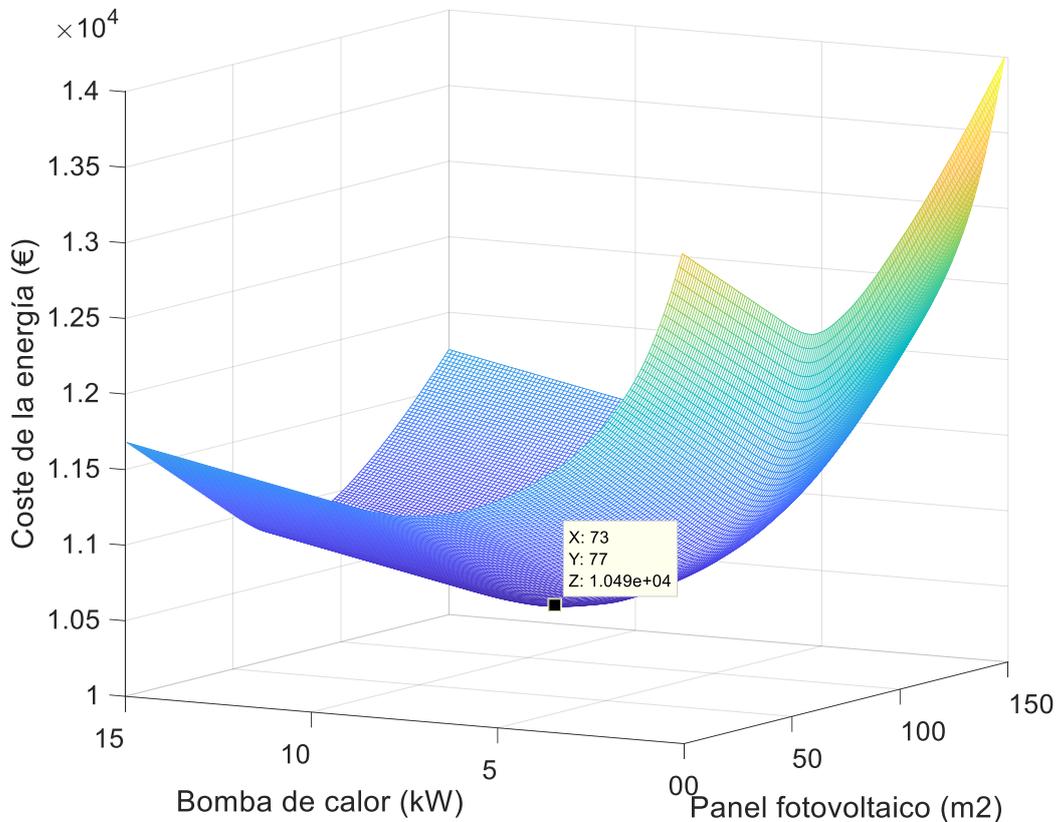


Figura 15. Coste anual de la energía en función de la bomba de calor y el panel fotovoltaico. EH con PV y BC

que supone un ahorro de 2743 € anuales, el 21 %.

En la **Figura 15** se puede observar como, a medida que se aumenta la potencia de la bomba de calor, disminuye el precio de la energía, hasta un punto a partir del cual, vuelve a aumentar. Lo mismo sucede con los paneles fotovoltaicos. La máxima depresión se encuentra en el punto señalado, combinación de ambas variables.

<sup>3</sup> El dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos se va a expresar en m<sup>2</sup> de panel. En función de los rendimientos tenidos en cuenta es este trabajo, el equivalente en kW pico sería:

$$5\text{m}^2=1\text{kWp}$$

$$1\text{m}^2=0,2\text{kWp}$$

Más exactamente  $\frac{1\text{ kWp} \cdot 0,86}{0,17} = 5,059\text{ m}^2$  siendo 0,86 el rendimiento de la instalación y 0,17 el rendimiento del panel.

## Consumos de electricidad y gas

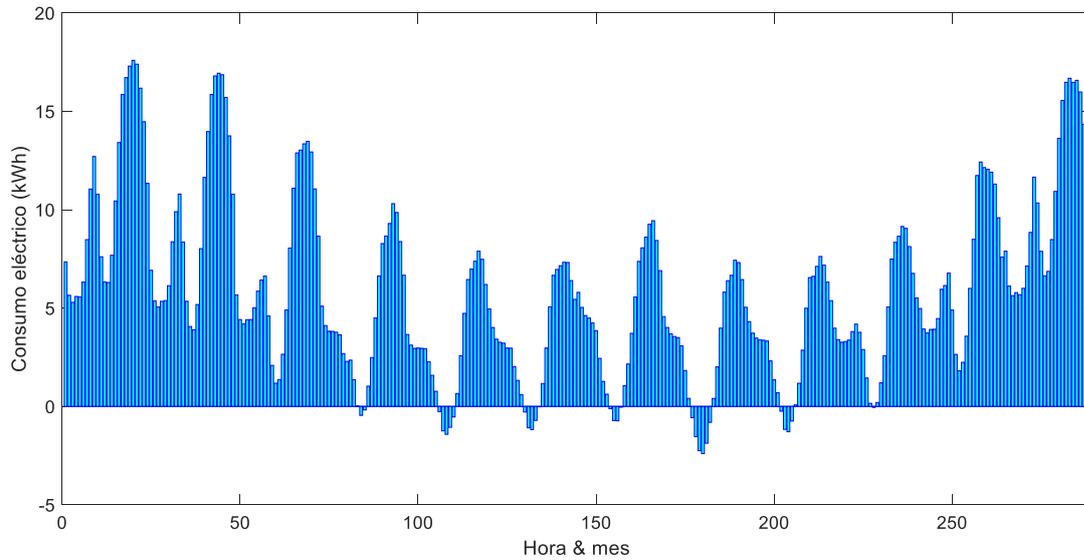


Figura 16. Consumo de electricidad por horas, tomando un día medio de cada mes. EH con PV y BC

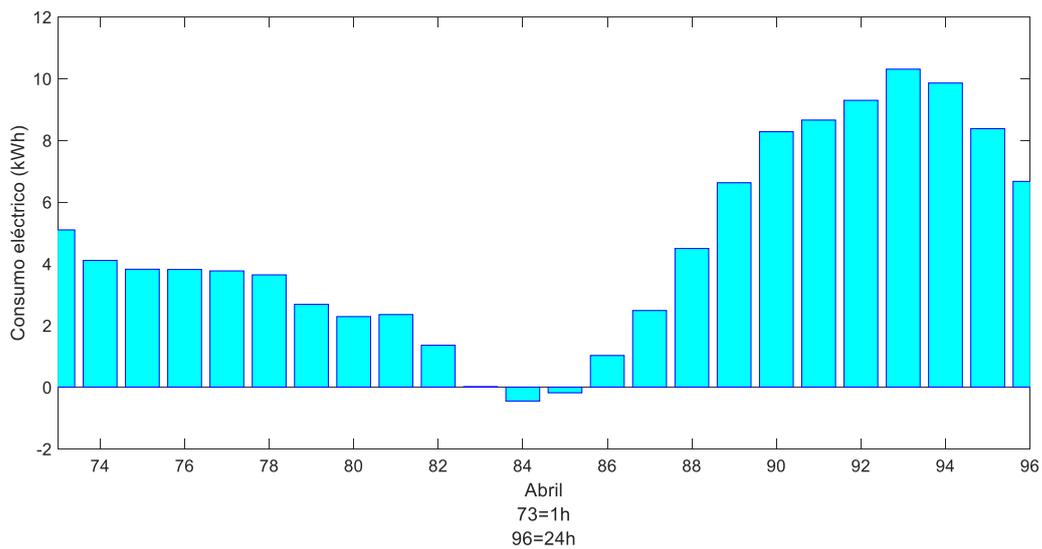


Figura 17. Consumo de electricidad por horas, un día medio de Abril. EH con PV y BC

En la curva de consumo de energía eléctrica de la **Figura 16** y la **Figura 17**, se puede observar el impacto de los paneles fotovoltaicos, los cuales consiguen reducir a 0 el consumo de energía de la red a mediodía durante los meses con más sol y de forma significativa el resto del año.

Sin embargo, la potencia pico, es mayor que la demanda pico de electricidad, debido al uso de la bomba de calor para producir calor.

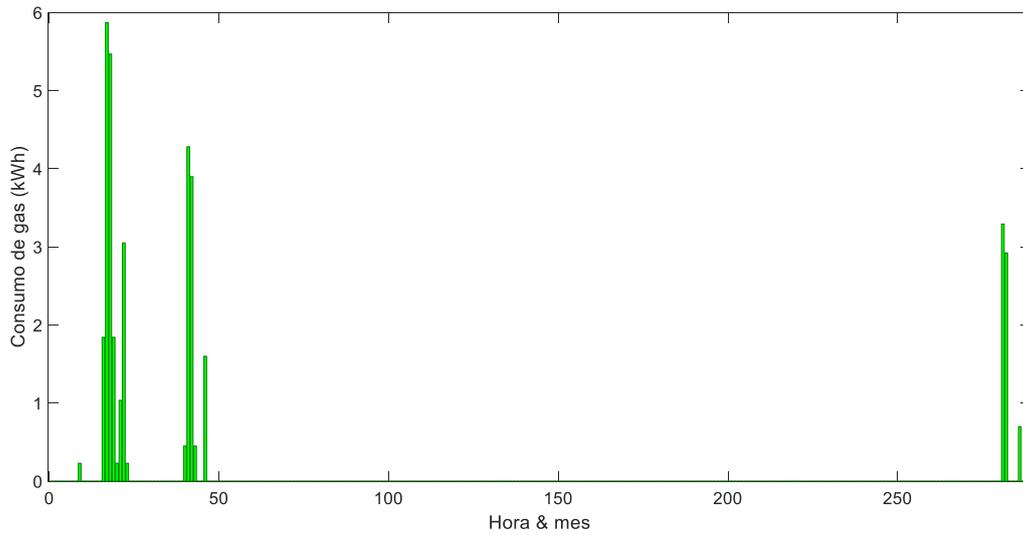


Figura 18. Consumo de gas natural por horas, tomando un día medio de cada mes. EH con PV y BC

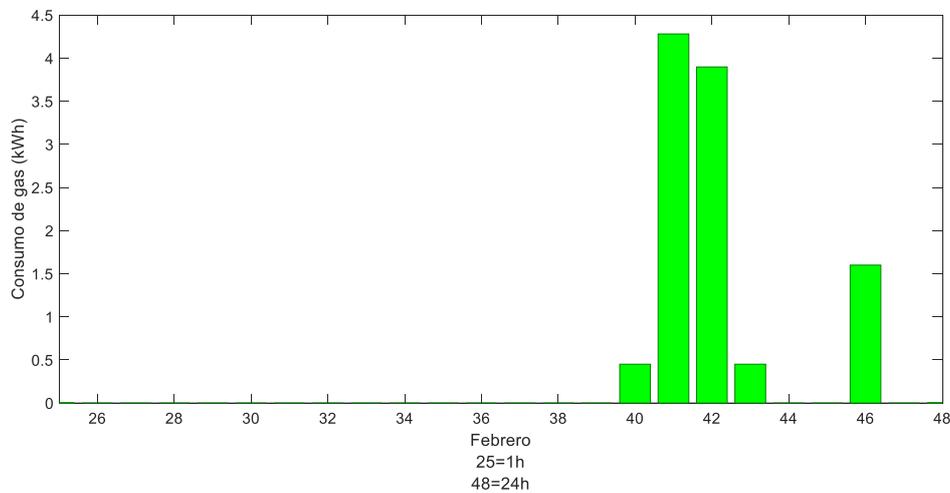


Figura 19. Consumo de gas natural por horas, un día medio de Febrero. EH con PV y BC

La curva de consumo de gas mostrada en la **Figura 18** y la **Figura 19**, presenta un efecto interesante. Pese a ser el precio del gas la mitad que el del gas natural, debido a los bajos costes de la bomba de calor y su buen rendimiento ( $COP=3,4$ ) hace que sea más eficiente consumir energía eléctrica que gas en la producción de calor durante la mayor parte año. Sin embargo, durante los meses de invierno (Diciembre, Enero y Febrero) y buscando la máxima eficiencia, es preferible no aumentar la potencia de la bomba un poco más para cubrir la totalidad de la demanda de calor.

## Emisiones de CO<sub>2</sub>

Las emisiones de CO<sub>2</sub> antes de instalar el Energy Hub, eran de 27764 kg de CO<sub>2</sub>. Gracias a la puesta en marcha de este sistema, las emisiones se reducen en un 53% hasta los **13032 kg** de CO<sub>2</sub>.

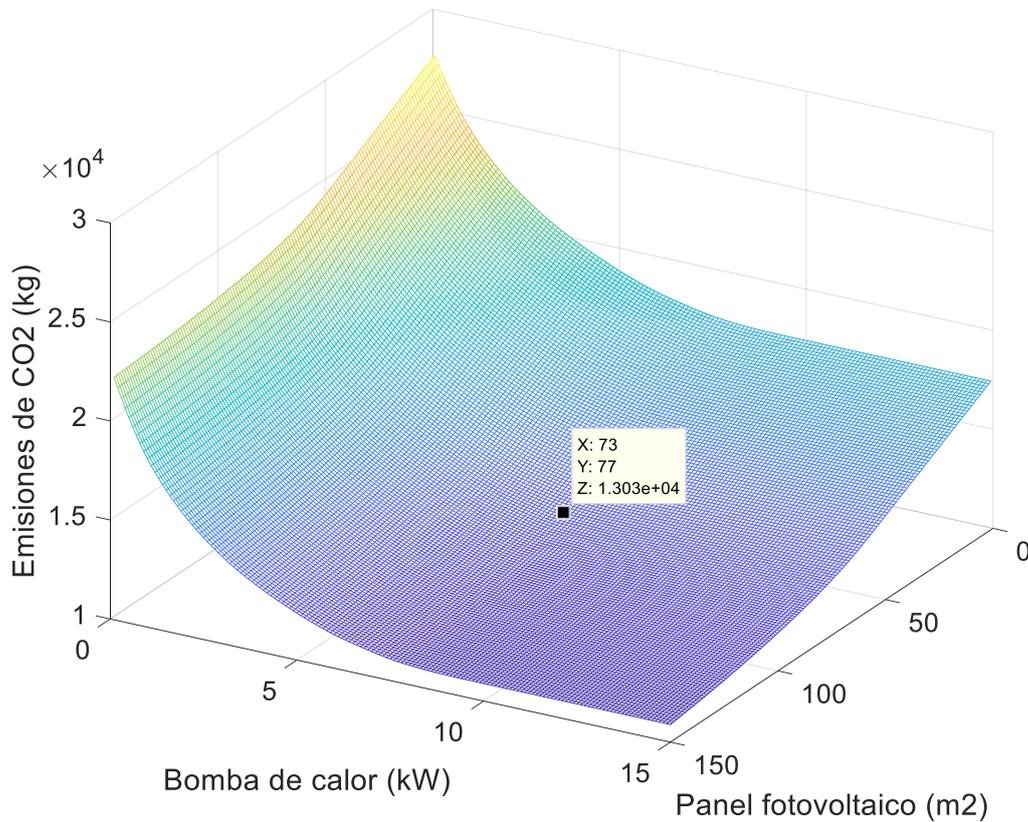


Figura 20. Emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la bomba de calor y los paneles fotovoltaicos.

En la **Figura 20** se puede ver como la bomba de calor y los paneles fotovoltaicos tienen una buena sinergia a la hora de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Sin los paneles solares, la bomba de calor reduciría emisiones a medida que sustituye gas por electricidad y, debido al COP de 3.4, hace más eficiente el consumo energético. Por otro lado, sin la bomba de calor, los paneles solares reducirían las emisiones de CO<sub>2</sub> a medida que sustituyesen energía eléctrica de la red, sin poder reducir las provenientes del gas natural.

La combinación de ambas tecnologías lleva a una fuerte reducción en las emisiones contaminantes.

Tabla 3. Resumen comparativo. Sin EH frente a con BC y PV.

Resultados	Sin EH	BC y PV
Bomba de calor (kW)	0	7.6
Panel fotovoltaico (m2)	0	72
Quemador de gas (kW)	31.6	5.87
Batería	0	0
Inversión inicial (€)	25280	62696
Sólo la energía (€)	11972	7862.2
Sólo los elementos (€)	1264	2630.8
Emisiones de CO2 (kg)	27764	13032
Coste anual de la energía (€)	13236	10493

## Incluyendo venta a la red

Los excedentes de las instalaciones de generación asociadas al autoconsumo están sometidos al mismo tratamiento que la energía producida por el resto de las instalaciones de producción, precio pool, aproximadamente 0,055 €/kWh<sup>(20)</sup>.

La nueva instalación contaría con:

- Bomba de calor: **7,6 kWh**
- Paneles fotovoltaicos: **100 m<sup>2</sup>**

Hay un incremento sustancial en los paneles solares óptimos mientras que la bomba de calor sigue manteniendo la misma potencia. Esto se debe a que ahora es rentable sobredimensionar los paneles fotovoltaicos ya que es posible disminuir más el consumo de la red sin riesgo a perder energía no consumida durante las horas de máxima radiación solar.

El precio de la energía anual pasaría a ser **10366 €/año**, reduciéndose en 127 € respecto al caso sin venta de excedentes y en 2870 € respecto al caso sin Energy Hub, lo que supone un ahorro del 22%.

## Consumo de electricidad

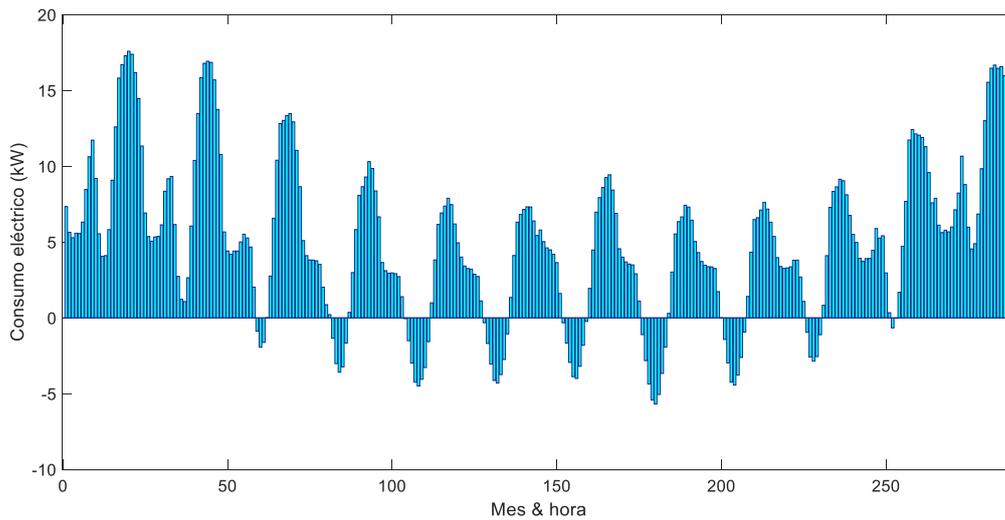


Figura 21. Consumo de electricidad por horas, tomando un día medio de cada mes. EH con PV y BC + VR.

En la **Figura 21**, vemos cómo se ha incrementado el periodo de tiempo donde consumo es negativo, siendo los excedentes mayores. Ahora hay más margen para incrementar los paneles fotovoltaicos, ya que el excedente se puede vender y recuperar así parte de las pérdidas debidas al sobredimensionamiento durante los meses de verano.

### Emisiones de CO<sup>2</sup>

Aunque el ahorro monetario no aumente significativamente, si se produce una importante reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo ahora **10993 kg CO<sub>2</sub>**. Esto supone una reducción del 16% respecto al caso sin venta de excedentes y del 60% respecto al caso sin Energy Hub.

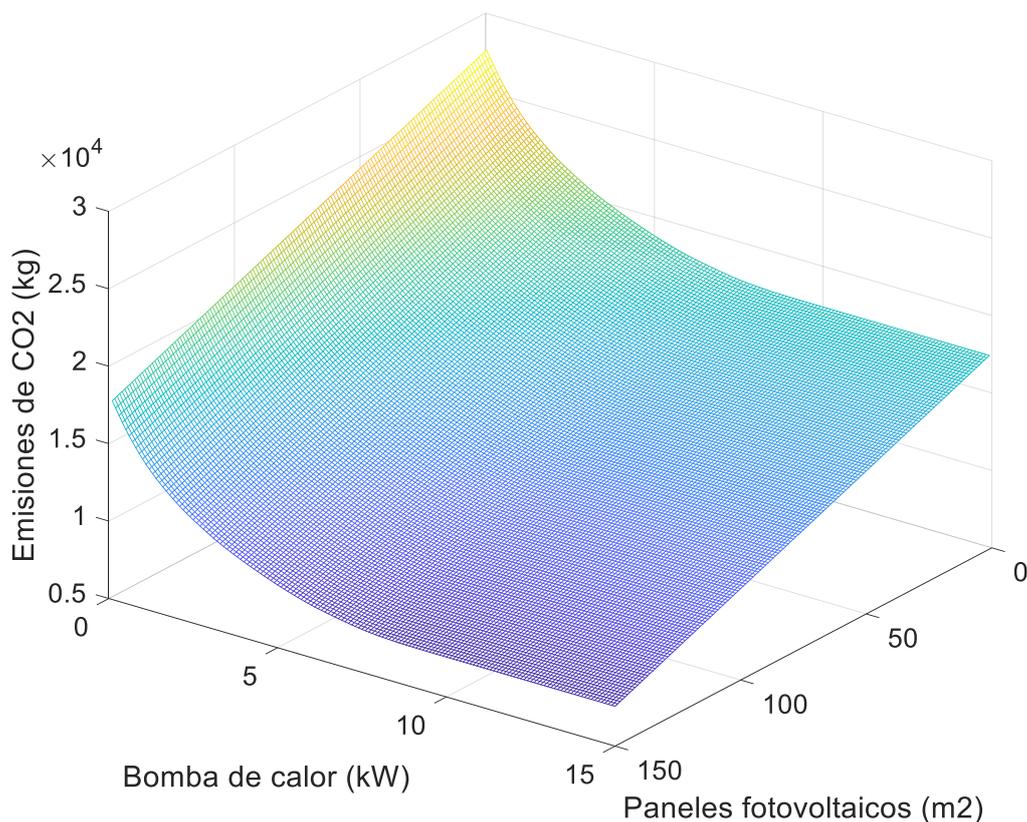


Figura 22. Emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la bomba de calor y los paneles fotovoltaicos. EH con PV y BC + VR.

En este caso si se puede observar como un aumento de los paneles fotovoltaicos conlleva una disminución lineal de las emisiones, mientras que la bomba de calor alcanza un límite en el que su aumento no repercute en mayor reducción de CO<sub>2</sub>.

## Variación de parámetros

### Sin uso de gas natural

Como se ha visto anteriormente, el consumo de gas es muy reducido, debido a la eficiencia de la bomba de calor. Cabe ahora preguntarse en esta situación, la conveniencia de eliminar esta fuente de energía como input.

El dimensionamiento más eficiente para eliminar el gas natural como fuente de energía sería:

- Bomba de calor: **9,3 kW**.
- Panel fotovoltaico: **72 m<sup>2</sup>**.

El coste anual de la energía sería de 10545 € y las emisiones de CO<sub>2</sub> 12880 kg.

Por lo cual, con un sobrecoste de tan solo **52 €** se podría suprimir el uso del gas.

Tabla 4. Resumen comparativo. Sin EH, BC PV con VR y BC PV sin VR.

Resultados	Sin EH	BC y PV	BC y PV + VR	BC y PV sin Gas	BC y PV + VR sin Gas
Bomba de calor (kW)	0	7.6	7.6	9.3	9.2
Panel fotovoltaico (m2)	0	72	100	72	100
Quemador de gas (kW)	31.6	5.87	5.87	0	0
Batería	0	0	0	0	0
Inversión inicial (€)	25280	62696	82296	59700	79200
Sólo la energía	11972	7862.2	6951.2	8064	7158
Sólo los elementos	1264	2630.8	3414.8	2481	3260
Emisiones de CO2 (kg)	27764	13032	10993	12880	11889
Coste anual de la energía (€)	13236	10493	10366	10545	10418

### Precio del gas

La relación entre el precio del gas y de la energía eléctrica es muy importante para determinar qué fuente de energía es más importante a la hora de satisfacer la demanda de calor.

Tabla 5. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio del gas.

Precio del Gas · x	0.5605	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.4	2
BC (kW)	0	0.8	4.2	6.2	7.3	7.6	7.8	8.1	8.5
PV (m2)	62	69	72	72	72	72	72	72	72
Quemador (kW)	32.24	29.46	17.67	10.73	6.91	5.87	5.18	4.13	2.75

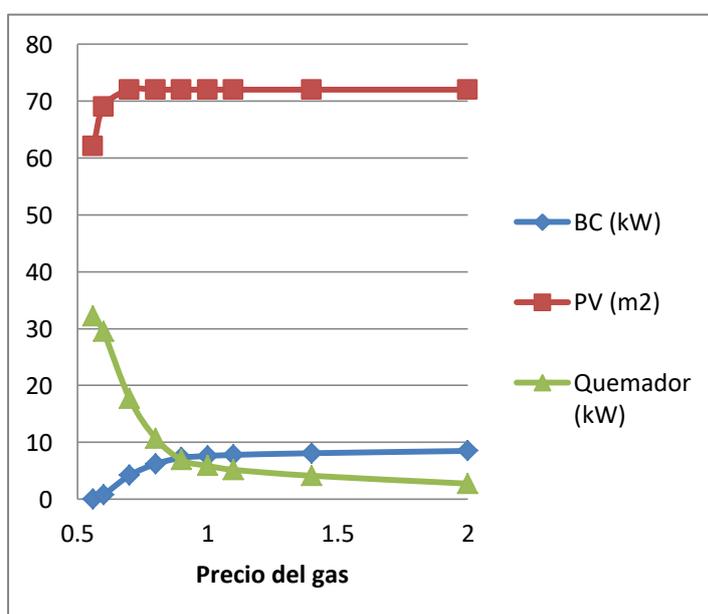


Figura 23. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio del gas.

Para precios del gas inferiores a 0.5605 veces el actual, la bomba de calor es inútil. A partir de ese valor, va cobrando importancia su implementación, junto con los paneles fotovoltaicos, reduciéndose rápidamente la importancia del quemador a medida que el precio del gas acerca a 1. De ahí en adelante los cambios ya no son significativos, tal y como se observa en la **Figura 23**.

## Importancia del COP de la bomba de calor

Tabla 6. Dimensionamiento óptimo del EH en función del COP de la BC.

COP de la BC	1.905	2	2.5	3	3.4	4	5	7
BC (kW)	0	1.1	7.4	8.2	7.6	6.7	5.6	4.2
PV (m2)	62	72	75	73	72	71	70	68
Quemador (kW)	32.24	30	13.36	7.14	5.87	4.89	3.67	2.24

De la misma forma que el precio, el rendimiento de la bomba de calor es un factor muy importante para decidir que recurso, gas natural o energía eléctrica, es más eficiente a la hora de satisfacer las demandas del edificio.

Vemos en la **Figura 24** que el rendimiento de la bomba debería ser muy bajo, inferior a 1.905, para que dejara de ser útil en el Energy Hub. Sin embargo, una vez aumenta el valor del COP, la bomba de calor empieza a sustituir el trabajo del quemador. A partir de un COP de 2.5, la potencia de la bomba de calor se reduce ya que, a medida que aumente su eficiencia, es necesaria menos energía para satisfacer la demanda.

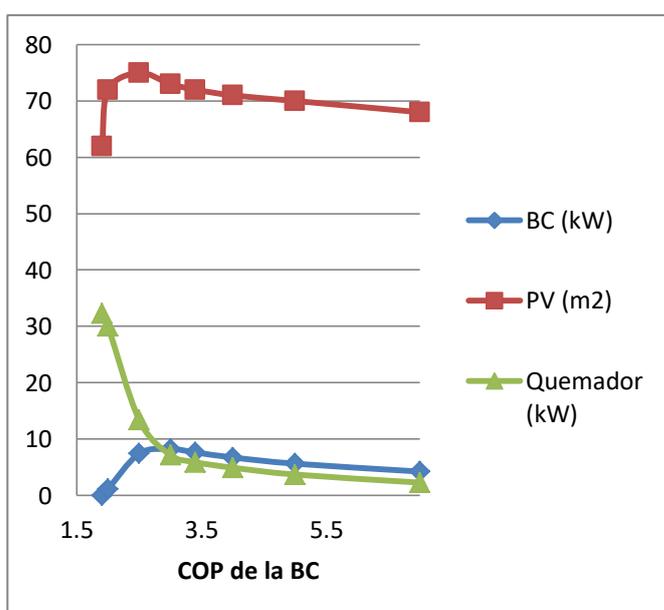


Figura 24. Dimensionamiento óptimo del EH en función del COP de la BC.

La curva realizada por los paneles fotovoltaicos es similar a la de la bomba de calor debido a que se adapta para satisfacer las nuevas demandas de energía eléctrica generadas por ésta.

El Coeficiente de eficiencia depende de la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío. Cuanto más pequeña es esta diferencia, mayor COP. Por ello, el uso de bombas de calor en países como España, donde las temperaturas exteriores no son especialmente bajas, resulta muy interesante.

### Precio del panel fotovoltaico

Precio PV	10	50	200	400	600	700	800	1000	1025	1032
BC (kW)	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
PV (m <sup>2</sup> )	709	353	168	104	81	72	68	55	51	0
Quemador (kW)	5.52	5.52	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87
Precio anual (€)	6315	7095	8432	9459	10187	10493	10775	11277	11330	11343

Tabla 7. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio del PV.

Respecto al precio del panel fotovoltaico, hay 3 zonas diferenciadas, que se pueden ver en la **Figura 25**.

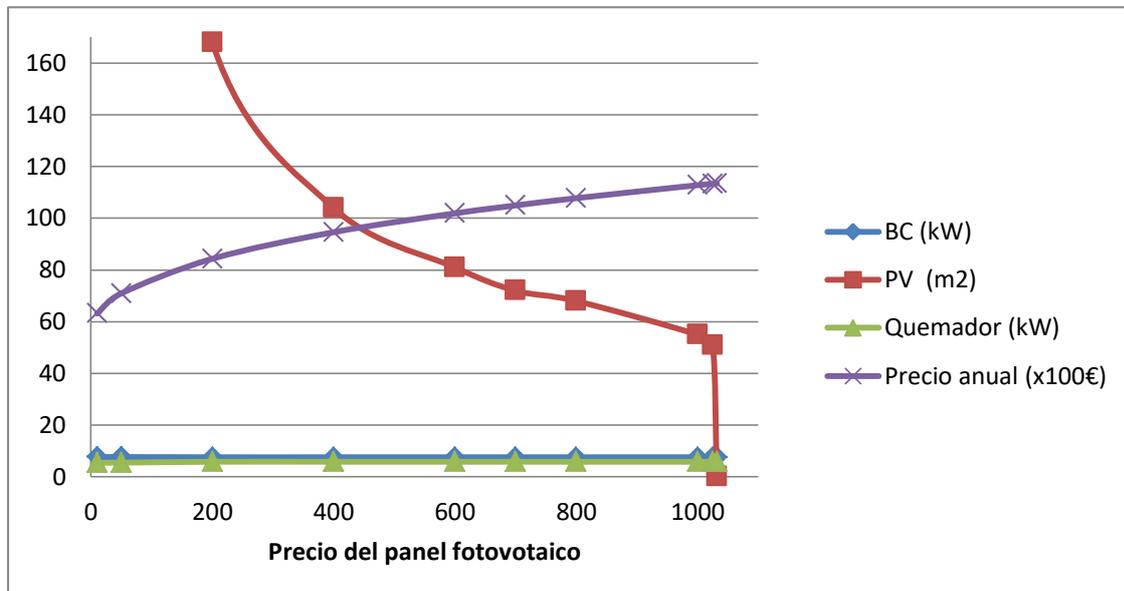


Figura 25. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio del PV.

A partir de los 1032 € deja de ser rentable incorporar paneles fotovoltaicos abruptamente, de 51 m<sup>2</sup> a 0. Esto se debe a que los 51 m<sup>2</sup> cubrían una potencia base constantemente, sin excedentes energéticos. Una vez aumenta el precio del panel, deja de ser rentable cubrir esta base con paneles y es mejor tomarla de la red directamente.

El rango de precios entre 400 y 1000 euros, donde el número de metros cuadrados de panel óptimo aumenta linealmente a medida que disminuye el precio. Cada vez es posible incluir más paneles a pesar de que en ciertos momentos haya excedentes que no van a poder ser utilizados.

Por último, el rango de precios menor a 400 euros, donde la utilidad del panel se dispara. Aquí ya es rentable incluir muchos paneles para cubrir la demanda eléctrica en horas del día con poca radiación solar, en las que se requiere mucha potencia instalada.

Podemos observar que las potencias de la bomba de calor y el quemador apenas se ven afectadas.

Por otra parte, teniendo la posibilidad de vender la energía producida a la red, podríamos convertirnos en productores netos con precios del panel fotovoltaico por debajo de 475 €/m<sup>2</sup>. Por debajo de este valor se hace rentable dedicarse a la producción ya que el coste de la instalación es inferior al precio de venta de la energía.

## Energy Hub con panel fotovoltaico, bomba de calor, quemador de gas y batería

Ahora, se va a añadir al modelo anterior una batería.

El esquema del Energy Hub es mostrado en la **Figura 26**.

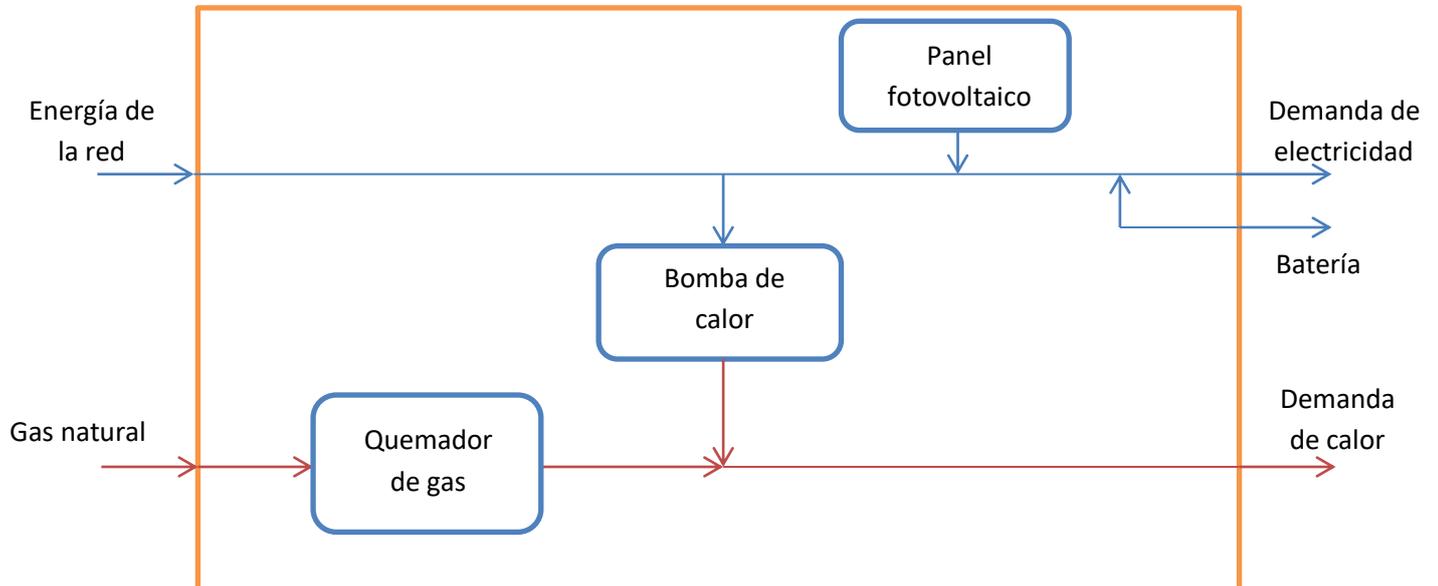


Figura 26. Esquema de un Energy Hub con bomba de calor, panel fotovoltaico y batería.

Tabla 8. Características de la batería.

Elemento	Precio (por m <sup>2</sup> o kW)	Vida útil (años)	Rendimiento
<b>Batería</b>	753 (21)	25 <sup>(22)</sup>	90 % <sup>(23)</sup>

Hay dos maneras de hacer funcionar la batería.

El primer modo es almacenar energía únicamente en los momentos en los que hay un exceso de producción fotovoltaica y no es posible consumir toda la energía producida. Una vez ya no hubiese exceso, sino déficit, descargar lo que fuese necesario hasta que se agotase la energía acumulada.

Sin embargo, este sistema no es útil, ya que el excedente de energía eléctrica que se obtiene para almacenar, en especial tras un dimensionamiento apropiado de los paneles fotovoltaicos, es muy pequeño. Los precios de los paneles y la batería también son muy altos para poder obtener un resultado satisfactorio utilizando este procedimiento. Más adelante se analizará un poco más en profundidad este sistema.

La segunda forma de **utilizar la batería es para aprovechar la variación de precios de la energía a diferentes horas teniendo contratada una tarifa supervalle**. Así, la batería se cargaría a horas de bajos precios, para utilizar esa energía en horas de altos precios, mientras

deja un espacio para poder cargar también los excedentes de la energía solar. A continuación, se describe el funcionamiento de este sistema.

## Realización del programa en MatLab (modificación).

### Nomenclatura (ampliación):

<b>PBateria</b>	Precio de la batería
<b>RendBateria</b>	Rendimiento de la batería
<b>TVBateria</b>	Tiempo de vida de la batería
<b>CapCarga</b>	Capacidad de carga. Potencia máxima de carga
<b>CapDescarga</b>	Capacidad de descarga. Potencia máxima de descarga
<b>EdlB</b>	Estado de la Batería. Carga actual de la batería
<b>EnergíaSobra</b>	Vector con los excedentes de energía
<b>TB</b>	Tamaño de la batería
<b>l</b>	Parámetro iterativo, referente al tamaño de la batería
<b>ResEspacio</b>	Reserva de espacio para llenar la batería con luz solar
<b>ConsBat(h)</b>	Consumo de la batería para una hora (h) (Negativo si la batería se descarga).

A continuación se muestra el funcionamiento principal de la batería. El programa principal también sufre pequeñas variaciones que se pueden encontrar en el Anexo.

1. *Se escriben las nuevas constantes y el nuevo bucle para el tamaño de la batería*
2. *Funcionamiento de la batería*

```
%Batería que consume en valle y gasta en pico
if ConsElec(h)>0 %Si, aún se consume electricidad, se descarga (-) la
batería
    if PElec(h)==(0.071*ImpElec) %Si, estamos en supervalle también se carga
        ConsBat(h)=min([(TB-EdlB-ResEspacio) CapCarga]);
        if ConsBat(h)<0 %Aseguramos que no es negativo
            ConsBat(h)=0;
        end
        EdlB=EdlB+ConsBat(h);
    elseif PElec(h)==(0.093*ImpElec) %Si estamos en valle no se hace nada
        ConsBat(h)=0;
    else %Si es pico se consume
        ConsBat(h)=-min([ConsElec(h) EdlB CapDescarga]); %Se usa el limitante
entre la carga, el consumo y la cap de descargarse
        EdlB=EdlB+ConsBat(h); %Positivo porque ya es negativo el valor
    end
else %Cuando sobra electricidad se carga la batería
    ConsBat(h)=min([(TB-EdlB) -ConsElec(h) CapCarga]); %Limitación entre: Lo
que queda para llenarse, la energía que sobra (negativo porque ya lo es) y la
capacidad de cargarse
    EdlB=EdlB+ConsBat(h);

end

%Se recalcula con la batería
ConsElec(h)=CapBomba-
Radiacion(h)*RendPV*RendPVDir(h)*CapPV+DElec(h)+ConsBat(h)*RendBateria;
```

Se consigue así que siempre que haya un exceso de electricidad, producida por los paneles fotovoltaicos, se almacene en la batería (hasta que se llene).

Además, la batería se llenará a la máxima velocidad posible durante las horas supervalle, no se descargará durante las horas valle y se descargará durante las horas pico siempre que sea necesario. La velocidad de carga se limitará con una potencia de carga máxima, de 10kW<sup>4</sup>, para evitar picos de potencia y que el tiempo de carga se distribuya, en cierta medida, a lo largo de las horas supervalle.

### 3. Reserva de espacio

La variable “ResEspacio” contiene una predicción de la energía que va a sobrar durante el día para no cargar de más la batería durante la noche si se va a poder cargar durante el día con luz solar. Para realizar esta predicción, se hace funcionar el programa como si no tuviese batería, se observa cuánto excedente de energía hay, el cual queda registrado en el vector “EnergíaSobra” y a continuación se pasa el programa de nuevo con la batería, esta vez teniendo en cuenta una Reserva de Espacio para esa energía sobrante.

```
%Predicción de lo que sobraré en las proximas 24h
if mod(h,24)==1
ResEspacio=0; %Reserva de espacio en la batería
for g=1:24
ResEspacio=ResEspacio-EnergiaSobra(h+g-1);
end
ResEspacio=ResEspacio*1; %Si se quiere manipular la reserva
end
```

## Resultados

El programa da como resultado, que el dimensionamiento más eficiente para un Energy Hub de estas características es:

- Bomba de calor de **7,1 kW**.
- Paneles fotovoltaicos de **114 m<sup>2</sup>**.
- Batería de **47 kWh**.

El precio anual de la energía es de **10090 €/año**, lo que supone un ahorro de 3146 €/año, el 24%.

---

<sup>4</sup> Se ha elegido esta potencia debido a que es la mínima que no afecta al desempeño de la batería. Potencias inferiores implicarían la imposibilidad de cargar la batería por completo durante las horas supervalle en algún periodo del año.

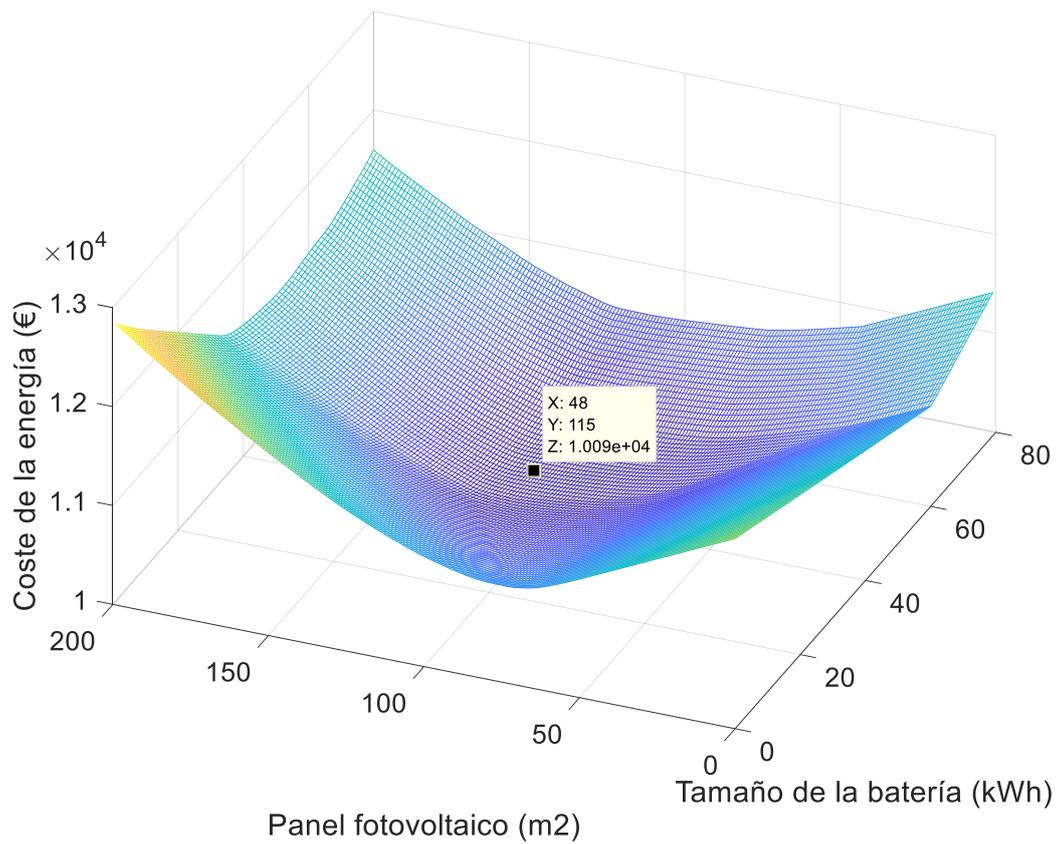


Figura 27. Coste de la energía en función del tamaño de la batería y el PV. Para una BC de 7,1 kW.

En la **Figura 27** se puede observar como varía el precio en función del tamaño de la batería y los m<sup>2</sup> de paneles fotovoltaicos, siendo la bomba de calor de 7,1 kW.

### Consumo de la batería

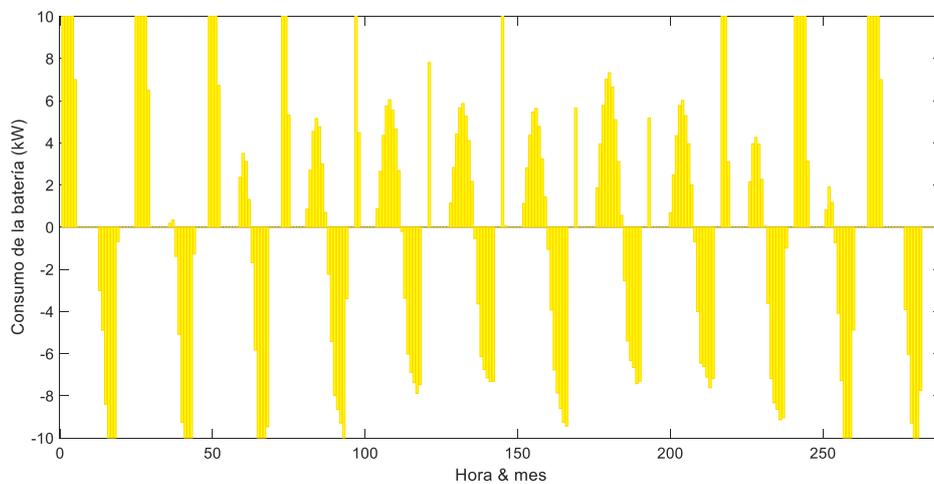


Figura 28. Consumo de la batería por horas, tomando un día de cada mes.

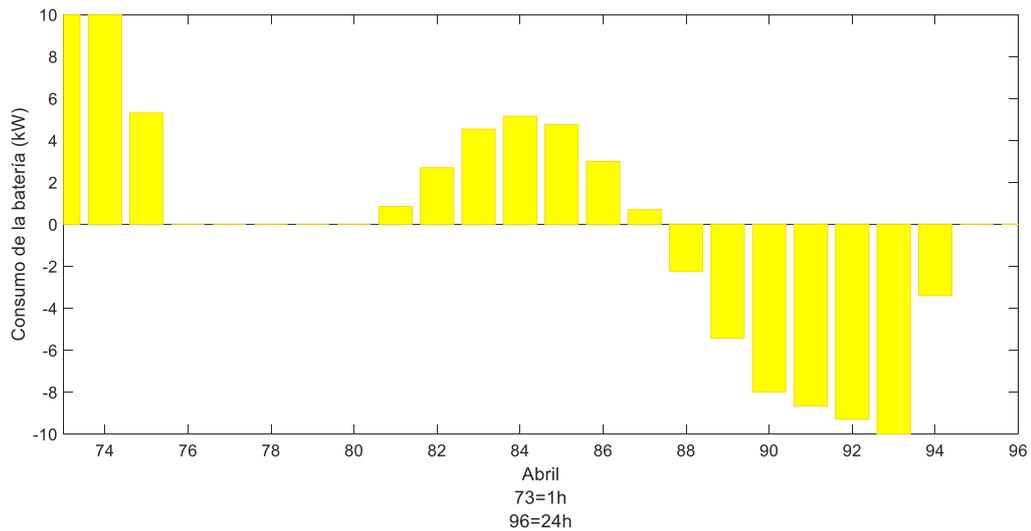


Figura 29. Consumo de la batería por horas un día de Abril.

En la **Figura 28** y la **Figura 29** se puede observar como la batería se carga a por la noche y en las horas centrales del día, mientras que se va descargando a medida que aumenta el consumo (en las horas de la tarde-noche) y disminuye el apoyo de la generación fotovoltaica. Durante los meses de verano, casi no es necesario cargar la batería durante la noche.

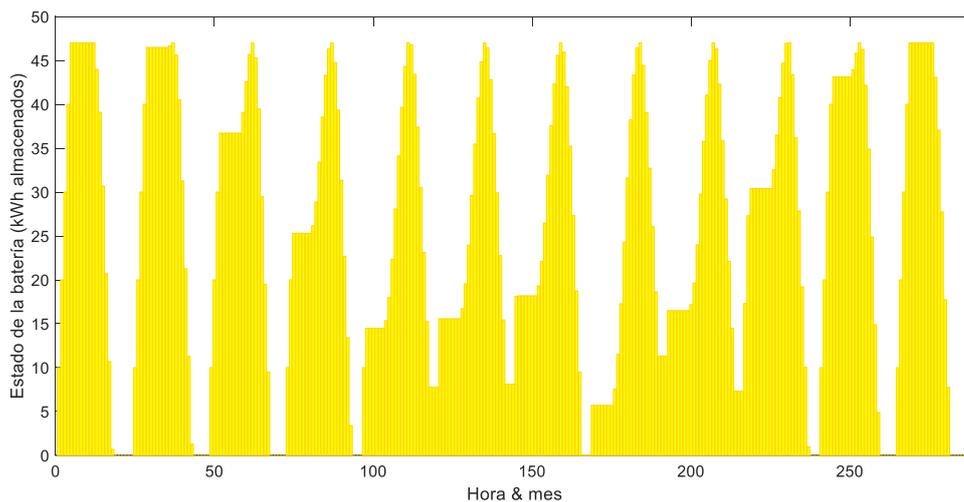


Figura 30. Estado de la batería a lo largo del año.

En la **Figura 30**, también se puede observar que hay momentos en los que la batería no se descarga por completo. Esta situación se da en los meses de verano, en los cuales el consumo energético es pequeño y la generación fotovoltaica muy grande.

En la **Figura 31** se muestra la energía perdida (por estar completamente llena la batería). Esto es un efecto relacionado con el rendimiento de la batería, en el que durante el proceso carga-descarga se pierde energía.

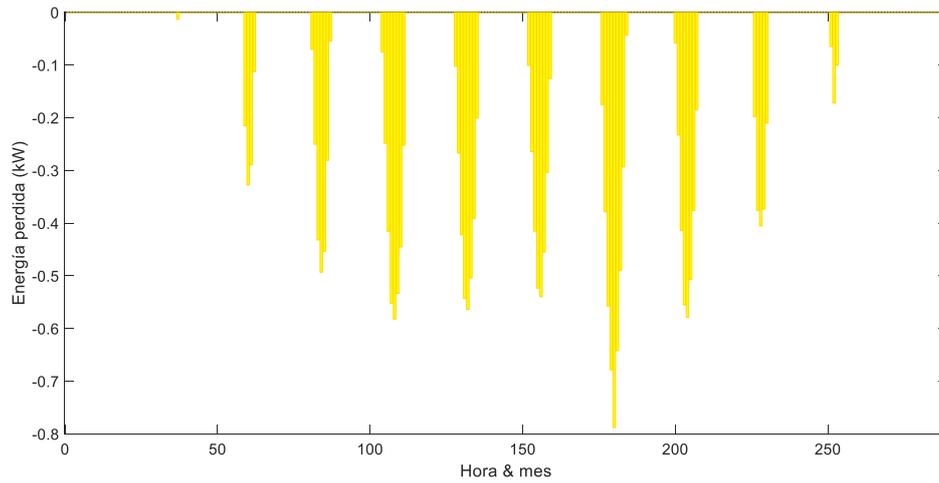


Figura 31. Exceso de energía en el EH con Batería

### Consumo de electricidad y gas

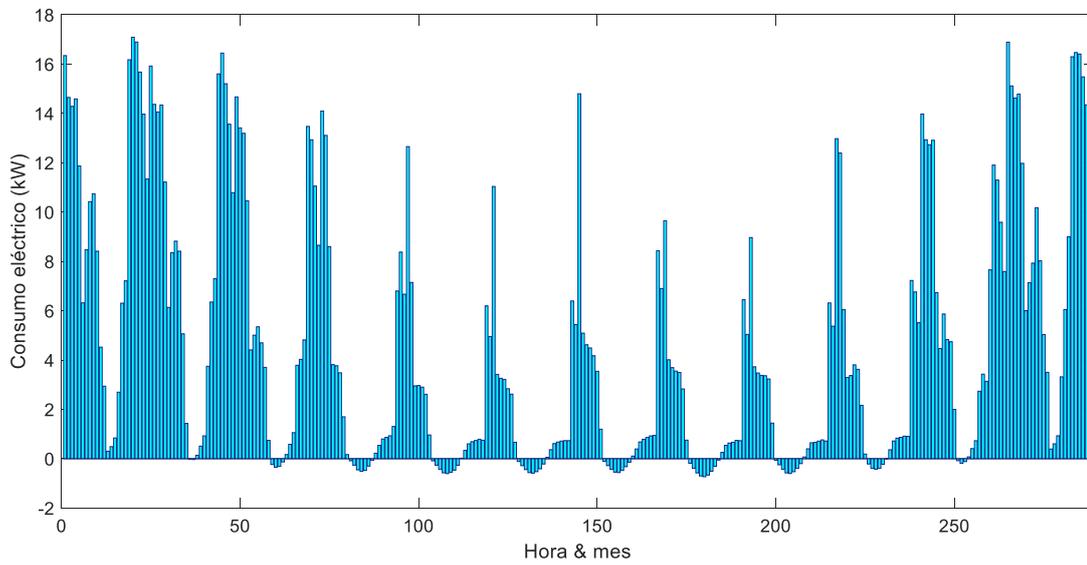


Figura 32. Consumo de electricidad por horas, tomando un día medio de cada mes. EH con PV, BC y Batería.

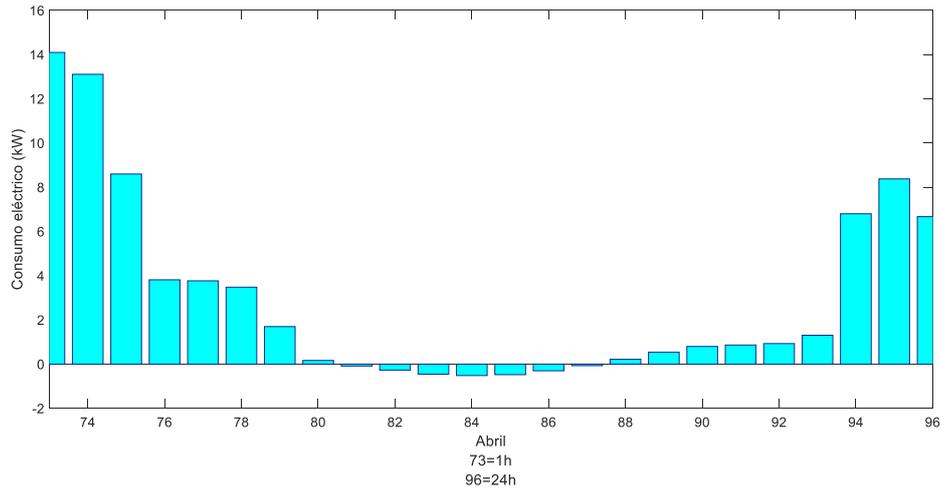


Figura 33. Consumo de electricidad por horas, mes de Abril. EH con PV, BC y Batería.

En la **Figura 32y** la **Figura 33**, se pueden observar los siguientes efectos en la curva de demanda.

- Los picos de demanda se dan las primeras horas de la mañana, momento en el que se carga la batería. Especialmente en meses de invierno. Esto es un efecto positivo para la red ya que es horario supervalle y ayuda a aplanar la curva de demanda global.
- El consumo de energía se reduce a 0 en horarios de máxima radiación solar, al igual que en el caso sin batería. La diferencia es que ahora, este consumo nulo, se alarga desde el mediodía hasta la tarde-noche, horas en las que la radiación no es tan intensa y la batería se descarga. La reducción del consumo a estas horas, también es positiva para la red eléctrica, ya que ayuda a aplanar el pico de la curva de demanda global.

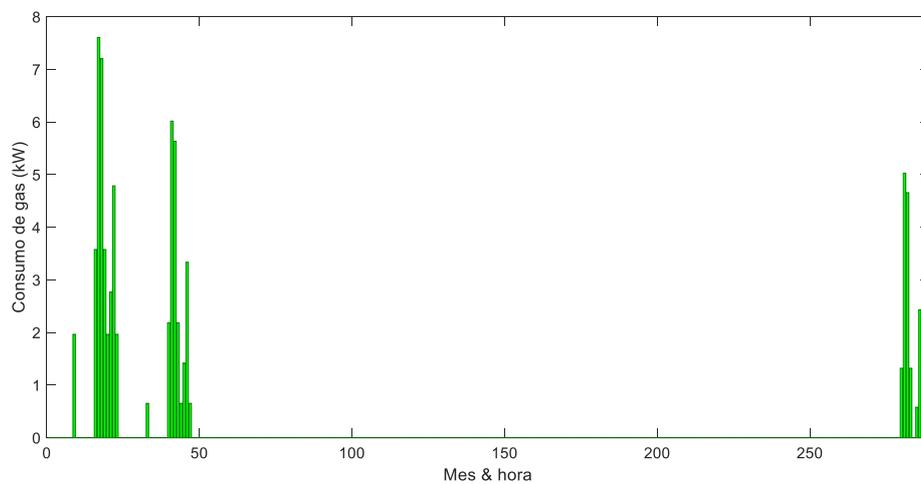


Figura 34. Consumo de gas natural por horas, tomando un día medio de cada mes. EH con PV, BC y Batería.

En cuanto al consumo de gas, **Figura 34**, sigue siendo exclusivo en los picos de consumo durante los meses de invierno.

Sin embargo, el uso de la batería sólo añade un ahorro de 403 € respecto al Energy Hub sin batería. En estas condiciones, quizá sea más interesante esperar para incluirla una vez los precios de los paneles fotovoltaicos y baterías hayan bajado más, como viene ocurriendo a lo largo de los últimos años. Actualmente el precio de la batería (sin contar instalación ni otros elementos requeridos para ésta) es de 176 €/kWh <sup>(24)</sup>, pero hay empresas dedicadas a esta tecnología que afirman que en dos años el precio puede reducirse a los 100 €/kWh y hasta los 50 €/kWh en 2025 <sup>(25)</sup>.

### Emisiones de CO<sub>2</sub>

Las emisiones de CO<sub>2</sub> con esta disposición son de **10369 kg**. Al evitar la pérdida de la energía que se produce en exceso durante las horas de máxima radiación solar, el uso de la batería consigue una reducción del 20% respecto al caso sin batería.

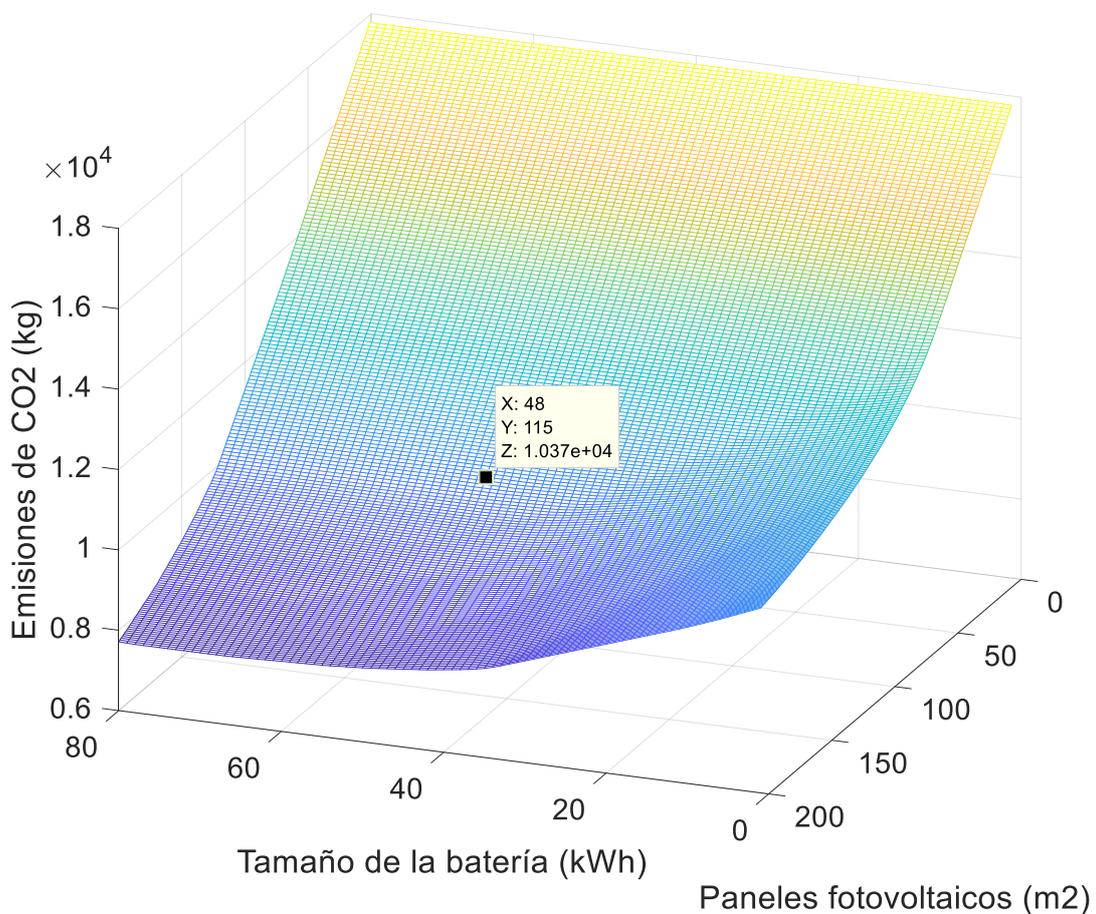


Figura 35. Emisiones de CO<sub>2</sub> en función del tamaño de la batería y el PV para una BC de 7,1 kW.

La **Figura 35** muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> en función del tamaño de la batería y de los paneles fotovoltaicos para una bomba de calor de 7,1 kW. Se puede observar como las emisiones decrecen linealmente con el aumento de los paneles fotovoltaicos instalados hasta un momento en el que se reduce este descenso. Un aumento en la batería ayuda a que este descenso lineal se mantenga y puedan alcanzarse menores valores en emisiones de CO<sub>2</sub>.

## Incluyendo venta a la red

Si además tenemos la posibilidad de vender excedentes energéticos a la red, la situación quedaría de la siguiente forma:

- Bomba de calor de **7,1 kW**.
- Paneles fotovoltaicos de **130 m<sup>2</sup>**.
- Batería de **52 kWh**.

El precio anual de la energía es de **10015 €/año**. Con la venta a la red, se consigue tener la capacidad de ampliar un poco más la potencia fotovoltaica instalada y la batería, aunque no supone un gran ahorro extra ya que el fin de la batería es hacer uso de los excedentes y que no sea necesario verterlos a la red.

Esta ampliación es técnicamente posible ya que al poderse vender excedentes a la red, es posible sobredimensionar los paneles fotovoltaicos (lo que implícitamente conlleva una ampliación de la batería). Así se cubre más satisfactoriamente la demanda con energía solar los meses de invierno a la vez que se pueden vender los excedentes por sobredimensionamiento en verano.

Tabla 9. Resumen comparativo. Sin EH, BC PV, BCPV+VR, BCPVBat, BCPVBat+VR.

Resultados	Sin EH	BC y PV	BC y PV + VR	BC, PV y Bat	BC, PV y Bat + VR
Bomba de calor (kW)	0	7.6	7.6	7.1	7.1
Panel fotovoltaico (m2)	0	72	100	114	130
Quemador de gas (kW)	31.6	5.87	5.87	7.61	7.61
Batería	0	0	0	47	52
Inversión inicial (€)	25280	62696	82296	92988	104188
Sólo la energía	11972	7862.2	6951.2	6238.6	5715.6
Sólo los elementos	1264	2630.8	3414.8	3851.4	4299.4
Emisiones de CO2 (kg)	27764	13032	10993	10369	9581
Coste anual de la energía (€)	13236	10493	10366	10090	10015

## Variación de parámetros

### Precio de la batería

A partir de un precio por debajo de 1300 €/kWh la batería comienza a ser rentable. Se observa en la **Figura 36** que a medida que se reduce el precio, cada vez es más eficiente la incorporación de más kWh de almacenamiento de batería a la vez que se aumenta la potencia fotovoltaica instalada. Una vez se llega a los 1000 €/kWh deja de aumentar esta sinergia.

Tabla 10. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio de la batería sin restricción de potencia.

Precio Bat	0	200	300	412	573	700	1000	1100	1200	1350
PV (m2)	90	90	99	111	114	111	108	90	81	75
Batería (kWh)	98	98	86	56	48	40	36	14	6	0
Precio anual (€)	8169	8955	9320	9683	10090	10249	10712	10806	10848	10871

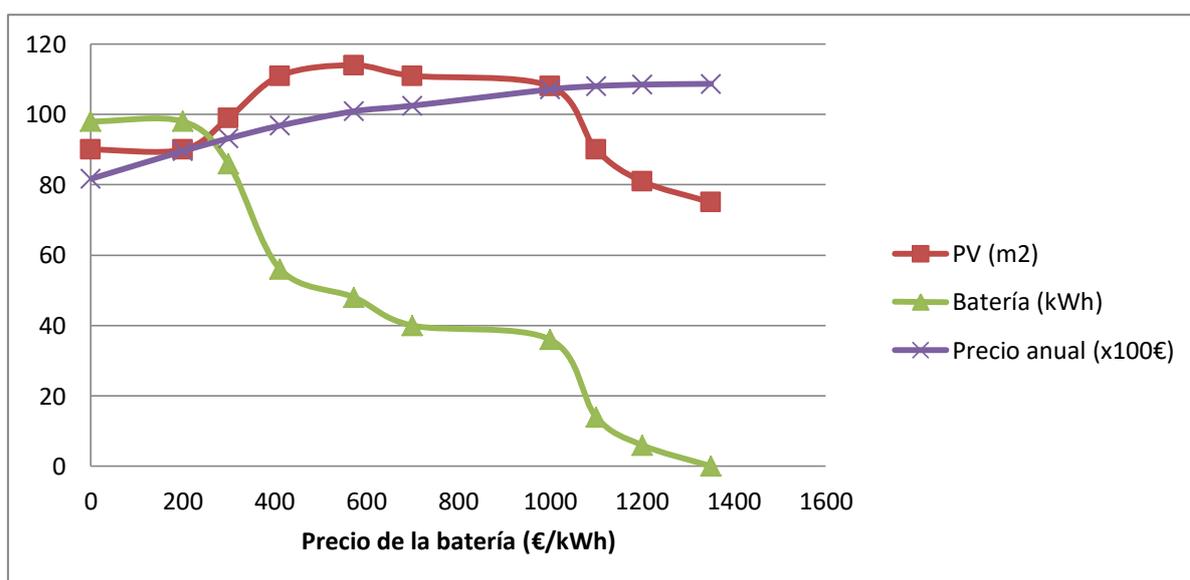


Figura 36. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio de la batería sin restricción de potencia.

Mientras el almacenamiento óptimo de la batería aumenta al disminuir el precio de ésta, hasta un máximo en los 98 kWh, los paneles fotovoltaicos se mantienen constantes. Entre los 400 y 300 €/kWh, hay un salto muy grande en la cantidad de almacenamiento óptimo y al mismo tiempo, la necesidad de paneles fotovoltaicos desciende.

Este es el punto de inflexión en el cual, empieza a ser más económico almacenar energía por la noche y usarla por el día que utilizar paneles fotovoltaicos para captar energía solar.

## Precio de la energía eléctrica de la red

Ahora se va a analizar cómo varía el Energy Hub en función del precio de la energía eléctrica de la red. No se tendrán en cuenta las restricciones de potencia de carga y descarga máximas.

Tabla 11. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio de la electricidad. En tanto por uno.

Precio electricidad red (·x)	0.6	0.65	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.4	1.7	2.5
Bomba de calor (kW)	7.8	7.8	7.6	7.4	7.2	6.4	5.8	3.6	2.6	1.4
Panel fotovoltaico (m2)	0	0	72	87	114	120	123	126	132	147
Quemador de gas (kW)	5.17	5.18	5.87	6.57	7.26	10.03	12.12	19.74	23.21	27.38
Batería	0	48	44	42	48	52	54	54	56	60
Coste anual de la energía (€)	7276	7758	8832	9471	10027	10521	10993	11846	1292	15232

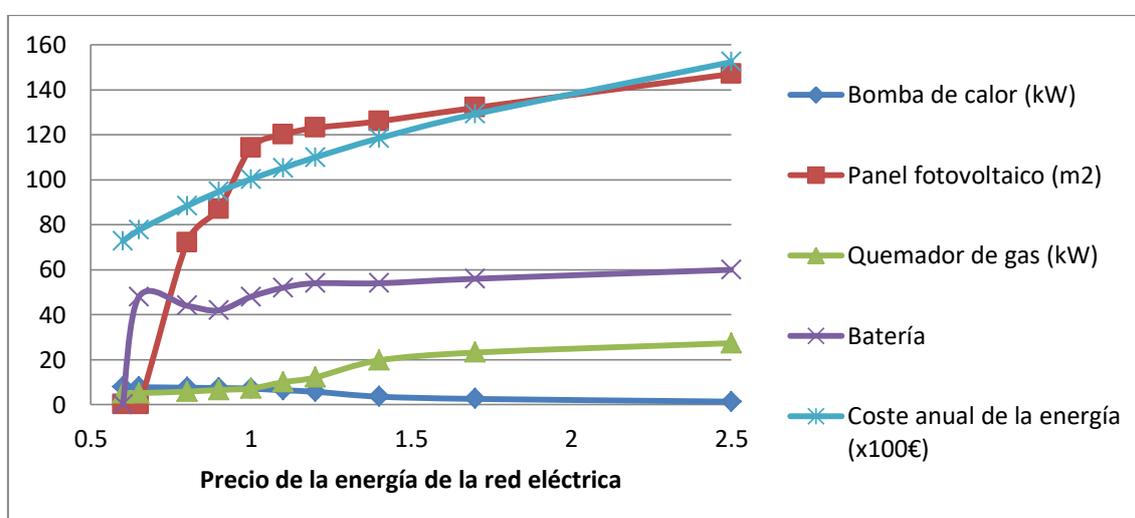


Figura 37. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio de la electricidad.

En la **Figura 37** se aprecia cómo al aumentar el precio de la electricidad, son más necesarios los paneles fotovoltaicos junto con la batería, a la vez que la bomba de calor pierde posiciones frente al quemador de gas.

Según baja el precio, entre 0.7 y 0.8, la necesidad de paneles fotovoltaicos cae fuertemente. En éste punto, la energía fotovoltaica empieza a dejar de ser rentable, dejando de serlo en 0,65. Sin embargo, sigue siendo rentable el uso de la batería para trasladar energía de la zona supervalle a la zona pico. Esto deja de ser útil en 0,6.

## Funcionamiento simple de la batería

Como se expuso anteriormente, una forma de hacer funcionar la batería es cargar si hay exceso de energía y descargar si hay déficit hasta que se llene o descargue del todo.

Resumiendo, la programación principal es la siguiente:

```
%Batería simple
if ConsElec(h)>0      %Si, aún se consume electricidad, se descarga
    ConsBat(h)=-min([ConsElec(h) EdlB CapDescarga]); %Se usa el limitante
    %entre la carga, el consumo y la cap de descargarse
    EdlB=EdlB+ConsBat(h); %Positivo porque ya es negativo el valor
else %Cuando sobra electricidad, se carga
    ConsBat(h)=min([(TB-EdlB) -ConsElec(h) CapCarga]); %Limitación entre: Lo
    %que queda para llenarse y la energía que sobra (negativo porque ya lo es)
    EdlB=EdlB+ConsBat(h);
end
```

En este caso el precio de la energía eléctrica volverá a ser fijo (0.12 €/kWh).

El programa da como resultado, que el dimensionamiento más eficiente para un Energy Hub de estas características es:

- Bomba de calor de **7.6 kW**.
- Paneles fotovoltaicos de **79 m<sup>2</sup>**.
- Batería de **3 kWh**.

El precio anual de la energía es de **10422 €/año**.

Se puede comprobar cómo sin aprovechar la variación de precios entre la noche y el día, la implementación de una batería no es demasiado útil. Esto se debe a que con una batería grande, los meses de verano tendría un funcionamiento intensivo, ya que hay mucho excedente que almacenar, sin embargo, en invierno estaría totalmente desaprovechada. Esta inactividad en invierno es la que se pretende eliminar con una buena gestión de la carga, en el caso anterior, al transportar energía de la noche hacia la tarde.

Por otra parte, aquí sí es importante la variación en el precio de la batería.

Tabla 12. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio de la batería con funcionamiento simple.

Precio Simple	Bat 0	150	300	400	500	573	600
PV (m2)	141	132	126	87	81	79	72
Batería (kWh)	54	45	40	11	5	3	0
Precio anual (€)	9723	10025	10279	10388	10417	10422	10428

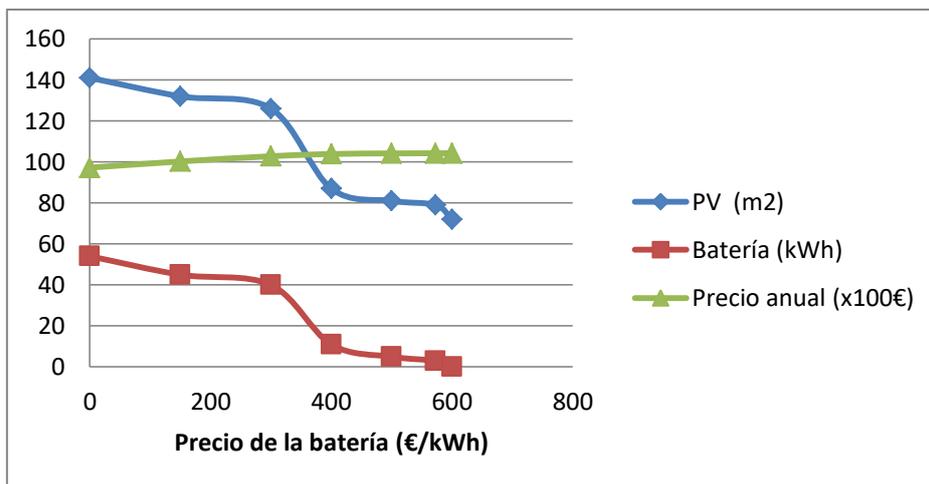


Figura 38. Dimensionamiento óptimo del EH en función del precio de la batería con funcionamiento simple.

En la **Figura 38** se puede ver un salto entre los 300€ y los 400€ por kilovatio. Este es el momento en el que empieza a ser rentable no sólo almacenar los pequeños picos del excedente de luz solar, sino sobredimensionar los paneles instalados para acumular mucha energía para usarla durante mucho tiempo. Aunque el precio tampoco experimenta bajadas significativas más allá del propio ahorro por menor precio.

En cuanto a la variación en el precio del panel fotovoltaico vemos un comportamiento similar en la **Figura 39**.

Tabla 13. Dimensionamiento óptimo del EH con batería simple en función del precio del PV.

Precio PV (bat simple)	450	500	550	600	700	750
PV (m2)	144	129	99	87	79	69
Batería (kWh)	39	33	12	6	3	0
Precio anual (€)	9395	9672	9907	10098	10422	10572

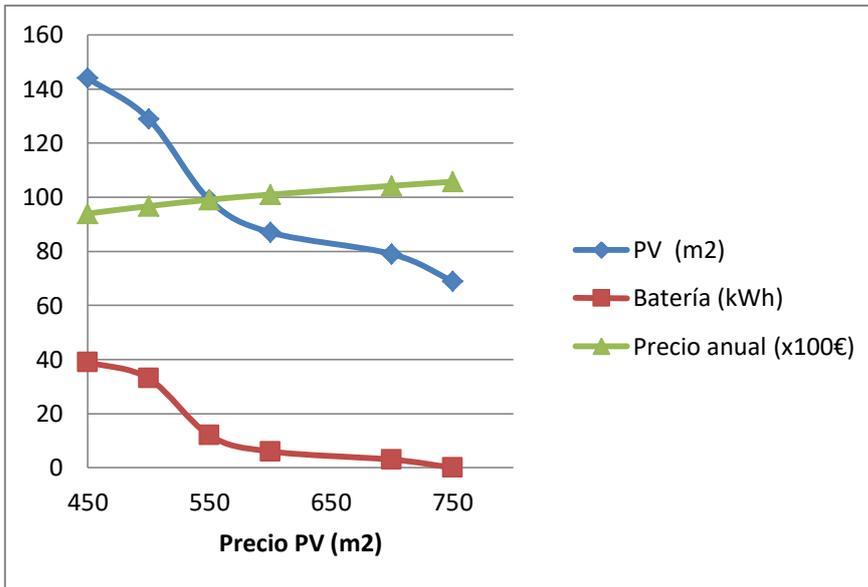


Figura 39. Dimensionamiento óptimo del EH con batería simple en función del precio del PV.

En la **Figura 40** se puede observar la interacción entre ambos precios, para la potencia fotovoltaica óptima tomando en cada valor el dimensionamiento de batería óptimo.

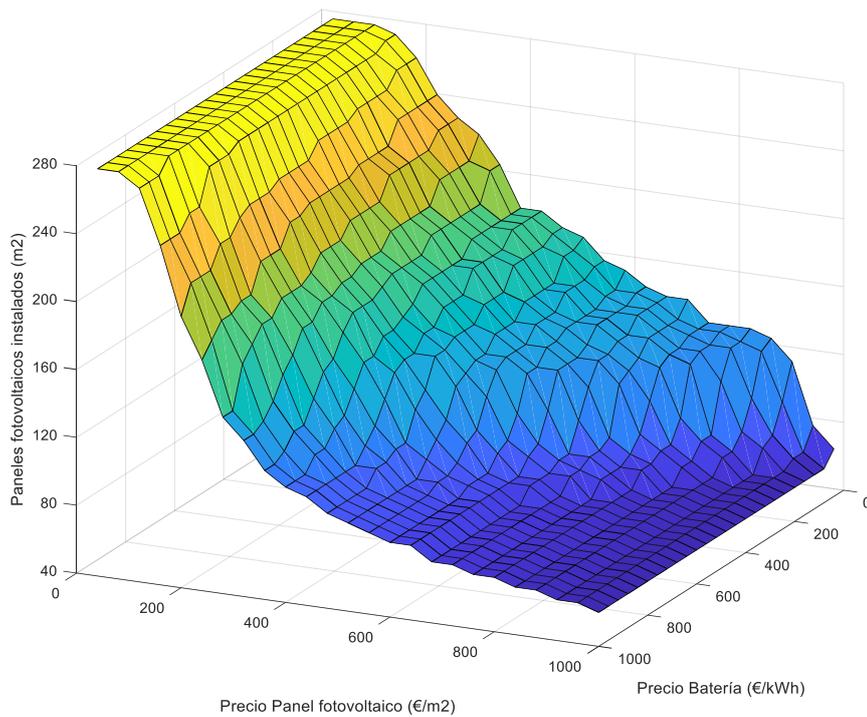


Figura 40. Paneles fotovoltaicos óptimos en función del precio del PV y el precio de la batería.

Tabla 14. Resumen comparativo. Sin EH, BCPV, BCPVBat, BCPVBatSimple.

Resultados	Sin EH	BC y PV	BC, PV y Bat	BC, PV y BatSimple
Bomba de calor (kW)	0	7.6	7.1	7.6
Panel fotovoltaico (m2)	0	72	114	79
Quemador de gas (kW)	31.6	5.87	7.61	5.87
Batería	0	0	47	3
Inversión inicial (€)	25280	62696	92988	67596
Sólo la energía	11972	7862.2	6238.6	7595.2
Sólo los elementos	1264	2630.8	3851.4	2826.8
Emissiones de CO2 (kg)	27764	13032	10369	
Coste anual de la energía (€)	13236	10493	10090	10422

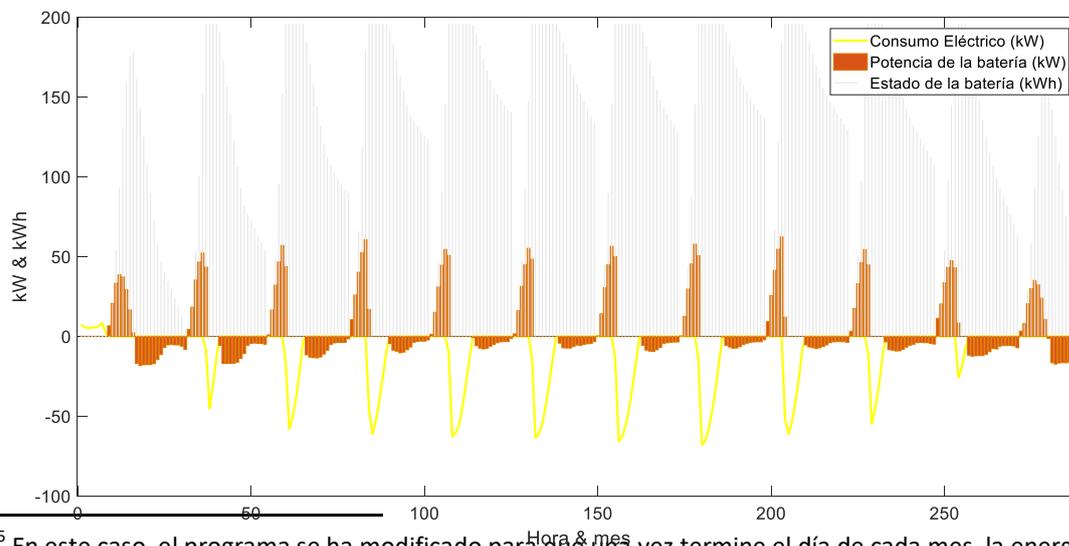
### Dimensionamiento para autoconsumo y 0 emisiones<sup>5</sup>

Para conseguir autoconsumo, se requiere que la bomba de calor produzca todas las necesidades caloríficas y que todas las necesidades eléctricas estén cubiertas por los paneles fotovoltaicos. Por tanto, el sistema está limitado por la radiación solar que reciba. Conseguir autoconsumo durante los meses de verano puede ser relativamente sencillo, sin embargo, extender el autoconsumo a los meses de invierno puede requerir una alta inversión.

Para conseguir autoconsumo durante todo el año, necesitaríamos:

- Bomba de calor: **9,6 kW**
- Paneles fotovoltaicos: **630 m<sup>2</sup>**
- Batería: **196 kWh**

El coste de la energía sería de **17507 €/año** y las emisiones de **0 kg de CO2**. Esto supondría un sobrecoste respecto al sistema sin Energy Hub del 132% y respecto al sistema de Energy Hub más eficiente del 173%.



<sup>5</sup> En este caso, el programa se ha modificado para que una vez termine el día de cada mes, la energía en  
 Figura 41. Consumo eléctrico, potencia y estado de la batería, cada hora del día para un día de cada mes. EH en autoconsumo.

En la **Figura 41** se muestra el funcionamiento de la batería. Se ve que los meses de verano, el potencial de la batería se ve desaprovechado, mientras que los de invierno se utiliza intensivamente.

Además, sería necesario sobredimensionar la batería para hacer frente a periodos puntuales en los que no hubiese luz solar, lo que aumentaría el coste en otros 10000 €/año más (el precio de triplicar la capacidad de la batería).

Sin embargo, para conseguir autoconsumo sólo durante los meses de verano necesitaríamos:

- Bomba de calor: **9,6 kW**
- Paneles fotovoltaicos: **180 m<sup>2</sup>**
- Batería: **76 kWh**

El coste de la energía sería de **10970 €/año** y las emisiones de **6158 kg de CO<sub>2</sub>**.

Podemos notar, que se necesita sólo una tercera parte de los paneles y batería requeridos en el caso anterior. Aquí también sería necesario sobredimensionar la batería para hacer frente a posibles días sin luz, el coste extra sería de unos 4000 €/año más.

**Tabla 15. Resumen comparativo. Sin EH, autoconsumos.**

Resultados	Sin EH	Autoconsumo	Autoconsumo verano
Bomba de calor (kW)	0	9.6	9.6
Panel fotovoltaico (m2)	0	630	180
Quemador de gas (kW)	31.6	0	0
Batería	0	196	76
Inversión inicial (€)	25280	450600	135600
Sólo la energía	11972	0	5463
Sólo los elementos	1264	17507	5520
Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg)	27764	0	6158
Coste anual de la energía (€)	13236	17507	10983

## Tabla Resumen

Tabla 16. Resumen comparativo de todos los casos expuestos a lo largo del trabajo.

Resultados	Sin EH	BC y PV	BC y PV + VR	BC y PV + Gas	BC y PV + VR + Gas	BC, PV y Bat	BC, PV y Bat + VR	BC, PV y BatSimple	AConsumo	AConsumo verano
Bomba de calor (kW)	0	7.6	7.6	9.3	9.2	7.1	7.1	7.6	9.6	9.6
Panel fotovoltaico (m2)	0	72	100	72	100	114	130	79	630	180
Quemador de gas (kW)	31.6	5.87	5.87	0	0	7.61	7.61	5.87	0	0
Batería	0	0	0	0	0	47	52	3	196	76
Inversión inicial (€)	25280	62696	82296	59700	79200	92988	104188	67596	450600	135600
Sólo la energía	11972	7862.2	6951.2	8064	7158	6238.6	5715.6	7595.2	0	5463
Sólo los elementos	1264	2630.8	3414.8	2481	3260	3851.4	4299.4	2826.8	17507	5520
Emisiones de CO2 (kg)	27764	13032	10993	12880	11889	10369	9581		0	6158
Coste anual de la energía (€)	13236	10493	10366	10545	10418	10090	10015	10422	17507	10983
% respecto a "Sin EH"	100	79,28	78,32	79,67	78,71	76,23	75,66	78,74	133,26	82,98
% respecto a "BC PV"		100	98,79			96,16				

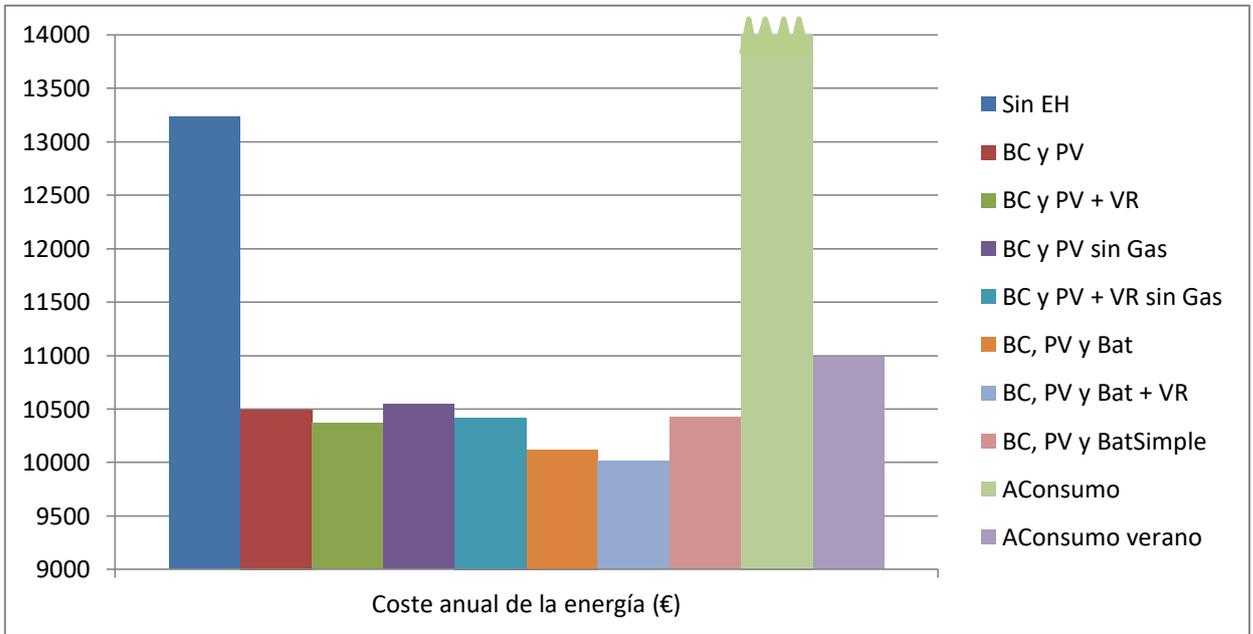


Figura 42. Coste de la energía en todos los casos expuestos.

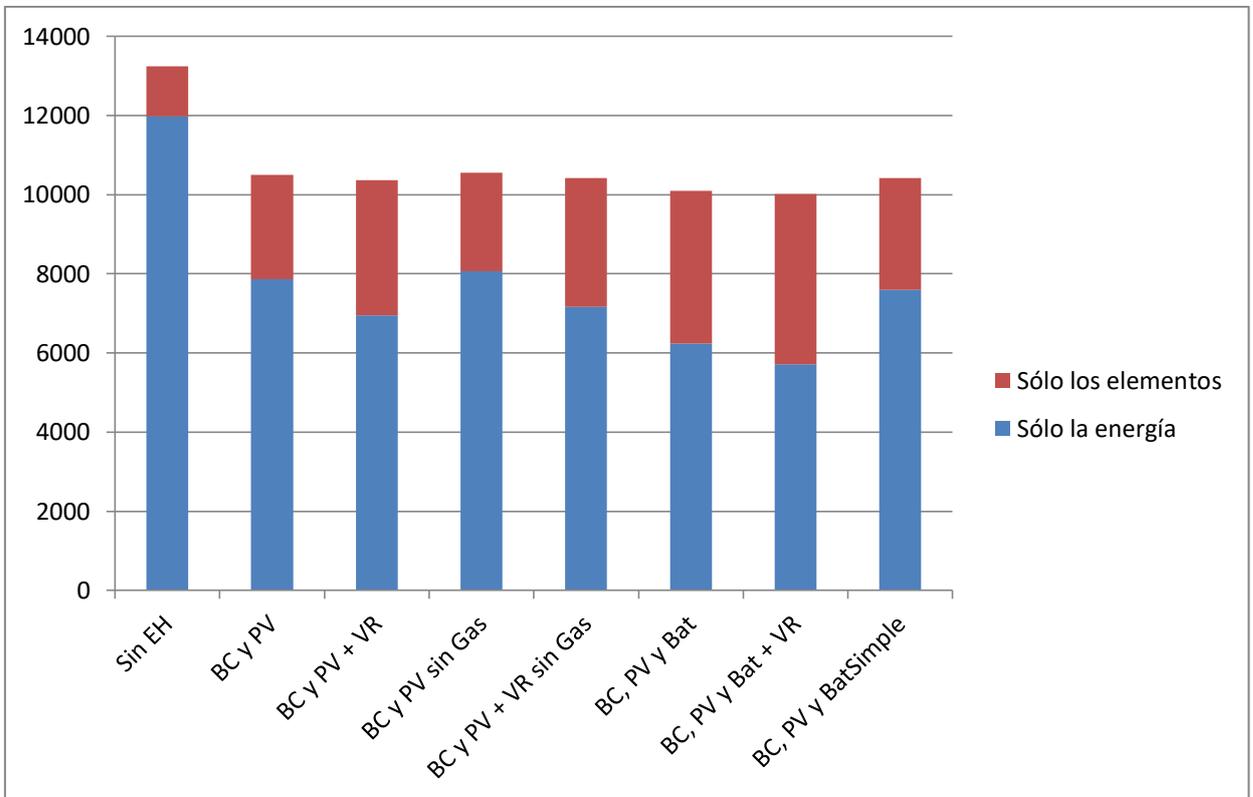


Figura 43. Coste de la energía según su procedencia

## Conclusiones

Este trabajo pretende demostrar que es posible mejorar la eficiencia energética de un edificio incorporando un Energy Hub, ya sea con bomba de calor y/o batería.

Lo primero en lo que se debe prestar atención es en la alta eficiencia de la bomba de calor, la cual puede sustituir en gran medida al gas natural como productor de calor. Esto es así debido a su COP y funcionará satisfactoriamente para COPs superiores a 2. Para hacer rentable el uso del gas natural frente a las bombas de calor actuales (COP=3.4), el precio de éste debería caer hasta alrededor de 0,65 el actual.

Por otra parte, los paneles fotovoltaicos ayudan a contener el incremento en la demanda eléctrica debida al uso de la bomba de calor, empiezan a ser rentables por debajo de los 1000€/m<sup>2</sup> y seguirían siéndolo siempre que el precio de la electricidad no caiga por debajo de 0,7-0,8 veces el actual. Aparte del beneficio económico, el uso de paneles fotovoltaicos ayuda a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en más de la mitad.

La incorporación de almacenamiento energético en forma de batería, genera una sinergia muy positiva con los paneles fotovoltaicos, pudiendo extender aún más el uso de la energía fotovoltaica. La incorporación de más paneles implica mayores reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, un correcto dimensionamiento no hace necesaria la posibilidad de verter de nuevo a la red los excedentes, ya que éstos son muy pequeños.

La combinación panel-batería, también tiene un impacto positivo para la red eléctrica ya que ayuda a aplanar la curva de demanda.

Sin embargo, la incorporación de la batería, tan solo conlleva una pequeña reducción en el coste de la energía y puede no merecer la pena realizar una enorme inversión inicial para apenas rentabilizarla. Es por ello, que actualmente quizá sea más conveniente esperar unos años para la implementación de una batería, con vistas a que se cumplan las predicciones de la industria respecto a la bajada de precios de éstas.

Hay que hacer mención también, a la posibilidad de que en un futuro cercano, el parque automovilístico pase a ser eléctrico. Los coche con funciones V2B (Vehicle to building) pueden poner a disposición del edificio sus baterías, complementando las propias del Energy Hub y ayudando a rentabilizar el coste del vehículo

Por último, sobre la posibilidad de pasarse al autoconsumo, se hace especialmente caro si va a haber demanda energética durante todo el año, sin embargo, si el consumo se realiza exclusivamente durante los meses de verano, podría ser una posibilidad a tener en cuenta.

## Conclusiones del trabajo realizado

Este trabajo de fin de grado se ha basado su estructura e idea general en el paper de mi director <sup>(19)</sup>. Para la realización he realizado las tareas de búsqueda de información de los diferentes datos y parámetros, así como su posterior manipulación para que estén la forma correcta para poder ser expuestos en el trabajo. Aquí se incluyen las características de los materiales usados y también los datos de demandas, temperaturas, etc.

También he realizado la programación desde cero de los programas con los que se ha modelado el Energy Hub. Esta ha sido quizá, la parte más compleja y que más tiempo ha tomado en la elaboración del trabajo. Esto se debe a que a lo largo de la programación aparecen múltiples errores que hay que corregir, y a que el programa no funcione de la manera esperada. Muchas veces es complicado encontrar cuál es la razón concreta de que el programa falla o no arroje los resultados esperados y lleva mucho tiempo encontrar los pequeños detalles en la programación que hacen que el programa de unos u otros resultados. En otras ocasiones es incluso difícil saber si los resultados obtenidos tienen lógica y son correctos en base a las órdenes dadas o hay errores aunque el resultado parezca coherente.

En algunas ocasiones estos errores son encontrados una vez se ha continuado el trabajo dando por buenos los resultados, lo que conlleva rehacer parcialmente éste.

El análisis de resultados también ha sido realizado por mi parte, fin último para saber cómo de viable es la incorporación de un Energy Hub en un edificio residencial y cumplir los objetivos del trabajo.

El trabajo cumple los objetivos de analizar la viabilidad de un Energy Hub en las viviendas y cómo depende de otros factores su implementación. Es un trabajo que utiliza paneles fotovoltaicos, bomba de calor y batería, pero es posible una continuación futura de éste incluyendo más elementos, como un coche eléctrico, un sistema de cogeneración a pequeña escala, etc. También otras formas de energía, como una red de frío, por ejemplo.

La realización de este TFG me ha servido para mejorar en la programación en general y en la programación con MatLab en particular. También para comprender mejor el funcionamiento del mercado eléctrico y de gas, y entender la relación entre los paneles fotovoltaicos, la radiación y sus rendimientos.

## Bibliografía

1. *Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in electric power systems utilizing energy storage and other enabling technologies*. **Paul Denholm, Robert M. Margolis**. 2007, Energy Policy, págs. 4424-4433.
2. *Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources – A review*. **S. Shivashankar, Saad Mekhilef, Hazlie Mokhlis, M. Karimi**. 2016, Renewable and Sustainable Energy Reviews 59, págs. 1170-1184.
3. *Energy hub: From a model to a concept – A review*. **Mohammad Mohammadi, Younes Noorollahi, Behnam Mohammadi-ivatloo, Hossein Yousefi**. 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews 80, págs. 1512-1527.
4. **REE**. Consumo medio de energía eléctrica de los hogares españoles. [En línea] [https://www.ree.es/sites/default/files/interactivos/como\\_consumimos\\_electricidad/como-varia-mi-consumo.html](https://www.ree.es/sites/default/files/interactivos/como_consumimos_electricidad/como-varia-mi-consumo.html).
5. **Española, Red Eléctrica**. PERFIL FINAL DE CONSUMO A (TARIFA 2.0.A). [En línea] [https://www.esios.ree.es/es/analisis/529?vis=1&start\\_date=01-01-2018T00%3A00&end\\_date=31-12-2018T23%3A50&compare\\_start\\_date=01-12-2017T00%3A00&groupby=hour&level=1](https://www.esios.ree.es/es/analisis/529?vis=1&start_date=01-01-2018T00%3A00&end_date=31-12-2018T23%3A50&compare_start_date=01-12-2017T00%3A00&groupby=hour&level=1).
6. Consumo medio gas año. [En línea] <https://preciogas.com/faq/consumo-medio-gas-casa>.
7. *Model for forecasting residential heat demand based on natural gas consumption and energy performance indicators*. **Alessandro Spoladore, Davide Borellia, Francesco Deviaa, Flavio Morab, Corrado Schenoneaa**. Applied Energy, Vol. 182, págs. 488-499.
8. Curva consumo medio horario calefacción y agua caliente. [En línea] [https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/atlas\\_indel\\_ree.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/atlas_indel_ree.pdf).
9. **Selectra**. Tarifas luz. [En línea] <https://tarifaluzhora.es/info/discriminacion-horaria>.
10. Lucera. *Precio término de potencia*. [En línea] <https://lucera.es/tarifas-luz>.
11. Precio electricidad endesa. [En línea] <https://tarifaluzhora.es/companias/endesa/oferta>.
12. Compañías de luz. *Precio término fijo gas*. [En línea] <https://www.companias-de-luz.com/precio-gas-natural/>.
13. **Commission, European**. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. [En línea] [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html).
14. **REE**. Emisiones de CO2 asociadas a la generación. [En línea] <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>.
15. **f2e**. Fundación para la eficiencia energética y el medio ambiente. *Emisiones de CO2 gas natural*. [En línea] <http://www.f2e.es/es/gas-natural-butano-electricidad-propano-y-gasoleo-que-energia-emite-mas-co2>.

16. Autosolar. *Rendimiento del panel fotovoltaico*. [En línea] <https://autosolar.es/paneles-solares>.
17. Precio del panel fotovoltaico. [En línea] <https://kitdeenergiasolar.com/placas-solares/precios>.
18. Climamanía. *Precios BC*. [En línea] [https://www.climamania.com/bombas-de-calor-para-calefaccion/#/servicio-calefaccion\\_acs](https://www.climamania.com/bombas-de-calor-para-calefaccion/#/servicio-calefaccion_acs).
19. *Modelling and simulation of a builidng Energy Hub*. **A.A. Bayod-Rújula, Y. Yuan, A.Martínez-Gracia, J. Wang, J. Uche, H. Chen**. Mieres, Spain : s.n., 2018.
20. **OMIE**. Precio horario del mercado diario. [En línea] <http://www.omie.es/reports/#>.
21. **Tesla**. Powerwall. *Batería powerwall*. [En línea] [https://www.tesla.com/es\\_ES/powerwall](https://www.tesla.com/es_ES/powerwall).
22. **Solarmat**. Vida útil batería tesla. [En línea] <http://www.solarmat.es/blog/lo-debes-saber-la-bateria-tesla-relacion-precio-valor/>.
23. **Tesla**. Powerwall. *Rendimiento batería*. [En línea] [https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall\\_2\\_CA\\_Datasheet\\_na\\_es\\_panol.pdf?](https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall_2_CA_Datasheet_na_es_panol.pdf?).
24. **eléctricos, Híbridos y**. Precio actual de la batería de litio. *Fuente:Bloomberg*. [En línea] <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/precios-baterias-llegan-minimos-historicos-2018/20181221092913024110.html>.
25. **motor, Diario**. Precio futuro de la batería de litio. *Fuente:Forbes*. [En línea] <https://www.diariomotor.com/noticia/coste-kwh-bateria-coche-electrico/>.

## Índice de figuras

FIGURA 1. PERFIL DE DEMANDA ELÉCTRICA HORARIA EN UN DÍA MEDIO DE MARZO.....	12
FIGURA 2. DEMANDA MENSUAL DE ELECTRICIDAD EN UN HOGAR MEDIO. ....	13
FIGURA 3. DEMANDA ELÉCTRICA HORARIA, SE MUESTRA UN DÍA POR CADA MES DEL AÑO.....	13
FIGURA 4. DEMANDA MENSUAL DE CALOR EN UN HOGAR MEDIO.....	14
FIGURA 5. PERFIL DE DEMANDA DE CALOR HORARIA EN UN DÍA MEDIO DE MARZO.....	14
FIGURA 6. DEMANDA DE CALOR HORARIA, SE MUESTRA UN DÍA POR CADA MES DEL AÑO.....	15
FIGURA 7. HORARIOS DE LOS PERIODOS DE LA TARIFA SUPERVALLE.....	15
FIGURA 8. PERFIL DE RADIACIÓN HORARIO EN UN DÍA MEDIO DE MARZO EN ZARAGOZA.....	16
FIGURA 9. RADIACIÓN MENSUAL EN ZARAGOZA.....	16
FIGURA 10. RADIACIÓN HORARIA EN ZARAGOZA, TOMANDO UN DÍA POR CADA MES.....	17
FIGURA 11. TEMPERATURA HORARIA, TOMANDO UN DÍA DE CADA MES DEL AÑO.....	17
FIGURA 12. ESQUEMA DE UN ENERGY HUB CON BOMBA DE CALOR Y PANEL FOTOVOLTAICO.....	18
FIGURA 13. DEMANDA DE CALOR DEL EDIFICIO.....	24
FIGURA 14. DEMANDA DE ELECTRICIDAD DEL EDIFICIO.....	24
FIGURA 15. COSTE ANUAL DE LA ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR Y EL PANEL FOTOVOLTAICO. EH CON PV Y BC .....	25
FIGURA 16. CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR HORAS, TOMANDO UN DÍA MEDIO DE CADA MES. EH CON PV Y BC.....	26
FIGURA 17. CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR HORAS, UN DÍA MEDIO DE ABRIL. EH CON PV Y BC.....	26
FIGURA 18. CONSUMO DE GAS NATURAL POR HORAS, TOMANDO UN DÍA MEDIO DE CADA MES. EH CON PV Y BC.....	27
FIGURA 19. CONSUMO DE GAS NATURAL POR HORAS, UN DÍA MEDIO DE FEBRERO. EH CON PV Y BC.....	27
FIGURA 20. EMISIONES DE CO2 EN FUNCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR Y LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.....	28
FIGURA 21. CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR HORAS, TOMANDO UN DÍA MEDIO DE CADA MES. EH CON PV Y BC + VR.....	30
FIGURA 22. EMISIONES DE CO2 EN FUNCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR Y LOS PANELES FOTOVOLTAICOS. EH CON PV Y BC + VR.....	31
FIGURA 23. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL GAS.....	32
FIGURA 24. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL COP DE LA BC.....	33
FIGURA 25. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL PV.....	34
FIGURA 26. ESQUEMA DE UN ENERGY HUB CON BOMBA DE CALOR, PANEL FOTOVOLTAICO Y BATERÍA.....	36
FIGURA 27. COSTE DE LA ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LA BATERÍA Y EL PV. PARA UNA BC DE 7,1 kW.....	39
FIGURA 28. CONSUMO DE LA BATERÍA POR HORAS, TOMANDO UN DÍA DE CADA MES.....	39
FIGURA 29. CONSUMO DE LA BATERÍA POR HORAS UN DÍA DE ABRIL.....	40
FIGURA 30. ESTADO DE LA BATERÍA A LO LARGO DEL AÑO.....	40
FIGURA 31. EXCESO DE ENERGÍA EN EL EH CON BATERÍA.....	41
FIGURA 32. CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR HORAS, TOMANDO UN DÍA MEDIO DE CADA MES. EH CON PV, BC Y BATERÍA.....	41
FIGURA 33. CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR HORAS, MES DE ABRIL. EH CON PV, BC Y BATERÍA.....	42
FIGURA 34. CONSUMO DE GAS NATURAL POR HORAS, TOMANDO UN DÍA MEDIO DE CADA MES. EH CON PV, BC Y BATERÍA.....	42
FIGURA 35. EMISIONES DE CO2 EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LA BATERÍA Y EL PV PARA UNA BC DE 7,1 kW.....	43
FIGURA 36. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA BATERÍA SIN RESTRICCIÓN DE POTENCIA.....	45
FIGURA 37. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD.....	46
FIGURA 38. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA BATERÍA CON FUNCIONAMIENTO SIMPLE.....	48
FIGURA 39. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH CON BATERÍA SIMPLE EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL PV.....	49
FIGURA 40. PANELES FOTOVOLTAICOS ÓPTIMOS EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL PV Y EL PRECIO DE LA BATERÍA.....	49
FIGURA 41. CONSUMO ELÉCTRICO, POTENCIA Y ESTADO DE LA BATERÍA, CADA HORA DEL DÍA PARA UN DÍA DE CADA MES. EH EN AUTOCONSUMO.....	50
FIGURA 42. COSTE DE LA ENERGÍA EN TODOS LOS CASOS EXPUESTOS.....	53
FIGURA 43. COSTE DE LA ENERGÍA SEGÚN SU PROCEDENCIA.....	53

## Índice de tablas

TABLA 1. PRECIOS E IMPUESTOS DE LA ENERGÍA.....	16
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL ENERGY HUB DE LA FIGURA 12. ....	19
TABLA 3. RESUMEN COMPARATIVO. SIN EH FRENTE A CON BC Y PV. ....	29
TABLA 4. RESUMEN COMPARATIVO. SIN EH, BC PV CON VR Y BC PV SIN VR. ....	32
TABLA 5. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL GAS.....	32
TABLA 6. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL COP DE LA BC.....	33
TABLA 7. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL PV.....	34
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA. ....	36
TABLA 9. RESUMEN COMPARATIVO. SIN EH, BC PV, BCPV+VR, BCPVBAT, BCPVBAT+VR. ....	44
TABLA 10. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA BATERÍA SIN RESTRICCIÓN DE POTENCIA. ....	45
TABLA 11. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD. EN TANTO POR UNO. ....	46
TABLA 12. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA BATERÍA CON FUNCIONAMIENTO SIMPLE...	47
TABLA 13. DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DEL EH CON BATERÍA SIMPLE EN FUNCIÓN DEL PRECIO DEL PV. ....	48
TABLA 14. RESUMEN COMPARATIVO. SIN EH, BCPV, BCPVBAT, BCPVBATSIMPLE. ....	50
TABLA 15. RESUMEN COMPARATIVO. SIN EH, AUTOCONSUMOS. ....	51
TABLA 16. RESUMEN COMPARATIVO DE TODOS LOS CASOS EXPUESTOS A LO LARGO DEL TRABAJO.....	52

## Anexo I: Programa MatLab. Bomba de calor + PV

```
%Las demandas de un día medio kW
DCalorVivienda=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo IV">];
DElecVivienda=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo III">];
ViviendasEdificio=15;
DElec=DElecVivienda*ViviendasEdificio;
DCalor=DCalorVivienda*ViviendasEdificio;

%Radiacion solar un día medio kW
Radiacion=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo V">];
Radiacion=0.001*Radiacion;
Temperatura=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo VI">];

%Precios energía (Euros)
PElec=0.12;
ImpElec=1.051127*1.21;
PElec=PElec*ImpElec;
TerPotencia=0.1042; %€/kWhDía
PGas=0.059+0.00234; %Suma el impuesto sobre los hidrocarburos
ImpGas=1.21;
PGas=PGas*ImpGas;
TerFijoGas=0.27; %€/día
VRed=0.055*ImpElec; %€ Precio de venta a la red (0 si no hay venta)

%Constantes generales
EmiCO2elec =0.246; %kgCO2/kwh
EmiCO2gas =0.2040; %kgCO2/kwh

%Precios Elementos EH
PBomba =1000;
PPV =700;
PQuema =800;

%Rendimientos
RendBomba =3.4;
RendQuema =0.98;

%Rendimiento fotovoltaica
RendPV = 0.86; %Rendimiento instalacion
Tc=Temperatura+(47-20)/0.8*Radiacion; %Temperatura de trabajo
EfPanel=0.17;
RendPVDir=EfPanel*(1-0.005*(Tc-25)); %Rendimiento panel

%Tiempo de vida (años)
TVBomba =20;
TVPV =25;
TVQuema=20;

%Inicializacion
CosteTotal=0;
minimo=1000;

for j=1:150 %filas
    CapBomba=(j-1)*0.1;
    for k=1:150 %columnas
        CapPV=(k-1);
    CosteTotal=0;

for i=1:288
h=i;

ConsElec (h)=CapBomba-Radiacion (h) *RendPV*RendPVDir (h) *CapPV+DElec (h);
```

```

ConsGas (h) = (DCalor (h) - CapBomba * RendBomba) / RendQuema; %El cons Gas =Cap
quemador

if ConsGas (h) < 0 %Asegurar que el Consumo no es negativo
    ConsGas (h) = 0;

    CapBomba2 = DCalor (h) / RendBomba; %La bomba consume lo necesario para que sea
0 el consumo de gas
    ConsElec (h) = CapBomba2 - Radiacion (h) * RendPV * RendPVDir (h) * CapPV + DElec (h); %Se
recalcula el consumo electrico con la nueva pot de la bomba

end

CapQuema = max (ConsGas); %Recordamos

%En el coste se incluyen precios de las energías y aparatos (incluida la
%instalacion
if ConsElec (h) < 0

Coste (h) = ConsElec (h) * VRed + ConsGas (h) * PGas + PBomba * CapBomba / TVBomba / 365 / 24 + PPV * C
apPV / TVPV / 365 / 24;
else

Coste (h) = ConsElec (h) * PElec + ConsGas (h) * PGas + PBomba * CapBomba / TVBomba / 365 / 24 + PPV *
CapPV / TVPV / 365 / 24;
end
CosteTotal = CosteTotal + Coste (h);

%Se organiza en una matriz los precios en funcion de las capacidades de
%la bomba (filas) y la PV (columna)
MatrizCoste (j, k) = CosteTotal;

%Para calcular las emisiones CO2 más adelante (si no hay venta a la red)...
if ConsElec (h) < 0
    ConsElecEmisiones (h) = 0;
else
    ConsElecEmisiones (h) = ConsElec (h);
end

end

%Se añade el precio del quemador, el máximo del consumo. También el término
fijo
%del gas y el término de potencia de la energía
MatrizCoste (j, k) = MatrizCoste (j, k) + PQuema * CapQuema / TVQuema / 365 / 24 + TerFijoGas + Te
rPotencia * max (ConsElec);

%Calculadora CO2 anual

EmiCO2 = (EmiCO2elec * sum (ConsElecEmisiones) + EmiCO2gas * sum (ConsGas)) * 30.5;
MatrizEmisiones (j, k) = EmiCO2;

%Buscador del mínimo

if MatrizCoste (j, k) < minimo
    minimo = MatrizCoste (j, k);

```

```

        vectormin=[j,k];

        EmiCO2final=MatrizEmisiones(j,k);
    end

%Buscador de estado
    if j==55 && k==118
        dato=ConsElec;
    end

end

end

MatrizCoste;
MatrizCosteAnual=MatrizCoste*30.5;
MatrizEmisiones;
PrecioAnual=minimo*30.5
minimo
vectormin
EmiCO2final

```

## Anexo II: Programa MatLab. Bomba de calor + PV + Batería

```
%Las demandas de un día medio kW
DCalorVivienda=[<Consbctor con los 288 valores, ver "Anexo IV">];
DElecVivienda=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo III">];
ViviendasEdificio=15;
DElec=DElecVivienda*ViviendasEdificio;
DCalor=DCalorVivienda*ViviendasEdificio;

%Radiacion solar un día medio kW
Radiacion=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo V">];
Radiacion=0.001*Radiacion;
Temperatura=[<Vector con los 288 valores, ver "Anexo VI">];

%Precios energía (Euros)
PElec=[<Vector con los 288 valores, en relación a la "Tarifa supervalle">];
ImpElec=1.051127*1.21;
PElec=PElec*ImpElec;
TerPotencia=0.1042; %€/kWhDía
PGas=0.059+0.00234;
ImpGas=1.21;
PGas=PGas*ImpGas;
TerFijoGas=0.27; %€/día
VRed=0; %0.055*ImpElec; Precio de venta a la red (0 si no hay venta)

%Constantes generales
EmiCO2elec =0.246; %kgCO2/kwh
EmiCO2gas =0.2040; %kgCO2/kwh

%Precios Aparatos por kW

PBomba =1000;
PPV =700;
PQuema =800;
PBateria=573;

%Rendimientos
RendBomba =3.4;
RendQuema =0.98;
RendBateria=0.9;

%Rendimiento fotovoltaica
RendPV = 0.86; %Rendimiento instalacion
Tc=Temperatura+(47-20)/0.8*Radiacion; %Temperatura de trabajo
EfPanel=0.17;
RendPVDir=EfPanel*(1-0.005*(Tc-25)); %Rendimiento panel

%Tiempo de vida (años)
TVBomba =20;
TVPV =25;
TVQuema=20;
TVBateria=25;

%Batería
CapCarga=10; %Potencia máxima de carga
CapDescarga=10; %Pot máx descarga

%Inicializacion
CosteTotal=0;
EdlB=10; %Estado de la batería
minimo=1000;
```

```

for j=1:100 %filas
    CapBomba=(j-1)*0.1;
    for k=1:150 %columnas
        CapPV=(k-1);
        for l=1:50 %fondo
            TB=(l-1);
CosteTotal=0;
EdlB=0;

for i=1:288
h=i;
EnergiaSobra(h)=0; %Empieza valiendo 0, luego se verá si cambia

ConsElec(h)=CapBomba-Radiacion(h)*RendPV*RendPVDDir(h)*CapPV+DElec(h);

if ConsElec(h)<0 %Guarda el valor de la energía sobrante
    EnergiaSobra(h)=ConsElec(h);
end

%FlujoGas= ConsGas(h)==CapQuema;
%FlujoCalor=DCalor(h)==CapBomba*RendBomba+CapQuema*RendQuema;
ConsGas(h)=(DCalor(h)-CapBomba*RendBomba)/RendQuema; %El cons Gas =Cap
quemador

if ConsGas(h)<0 %Asegurar que el Consumo no es negativo
    ConsGas(h)=0;

    CapBomba2=DCalor(h)/RendBomba; %La bomba consume lo necesario para que sea
0 el consumo de gas
    ConsElec(h)=CapBomba2-Radiacion(h)*RendPV*RendPVDDir(h)*CapPV+DElec(h); %Se
recalcula el consumo electrico con la nueva pot de la bomba
    if ConsElec(h)<0 %Guarda el valor de la energía sobrante
        EnergiaSobra(h)=ConsElec(h);
    end

end
end

for i=1:288
h=i;

%Predicción de lo que sobrará en las proximas 24h
if mod(h,24)==1
    ResEspacio=0; %Reserva de espacio en la batería
    for g=1:24
        ResEspacio=ResEspacio-EnergiaSobra(h+g-1);
    end
    ResEspacio=ResEspacio*1; %Si se quiere manipular la reserva
end

EnergiaSobra(h)=0;

EdlB2=EdlB;
ConsElec(h)=CapBomba-Radiacion(h)*RendPV*RendPVDDir(h)*CapPV+DElec(h);

%Batería que consume en valle y gasta en pico
if ConsElec(h)>0 %Si, aún se consume electricidad, se descarga
    if PElec(h)==(0.071*ImpElec) %Si, estamos en supervalle también se carga
        ConsBat(h)=min([(TB-EdlB-ResEspacio) CapCarga]);
        if ConsBat(h)<0 %Aseguramos que no es negativo
            ConsBat(h)=0;
        end
        EdlB=EdlB+ConsBat(h);
    end
end

```

```

elseif PElec(h)==(0.093*ImpElec) %Si estamos en valle no se hace nada
    ConsBat(h)=0;
else %Si es pico se consume
    ConsBat(h)=-min([ConsElec(h) EdlB CapDescarga]); %Se usa el limitante
entre la carga, el consumo y la cap de descargarse
    EdlB=EdlB+ConsBat(h); %Positivo porque ya es negativo el valor
end
else %Cuando sobra electricidad se carga
    ConsBat(h)=min([(TB-EdlB) -ConsElec(h) CapCarga]); %Limitación entre: Lo
que queda para llenarse, la energía que sobra (negativo porque ya lo es) y la
capacidad de cargarse
    EdlB=EdlB+ConsBat(h);

end

%Se recalcula con la batería
ConsElec(h)=CapBomba-
Radiacion(h)*RendPV*RendPVDDir(h)*CapPV+DElec(h)+ConsBat(h)*RendBateria;

if ConsElec(h)<0 %Guarda el valor de la energía sobrante
    EnergiaSobra(h)=ConsElec(h);
end

ConsGas(h)=(DCalor(h)-CapBomba*RendBomba)/RendQuema; %El cons Gas =Cap
quemador

if ConsGas(h)<0 %Asegurar que el Consumo no es negativo
    ConsGas(h)=0;

    CapBomba2=DCalor(h)/RendBomba; %La bomba consume lo necesario para que
sea 0 el consumo de gas
    ConsElec(h)=CapBomba2-Radiacion(h)*RendPV*RendPVDDir(h)*CapPV+DElec(h); %Se
recalcula el consumo electrico con la nueva pot de la bomba
    EdlB=EdlB2; %Tomamos el valor antes de que varíe con el primer cálculo

%%Batería que consume en valle y gasta en pico
if ConsElec(h)>0 %Si, aún se consume electricidad, se descarga
    if PElec(h)==(0.071*ImpElec) %Si, estamos en supervalle también se carga
        ConsBat(h)=min([(TB-EdlB-ResEspacio) CapCarga]);
        if ConsBat(h)<0 %Aseguramos que no es negativo
            ConsBat(h)=0;
        end
        EdlB=EdlB+ConsBat(h);
    elseif PElec(h)==(0.093*ImpElec) %Si estamos en valle no se hace nada
        ConsBat(h)=0;
    else %Si es pico se consume
        ConsBat(h)=-min([ConsElec(h) EdlB CapDescarga]); %Se usa el limitante
entre la carga, el consumo y la cap de descargarse
        EdlB=EdlB+ConsBat(h); %Positivo porque ya es negativo el valor
    end
else %Cuando sobra electricidad se carga
    ConsBat(h)=min([(TB-EdlB) -ConsElec(h) CapCarga]); %Limitación entre: Lo
que queda para llenarse, la energía que sobra (negativo porque ya lo es) y
    EdlB=EdlB+ConsBat(h);

end

ConsElec(h)=CapBomba2-
Radiacion(h)*RendPV*RendPVDDir(h)*CapPV+DElec(h)+ConsBat(h)*RendBateria;

if ConsElec(h)<0 %Guarda el valor de la energía sobrante
    EnergiaSobra(h)=ConsElec(h);
end

end

```

```

CapQuema=max(ConsGas); %Recordamos

%En el coste se incluyen precios de las energías y aparatos (incluida la
%instalacion
    if ConsElec(h)<0

Coste(h)=ConsElec(h)*VRed+ConsGas(h)*PGas+PBomba*CapBomba/TVBomba/365/24+PPV*CapPV/TVPV/365/24+TB*PBateria/TVBateria/365/24;
    else

Coste(h)=ConsElec(h)*PElec(h)+ConsGas(h)*PGas+PBomba*CapBomba/TVBomba/365/24+PBateria*CapPV/TVPV/365/24+TB*PBateria/TVBateria/365/24;
    end
CosteTotal=CosteTotal+Coste(h);

%Se organiza en una matriz los precios en funcion de las capacidades de
%la bomba (filas), la PV (columna) y la batería
MatrizCoste(j,k,l)=CosteTotal;

%Para calcular las emisiones CO2 más adelante (si no hay venta a la red)...
    if ConsElec(h)<0
        ConsElecEmisiones(h)=0;
    else
        ConsElecEmisiones(h)=ConsElec(h);
    end

FlujoBateria(h)=EdlB;
end

%Se añade el precio del quemador, el máximo del consumo. También el término
fijo
%del gas y el término de potencia de la energía
MatrizCoste(j,k,l)=MatrizCoste(j,k,l)+PQuema*CapQuema/TVQuema/365/24+TerFijoGas+TerPotencia*max(ConsElec);

%Calculadora CO2 anual
EmiCO2=(EmiCO2elec*sum(ConsElecEmisiones)+EmiCO2gas*sum(ConsGas))*30.5;
MatrizEmisiones(j,k,l)=EmiCO2;

%Buscador del mínimo

    if MatrizCoste(j,k,l)<minimo
        minimo=MatrizCoste(j,k,l);
        vectormin=[j,k,l];

        EmiCO2final=MatrizEmisiones(j,k,l);

    end

%Buscador de estado
    if j==36 && k==27 && l==43

    end

end
end
end

```

```
MatrizCoste;  
MatrizCosteAnual=MatrizCoste*30.5;  
MatrizEmisiones;  
PrecioAnual=minimo*30.5  
minimo  
vectormin  
EmiCO2final
```

## Anexo III: Datos de demanda de electricidad

Energía eléctrica consumida por hogar cada una de las 24 horas del día, tomando un día representativo de cada mes. En kWh.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	0.2729	0.2552	0.2175	0.2547	0.2046	0.2360	0.3605	0.2825	0.2580	0.2131	0.1927	0.3266
2	0.2371	0.2254	0.1911	0.2192	0.1826	0.2077	0.3187	0.2533	0.2297	0.1928	0.1729	0.2794
3	0.2209	0.2121	0.1823	0.2031	0.1731	0.1983	0.2922	0.2330	0.2139	0.1860	0.1644	0.2540
4	0.2176	0.2088	0.1793	0.1934	0.1700	0.1920	0.2808	0.2213	0.2045	0.1826	0.1615	0.2431
5	0.2241	0.2188	0.1852	0.1934	0.1763	0.1920	0.2732	0.2184	0.2045	0.1894	0.1672	0.2431
6	0.2664	0.2618	0.2205	0.1999	0.2046	0.2140	0.2732	0.2184	0.2108	0.2165	0.1984	0.2576
7	0.3638	0.3679	0.2998	0.2128	0.2644	0.2612	0.2808	0.2242	0.2265	0.2943	0.2777	0.2903
8	0.4515	0.4441	0.3616	0.2547	0.3211	0.3179	0.3149	0.2504	0.2737	0.3484	0.3316	0.3665
9	0.5068	0.4839	0.3968	0.3224	0.3494	0.3588	0.3718	0.2970	0.3398	0.3788	0.3571	0.4754
10	0.5555	0.5204	0.4262	0.3836	0.3715	0.3902	0.4250	0.3378	0.3932	0.4025	0.3798	0.5552
11	0.5652	0.5237	0.4292	0.4062	0.3778	0.4060	0.4591	0.3640	0.4090	0.4093	0.3826	0.5806
12	0.5685	0.5270	0.4351	0.4126	0.3904	0.4217	0.4819	0.3786	0.4215	0.4194	0.3911	0.5806
13	0.5782	0.5369	0.4409	0.4255	0.4030	0.4406	0.5122	0.3989	0.4404	0.4329	0.3996	0.5951
14	0.5522	0.5137	0.4233	0.4191	0.3841	0.4249	0.5274	0.4077	0.4278	0.4093	0.3826	0.5878
15	0.5262	0.4872	0.3968	0.3707	0.3526	0.3997	0.5046	0.3873	0.3869	0.3754	0.3599	0.5443
16	0.5262	0.4839	0.3880	0.3449	0.3463	0.3965	0.4857	0.3727	0.3649	0.3687	0.3571	0.5153
17	0.5555	0.5071	0.3998	0.3353	0.3589	0.4091	0.4819	0.3669	0.3618	0.3856	0.3854	0.5298
18	0.6075	0.5502	0.4174	0.3449	0.3683	0.4154	0.4857	0.3727	0.3649	0.4093	0.4364	0.5915
19	0.6464	0.6132	0.4674	0.3643	0.3778	0.4091	0.4933	0.3786	0.3681	0.4465	0.4620	0.6132
20	0.6659	0.6430	0.5115	0.4191	0.3998	0.4028	0.5122	0.3931	0.4058	0.4871	0.4761	0.6278
21	0.6529	0.6231	0.5086	0.4803	0.4313	0.4123	0.5540	0.4426	0.4373	0.4769	0.4563	0.6205
22	0.5717	0.5402	0.4439	0.4352	0.3967	0.4060	0.5616	0.4310	0.4027	0.4059	0.3911	0.5588
23	0.4580	0.4309	0.3586	0.3578	0.3211	0.3525	0.5009	0.3786	0.3523	0.3281	0.3117	0.4862
24	0.3378	0.3215	0.2675	0.2805	0.2550	0.3021	0.4098	0.2941	0.3020	0.2672	0.2381	0.4064
	<b>11.1290</b>	<b>10.5000</b>	<b>8.5484</b>	<b>7.8333</b>	<b>7.5806</b>	<b>8.1667</b>	<b>10.1613</b>	<b>7.9032</b>	<b>8.0000</b>	<b>8.2258</b>	<b>7.8333</b>	<b>11.1290</b>

## Anexo IV: Datos de demanda de calor

Energía calorífica consumida por hogar cada una de las 24 horas del día, tomando un día representativo de cada mes. En kWh.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	0.7372	0.7008	0.5455	0.2895	0.1327	0.1066	0.0885	0.0737	0.0990	0.1769	0.4723	0.6782
2	0.4739	0.4505	0.3507	0.1861	0.0853	0.0686	0.0569	0.0474	0.0637	0.1137	0.3036	0.4360
3	0.4476	0.4255	0.3312	0.1758	0.0806	0.0648	0.0537	0.0448	0.0601	0.1074	0.2868	0.4118
4	0.5266	0.5006	0.3897	0.2068	0.0948	0.0762	0.0632	0.0527	0.0707	0.1264	0.3374	0.4845
5	0.5002	0.4756	0.3702	0.1964	0.0900	0.0724	0.0600	0.0500	0.0672	0.1201	0.3205	0.4602
6	0.5266	0.5006	0.3897	0.2068	0.0948	0.0762	0.0632	0.0527	0.0707	0.1264	0.3374	0.4845
7	0.6846	0.6508	0.5066	0.2688	0.1232	0.0990	0.0821	0.0685	0.0920	0.1643	0.4386	0.6298
8	1.2111	1.1514	0.8962	0.4756	0.2180	0.1752	0.1453	0.1211	0.1627	0.2907	0.7759	1.1142
9	1.7377	1.6520	1.2859	0.6823	0.3128	0.2514	0.2085	0.1738	0.2334	0.4171	1.1133	1.5987
10	1.4744	1.4017	1.0911	0.5790	0.2654	0.2133	0.1769	0.1474	0.1981	0.3539	0.9446	1.3565
11	1.0005	0.9511	0.7404	0.3929	0.1801	0.1447	0.1201	0.1000	0.1344	0.2401	0.6410	0.9205
12	0.8162	0.7759	0.6040	0.3205	0.1469	0.1181	0.0979	0.0816	0.1096	0.1959	0.5229	0.7509
13	0.7372	0.7008	0.5455	0.2895	0.1327	0.1066	0.0885	0.0737	0.0990	0.1769	0.4723	0.6782
14	0.9478	0.9011	0.7014	0.3722	0.1706	0.1371	0.1137	0.0948	0.1273	0.2275	0.6073	0.8720
15	1.3691	1.3016	1.0131	0.5376	0.2464	0.1981	0.1643	0.1369	0.1839	0.3286	0.8771	1.2596
16	1.8430	1.7521	1.3638	0.7237	0.3317	0.2666	0.2212	0.1843	0.2476	0.4423	1.1808	1.6956
17	2.1063	2.0024	1.5587	0.8271	0.3791	0.3047	0.2528	0.2106	0.2829	0.5055	1.3494	1.9378
18	2.0800	1.9774	1.5392	0.8167	0.3744	0.3009	0.2496	0.2080	0.2794	0.4992	1.3326	1.9136
19	1.8430	1.7521	1.3638	0.7237	0.3317	0.2666	0.2212	0.1843	0.2476	0.4423	1.1808	1.6956
20	1.7377	1.6520	1.2859	0.6823	0.3128	0.2514	0.2085	0.1738	0.2334	0.4171	1.1133	1.5987
21	1.7904	1.7020	1.3249	0.7030	0.3223	0.2590	0.2148	0.1790	0.2405	0.4297	1.1470	1.6471
22	1.9220	1.8272	1.4223	0.7547	0.3460	0.2781	0.2306	0.1922	0.2582	0.4613	1.2314	1.7683
23	1.7377	1.6520	1.2859	0.6823	0.3128	0.2514	0.2085	0.1738	0.2334	0.4171	1.1133	1.5987
24	1.4218	1.3516	1.0521	0.5583	0.2559	0.2057	0.1706	0.1422	0.1910	0.3412	0.9109	1.3080
	<b>29.6727</b>	<b>28.2089</b>	<b>21.9578</b>	<b>11.6515</b>	<b>5.3411</b>	<b>4.2927</b>	<b>3.5607</b>	<b>2.9673</b>	<b>3.9860</b>	<b>7.1215</b>	<b>19.0103</b>	<b>27.2989</b>

## Anexo V: Datos de radiación solar

Radiación sobre la ciudad de Zaragoza, cada una de las 24 horas del día, tomando un día representativo de cada mes. En Wh/m<sup>2</sup>.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	8	21	11	0	0	0	0	0
6	0	0	1	24	50	54	49	40	14	0	0	0
7	0	2	77	153	208	221	204	175	139	87	13	0
8	94	164	270	341	406	417	409	386	337	258	205	139
9	225	345	476	537	589	607	614	603	551	453	325	228
10	375	537	652	705	729	757	792	789	742	624	476	367
11	502	656	773	813	821	859	916	917	860	733	581	461
12	560	724	826	850	855	895	963	968	894	758	633	515
13	545	727	789	829	832	872	934	942	861	748	578	484
14	457	644	689	717	754	771	836	832	750	614	472	395
15	327	486	547	551	596	612	680	662	574	453	310	258
16	191	302	365	381	412	433	488	469	379	236	193	144
17	7	112	165	195	227	243	287	251	165	49	0	0
18	0	0	15	46	69	87	101	69	15	0	0	0
19	0	0	0	0	14	34	31	10	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## Anexo VI: Datos de temperatura

Temperatura en la ciudad de Zaragoza, cada una de las 24 horas del día, tomando un día representativo de cada mes. En °C.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	6.3	6.3	8.4	11	14.5	18.6	21.5	21.9	18.7	14.9	9.6	6.2
2	6.1	6.1	8.1	10.7	14	18.1	20.9	21.3	18.3	14.6	9.4	6.1
3	5.9	5.8	7.8	10.4	13.6	17.5	20.3	20.8	17.9	14.2	9.3	5.9
4	5.7	5.6	7.5	10.1	13.2	17	19.7	20.2	17.4	13.9	9.1	5.8
5	5.6	5.4	7.2	10	13.2	17	19.6	19.9	17.1	13.7	9	5.6
6	5.4	5.1	6.9	9.8	13.3	17.1	19.5	19.6	16.8	13.4	8.8	5.5
7	5.2	4.9	6.7	9.7	13.3	17.2	19.4	19.3	16.5	13.1	8.6	5.4
8	5.7	5.7	7.9	11.1	14.8	18.7	20.9	20.8	17.8	14.3	9.3	5.9
9	6.3	6.6	9.2	12.5	16.3	20.2	22.4	22.2	19	15.4	10	6.5
10	6.8	7.4	10.4	13.9	17.8	21.7	23.9	23.6	20.3	16.5	10.7	7
11	8	8.6	11.6	15.1	19	23.1	25.4	25.1	21.6	17.7	11.7	8.1
12	9.2	9.8	12.8	16.2	20.1	24.4	26.9	26.7	22.8	18.8	12.7	9.1
13	10.4	11	13.9	17.3	21.3	25.8	28.4	28.2	24.1	20	13.6	10.2
14	10.7	11.4	14.4	17.9	21.9	26.5	29.5	29.2	24.8	20.4	13.9	10.4
15	11.1	11.9	14.9	18.5	22.5	27.2	30.5	30.2	25.6	20.9	14.1	10.6
16	11.4	12.3	15.4	19	23.1	28	31.5	31.1	26.3	21.4	14.4	10.9
17	10.3	11.2	14.5	18.4	22.6	27.4	31.1	30.7	25.6	20.4	13.4	9.9
18	9.3	10.2	13.6	17.7	22	26.9	30.6	30.2	24.9	19.4	12.3	8.9
19	8.2	9.1	12.7	17	21.5	26.4	30.2	29.8	24.1	18.4	11.3	7.9
20	7.7	8.4	11.7	15.7	20	24.8	28.5	28.2	23	17.5	10.8	7.5
21	7.2	7.7	10.7	14.4	18.5	23.3	26.8	26.6	21.9	16.7	10.3	7.1
22	6.7	7	9.8	13.1	17.1	21.7	25.1	25	20.8	15.8	9.8	6.7
23	6.6	6.8	9.3	12.4	16.2	20.8	23.9	23.9	20	15.5	9.6	6.6
24	6.4	6.6	8.9	11.7	15.4	19.8	22.8	22.9	19.3	15.1	9.5	6.4