



## Trabajo Fin de Grado

Diseño y análisis de un sistema de generación  
de electricidad y climatización de un centro  
comercial situado en Zaragoza

Design and analysis of electricity and air  
conditioning polygeneration system for a  
shopping center located in Zaragoza

Autor

Adrián Hernández Iranzo

Directores

Dr. Luis María Serra de Renobales  
Dr. Miguel Ángel Lozano Serrano

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2019

# Diseño y análisis de un sistema de generación de electricidad y climatización de un centro comercial situado en Zaragoza.

## RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es el diseño y optimización de costes de un sistema de energía renovable integrado con la red eléctrica capaz de cubrir la demanda de energía eléctrica y de frío de un centro comercial situado en Zaragoza.

El sistema de energía renovable a emplear se compone de un campo de concentradores cilindro parabólicos (CCP) que junto con el apoyo de una caldera de biomasa proporcionan la energía térmica necesaria para hacer funcionar un ciclo Rankine orgánico (ORC) con el que se produce la electricidad necesaria en el centro comercial para atender el consumo eléctrico de las maquinas enfriadoras empleadas en la refrigeración y del resto de servicios del centro.

El sistema de captación cuenta con tanques de acumulación para almacenar el excedente de energía térmica producida en las horas de máxima radiación, así se consigue alargar la producción de electricidad en el ciclo ORC en las horas en las que no hay radiación.

El sistema se ha sobredimensionado para que su producción eléctrica anual sea similar al consumo anual de energía eléctrica del centro comercial. De esta forma se evita su sobredimensionamiento. No obstante, la energía producida no siempre satisface la demanda de electricidad del centro comercial por lo que es necesario comprar energía a la red eléctrica durante algunas horas del año, como pueden ser horas nocturnas de meses de enero en los que la disponibilidad del recurso solar es escasa. Del mismo modo, hay momentos en los que la producción de energía excede al consumo de la misma, como ocurre en los meses de verano, en estos casos se vende el exceso de producción a la red eléctrica.

Se plantean diferentes formas de optimizar el sistema variando el tamaño del campo solar, la potencia de la caldera de biomasa y la potencia del ORC entre otros, buscando de este modo optimizar el sistema y estudiar su viabilidad técnica y económica, así como una estimación de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que se podría alcanzar.

# ÍNDICE

---

Índice .....	2
1 Introducción .....	3
1.1 Energía solar .....	3
1.2 Ciclo Rankine Orgánico (ORC) .....	5
1.3 Caldera de biomasa .....	5
1.4 Objetivo del documento .....	5
2 Demanda de energía del centro comercial .....	7
2.1 Demanda de frío .....	7
2.2 Demanda de electricidad de otros consumos .....	9
3 Maquinas enfriadoras.....	11
3.1 Demanda electricidad para producción de frío .....	13
4 Ciclo Rankine Orgánico .....	14
5 Caldera de biomasa .....	16
6 Diseño del campo solar .....	17
6.1 Captadores (SCA) y Receptores (HCE) .....	17
6.2 Tanque de acumulación Y Variable solar multiplicativa .....	19
6.3 Simulación caso base .....	21
7 Análisis del sistema.....	26
7.1 Caso base .....	26
7.2 ORC menor potencia.....	29
7.3 ORC operando a carga parcial .....	32
7.4 ORC de mayor rendimiento .....	35
7.5 ORC de mayor rendimiento y operando a carga parcial .....	37
8 Conclusiones.....	40
9 Referencias .....	42
10 Anexos .....	44

# 1 INTRODUCCIÓN

---

Las energías renovables juegan un papel cada vez más destacado en todo el mundo, incluida Europa en el esfuerzo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y evolucionar así hacia un futuro con bajas emisiones de carbono.

La organización meteorológica mundial advierte de que el impacto del cambio climático se está acelerando a medida que las concentraciones de gases de efecto invernadero contribuyen a que las temperaturas globales alcancen niveles cada vez más peligrosos [1]. Además de otros factores, como son los grandes incendios forestales, que no sólo liberan a la atmósfera dióxido de carbono sino que provocan la desaparición de árboles y vegetación que absorben esas emisiones, la principal causa del aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero se debe a la aún masiva utilización de combustibles fósiles que todavía representa actualmente el 80% de la energía primaria consumida por la humanidad. [2]

En enero de 2014, la Comisión Europea presentó una propuesta, con horizonte 2030, en la que se proponen nuevos objetivos de reducción de emisiones, de utilización de energías renovables y de mejora de la eficiencia energética, con la que se pretende dar continuidad a la arquitectura de lucha contra el cambio climático de la UE [3].

Los principales elementos de esta Propuesta para 2030 que se revisaron al alza en 2018 son la reducción de gases de efecto invernadero al menos un 40% respecto a los niveles de 1990. La fracción renovable en el consumo de energía final debe alcanzar al menos el 32% y la mejora de al menos un 32,5% de la eficiencia energética. [3]

El cumplimiento de estos objetivos es factible debido a que la producción de electricidad mediante energías renovables es cada vez más barata debido a la tendencia de disminución de precio de los componentes necesarios para su producción. Por ello la producción mediante tecnologías de energía renovable es cada vez más competitiva en términos de costes en comparación con otras fuentes de energía. De hecho, en muchos lugares, las energías renovables ya compiten con éxito con las tecnologías de combustibles fósiles a precios de mercado. Además, si los precios de la energía internalizasen mejor los impactos medioambientales asociados a la generación y el uso de energía, como las emisiones a la atmósfera, las energías renovables superarían claramente a las tecnologías convencionales [4].

Por ello es muy importante que aumente el uso de tecnologías renovables para poder conseguir que en el futuro estas sean capaces que asumir la mayor parte de la producción de energía. Como resultado se reducirán las emisiones contaminantes a la atmósfera y se conseguirá reducir la contaminación secundaria debido a estas emisiones como son el calentamiento global y la lluvia acida.

## 1.1 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La radiación electromagnética puede

aprovecharse por medio de diversos captadores como células fotovoltaicas o captadores solares, pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica.

### 1.1.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en la obtención de electricidad mediante un conjunto de células fotovoltaicas formadas por material semiconductor que, al recibir la energía de los fotones procedentes de la radiación solar, liberan electrones que son conducidos a un circuito eléctrico generando así una corriente eléctrica a partir de la radiación solar.

### 1.1.2 Energía solar térmica

Con la energía solar térmica se convierte la radiación incidente en el área del captador en energía térmica a la que luego se puede dar diferentes usos. Este proceso se realiza con un fluido térmico como medio de transporte de la energía, el fluido térmico absorbe la radiación solar para aumentar su temperatura y luego se aprovecha la temperatura del fluido para el uso que se desee, que puede ser, por ejemplo el aprovechamiento directo de la energía térmica en procesos de calentamiento, o la producción de frío con máquinas de absorción, ó la producción de electricidad mediante un ciclo Rankine orgánico (ORC, siglas en inglés), que es el caso que se estudia en este documento.

## Captadores

Hay diferentes tipos de captadores solares, se pueden agrupar principalmente en dos categorías:

- Captadores estacionarios: Son los captadores en los que la energía se absorbe por el fluido que pasa por un tubo sin que la radiación de un área se concentre en un tubo. Suelen estar en posición fija. Ejemplos de este tipo de captadores son los de placa plana y los colectores de tubos de vacío.
- Captadores de concentración: En estos captadores la radiación solar de un área se concentra en el absorbéedor. Para aumentar la eficiencia de este tipo de captadores se suele usar sistemas de seguimiento. Ejemplos de este tipo de captadores son los cilindro parabólicos, fresnel lineales, heliostatos (central de torre) y discos parabólicos.

## Receptores y fluido térmico

Los receptores también conocidos como absorbédores se instalan sobre los captadores, en la posición en la posición donde el colector refleja la radiación. Los receptores tienen la función de maximizar la absorción de energía procedente de la radiación solar al fluido térmico.

Están compuestos por un tubo de vacío de cristal en cuyo interior hay un tubo de metal por el que circula el fluido térmico. Mediante esta configuración se consigue maximizar la absorción de energía procedente de la radiación solar.

## Tanques de almacenamiento de energía

Con el fin de aumentar la estabilidad del sistema y que éste pueda funcionar en horas en las que no haya sol o el recurso solar haya disminuido se usan tanques para almacenar el

fluido térmico a alta temperatura. Estos tanques se sitúan después de que el fluido pase por los colectores y haya absorbido la energía térmica. La colocación de tanques hace que el sistema sea más estable y amplia las horas de funcionamiento del sistema solar, pero también hace que la puesta en marcha sea algo más lenta puesto que el sistema requiere más tiempo para alcanzar su potencia térmica máxima.

## 1.2 CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)

Un posible uso de la energía térmica obtenida mediante los captadores solares térmicos, que es el que se analiza en este documento, es el de producción de electricidad con un ciclo Rankine orgánico (ORC). El ciclo Rankine orgánico es un ciclo de potencia que emplea un fluido orgánico como fluido de transferencia de calor. El objetivo de este ciclo es el de obtener energía mecánica a partir de una fuente de calor.

Los sistemas ORC se comportan de igual modo que un ciclo de Rankine convencional y necesitan por tanto los mismos elementos para funcionar (bomba, turbina, evaporador y condensador) y rendimiento del ORC puede mejorarse aplicando las mismas acciones que a un ciclo convencional, por ejemplo, regeneración o precalentamiento.

Algunas ventajas del ciclo Rankine orgánico son que debido a las propiedades del fluido orgánico, no se produce corrosión, y no se pierde fluido de trabajo salvo rotura. Además, son poco ruidosos, compactos y necesitan poco mantenimiento

En la actualidad ya existen en funcionamiento plantas de producción de electricidad como la que se va a diseñar en este documento, que mediante captadores aprovechan la energía solar y con un ORC producen electricidad. Por ejemplo, la planta *Aalborg CSP-Brønderslev CSP with ORC Project* situada en Dinamarca, que produce energía eléctrica y térmica para sus ciudadanos. [5]

## 1.3 CALDERA DE BIOMASA

Las calderas de biomasa utilizan como fuente de energía combustibles naturales como los pellets de madera, residuos forestales o huesos de aceitunas. La base de su funcionamiento es similar a una caldera que utiliza combustibles fósiles como fuente de energía. Las calderas de biomasa queman el combustible en la cámara y el calor generado durante la combustión se transmite al fluido térmico que aumenta su temperatura.

## 1.4 OBJETIVO DEL DOCUMENTO

Este documento describe el procedimiento de diseño y optimización de los costes de un sistema de producción de energía renovable integrado con la red eléctrica capaz de cubrir la demanda de energía eléctrica y de climatización de un centro comercial situado en Zaragoza para conseguir una reducción de costes y de emisiones de CO<sub>2</sub> gracias a un uso más eficiente de la energía.

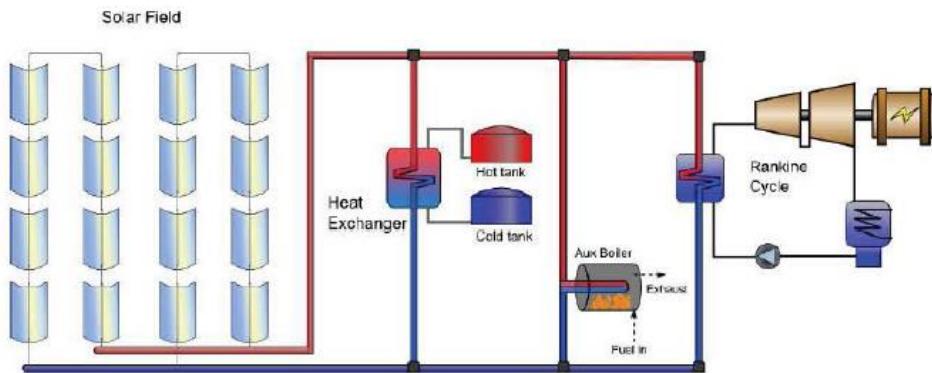


Figura 1.1. Diagrama del sistema estudiado [6]

El sistema de producción de energía representado en la Figura 1.1 está compuesto por un sistema de captación compuesto de un campo de captadores solares cilíndro parabólicos y una caldera de biomasa que aportan la energía térmica necesaria para que hace funcionar a un ciclo Rankine orgánico (ORC) que produce la electricidad que necesitan las máquinas enfriadoras y otros consumos del centro comercial. La caldera de biomasa está como apoyo del campo solar, para proporcionar la energía térmica que necesita el ORC para su funcionamiento a plena carga.

El sistema de captación cuenta con tanques de acumulación para almacenar el excedente de energía térmica producida en las horas de máxima radiación, así se consigue alargar la producción de electricidad en el ciclo ORC en las horas en las que no hay radiación.

La producción de frío se realiza con máquinas enfriadoras que consumen electricidad para su funcionamiento.

Para el diseño del sistema se emplea el software System Advisor Model [7] en el que se diseña el campo de captadores y para el análisis del ciclo Rankine orgánico (ORC) se utiliza el software Engineering Equation Solver [8].

El objetivo es diseñar y analizar el comportamiento del sistema a lo largo del año. Para el dimensionamiento de los equipos del sistema se parte del estudio de demanda de electricidad del centro comercial, tanto de producción de frío para climatización, como del resto de consumos (iluminación, servicios, etc.). El criterio de partida utilizado para el dimensionado del sistema es cubrir la potencia eléctrica requerida para la producción de frío para climatización, de forma que se puedan cubrir las demandas de frío del centro comercial con el sistema solar hibridoado con biomasa. Esta elección de partida se realiza para evitar un excesivo sobredimensionamiento del sistema para cubrir los meses con recurso solar escaso. Es por ello necesario que el sistema esté conectado a la red eléctrica para comprar la electricidad necesaria o vender el excedente de producción.

A partir de este caso base se estudian diferentes casos correspondientes a diseños diferentes orientados a reducir el coste de la energía producida en el sistema solar. Por tanto, la estructura de este documento es la siguiente. En el capítulo 2 se estudian y analizan las demandas de energía del centro comercial. En los capítulos 3, 4, 5 y 6 se

describen y dimensionan los equipos que constituyen el sistema propuesto, para en el capítulo 7 analizar los diferentes casos de estudio considerados:

- Caso base en el que el sistema está dimensionado para cubrir la potencia necesaria para atender las demandas de frío para climatización
- A continuación, se analiza el caso en el que el sistema produce en base anual toda la energía eléctrica necesaria para atender las demandas de energía eléctrica del centro comercial optimizando la superficie del campo solar.
- Se estudia el efecto de la operación a carga parcial del ciclo Rankine orgánico
- Y se analiza en otro diferenciado el efecto de modificar el rendimiento energético del ciclo Rankine orgánico para producción de electricidad.

A continuación se muestra el proceso de diseño del sistema siguiendo el orden empleado para su diseño.

## 2 DEMANDA DE ENERGÍA DEL CENTRO COMERCIAL

---

Se consideran dos tipos de demandas. La demanda de energía eléctrica necesaria para la producción de frío mediante las maquinas enfriadoras, y la demanda que se necesita para abastecer otros consumos eléctricos del centro comercial.

### 2.1 DEMANDA DE FRÍO

Para la obtención de la demanda del centro comercial se parte del estudio realizado por Daikin [9] de demanda eléctrica necesaria para la producción de frío de un centro comercial situado en la provincia de Madrid. Como las condiciones climáticas de Madrid no difieren mucho de las de Zaragoza, este estudio se considera válido también para un centro comercial ubicado en Zaragoza. Además, para condiciones climáticas similares los datos del estudio son mucho más dependientes de la ocupación del centro comercial que de la localización por lo que, en el caso de este trabajo, la localización no es el aspecto más influyente.

Para obtener el perfil de demanda de frío se considera que hay dos días tipo, de acuerdo con la ocupación del centro comercial, los días laborables y los festivos. Se considera que cada día laborable de cada mes tiene la misma ocupación, y lo mismo para los días festivos.

De este modo a cada día tipo le corresponden unos índices de ocupación que varían según la hora del día de acuerdo con la Figura 2.1 y 2.2. El centro comercial tiene actividad durante 18 horas diarias: 12 horas de apertura al público (de 9 a 21 horas) y 6 horas (6 a 9 horas y de 21 a 00 horas) para suministro de mercancías y atención a los diferentes servicios del centro.

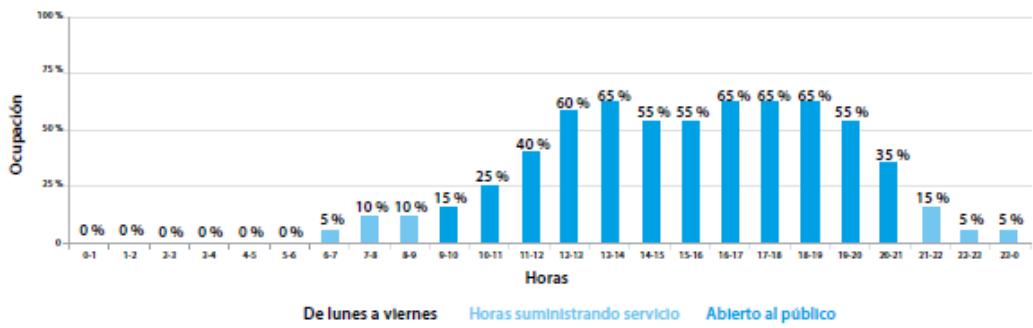


Figura 2.1. Índice de ocupación en un día laborable, demanda de frío [9]

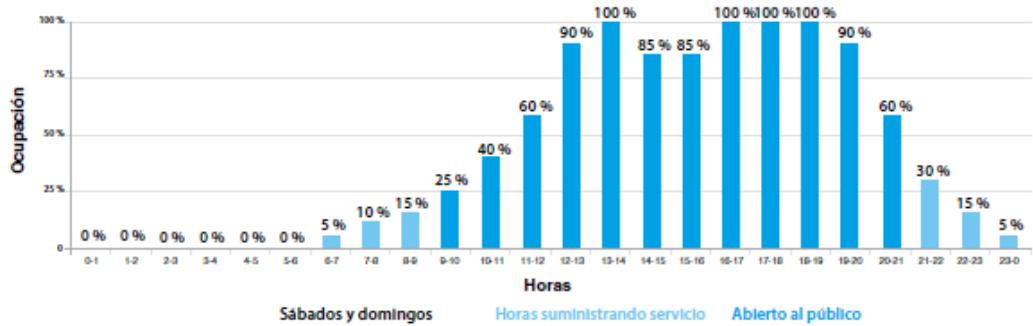


Figura 2.2. Índices de ocupación en un día festivo, demanda de frío [9]

También se conoce la distribución del consumo mensual de energía que se emplea en la climatización del centro comercial (Figura 2.3), siendo la climatización necesaria todos los meses del año, y los meses Junio y Julio los que mayor consumo de energía presentan.

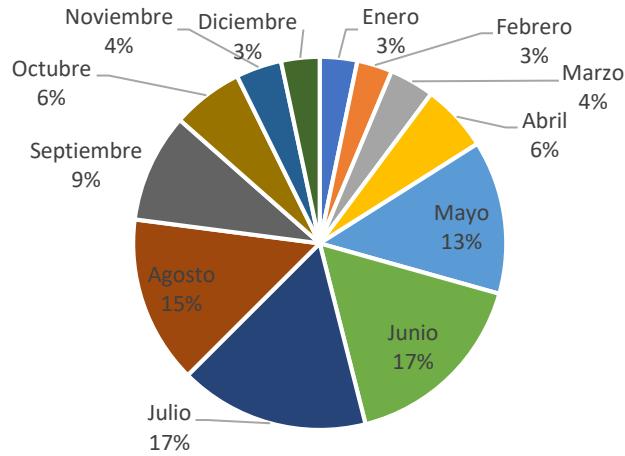


Figura 2.3. Porcentaje mensual de consumo de climatización de consumo de climatización (aire acondicionado)

Se conoce la demanda anual de frío para climatización, que es de 6455 MWh<sub>t</sub>. Esta demanda anual se puede distribuir por meses, teniendo en cuenta los porcentajes de consumo mensual mostrados en la Figura 2.3. Conocidos los índices de ocupación de los días laborables (Figura 2.1) y de los días festivos (Figura 2.2), así como el número de días laborables y festivos que tiene cada mes (Tabla 2.1) [10], se obtiene la demanda de frío para cada hora de cada mes para los dos días tipo considerados, laborables y festivos (Figura 2.4 y Figura 2.5). La mayor demanda de frío para el acondicionamiento del aire del centro comercial es de 4,549 MW<sub>t</sub> los días festivos del mes de junio a las 13 horas y de 16-18 horas.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Laborables</b>	20	18	20	19	20	19	20	20	19	20	19	20
<b>Festivos</b>	11	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

Tabla 2.1. Número de días laborables y festivos de cada mes

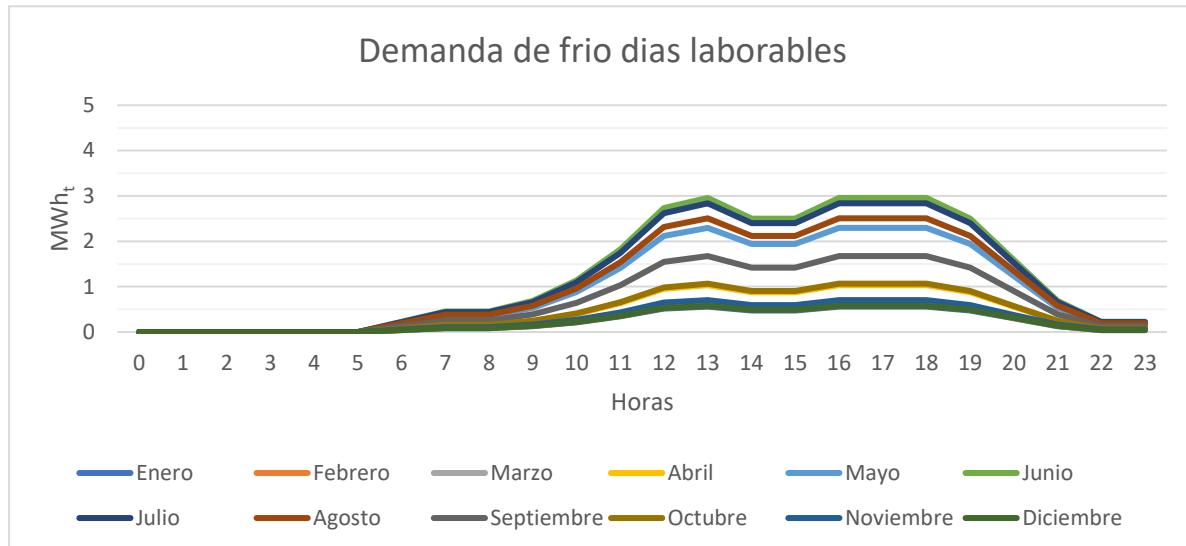


Figura 2.4. Demanda de frío para acondicionamiento del aire en días laborables

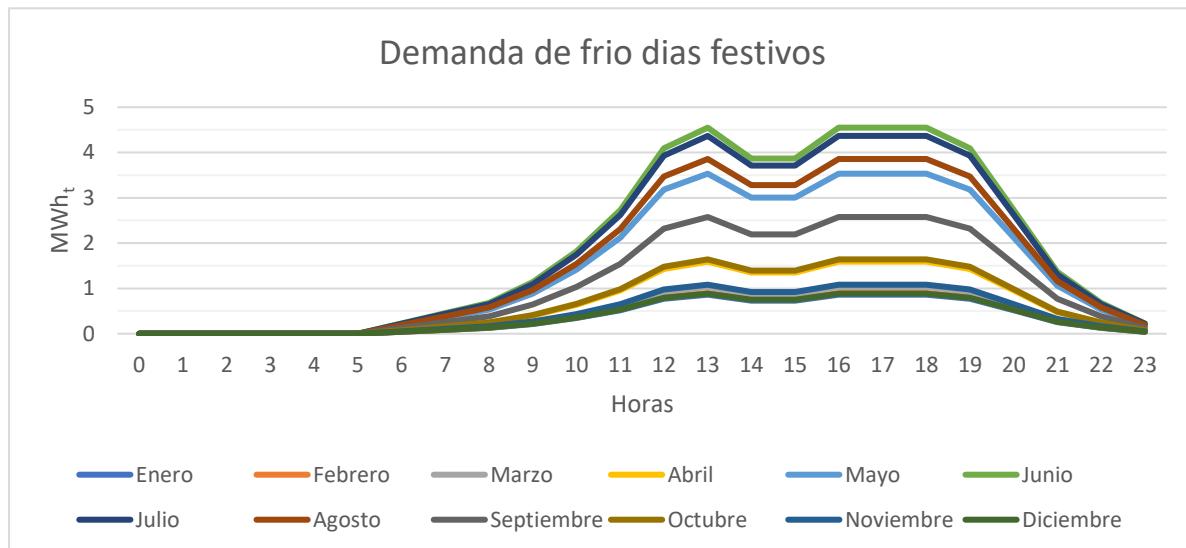


Figura 2.5. Demanda de frío para acondicionamiento del aire en días festivos

## 2.2 DEMANDA DE ELECTRICIDAD DE OTROS CONSUMOS

Se pueden considerar como otros consumos los consumos debido a iluminación y a los aparatos conectados a la red eléctrica.

La demanda anual de electricidad de otros consumos se considera que es igual a la demanda de electricidad necesaria para la producción de frío [11], es decir, los 6455 MWh<sub>t</sub> dividido por el EER de las enfriadoras (4,68), es decir, 1369,41 MWh<sub>e</sub>.

Para estimar la demanda eléctrica de otros consumos por hora para los días laborables y festivos de cada mes se asigna a cada hora cada día tipo el porcentaje de consumo eléctrico [12] que se muestra en la Figura 2.6, es decir en las horas en las que se usa el máximo se le asigna el 100% de uso y a partir de esa hora se asignan los porcentajes a las demás horas.

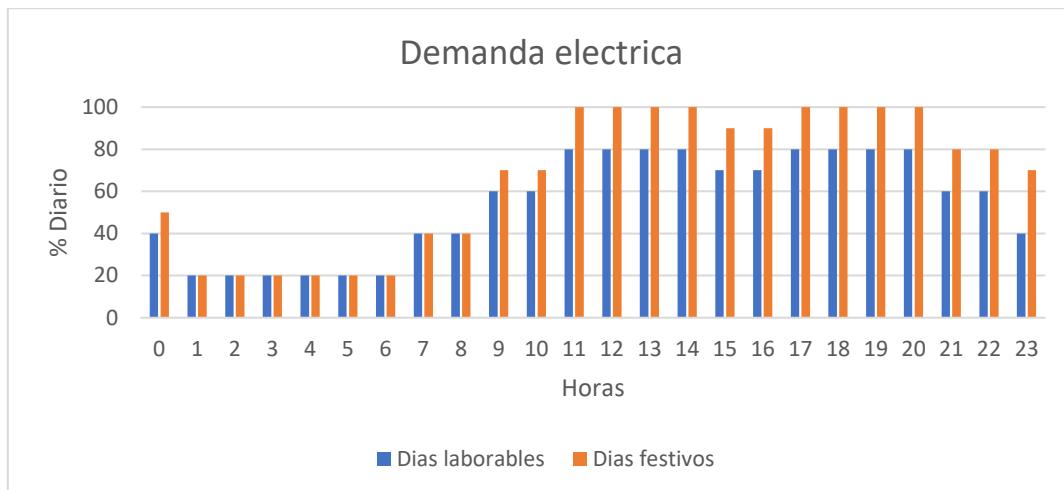


Figura 2.6. Porcentajes de uso demanda electrica para los dos días tipo

De acuerdo con la Tabla 2.1 en un año hay 234 días laborables y 131 días festivos, por lo que teniendo en cuenta el porcentaje de demanda se obtiene que el 59,20% de los 1369,41 MWh<sub>e</sub> se consumen en los días laborables y el 40,80% de los 1369,41 MWh<sub>e</sub> se consumen en los días festivos.

Utilizando estos porcentajes, junto con los porcentajes de demanda y el número de días laborables y festivos por mes, se calcula la demanda eléctrica de otros consumos para cada hora de cada mes para los dos días tipo considerados.



Figura 2.7. Demanda de otros consumos eléctricos por horas para los días laborables



Figura 2.8. Demanda de otros consumos eléctricos por horas para los días festivos.

En los capítulos siguientes se describen las características técnicas y los modelos de las diferentes tecnologías empleadas para modelar el comportamiento del sistema propuesto. Los datos técnicos y dimensionado de equipos que se considera en estos próximos capítulos (capítulos 3-6) son los correspondientes al caso base en el que el sistema propuesto debe cubrir con energía renovable toda la demanda (potencia) de frío del centro comercial considerado.

### 3 MAQUINAS ENFRIADORAS

La función de las maquinas enfriadoras es la de cubrir la demanda de frío de un recinto, para ello consume electricidad. Las máquinas enfriadoras se basan en un ciclo de Rankine inverso a partir del cual con un fluido refrigerante se extrae el calor que hay en el aire y se vuelve a expulsar el aire a menor temperatura al interior del recinto.

Los elementos de los que está compuesta una máquina enfriadora son los siguientes:

- Evaporador: El refrigerante absorbe el calor que hay en el recinto a enfriar y se evapora.
- Válvula de estrangulación: Tiene la función de reducir la presión del refrigerante para conseguir una temperatura y presión óptimas en el evaporador.
- Compresor: Eleva la presión del refrigerante consumiendo electricidad.
- Condensador: Extrae parte de calor del refrigerante que se condensa pasando de vapor sobrecalegado a líquido (habitualmente subenfriado).

Las máquinas enfriadoras a emplear en la refrigeración del centro comercial son de la empresa Swegon, en concreto los modelos COBALT W destinadas para potencias entre 172kW y 1527kW [13].



Figura 3.1. Enfriadora COBALT W [13]

Tamaño de la unidad		95.2	100.2	105.2	110.2	117.2	124.2	130.3	137.3	143.3	147.3	153.3	
<b>Refrigeracion (Gross values)</b>													
Potencia frigorífica nominal	(1)	kW	946	993	1049	1091	1171	1225	1282	1369	1424	1464	1527
Total potencia absorbida	(1)	kW	199	218	221	239	254	267	281	297	311	318	326
EER	(1)		4,74	4,55	4,74	4,56	4,62	4,59	4,56	4,61	4,58	4,60	4,68
ESEER			5,56	5,40	5,60	5,39	5,41	5,52	5,46	5,49	5,47	5,49	5,60
Clase de eficiencia			B	C	B	C	C	C	C	C	C	B	
<b>Refrigeracion (EN 14511 values)</b>													
Potencia frigorífica nominal	(1)(5)	kW	942	989	1044	1087	1167	1221	1278	1364	1418	1457	1520
EER	(1)(5)		4,55	4,35	4,52	4,40	4,44	4,41	4,39	4,43	4,39	4,40	4,47
ESEER	(5)		4,73	4,56	4,71	4,65	4,62	4,68	4,67	4,68	4,61	4,62	4,76
Clase de eficiencia			C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
<b>Compresores</b>													
Tipo													
Cantidad/Circuitos frigoríficos	nº		2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	
Niveles de parcialización	nº								Continua				
Carga total de aceite	l	40	51	56	56	56	56	74	79	84	84	84	
Carga total refrigerante	kg	160	180	190	195	220	230	225	250	270	280	290	
<b>Evaporador</b>													
Caudal de agua	(1)	l/h	134.136	142.906	151.055	162.683	201.431	210.711	220.546	235.409	244.911	251.752	262.622
Pérdida de carga	(2)	kPa	41	46	48	54	50	55	53	58	69	72	75
<b>Condensador</b>													
Caudal de agua	(1)	l/h	162.081	174.033	184.141	196.973	245.059	256.592	268.904	286.450	298.359	306.438	318.684
Pérdida de carga	kPa	32	31	51	54	54	57	50	50	54	54	54	
<b>Ruido</b>													
Nivel de potencia sonora	(3)	dB(A)	98	100	100	100	101	101	101	101	101	101	
Nivel de presión sonora	(4)	dB(A)	79	81	81	81	81	81	81	81	81	81	
Nivel de potencia sonora (modelo LN)	(3)	dB(A)	93	95	95	95	96	96	96	96	96	97	
Nivel de presión sonora (modelo LN)	(4)	dB(A)	74	76	76	76	76	76	76	76	77	77	
Nivel de potencia sonora (modelo SLN)	(3)	dB(A)	86	88	89	89	90	91	91	91	91	91	
Nivel de presión sonora (modelo SLN)	(4)	dB(A)	67	69	70	70	70	71	71	71	71	71	
<b>Dimensiones y pesos de la unidad básica</b>													
Longitud	mm	4.060	4.060	4.770	4.770	4.770	4.770	4.450	4.450	4.450	4.450	4.450	
Profundidad	mm	1.280	1.280	1.460	1.460	1.420	1.420	2.130	2.130	2.130	2.130	2.130	
Altura	mm	1.950	1.950	2.150	2.150	2.220	2.220	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	
Peso en funcionamiento	kg	3.365	3.354	3.975	4.080	4.772	4.810	6.192	6.297	6.402	6.492	6.581	

Figura 3.2. Datos técnicos de diferentes modelos de enfriadoras [13]

En la Figura 3.2 se pueden ver diferentes modelos de enfriadoras de esta empresa. Para seleccionar el modelo que se aadecua a el uso de este estudio se parte del estudio de la demanda de frio del centro comercial. Se sabe pues que la máxima potencia de refrigeración necesaria se requiere en junio y es de 4,549 MW.

Teniendo en cuenta que en los meses de invierno la potencia máxima demandada es muy inferior, en torno a los 900 kW, se propone la utilización de tres máquinas enfriadoras del modelo COBALT W 153.3 con una capacidad de enfriamiento nominal de 1,527 MW. Con las tres enfriadoras se obtiene una capacidad de enfriamiento nominal de 4,581 MW, suficiente para garantizar la demanda de frio máxima. Este modelo de enfriadora tiene un EER de 4,68, por lo que el consumo eléctrico de una enfriadora a máxima potencia es de 326 kW.

### 3.1 DEMANDA ELECTRICIDAD PARA PRODUCCIÓN DE FRÍO

A partir de esta demanda de frío obtenida en la sección 2.1 se obtiene la demanda de electricidad para la producción de frío que se obtiene dividiendo la demanda de frío para cada hora de cada mes entre el EER de la enfriadora, 4,68 (Figura 3.3 y Figura 3.4).

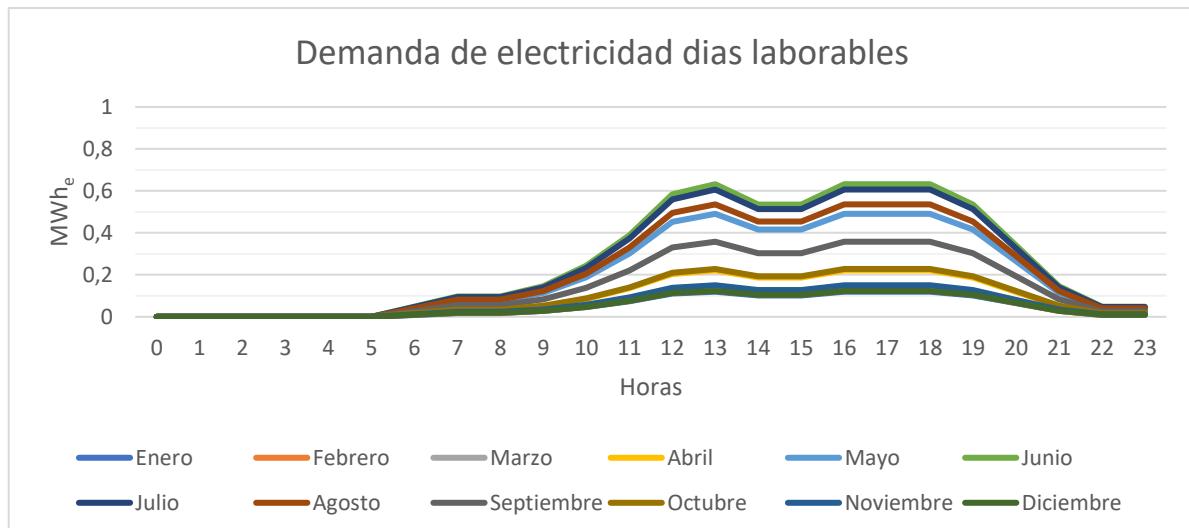


Figura 3.3. Demanda de electricidad días laborables

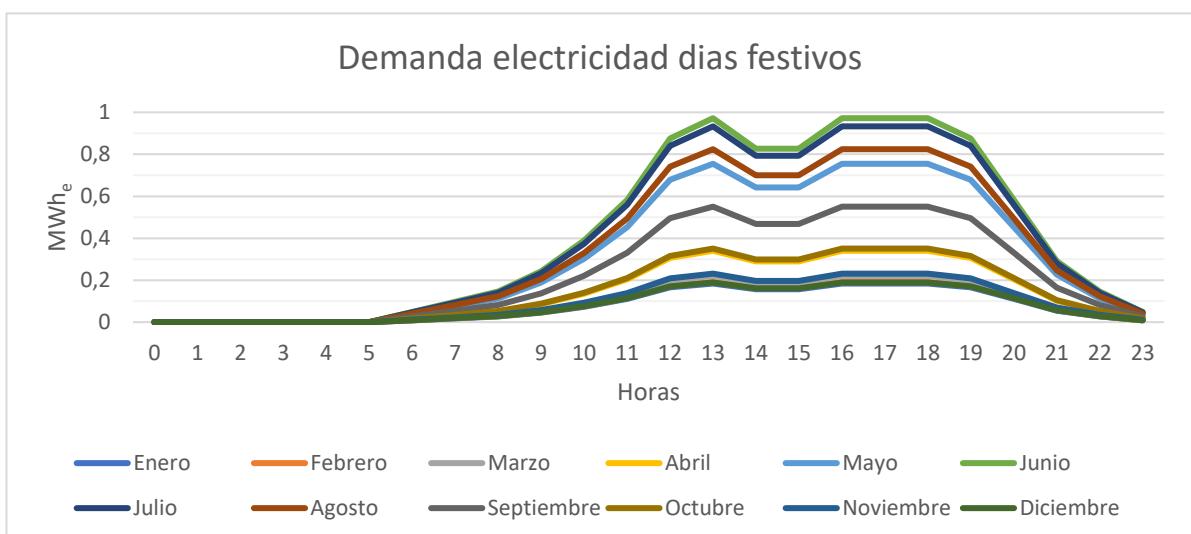


Figura 3.4. Demanda de electricidad días festivos

## 4 CICLO RANKINE ORGÁNICO

El Ciclo Rankine Orgánico (ORC) es un ciclo de potencia que emplea como fluido de trabajo un fluido orgánico. Con este ciclo se obtiene energía mecánica a partir de una fuente de calor, esta energía mecánica se transforma en energía eléctrica mediante un generador.

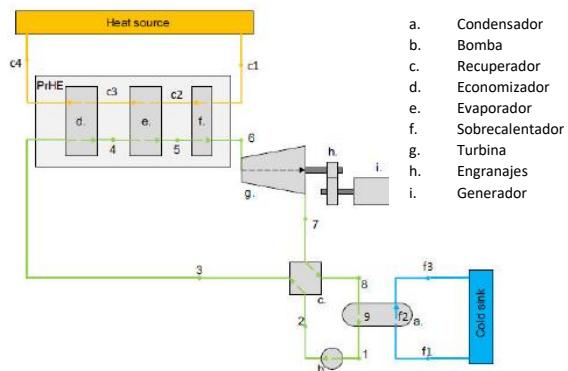


Figura 4.1. Equipos del ORC [14]

En este proyecto se consideran diferentes escenarios en los que se va a emplear dos ciclos ORC comerciales de empresas diferentes, Turboden [15] y Enertime [16]. Estos ciclos tienen diferentes rendimientos, puesto que operan en condiciones diferentes al aprovechar la energía térmica generada a diferentes temperaturas de operación de los captadores solares.

En primer lugar, se considera el sistema con el ORC comercial de la empresa Turboden [15], el ciclo que sigue es un ciclo subcrítico con un sólo nivel de presión y precalentamiento regenerativo. A la hora de seleccionar el ciclo se comprueba que en el generador de vapor no se produzca, en los diferentes escenarios analizados, cruce de temperaturas entre el aceite térmico del captador solar que cede energía térmica al fluido orgánico de trabajo del ORC.

Para dimensionar el ORC se tiene en cuenta la premisa de que se debe de cubrir la demanda de electricidad de refrigeración del centro comercial, por ello el ORC debe cubrir la demanda de frío anual del centro comercial. Para poder cubrir esta demanda el ORC debe ser capaz de abastecer la energía que consumen las maquinas enfriadoras a máxima potencia que es de  $3 \times 326 = 978$  kW.

En el catálogo de Turboden se escoge el ORC comercial capaz de suministrar 978 kW de potencia eléctrica neta, el denominado *Turboden 10 to 14 HR* (Figura 4.2) cumple con los requisitos ya que tiene un rango de operación de 900 kW – 1600 kW.

Este modelo de ORC tiene un rango de rendimiento en condiciones normales del 17% – 22%, para el análisis se supone un caso conservador se estima que el ORC opera con un rendimiento del 18%. Considerando este rendimiento y que el ORC sólo funcionará a plena carga se obtiene que para que el ORC produzca 978 kW<sub>e</sub> de potencia eléctrica se

necesita aportar 5433 kW<sub>t</sub> de potencia térmica, que serán aportados por el campo solar y la caldera de biomasa.

	TURBODEN 6/7 HR <i>DE</i>		TURBODEN 10 to 14 HR <i>DE</i>		TURBODEN 18 to 24 HR <i>DE</i>		TURBODEN 27 to 40 HR <i>DE</i>		TURBODEN 50 to 100 HR <i>DE</i>	
	Range of Operation	Reference Case TD 6 HR	Range of Operation	Reference Case TD 10 HR	Range of Operation	Reference Case TD 22 HR SPLIT	Range of Operation	Reference Case TD 40 HR SPLIT	Range of Operation	Reference Case TD 70 HR
<b>INPUT* - Thermal Oil</b>										
Thermal Oil inlet temperature	°C	240-300	270	240-310	290	240-310	285	250-315	315	240-310
Thermal Oil outlet temperature	°C	170-120	140	170-120	145	170-120	120	170-120	130	150-110
Thermal power input	MW	2.5-4.0	3.0	5.0-7.0	5.54	8.0-12.0	11.21	13.0-22.0	21.40	24.0-50.0
Thermal Oil inlet temperature	°F	464-572	518	464-590	554	464-590	545	482-599	599	464-590
Thermal Oil outlet temperature	°F	338-248	294	338-248	293	338-248	248	338-248	266	302-230
Thermal power input	MMBtu/hr	8.53-13.65	10.24	17.06-23.88	18.90	27.30-40.95	38.25	44.36-75.07	73.02	81.89-170.61
<b>OUTPUT** - Cooling Water</b>										
Typical cooling water temperature (in/out)	°C	25/35	25/35	25/38	25/40	22/40	20/45	22/54	25/40	20/27
Thermal power to condenser	MW	2.0-3.5	2.4	4.0-5.0	4.4	6.0-9.5	9.0	10.0-17.5	17.2	19.2-40.0
Typical cooling water temperature (in/out)	°F	77/95	77/95	79/100	77/104	72/104	68/113	72/129	77/104	68/81
Thermal power to condenser	MMBtu/hr	6.82-11.94	8.19	13.65-17.06	15.01	20.47-32.42	30.71	34.12-59.71	58.89	65.51-136.49
<b>PERFORMANCES</b>										
Gross electric power	kW	500-800	600	900-1600	1108	1700-2500	2120	2600-4500	4000	4800-10500
Gross electric efficiency***		17%-20%	20%	17%-22%	20%	17%-22%	19%	17%-21%	19%	17%-22%
Captive power consumption	kW	18-36	25	36-70	46	60-100	80	100-200	200	200-800
Net active electric power output	kW	480-760	575	850-1550	1062	1650-2400	2040	2500-4000	3800	4500-9800
Net electric efficiency***		16%-19%	19%	16%-21%	19%	16%-21%	18%	16%-20%	18%	16%-21%
Electric generator****		50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 660V 60Hz, 4160V	50Hz, 660V 60Hz, 4160V	50Hz, 6kV 60Hz, 4150V	50Hz, 6kV 60Hz, 4160V	60Hz, 4160V
Cooling systems		closed loop water cooling or wet tower		closed loop water cooling or wet tower		closed loop water cooling or wet tower		closed loop water cooling or wet tower		wet tower or air condenser
Typical delivery time (EXW)	Months	9-11		9-11		9-11		11-13		12-14

Figura 4.2. Características técnicas de diferentes ORC de Turboden [15]

Existen distintos fluidos orgánicos de trabajo que pueden ser empleados en ciclos ORC. De acuerdo con el análisis realizado por C.Ballerini [12] en el que analizan distintos fluidos y temperaturas, el fluido con mejores características es el R245fa cuando la temperatura de entrada al sobrecalentador de vapor del ciclo del aceite térmico, procedente del captador solar cilíndrico parabólico es de 214°C y la temperatura y la temperatura de retorno del aceite térmico al captador solar (es decir salida del economizador del ciclo) es de 121,5°C.

El ORC también puede funcionar a carga parcial disminuyendo el rendimiento del ciclo cuanto menor sea el factor de carga tal y como se muestra en la Figura 4.3.

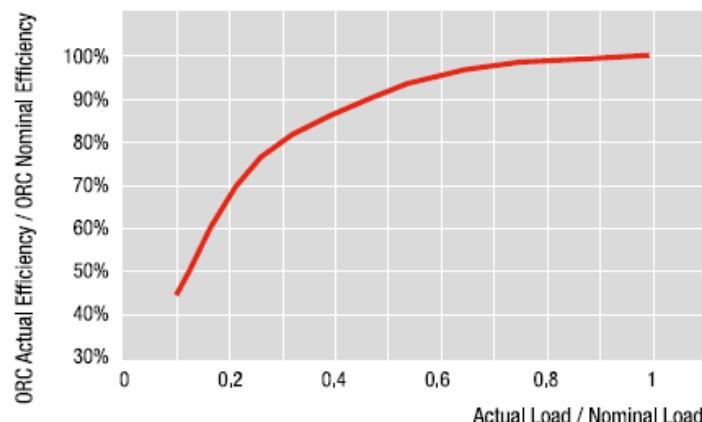


Figura 4.3. Eficiencia de los ciclos ORC de Turboden cuando trabajan a carga parcial [15]

Como se ha comentado anteriormente, también se empleará el ORC comercial de la empresa Enertime [16]. En concreto el denominado Cordial IGT que emplea como fuente de energía térmica aceite térmico. De acuerdo con los datos técnicos recogidos en la Figura 4.4, este ciclo puede operar en un rango de rendimiento energético en condiciones nominales del 21% - 22% con una temperatura de entrada del aceite térmico al ciclo de 280°C y de 220°C de salida.

Al igual que en el caso del ORC anteriormente descrito con datos de Turboden, se comprueba que es viable físicamente modelando el ciclo con el software EES [8]. Se comprueba que se puede conseguir un 21,5% de rendimiento energético (Anexo 2). Para conseguir este valor de rendimiento, considerando parámetros de operación razonables, es necesario considerar un ciclo supercrítico. Se comprueba, asimismo, que no se produce cruce de temperaturas en el generador de vapor entre el fluido orgánico de trabajo del ORC y el aceite térmico del captador solar que cede calor a aquél.

Pese a que el fabricante no aporta la curva de eficiencia a carga parcial para posteriores análisis se supondrá que será la misma que la de la empresa Turboden mostrada en la Figura 4.3.

POWER-ONLY BIOMASS PLANTS								
RANGE	ORCHID®	CORDIAL® IGT				CORDIAL®		
Thermal fluid	Pressurized water	Thermal oil				Thermal oil		
Temperatures (In/out)	°C	200 / 130*				280* / 220* + secondary 220* / 110* (option)		
Thermal power	kWth	600 to 18 500	470	950	1 400	2 300	4 200	8 200
<b>NOMINAL POWER</b>	<b>kWe</b>	<b>100 to 3 000</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>500</b>	<b>1 000</b>	<b>2 000</b>
Gross efficiency	%	14,5 to 17,0%	21,0 to 22,0%				23,0 to 24,0%	
Cooling water	°C	25	25				25	
<b>Structure</b>	<b>size dependent</b>		<b>1 SKID</b>			<b>1 SKID</b>	<b>2 SKIDS</b>	<b>on-site erection</b>
Length (A)	m	size dependent	Standard 40' container			12	12	14
Width (B)	m					3	6	8
Height (C)	m					5	5	6
EXW Delivery	months	10 to 11	10			10	11	11

Figura 4.4. Especificaciones ORC Enertime [16]

## 5 CALDERA DE BIOMASA

La caldera de biomasa complementa la energía aporta el campo solar, con objeto de alcanzar la potencia térmica nominal de 5,43 MW<sub>t</sub> requerida por el ciclo ORC. La caldera de biomasa aumenta la potencia renovable del sistema al ser también una fuente de energía renovable.

La caldera de biomasa se pone en marcha solamente cuando el sistema solar está en operación. El resto del tiempo está parada.

La caldera de biomasa que se ha considerado es de parrilla móvil, con una potencia nominal de 5,43 MW<sub>t</sub> para poder atender la demanda del ORC si fuera necesario, con un rendimiento energético sobre el PCI del 82% y que utiliza como combustible pellets [17].

## 6 DISEÑO DEL CAMPO SOLAR

---

Para el diseño del campo solar se utiliza el software System Advisor Model (SAM) [7]. Sam es un programa de software libre desarrollado por el Departamento Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) y el Laboratorio Nacional Sandia (EEUU).

Este programa está orientado para el cálculo de proyectos de energía renovable y es capaz de realizar una simulación horaria detallada para sistemas de concentración solar (CSP). En la simulación se obtienen la evolución de diferentes valores de rendimiento y energía obtenida en diferentes zonas del sistema en función de las horas y meses del año. En la Figura 1.1 se puede ver la configuración del campo solar con la única diferencia de que en el caso de este TFG se utilizan más de dos bucles.

Para poder realizar la simulación se necesita introducir en el programa una serie de parámetros, descritos a continuación:

Se necesita conocer el recurso solar (radiación solar horaria y datos climáticos) a lo largo del año. Se utiliza la base de datos de Meteonorm [18] para la ubicación en la que se encuentra el centro comercial, Zaragoza.

Para el diseño del campo de colectores se necesita establecer el valor de la irradiancia normal directa (DNI) de diseño, para la ubicación elegida se establece un valor de 950 W/m<sup>2</sup>. Aumentar este valor significa que se necesitaran menos colectores para llegar a la potencia establecida, y reducir el valor tiene el efecto contrario.

La potencia objetivo que tiene que aportar el campo solar viene definida por la potencia térmica requerida por el ORC. Por lo que la variable potencia térmica necesaria (heat sink power) se establece que es 5,43 MW<sub>t</sub>. Como ya se ha comentado en apartados anteriores en aquellos escenarios en los que el ORC funcione siempre a plena carga la caldera de biomasa se encargara de aportar la potencia necesaria para que el ORC disponga de 5,43 MW<sub>t</sub> de potencia térmica para su funcionamiento a plena carga.

### 6.1 CAPTADORES (SCA) Y RECEPTORES (HCE)

Para los colectores y receptores se elige en ambos casos los modelos fabricados por la empresa Siemens. En concreto los captadores *Siemens SunField 6* y los receptores *Siemens UVAC 2010*, Figura 6.1 y 6.2 respectivamente [19].

SAM cuenta con una librería con los parámetros de los colectores y receptores comerciales más usados en el mercado. Los modelos seleccionados están incluidos dentro de la librería de SAM [7].



Figura 6.1. Captadores Siemens SunField 6 [19]



Figura 6.2. Receptor Siemens UVAC 2010 [19]

La orientación de los colectores depende de la aplicación que se les va a dar. Como en este caso interesa cubrir la demanda de frío que será mayor en verano que en invierno lo mejor es orientar el eje del colector según la dirección norte-sur, porque con esta disposición se capta más energía en verano que en invierno. Si la aplicación requiriera utilizar más energía en invierno sería mejor la orientación del eje del colector este-oeste porque con esta posición se capta más energía en invierno que en verano.

Collector Orientation	Collector tilt	0 deg	Tilt: horizontal=0, vertical=90
	Collector azimuth	0 deg	Azimuth: equator=0, west=90, east=-90

Figura 6.3. Orientación de los colectores norte-sur en SAM [7]

En cada bucle se instalan cuatro colectores (Figura 6.4) y los bucles se conectan en paralelo al sistema de tuberías que lleva el fluido térmico, el número de bucles se indica en el apartado inferior.

El fluido seleccionado que pasa a través de los receptores es el Therminol 66. Este fluido es capaz de operar entre un rango de temperaturas de -85°C a 400°C y es muy utilizado como fluido que transporta energía en aplicaciones de calentamiento y enfriamiento [20].

Las temperaturas optima de entrada y salida del fluido térmico (HTF) al bucle de captadores solares son de 121,5°C y 214°C respectivamente [12]. Estas temperaturas se corresponden con las temperaturas de salida y de entrada del ORC respectivamente.

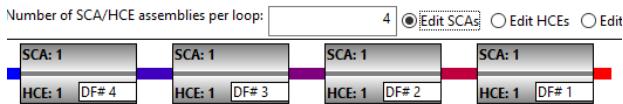


Figura 6.4. Cuatro colectores por bucle en SAM [7]

## 6.2 TANQUE DE ACUMULACIÓN Y VARIABLE SOLAR MULTIPLICATIVA

Si se diseñara la superficie reflectiva del campo solar para aportar los 5,43 MW<sub>t</sub> nos encontraríamos que en la mayor parte del año la potencia obtenida sería bastante inferior. Por ello es necesario un sobredimensionamiento del campo solar, este sobredimensionamiento se indica con la variable solar multiplicativa (solar multiple en SAM) que representa la ratio entre la potencia térmica recibida y la potencia térmica necesaria. Una vez fijada la potencia térmica necesaria SAM calcula la superficie reflectiva necesaria.

El programa también incorpora la posibilidad de integrar la acumulación de energía en tanques que sirve para que la estabilidad de producción de energía sea mayor reduciendo así la fluctuación de potencia térmica producida por el campo solar.

La variable que se introduce para determinar la capacidad de los tanques son las horas de acumulación de energía deseadas. SAM calcula a partir de esta variable la capacidad de dos tanques. Un tanque caliente y un tanque frío, para acumular el fluido térmico (HTF) que circula a través del receptor del captador.

Antes de fijar estas dos variables (horas de acumulación de tanque y variable solar multiplicativa) se realiza un análisis entre ambas variables (Figura 6.5) ya que tienen una gran influencia en el coste del sistema y en los resultados de producción. Se trata pues de encontrar la relación óptima entre costes y producción de energía.

En el análisis se introducen todos los parámetros comentados en este apartado y se varía el tamaño del tanque para que permita la producción de la máxima potencia de energía térmica de 2 horas a 8 horas y la variable solar multiplicativa desde 1 hasta 4,5.

Con el aumento del tamaño del tanque es posible almacenar más energía cuando la producción solar excede la capacidad nominal. Esta energía térmica se usa cuando el recurso solar no es suficiente para satisfacer la capacidad nominal, y se usará hasta que se descargue el tanque. La desventaja que tiene el aumento del tamaño del tanque es que el arranque del sistema es más lento puesto que tiene que almacenar energía en el tanque hasta que llegue a su máximo. Además, el coste económico de los tanques es elevado.

El aumento de la variable solar multiplicativa aumenta significativamente los costes puesto que aumentar esta variable implica aumentar el área de captadores solares. El aumento de esta variable está relacionado con el tamaño del tanque. Como esta variable indica el sobredimensionamiento de la superficie de captación, en las horas para los que

el recurso solar es capaz de suministrar la potencia térmica necesaria al ORC, el exceso de energía se almacena en los tanques. Sin embargo, si el valor de esta variable fuera uno no habría sobredimensionamiento por lo que en ningún momento el sistema sería capaz de obtener más potencia térmica de la necesaria y como resultado no se almacenaría energía en los tanques.

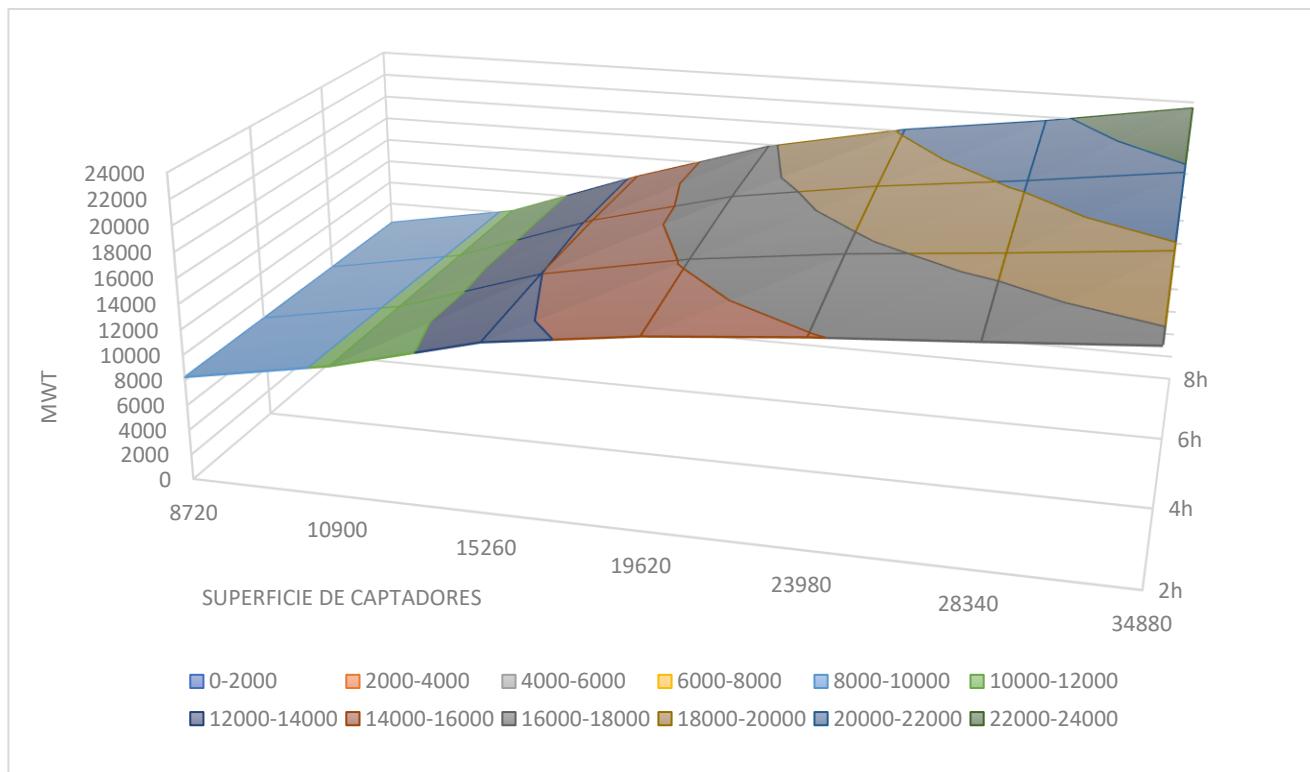


Figura 6.5. Energía anual neta en función de tamaño tanque y variable solar multiplicativa

Variable Solar multiplicativa	1.13	1.41	1.98	2.54	3.1	3.67	4.52	
Numero de bucles	4	5	7	9	11	13	16	
Área Reflectiva [m <sup>2</sup> ]	8720	10900	15260	19620	23980	28340	34880	
Energía anual bruta [MWh <sub>t</sub> ]	8257.4	10295.8	13282.6	14850.5	15912.6	16718.3	17588.9	
Energía anual neta [MWh <sub>e</sub> ]	8329.9	10340.2	13309.3	14865.6	15922.1	16725.5	17594.6	2h
Energía anual bruta [MWh <sub>t</sub> ]	8227.6	10272	13978.7	16170.2	17577.7	18639.1	19795.5	4h
Energía anual neta [MWh <sub>e</sub> ]	8331.9	10331.6	14013.5	16189.0	17588.8	18646.5	19801	
Energía anual bruta [MWh <sub>t</sub> ]	8205.1	10241.9	14262.1	17190.3	18939.3	20272.5	21797.8	6h
Energía anual neta [MWh <sub>e</sub> ]	8334.2	10312.8	14302.8	17212.3	18951.6	20279	21802.8	
Energía anual bruta [MWh <sub>t</sub> ]	8186.4	10216.8	14311.2	17847.7	20130	21677	23516.9	8h
Energía anual neta [MWh <sub>e</sub> ]	8336.8	10297.6	14357.7	17872.7	20143.3	21684.4	23521.5	

Tabla 6.1. Variación de variable solar y capacidad del tanque

Se puede ver tras este análisis que el aumento del tanque no es aprovechable si a su vez no se aumenta la variable solar multiplicativa (aumento de superficie reflectiva). Además, para valores de la variable solar multiplicativa bajos, la energía anual neta es mayor para tanques más pequeño, esto es debido a que se producen pérdidas.

Se ve que el aumento de energía producida a lo largo del año sufre un aumento lineal y considerable hasta que la variable solar multiplicativa es 2,5. A partir de este valor se observa que el aumento de la variable no es proporcional al aumento de energía producida en el año. Lo mismo ocurre para este valor de variable solar multiplicativa y el tamaño de los tanques, al aumentar más de 6 horas de almacenamiento el aumento de tamaño de tanque no es proporcional al aumento de energía producida en un año. Lo que sugiere que el **tamaño óptimo de tanque es de 6 horas y la variable solar de 2,5**, que son los parámetros que se introducen en SAM.

El almacenamiento solar multiplicativa en estas condiciones es de 32,6 MWh<sub>t</sub>-hr (696m<sup>3</sup>) y la superficie de captadores es de 19620 m<sup>2</sup>.

En función de la variable solar multiplicativa y del número de colectores por bucle, el programa calcula el número de bucles necesarios para obtener la potencia térmica de 5,43 MW<sub>t</sub>, son necesarios 9 bucles.

Ahora ya se tienen todos los parámetros necesarios introducidos en SAM (Figura 6.6), por lo que se procede a su simulación y análisis.

Design Point Parameters	
<b>-Solar Field</b>	
Design point DNI	950 W/m <sup>2</sup>
Target solar multiple	2.54
Target receiver thermal power	13.79 MWt
Loop inlet HTF temperature	121.5 °C
Loop outlet HTF temperature	214 °C
<b>-Heat Sink</b>	
Heat sink power	5.43 MWt
Pumping power for HTF through heat sink	0.55 kW/kg/s
<input type="button" value="Choose Number of Loops"/>	
<b>-Thermal Storage</b>	
Hours of storage at design point	6 hours
<b>-System Availability and Curtailment</b>	
Curtailment and availability losses reduce the system output to represent system outages or other events.	<input type="button" value="Edit losses..."/> Constant loss: 4.0 % Hourly losses: None Custom periods: None
<b>System Summary</b>	
Actual number of loops	9
Total aperture reflective area	19,620.0 m <sup>2</sup>
Actual solar multiple	2.54
Actual field thermal output	13.79 MWt

Figura 6.6. Parámetros de diseño del campo solar en SAM

### 6.3 SIMULACIÓN CASO BASE

Los resultados de la simulación muestran el comportamiento horario del sistema solar a lo largo de todo el año (Figura 6.7). Las gráficas son la referencia de un día tipo del mes, este día tipo se puede considerar representativo de todos los días de ese mes.

Para el día tipo se puede ver como varían los parámetros a lo largo de las horas del día. Se puede ver cómo la potencia térmica necesaria está limitada a 5,43 MW<sub>t</sub> (curva azul) y que cuando el recurso solar deja de estar disponible (curva roja) la potencia se mantiene

y va disminuyendo suavemente gracias a la energía almacenada en los tanques. También se ve que sólo se alcanza el máximo de potencia térmica en los meses de verano.

La curva en verde oscuro indica la carga de energía térmica de los tanques y la curva en verde claro la descarga. También se puede ver cómo en los meses de invierno al ser el recurso solar escaso apenas almacenan energía los tanques.

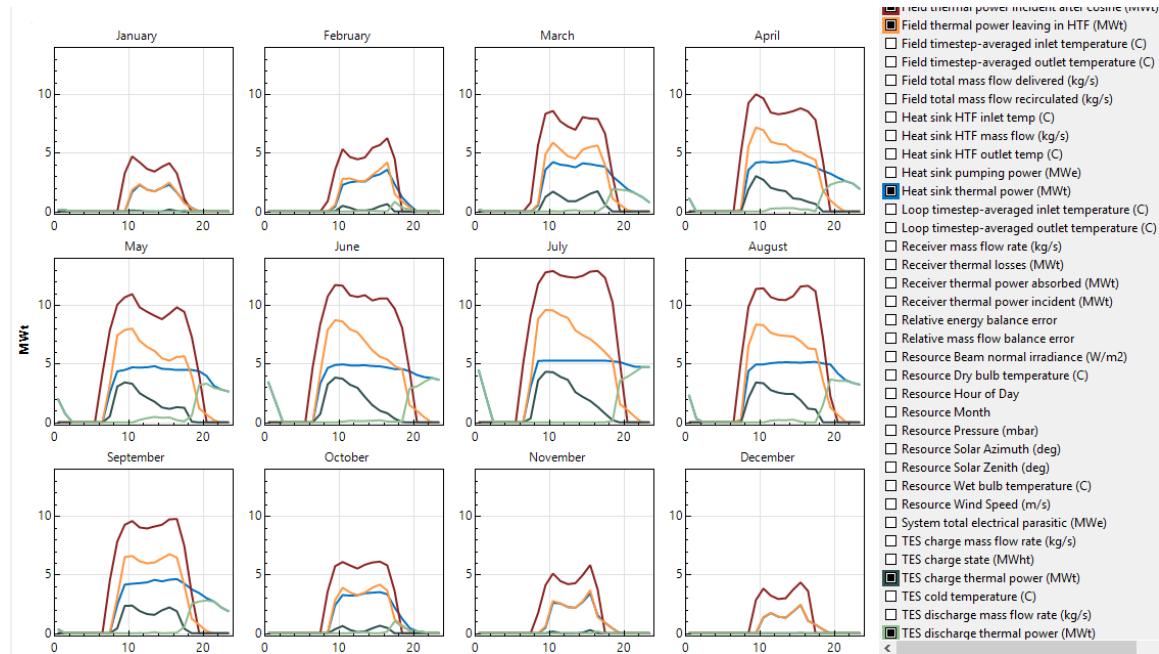


Figura 6.7. Resultados de valores mensuales por horas de SAM

Los valores que nos interesa procesar para este estudio son los de la potencia térmica (curva azul). Se realiza un filtrado a estos valores antes de su análisis que consiste en lo siguiente.

Se establece un valor mínimo de 0,5 MW en la potencia térmica del campo solar para que el sistema campo solar – biomasa aporte la energía para el funcionamiento del ORC. En las horas en las que no se supere este valor mínimo se comprará la energía a la red eléctrica. Esto se establece así porque si el campo solar aporta poca cantidad de energía y la caldera mucha se dispara el coste de operación.

La Figura 6.8 y la Tabla 6.2 representan la producción horaria de energía térmica del campo solar para cada día tipo del mes considerando solamente una potencia térmica producida superior a 0,5 MW, que es la potencia umbral considerada para que el sistema comience a operar. La diferencia entre 5,43 MWh y el valor que aparece en la tabla será lo que tenga que aportar la caldera, que sólo entrará en funcionamiento cuando el campo solar esté en operación.

En la tabla se puede ver por ejemplo que a ciertas horas en las que el centro comercial está cerrado el sistema produce energía, como en estas horas no hay climatización la energía producida sirve para cubrir íntegramente otros consumos del centro comercial y la sobrante se vende.

HORA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	0	0	0	1.17	2.06	3.50	4.52	2.36	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0.74	1.76	2.21	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	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	2.54	3.31	3.04	0	0	0	0	0
8	0	0	0.52	3.55	4.35	4.64	5.24	4.39	2.43	0	0	0
9	0	0	3.58	4.17	4.48	4.90	5.28	4.94	4.16	2.41	0	0
10	1.67	2.28	4.22	4.25	4.70	4.95	5.27	4.95	4.23	3.26	2.60	1.33
11	2.27	2.50	4.00	4.18	4.68	4.87	5.27	5.05	4.27	3.21	2.54	1.73
12	1.87	2.58	3.92	4.21	4.70	4.85	5.27	5.11	4.34	3.24	2.25	1.41
13	1.73	2.55	3.77	4.27	4.80	4.88	5.28	5.13	4.55	3.42	2.18	1.33
14	2.02	3.00	4.12	4.36	4.57	4.81	5.26	5.12	4.43	3.47	2.67	1.85
15	2.30	3.18	4.04	4.20	4.54	4.79	5.27	5.10	4.57	3.51	3.39	2.41
16	1.62	3.57	3.93	4.05	4.47	4.68	5.27	5.14	4.63	3.33	1.53	1.06
17	0.82	2.33	3.83	3.78	4.49	4.55	5.27	5.16	4.24	2.19	0.89	0.73
18	0	1.22	3.00	3.47	4.47	4.56	5.21	5.03	3.74	1.25	0	0
19	0	0.54	2.47	3.24	4.36	4.37	5.14	4.95	3.43	0	0	0
20	0	0	1.91	2.90	3.96	4.04	4.93	4.18	2.99	0	0	0
21	0	0	1.58	2.60	3.11	3.86	4.75	3.63	2.70	0	0	0
22	0	0	1.23	2.40	2.80	3.80	4.73	3.38	2.19	0	0	0
23	0	0	0.75	1.90	2.63	3.62	4.74	3.21	1.86	0	0	0

Tabla 6.2. Valores horarios de potencia térmica en el campo solar para cada mes (MW<sub>t</sub>)

En la Tabla 6.3 se muestra la potencia de producción necesaria en la caldera. Esta potencia se obtiene restando 5,43 MW<sub>t</sub> menos los valores de la Tabla 6.2.

HORA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	0	0	0	4.26	3.37	1.93	0.91	3.07	0	0	0	0
1	0	0	0	0	4.69	3.67	3.22	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	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	2.89	2.12	2.39	0	0	0	0	0	0
8	0	0	4.91	1.88	1.08	0.79	0.19	1.04	3.00	0	0	0
9	0	0	1.85	1.26	0.95	0.53	0.15	0.49	1.27	3.02	0	0
10	3.76	3.15	1.21	1.18	0.73	0.48	0.16	0.48	1.20	2.17	2.83	4.10
11	3.16	2.93	1.43	1.25	0.75	0.56	0.16	0.38	1.16	2.22	2.89	3.70
12	3.56	2.85	1.51	1.22	0.73	0.58	0.16	0.32	1.09	2.19	3.18	4.02
13	3.70	2.88	1.66	1.16	0.63	0.55	0.15	0.30	0.88	2.01	3.25	4.10
14	3.41	2.43	1.31	1.07	0.86	0.62	0.17	0.31	1.00	1.96	2.76	3.58
15	3.13	2.25	1.39	1.23	0.89	0.64	0.16	0.33	0.86	1.92	2.04	3.02
16	3.81	1.86	1.50	1.38	0.96	0.75	0.16	0.29	0.80	2.10	3.90	4.37
17	4.61	3.10	1.60	1.65	0.94	0.88	0.16	0.27	1.19	3.24	4.54	4.70
18	0	4.21	2.43	1.96	0.96	0.87	0.22	0.40	1.69	4.18	0	0
19	0	4.89	2.96	2.19	1.07	1.06	0.29	0.48	2.00	0	0	0
20	0	0	3.52	2.53	1.47	1.39	0.50	1.25	2.44	0	0	0
21	0	0	3.85	2.83	2.32	1.57	0.68	1.80	2.73	0	0	0
22	0	0	4.20	3.03	2.63	1.63	0.70	2.05	3.24	0	0	0
23	0	0	4.68	3.53	2.80	1.81	0.69	2.22	3.57	0	0	0

Tabla 6.3. Valores horarios de potencia en la caldera de biomasa para cada mes (MW<sub>t</sub>)

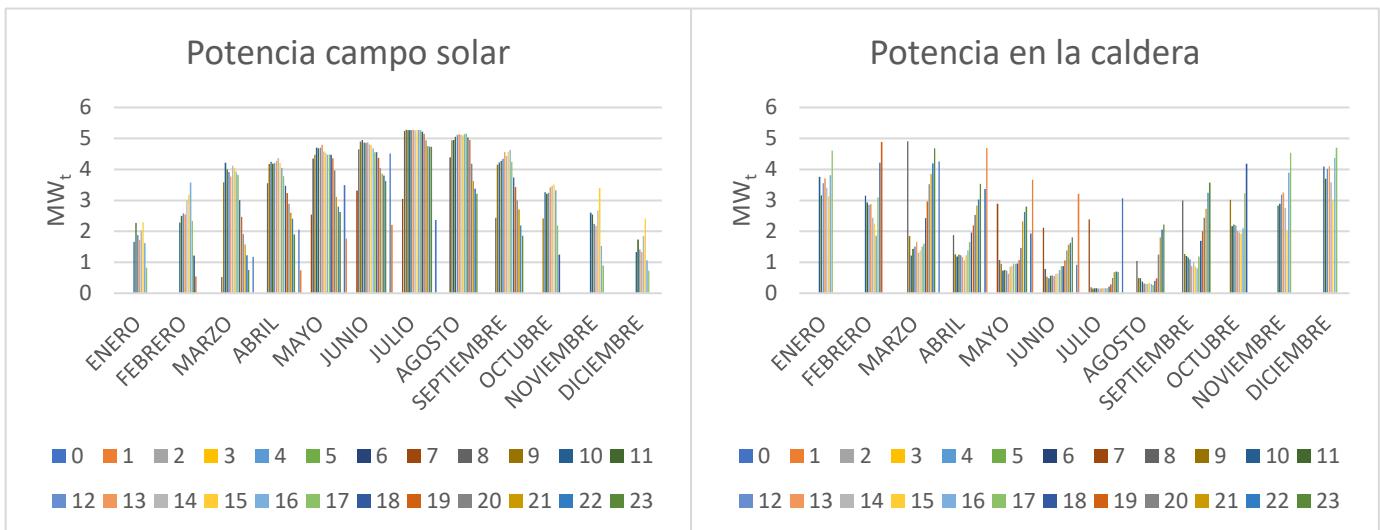


Figura 6.8. Valores horarios de potencia en la caldera y campo solar para cada mes (MW<sub>t</sub>)

Por lo que en cada hora que opera el sistema solar, el ORC, que en el caso base opera en todo momento a plena carga, producirá  $5,43 \text{ MW}_t \times 0,18 = 0,978 \text{ MW}_e$ . En la Tabla 6.4 se ve la producción horaria de electricidad teniendo en cuenta que al ser la tabla pequeña los números están redondeados a 0,98 MW<sub>e</sub>.

HORA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	0	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0.98	0.98	0.98	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	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0.98	0.98	0.98	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0
9	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0
10	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
11	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
12	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
13	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
14	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
15	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
16	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
17	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
18	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0
19	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0
20	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0
21	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0
22	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0
23	0	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0

Tabla 6.4. Valores horarios de producción de electricidad del ORC para cada mes (MW<sub>e</sub>)

### 6.3.1 Comparación de producción de energía en el campo solar y en la caldera de biomasa

En este apartado se compara la relación que tienen el campo solar en la caldera de biomasa en la producción de la energía térmica.

La grafica de la Figura 6.9 representa la producción de energía térmica del día tipo de cada mes. Se ve que en los meses de verano se produce más energía que en los meses de invierno, esto es porque el sistema de captadores solares produce energía durante más horas por lo que el ORC está operando también durante más horas. Además, como es de esperar el campo solar produce la mayor parte de la energía térmica.

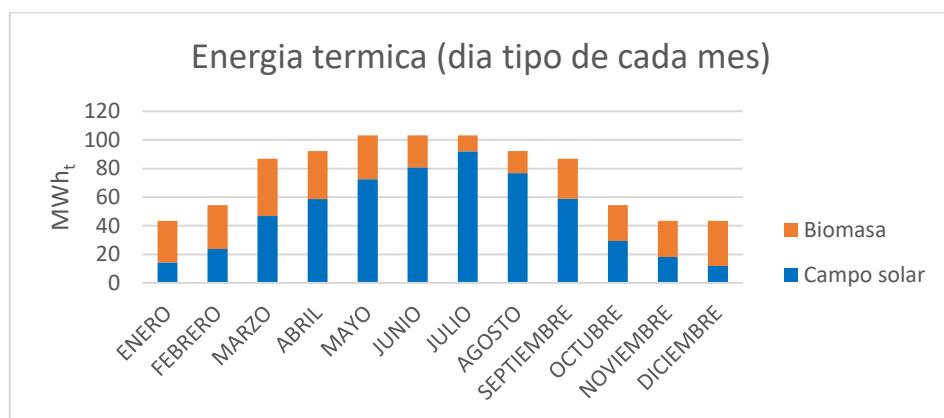


Figura 6.9. Producción de energía térmica en el campo solar y en la caldera de biomasa en el día tipo de cada mes

Las Figuras 6.10 representan una comparación de potencia térmica horaria producida por la caldera de biomasa y por el campo solar en los días tipo de enero y julio. Se ve que en julio el sistema campo solar-biomasa funciona durante más horas del día que en enero al haber más disponibilidad del recurso solar, lo que hace que durante más horas la potencia del campo solar sea superior a 0,5 MW<sub>t</sub> por lo que el ORC entra en funcionamiento. También se ve que en julio la caldera de biomasa apenas es necesaria porque el campo solar aporta la mayoría de la potencia, y en enero la biomasa aporta más potencia que el campo solar.

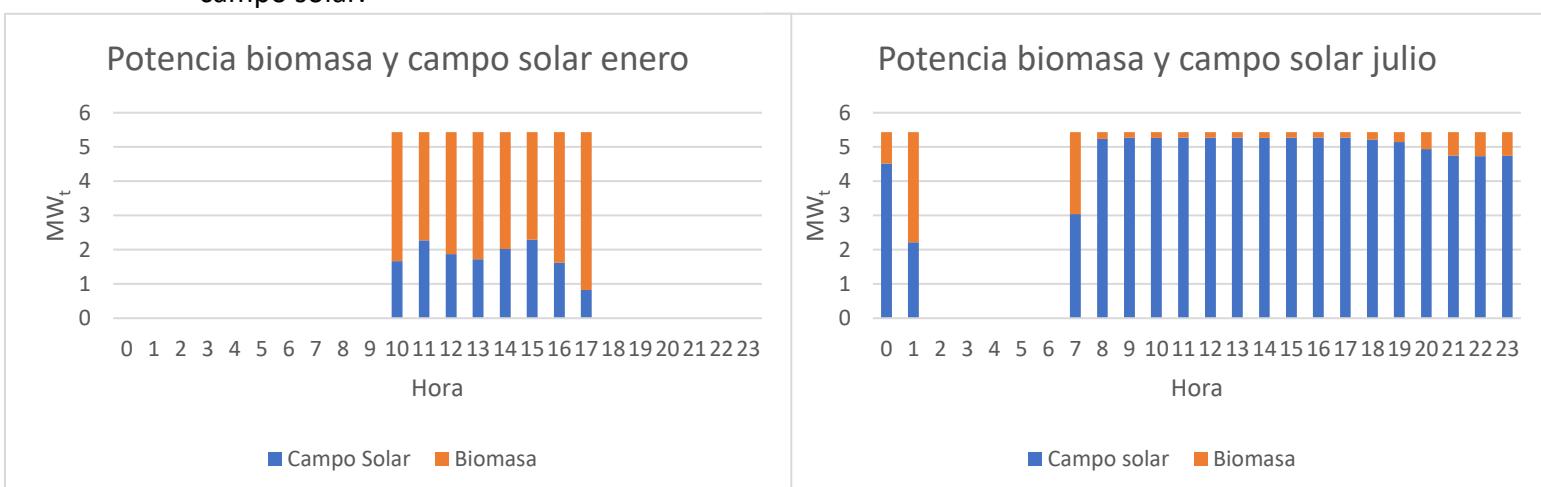


Figura 6.10. Comparación de potencia térmica horaria (caldera de biomasa y campo solar) en los días tipo de enero y julio

## 7 ANÁLISIS DEL SISTEMA

En este apartado se realiza el análisis del sistema en el caso base, es decir con los datos introducidos hasta ahora en los capítulos anteriores (3-6) y se proponen distintas variaciones en el diseño con el objetivo de analizar en qué condiciones el sistema propuesto es más rentable.

Para comparar entre los distintos casos se utiliza para cada caso una tabla con el análisis económico y medioambiental y gráficas de la energía producida/comprada/vendida de los meses más desfavorables, que son enero y julio.

### 7.1 CASO BASE

Los datos de este caso son los mostrados hasta ahora en la explicación de cómo se ha realizado el estudio.

Como el sistema se ha dimensionado para que cubra la potencia de electricidad de refrigeración, que será como máximo 978 kW (la potencia de las tres máquinas enfriadoras), y además el ORC funciona siempre a plena carga, se puede ver en las Figuras 7.1 y 7.2 que siempre que el ORC está en funcionamiento se produce en cada hora 978 kWh. También se observa que cuando el ORC no funciona porque el campo solar no es capaz de aportar el mínimo de energía necesaria al ORC, se compra la electricidad a la red.

Como el sistema se ha dimensionado para cubrir la demanda de refrigeración (potencia) y en las gráficas se muestra la demanda total de energía eléctrica, que incluye la necesaria para accionar las máquinas de refrigeración y la empleada en otros consumos, se muestra que en las horas centrales de julio la producción no es suficiente y es necesario comprar energía.

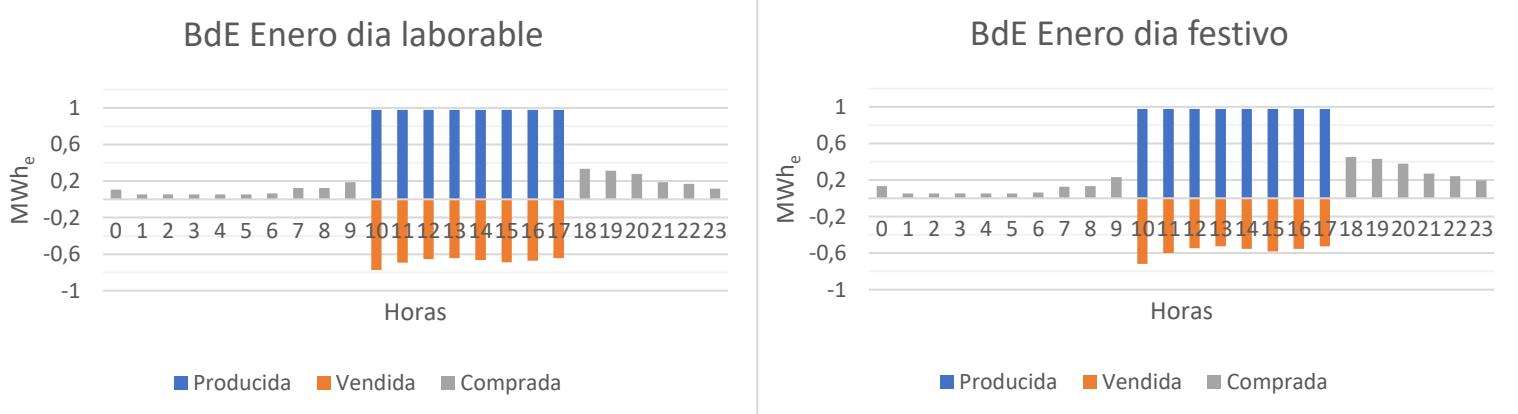
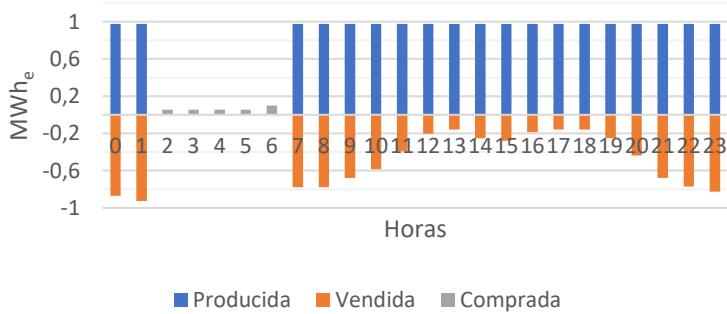


Figura 7.1. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de enero en función de las horas

BdE Julio dia laborable



BdE Julio dia festivo

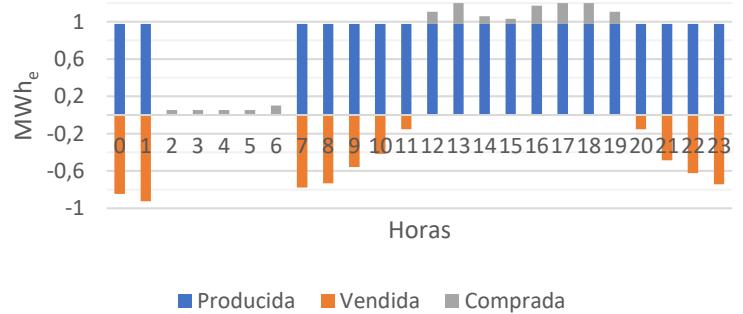
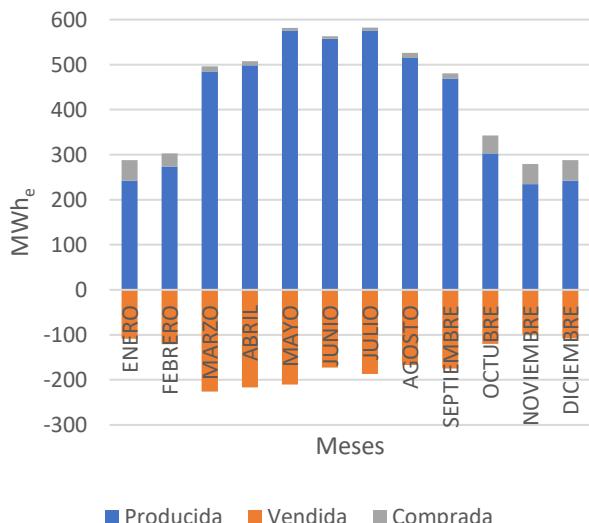


Figura 7.2. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de julio en función de las horas

BdE mensual de días laborables



BdE mensual de días festivos

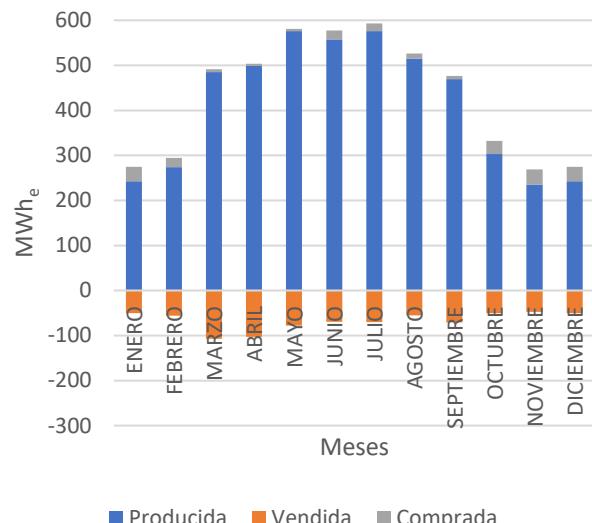


Figura 7.3. Balance de energía mensual para los días tipo laborable y festivo

Se puede ver que el sistema, en este caso base, está sobredimensionado, puesto que la electricidad anual vendida (2720 MWh<sub>e</sub>/año) es prácticamente la misma cantidad que la demanda anual de energía eléctrica del centro comercial (2738 MWh<sub>e</sub>/año), siendo la electricidad comprada una cantidad sensiblemente inferior (487 MWh<sub>e</sub>/año). Este sobredimensionamiento se pone también de manifiesto la mayoría de los meses, porque excepto en los días festivos de los meses de verano se vende electricidad por sobrepasar la producción de energía a la demanda del centro comercial en ese momento. Y las pocas veces que la demanda de electricidad sobrepasa a la producción de energía del sistema es sólo en las horas centrales del día en verano, cuando es mayor la demanda de frío del centro comercial. En estos casos se compra la electricidad a la red.

Para todos meses representados en la Figura 7.2 se ve claramente cómo la demanda de electricidad es mayor en los días festivos que en los laborables porque cuando el ORC está en funcionamiento se vende más energía a la red en las horas del día laborable que

en las horas del día festivo y cuando el ORC no funciona se compra más electricidad en las horas del día festivo.

La gran diferencia de producción entre los meses de enero y julio se encuentra en que pese a que en julio la demanda de energía es mucho mayor por tener una mayor necesidad de refrigeración, también se cuenta con mayor recurso solar lo que permite que el ORC pueda funcionar durante mas horas del día, incluso por la noche con la energía almacenada en los tanques. Esto hace que se venda una gran cantidad de electricidad a la red a lo largo del día, siendo sólo necesario comprar electricidad en algunas horas nocturnas. Las horas en las que más electricidad se vende son las horas no centrales del día (bien porque el centro comercial está cerrado o porque tiene poca ocupación), en las que el centro comercial tiene poca demanda por lo que la mayor parte de electricidad producida se vende.

En la Figura 7.3 se observa que en todos los meses la energía comprada mensual es muy inferior a la producida y que en los días festivos se compra más energía y se vende menos que en los días laborables. Además, se puede ver cómo en los meses de verano la producción de energía es mucho mayor que en los meses de invierno.

A continuación, se muestra el análisis económico y medioambiental teniendo en cuenta una amortización de equipos de 20 años:

Análisis económico				
Componentes	Capacidad	Coste por unidad	Coste de inversión [€]	Coste inversión anual [€/año]
Campo Solar	19.620 [m <sup>2</sup> ]	235 [€/m <sup>2</sup> ] [21]	4.610.700	230.535
Almacenamiento de energía	32.600 [kWh]	65 [€/kWh <sub>t</sub> ] [21]	2.119.000	105.950
Caldera de biomasa	5430 [kW <sub>t</sub> ]	315 [€/kW <sub>t</sub> ] [17]	1.710.450	85.522,5
ORC	978 [kW <sub>e</sub> ]	2000 [€/kW <sub>e</sub> ] [22] [23]	1.956.000	97.800
Enfriadoras	4581 [kW <sub>t</sub> ]	180 [€/kW <sub>t</sub> ] [24]	824.580	41.229
<i>Inversión total anual</i>				561.036 [€/año]
Energía	Energía anual [MWh/año]	Coste por unidad [€/kWh]	Coste por año [€/año]	
Electricidad comprada	487	0,1267 [25]	61.742	
Electricidad vendida	2720	0,11403	-310.219	
Pellets biomasa	11.980	0,0444 [26]	531.912	
<i>Coste energía anual</i>				283.434 [€/año]
<b>Coste anual</b>				<b>844.471 [€/año]</b>
Análisis medioambiental				
Energía	Emisiones CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Emisiones CO <sub>2</sub> anuales [kgCO <sub>2</sub> /año]	Energía primaria (non-renewable) [kWh/kWh]	Energía primaria anual (non-renewable) [kWh/año]
Electricidad comprada	0,331 [26]	161.299	1,954 [26]	952.202
Electricidad vendida	- 0,331	-900.487	- 1,954	- 5.315.871
Pellets biomasa	0,018 [26]	215.640	0,085 [26]	1.018.300

<i>Emisiones CO<sub>2</sub> anuales</i>	<b>-523.548 [kgCO<sub>2</sub>/año]</b>
<i>Total anual energía primaria no renovable</i>	<b>-3.345.368 [kWh/año]</b>

Tabla 7.1. Análisis económico y medioambiental del caso base

Como se ve en el análisis económico de la tabla 7.1 este sistema tiene un coste anual muy elevado, 844.471 €/año, siendo el coste de inversión el 66% del coste anual. No obstante, el coste de la electricidad producida con energía renovable (sistema solar hibrido con biomasa) es de 0,2115 €/kWh, que aun siendo superior al coste de la compra de electricidad de la red de 0,1267€/kWh no es un valor elevado.

Además, los beneficios ambientales de reducción de emisiones de dióxido de carbono son muy significativos (-523.548 kgCO<sub>2</sub> al año). Asimismo, la reducción de consumo de energía primaria no renovable es también muy elevada. Esto es muy ventajoso ya que una de las premisas de instalar un sistema de energía renovable es la de reducir la huella de carbono, pero a pesar de las ventajas ambientales obtenidas el coste económico es demasiado elevado, por lo que se plantean diferentes alternativas a continuación.

## 7.2 ORC MENOR POTENCIA

Como se observa en la tabla 7.1 el coste de los equipos supone gran parte del gasto anual del sistema (aproximadamente 66%) por lo que se va a tratar de reducir estos costes.

Para ello, se mantiene la estructura y consideraciones del sistema anterior pero con los siguientes cambios:

Puesto que el sistema analizado en el caso base produce aproximadamente en base anual el doble de energía eléctrica que consume el centro consumidor, se dimensiona el sistema para cubrir aproximadamente la demanda anual de energía eléctrica del centro comercial.

Por lo tanto, se selecciona un ORC de 500 kW<sub>e</sub> de la empresa Turboden [15] que trabaja siempre a carga máxima y con un rendimiento de 18%, al igual que en el caso anterior, por lo que el sistema campo solar-biomasa deberá aportar 2,78 MW<sub>t</sub> para que el ORC puede funcionar

El análisis económico del caso base, analizado en el apartado anterior, pone de manifiesto que el campo solar presenta el mayor coste de inversión, por lo que se lleva a cabo una optimización de la superficie del campo solar con el objetivo de minimizar el coste económico anual. En este proceso de optimización el criterio de dimensionamiento del resto de equipos no se ha modificado. Es decir, en todos los casos: i) la caldera de biomasa se ha mantenido con una potencia de 2,8 MW<sub>t</sub>; y ii) las horas de almacenamiento de energía en los tanques se mantiene en el valor óptimo de 6 horas, pero al modificar la superficie de captación solar el tamaño de los tanques se modifica en consonancia. Los costes anuales del sistema en función de la superficie de captadores y manteniendo los criterios anteriormente explicados son:

- $8720 \text{ m}^2 \rightarrow \text{Coste total} = 605.945 \text{ €/año}$
- **13080 m<sup>2</sup> -> Coste total = 592.569 €/año ← Sistema optimizado**
- $15620 \text{ m}^2 \rightarrow \text{Coste total} = 598.446 \text{ €/año}$

En la tabla 7.2 se muestran las capacidades y tamaños de los equipos obtenidos en el sistema óptimo.

Se observa que todos los equipos reducen su tamaño/potencia excepto las máquinas enfriadoras. El sistema propuesto en este caso cubre la demanda de energía anual del centro comercial (2378 MWh<sub>e</sub>/año) y la compra anual de electricidad de la red (867 MWh<sub>e</sub>/año) es ligeramente superior a la venta anual de energía eléctrica del sistema (687 MWh<sub>e</sub>/año).

Con estos datos los resultados mensuales y diarios se muestran en las siguientes gráficas:

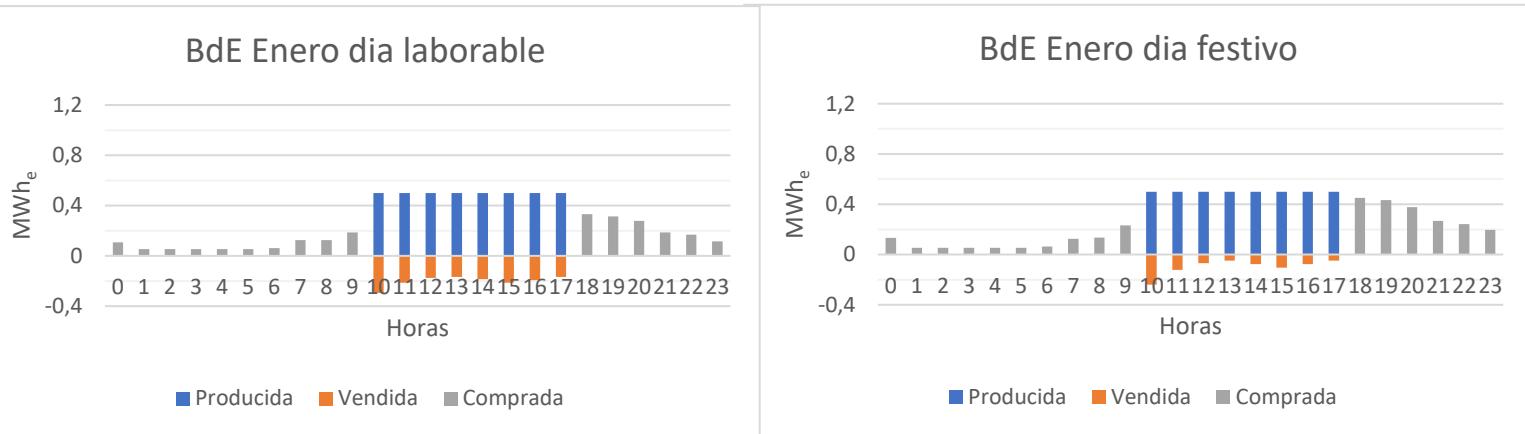


Figura 7.4. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de enero en función de las horas

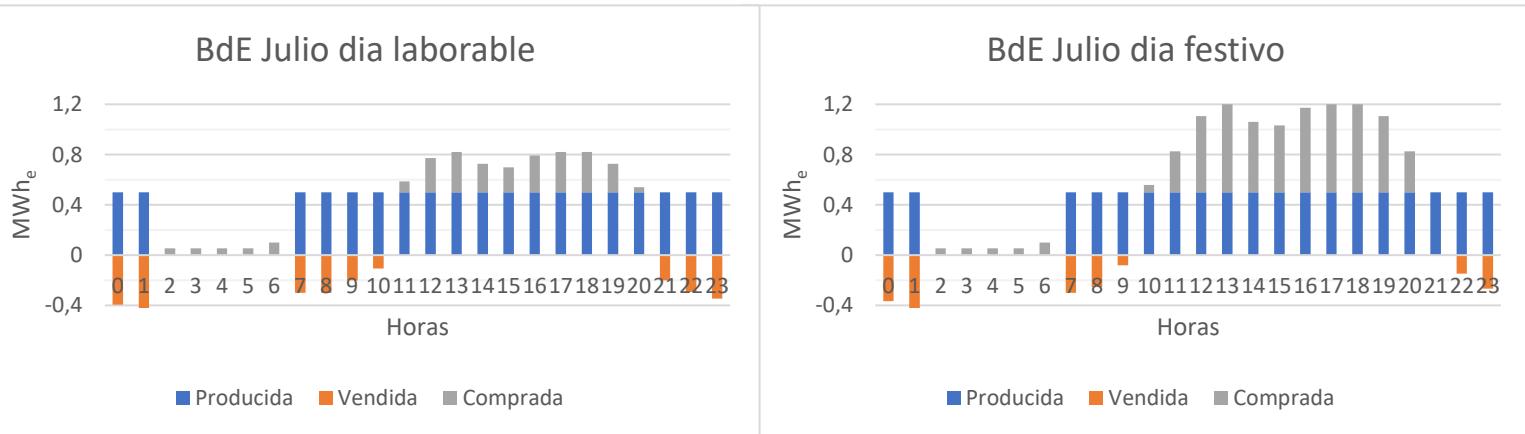


Figura 7.5. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de julio en función de las horas

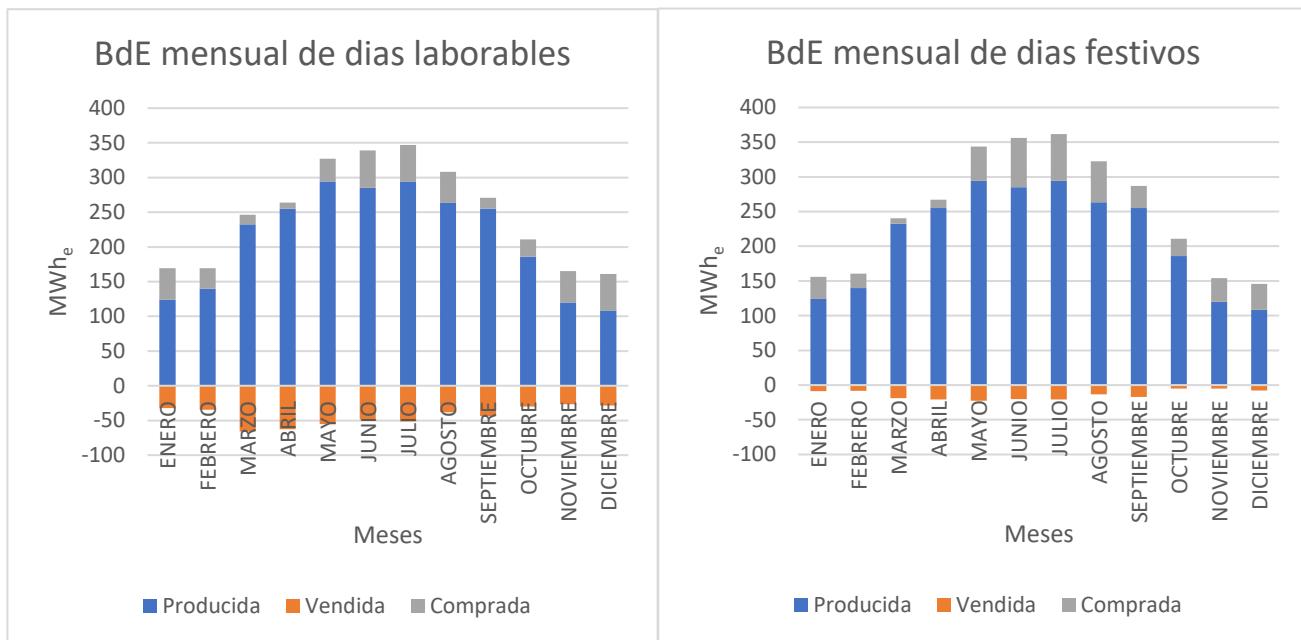


Figura 7.6. Balance de energía mensual para los días tipo laborable y festivo

La diferencia de las Figuras 7.4 y 7.5 respecto a las del caso anterior (Figuras 7.1 y 7.2) es notable. Como el tamaño del ORC se ha reducido prácticamente a la mitad, produce 0,5 MWh<sub>e</sub> cuando está en funcionamiento, se reduce pues el sobredimensionamiento del sistema. Esto es bueno desde un punto de vista económico porque el coste de todos los equipos es inferior, pero presenta como inconveniente que es necesario comprar más energía eléctrica a la red.

En el balance de energía para un día festivo de julio, el caso más desfavorable de todos, se ve que durante la mayor parte del día no se vende energía y que durante casi todas las horas que el centro comercial está abierto se necesita comprar energía.

En la Figura 7.6 en la que se muestra el balance de energía mensual se observa algo que contrasta con el caso anterior, se produce menos energía por mes en comparación al caso base y por tanto se vende menos energía que en el caso base y se compra más. La disminución en la producción de energía se puede ver que afecta más a la disminución en la venta que al aumento de la energía comprada, algo bueno porque quiere decir que no se produce en exceso, puesto que la compra y venta de electricidad en el balance anual son prácticamente la misma cantidad.

Al igual que en el caso base, a continuación, se muestra el análisis económico y medioambiental teniendo en cuenta una amortización de equipos de 20 años:

Análisis económico				
Componentes	Capacidad	Coste por unidad	Coste de inversión [€]	Coste inversión anual [€/año]
Campo Solar	13.080 [m <sup>2</sup> ]	235 [€/m <sup>2</sup> ] <sup>[21]</sup>	3.073.800	153.690
Almacenamiento de energía	16.700 [kWh]	65 [€/kWh <sub>t</sub> ] <sup>[21]</sup>	1.085.500	54.275
Caldera de biomasa	2800 [kW <sub>t</sub> ]	315 [€/kW <sub>t</sub> ] <sup>[17]</sup>	882.000	44.100
ORC	500 [kW <sub>e</sub> ]	2000 [€/kW <sub>e</sub> ] <sup>[22]</sup> <sup>[23]</sup>	1.000.000	50.000
Enfriadoras	4581 [kW <sub>t</sub> ]	180 [€/kW <sub>t</sub> ] <sup>[24]</sup>	824.580	41.229
<i>Inversión total anual</i>				343.294 [€/año]
Energía	Energía anual [MWh/año]	Coste por unidad [€/kWh]	Coste por año [€/año]	
Electricidad comprada	867	0,1267 <sup>[25]</sup>	109.882	
Electricidad vendida	686	0,11403	-78.330	
Pellets biomasa	4903	0,0444 <sup>[26]</sup>	217.723	
<i>Coste energía anual</i>				249.275 [€/año]
<i>Coste anual</i>				592.569 [€/año]
Análisis medioambiental				
Energía	Emisiones CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Emisiones CO <sub>2</sub> anuales [kgCO <sub>2</sub> /año]	Energía primaria (non-renewable) [kWh/kWh]	Energía primaria anual (non-renewable) [kWh/año]
Electricidad comprada	0,331 <sup>[26]</sup>	287.065	1,954 <sup>[26]</sup>	1.694.637
Electricidad vendida	- 0,331	-227.373	- 1,954	-1.342.261
Pellets biomasa	0,018 <sup>[26]</sup>	88.266	0,085 <sup>[26]</sup>	416.813
<i>Emisiones CO<sub>2</sub> anuales</i>				147.957 [kgCO <sub>2</sub> /año]
<i>Total anual energía primaria no renovable</i>				769.190 [kWh/año]

Tabla 7.2. Análisis económico y medioambiental para un ORC de menor potencia

Respecto al caso base disminuye el coste en 252.000 €/año ya que disminuye tanto el coste de equipos como el coste de la energía. El coste de la electricidad producida con energías renovables disminuye a 0,2031 €/kWh, algo menor pero todavía elevado.

La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es menor que en el caso anterior. Si se comprara toda la electricidad a la red se emitiría el equivalente a 787.118 kgCO<sub>2</sub>/año pero con este sistema se están emitiendo 147.957 kgCO<sub>2</sub>/año, es una reducción considerable pero con el caso base la reducción de emisiones era mayor, 671.505 kgCO<sub>2</sub>/año mayor.

### 7.3 ORC OPERANDO A CARGA PARCIAL

Se parte del caso base y se considera que el ORC puede funcionar a carga parcial por lo que no es necesaria la caldera de biomasa porque el aporte de energía térmica que necesita el ORC lo suple el campo de captadores solares.

Como el ORC trabaja como un ciclo subcrítico se pueden producir cruces de temperaturas en la zona de intercambio de calor entre el fluido térmico y el R245fa, para evitar esto se ha comprobado (Anexo 1) que para que no haya cruces de temperatura la temperatura de entrada del fluido térmico no puede ser menor que 199°C. Por lo que si la temperatura es menor el ORC no opera.

A excepción de la caldera de biomasa, todos los demás costes de equipos permanecen iguales por lo que se reduce 85.522€ anuales de gasto del coste de equipos (Tabla 7.3). Además, el coste de la energía comprada/vendida es de solo 4895 €/año, lo que significa que los costes de operación son despreciables frente a los costes de inversión, que son de 475.514 €/año.

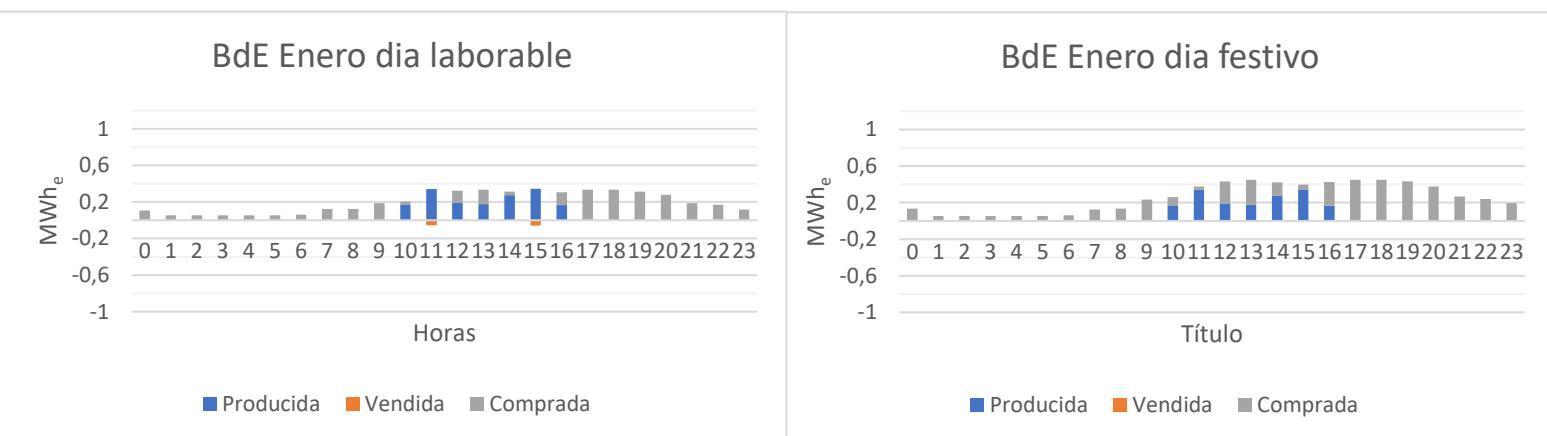


Figura 7.7. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de enero en función de las horas

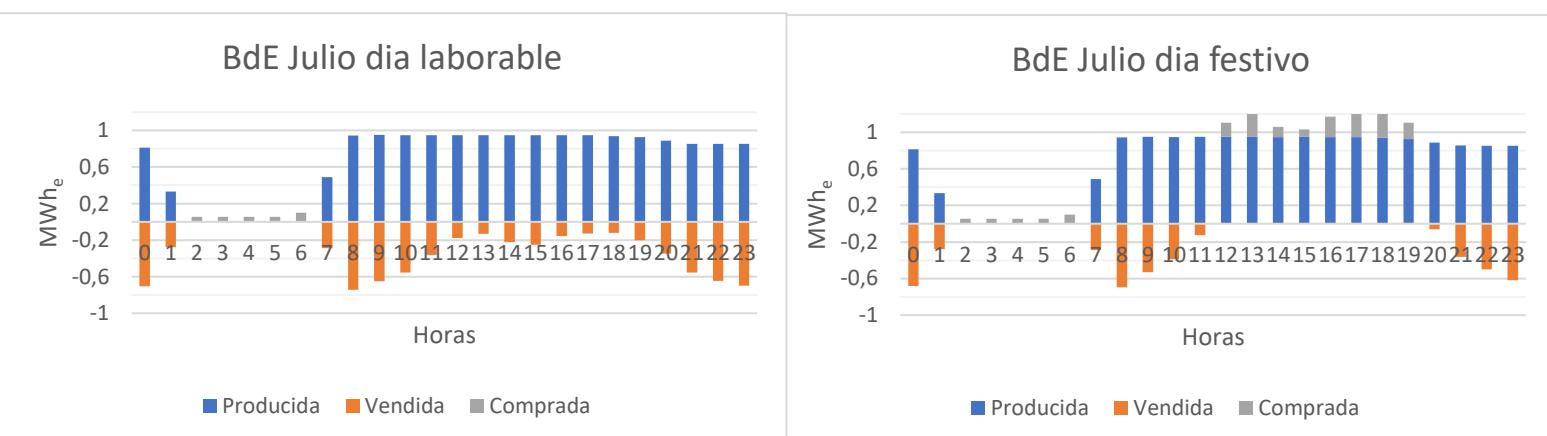


Figura 7.8. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de julio en función de las horas

En las Figuras 7.7 y 7.8 se puede ver que al ser carga parcial la energía producida depende de la energía térmica que aporta el campo solar porque no a todas las horas se produce lo mismo. En comparación con el caso base y el caso 7.2 se produce poca energía en los meses con bajo recurso solar, pero en los meses importantes en los que se debe refrigerar el centro comercial (junio, julio, agosto, etc), el ORC funciona a casi a plena carga sin necesidad de la caldera de biomasa por lo que se produce casi la misma energía que en el caso base con caldera.

En el balance de energía anual de la tabla 7.3 se muestra que la electricidad comprada a la red y la vendida por el sistema son muy parecidas, 840 MWh<sub>e</sub>/año y 891 MWh<sub>e</sub>/año respectivamente de ahí que el coste en energía anual sea de solo 4895 €/año. Se observa con estos que con este sistema no se vende tanta electricidad como en el caso base (2720 MWh<sub>e</sub>/año vendidos en el caso base). La diferencia de la venta de electricidad de este caso con el caso base se puede ver en la Figura 7.9 y 7.3, mientras que los meses centrales hay una producción de electricidad parecida en los demás meses la producción mensual de electricidad es mucho menor en este caso que en el caso base.

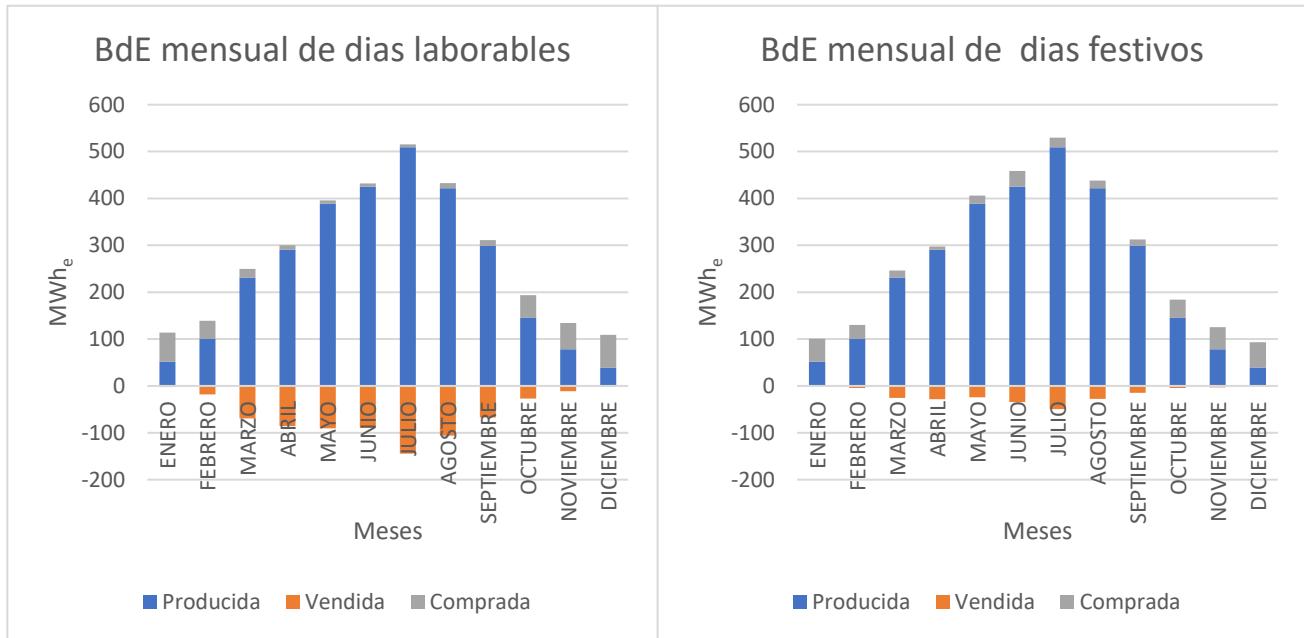


Figura 7.9. Balance de energía mensual para los días tipo laborable y festivo

Análisis económico				
Componentes	Capacidad	Coste por unidad	Coste de inversión [€]	Coste inversión anual [€/año]
Campo Solar	19.620 [m <sup>2</sup> ]	235 [€/m <sup>2</sup> ] [21]	4.610.700	230.535
Almacenamiento de energía	32.600 [kWh]	65 [€/kWh <sub>t</sub> ] [21]	2.119.000	105.950
Caldera de biomasa	0 [kW <sub>t</sub> ]	315 [€/kW <sub>t</sub> ] [17]	0	0
ORC	978 [kW <sub>e</sub> ]	2000 [€/kW <sub>e</sub> ] [22] [23]	1.956.000	97.800
Enfriadoras	4581 [kW <sub>t</sub> ]	180 [€/kW <sub>t</sub> ] [24]	824.580	41.229
<i>Inversión total anual</i>				475.514 [€/año]
Energía	Energía anual [MWh/año]	Coste por unidad [€/kWh]	Coste por año [€/año]	
Electricidad comprada	840	0,1267 [25]	106.518	
Electricidad vendida	891	0,11403	-101.623	
Pellets biomasa	0	0,0444 [26]	0	
<i>Coste energía anual</i>				4.895 [€/año]
<b><i>Coste anual</i></b>				<b>480.409 [€/año]</b>

Análisis medioambiental				
Energía	Emisiones CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Emisiones CO <sub>2</sub> anuales [kgCO <sub>2</sub> /año]	Energía primaria (non-renewable) [kWh/kWh]	Energía primaria anual (non-renewable) [kWh/año]
Electricidad comprada	0,331 [26]	278.358	1,954 [26]	1.642.735
Electricidad vendida	- 0,331	-294.985	- 1,954	-1.741.397
Pellets biomasa	0,018 [26]	0	0,085 [26]	0
<b>Emisiones CO<sub>2</sub> anuales</b>				<b>-16.710 [kgCO<sub>2</sub>/año]</b>
<i>Total anual energía primaria no renovable</i>				<i>-98.644 [kWh/año]</i>

Tabla 7.3. Análisis económico y medioambiental para un ORC que opera a carga parcial

Respecto al caso base disminuye el coste en 387.600 €/año y respecto al caso 7.2 135.700 €/año. El coste de la electricidad producida disminuye a 0,1556 €/kWh, por lo que en cuanto a costes mejora a los dos casos anteriores.

En cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> anuales, este caso se encuentra en un punto intermedio entre los dos casos anteriores. Reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> 164.657 kgCO<sub>2</sub>/año más que el caso 7.2 pero el caso base reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> 506.550 kgCO<sub>2</sub>/año más que este caso.

#### 7.4 ORC DE MAYOR RENDIMIENTO

Para este caso se parte del Caso de la sección 7.2 con el ORC de 500 kW pero con mayor rendimiento al utilizar un ciclo comercial de la empresa Enertime [16] que consigue trabajar a mayores rendimientos y por tanto necesita un menor aporte de energía térmica, y en consecuencia un campo solar menor. Se ha comprobado con EES que con la configuración del ORC del fabricante se puede trabajar con un rendimiento del 21,5% usando un ciclo supercrítico. Con este rendimiento el sistema campo solar-biomasa deberá aportar 2,32 MW<sub>t</sub> para que el ORC puede funcionar. Por lo que la caldera necesaria será de 2,3 MW<sub>t</sub>.

Para dimensionar el campo solar se continúa con la premisa de que el sistema solar es capaz de producir la energía que se necesita para la demanda eléctrica de refrigeración de un año, con 10.900 m<sup>2</sup> se cumple esta premisa y se ve que al aumentar el campo solar se aumenta el coste anual del sistema por lo que 10.900 m<sup>2</sup> es la superficie óptima. Para mantener las horas de almacenamiento de los tanques de acumulación de energía en el punto óptimo de 6h de acumulación, el tamaño necesario del tanque es de 13.600 kWh, por lo que se reduce respecto al caso 7.2.

Tal y como se muestra en las Figuras 7.10 y 7.11 los balances de energía son casi iguales a las Figuras 7.4 y 7.5 del caso 7.2, al fin y al cabo, la diferencia más relevante entre ambos casos es un aumento del rendimiento del 3,5%. En base anual, el sistema produce un poco menos (2380 MWh<sub>e</sub>/año) de la energía eléctrica demandada (2738 MWh<sub>e</sub>/año). Por este motivo, la electricidad anual comprada (959 MWh<sub>e</sub>/año) es superior a la vendida (611 MWh<sub>e</sub>/año).

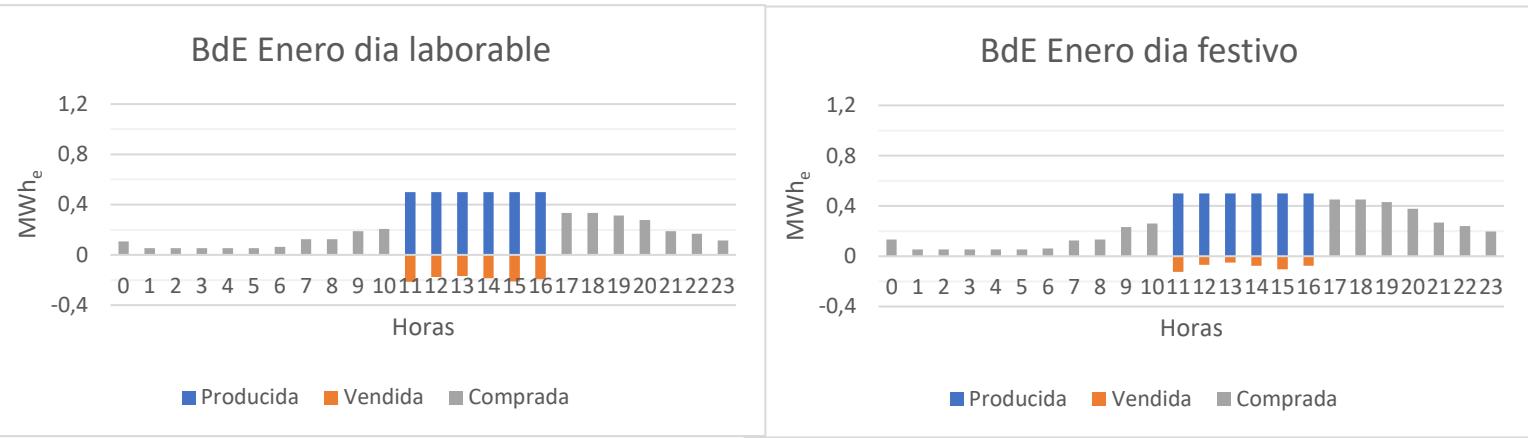


Figura 7.10. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de enero en función de las horas

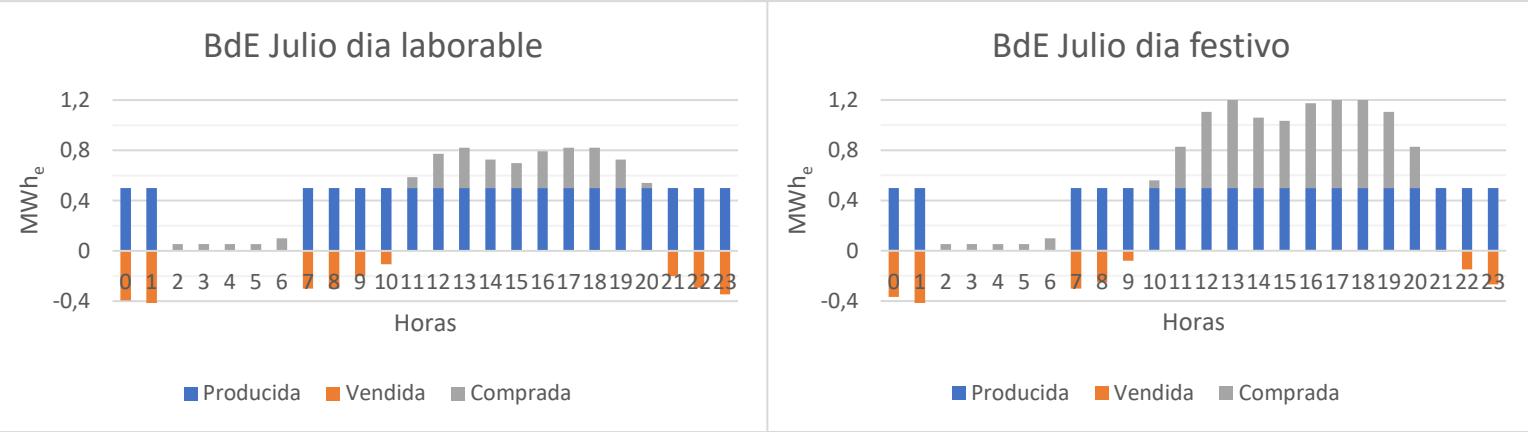


Figura 7.11. Balance de energía para los días tipo laborable y festivo de julio en función de las horas

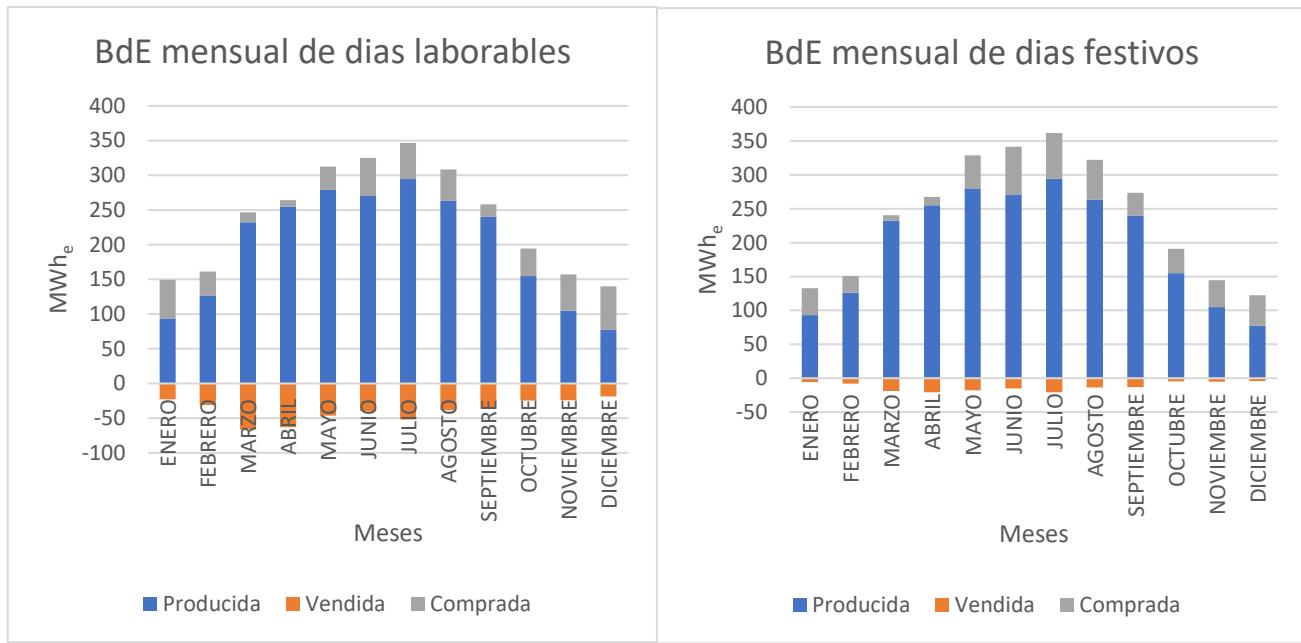


Figura 7.12. Balance de energía mensual para los días tipo laborable y festivo

La diferencia de costes se puede apreciar mejor en la tabla 7.4 de costes en la que se ve que los costes de equipos anuales disminuyen 48.300€ respecto del caso 7.2 y los costes de electricidad comprada/vendida disminuyen 27.000€. Por lo en total disminuye el coste

en 74.300 €/año, pero el coste es 43.000€/año superior al del caso 7.3. El coste de la electricidad producida con el sistema de energía renovable disminuye a 0,1778 €/kWh.

En cuanto al análisis de emisiones de CO<sub>2</sub>, con el caso 7.2 se emiten 37.000 kgCO<sub>2</sub>/año menos y la energía primaria no renovable utilizada es también inferior (300.000 kWh/año inferior).

A continuación, se muestra el análisis económico y medioambiental teniendo en cuenta una amortización de equipos de 20 años:

Análisis económico				
Componentes	Capacidad	Coste por unidad	Coste de inversión [€]	Coste inversión anual [€/año]
Campo Solar	10.900 [m <sup>2</sup> ]	235 [€/m <sup>2</sup> ] [21]	2.561.500	128.075
Almacenamiento de energía	13.600 [kWh]	65 [€/kWh <sub>t</sub> ] [21]	884.000	44.200
Caldera de biomasa	2300 [kW <sub>t</sub> ]	315 [€/kW <sub>t</sub> ] [17]	630.000	36.250
ORC	500 [kW <sub>e</sub> ]	2000 [€/kW <sub>e</sub> ] [22] [23]	1.000.000	50.000
Enfriadoras	4581 [kW <sub>t</sub> ]	180 [€/kW <sub>t</sub> ] [24]	824.580	41.229
<i>Inversión total anual</i>				299.729 [€/año]
Energía	Energía anual [MWh/año]	Coste por unidad [€/kWh]	Coste por año [€/año]	
Electricidad comprada	959	0,1267 [25]	121.458	
Electricidad vendida	611	0,11403	-69.649	
Pellets biomasa	3862	0,0444 [26]	171.474	
<i>Coste energía anual</i>				223.283 [€/año]
<i>Coste anual</i>				523.013 [€/año]
Análisis medioambiental				
Energía	Emisiones CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Emisiones CO <sub>2</sub> anuales [kgCO <sub>2</sub> /año]	Energía primaria (non-renewable) [kWh/kWh]	Energía primaria anual (non-renewable) [kWh/año]
Electricidad comprada	0,331 [26]	317.307	1,954 [26]	1.873.168
Electricidad vendida	- 0,331	-202.173	- 1,954	-1.193.497
Pellets biomasa	0,018 [26]	69.516	0,085 [26]	328.272
<i>Emisiones CO<sub>2</sub> anuales</i>				184.650 [kgCO <sub>2</sub> /año]
<i>Total anual energía primaria no renovable</i>				1.007.944 [kWh/año]

Tabla 7.4. Análisis económico y medioambiental para un ORC con un rendimiento del 21,5%

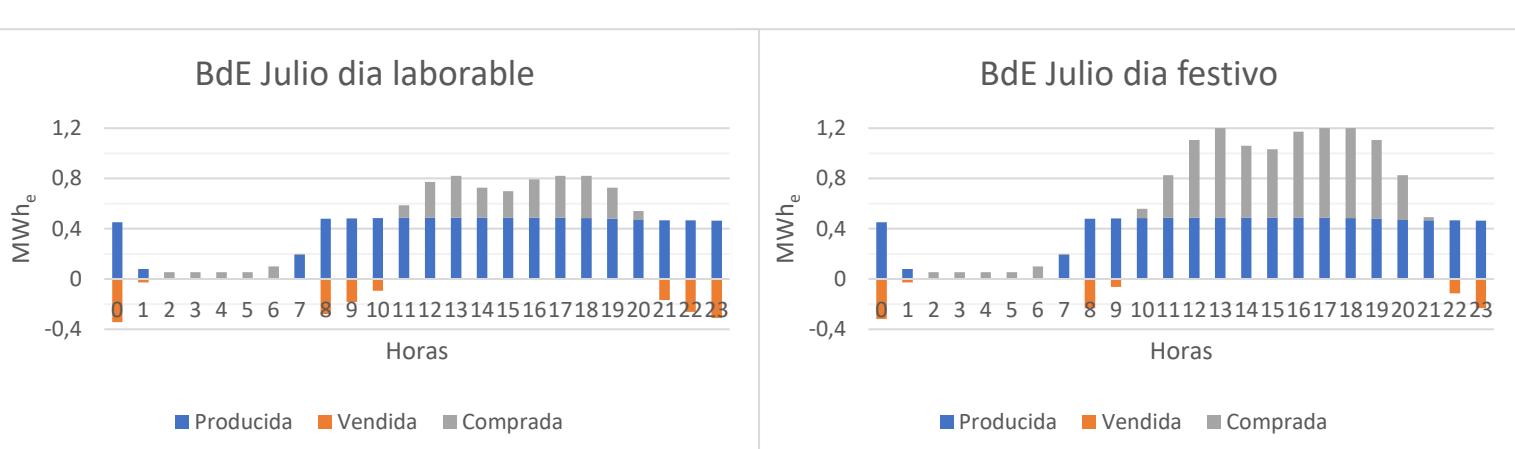
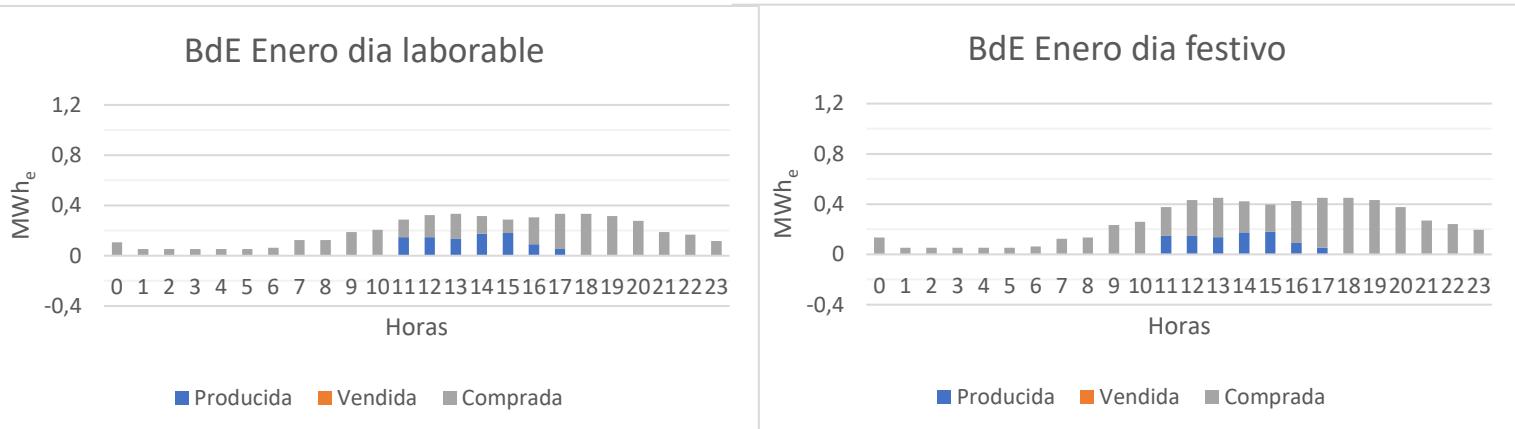
## 7.5 ORC DE MAYOR RENDIMIENTO Y OPERANDO A CARGA PARCIAL

En este caso se parte del caso 7.4 en el que se usa un ORC de 500kW con un rendimiento del 21,5% y además se añade la hipótesis de que trabaje a carga parcial. Por lo que la caldera dejará de ser necesaria y la única diferencia que hay respecto al coste de equipos anual del caso 7.4 es de 36.250 €/año del coste de la caldera de biomasa.

En términos de balance anual, la energía eléctrica producida en el sistema solar es de 1608 (MWh<sub>e</sub>/año), que es menor que la demanda anual de electricidad (2738 MWh<sub>e</sub>/año), lo que explica que la compra anual de electricidad (1281 MWh<sub>e</sub>/año) sea una cantidad significativa y muy superior a la energía eléctrica anual vendida (151 MWh<sub>e</sub>/año).

En las Figuras 13 y 14 se ve que en comparación con el caso 7.4 se produce poca energía en los meses con bajo recurso solar, pero en los meses centrales del año el ORC funciona a casi plena carga sin necesidad de la caldera de biomasa por lo que se produce casi la misma energía que en el caso base con caldera. Además, se ve que se vende menos electricidad y se compra más. Pese a ello, la fracción renovable del 59% que es un valor elevado.

En la Figura 15 se comprueba que se produce menos energía por mes que en el caso 7.4, sobre todo en los días festivos, en lo que se tiene que comprar más electricidad. Además, apenas se vende energía.



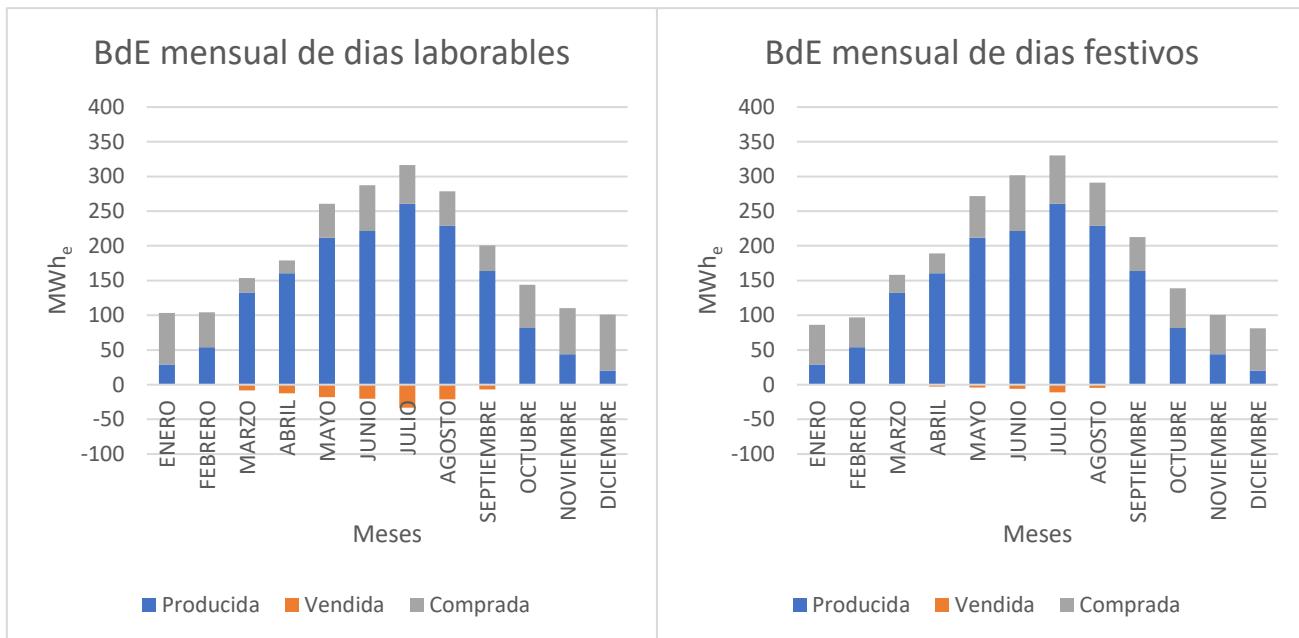


Figura 7.15. Balance de energía mensual para los días tipo laborable y festivo

El coste total anual como se indica en la tabla 7.5 es el más bajo de todos los casos analizados. Respecto al caso 7.4 disminuye el coste en 110.000 €/año y respecto al caso más económico hasta la fecha (caso 7.3) disminuye 72.000 €/año. El coste de la electricidad producida es también el más bajo, 0,1381 €/kWh, siendo bastante parecido al coste de compra de la red eléctrica.

La desventaja de este caso es que no se produce tanta energía como en los casos anteriores por lo que se tiene que comprar más a la red. Al no producir tanta energía eléctrica la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es la menor de todos los casos analizados, en comparación con el caso 7.3 la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es 363.000 kgCO<sub>2</sub>/año menor. La ventaja es que requiere unos costes de inversión más bajos que en los otros casos.

A continuación, se muestra el análisis económico y medioambiental teniendo en cuenta una amortización de equipos de 20 años:

Análisis económico				
Componentes	Capacidad	Coste por unidad	Coste de inversión [€]	Coste inversión anual [€/año]
Campo Solar	10.900 [m <sup>2</sup> ]	235 [€/m <sup>2</sup> ] [21]	2.561.500	128.075
Almacenamiento de energía	13.600 [kWh]	65 [€/kWh <sub>t</sub> ] [21]	884.000	44.200
Caldera de biomasa	0 [kW <sub>t</sub> ]	315 [€/kW <sub>t</sub> ] [17]	0	0
ORC	500 [kW <sub>e</sub> ]	2000 [€/kW <sub>e</sub> ] [22] [23]	1.000.000	50.000
Enfriadoras	4581 [kW <sub>t</sub> ]	180 [€/kW <sub>t</sub> ] [24]	824.580	41.229
<i>Inversión total anual</i>				263.504 [€/año]

Energía	Energía anual [MWh/año]	Coste por unidad [€/kWh]	Coste por año [€/año]	
Electricidad comprada	1281	0,1267 <sub>[25]</sub>	162.271	
Electricidad vendida	151	0,11403	-17.163	
Pellets biomasa	0	0,0444 <sub>[26]</sub>	0	
<i>Coste energía anual</i>				<b>145.108 [€/año]</b>
<i>Coste anual</i>				<b>408.612 [€/año]</b>
<b>Análisis medioambiental</b>				
Energía	Emisiones CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Emisiones CO <sub>2</sub> anuales [kgCO <sub>2</sub> /año]	Energía primaria (non-renewable) [kWh/kWh]	Energía primaria anual (non-renewable) [kWh/año]
Electricidad comprada	0,331 <sub>[26]</sub>	423.928	1,954 <sub>[26]</sub>	2.502.587
Electricidad vendida	- 0,331	-49.820	- 1,954	-294.105
Pellets biomasa	0,018 <sub>[26]</sub>	0	0,085 <sub>[26]</sub>	0
<i>Emisiones CO<sub>2</sub> anuales</i>				<b>347.108 [kgCO<sub>2</sub>/año]</b>
<i>Total anual energía primaria no renovable</i>				<b>2.208.481 [kWh/año]</b>

Tabla 7.5. Análisis económico y medioambiental para un ORC con un rendimiento del 21,5% y carga parcial

## 8 CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el diseño y optimización de costes de un sistema de energía renovable integrado con la red eléctrica capaz de cubrir la demanda de energía eléctrica y de frío de un centro comercial situado en Zaragoza. El sistema de energía renovable estudiado se compone de un campo de concentradores cilindro parabólicos (CCP) que junto con el apoyo de una caldera de biomasa proporcionan la energía térmica necesaria para hacer funcionar un ciclo Rankine orgánico (ORC) con el que se produce la electricidad necesaria en el centro comercial para atender el consumo eléctrico de las máquinas enfriadoras empleadas en la refrigeración y del resto de servicios del centro.

El diseño del sistema ha partido de la demanda de electricidad empleada en climatización de un centro comercial y otros consumos. A partir de estos datos se ha dimensionado la potencia y tamaño de los diferentes equipos. Se han aplicado varios criterios de diseño diferentes con el objetivo de determinar la configuración y diseño con mayor viabilidad.

En concreto se han analizado cinco casos de estudio diferentes, a saber:

- Caso base en el que el sistema está dimensionado para cubrir la potencia necesaria para atender las demandas de frío para climatización
- Se reduce la potencia de producción eléctrica del sistema, pero produciendo en base anual la energía necesaria para atender toda la demanda de energía eléctrica del centro comercial optimizando la superficie del campo solar.
- Se ha estudiado el efecto de la operación a carga parcial del ciclo Rankine orgánico
- Y se ha analizado también el efecto de modificar el rendimiento energético del ciclo Rankine orgánico para producción de electricidad.

Con los datos del recurso solar de Zaragoza y el software informático SAM se ha dimensionado para cada caso estudiado el campo de captadores solares requerido. También se han obtenido la energía térmica que el sistema aporta por hora y por meses para los días tipo laborable y festivo, y la energía que debe aportar la caldera de biomasa para la operación del ORC.

En el análisis del sistema se ha comparado la electricidad producida por el ORC con la electricidad demandada por el centro comercial. Si la demanda supera a la producción se compra electricidad a la red eléctrica y si la producción supera la demanda se vende. Se ha visto que, en algunos de los casos estudiados hay horas en las que el ORC está parado y el centro comercial demanda electricidad por lo que se compra toda la electricidad demandada, también hay horas en las que la producción excede por mucho a la demanda por lo que se vende el excedente de electricidad.

La valoración económica del sistema en los casos estudiados muestra que con el denominado caso base el coste anual del sistema es muy elevado, en concreto 498.000 €/año más que el coste de comprar toda la electricidad a la red eléctrica, la ventaja es que al ser un sistema renovable se reducen 523.548 kgCO<sub>2</sub>/año. Para reducir el coste económico se han propuesto diferentes alternativas siendo la alternativa más barata el uso de un ORC de menor potencia con un mayor rendimiento y operando a carga parcial. En este caso el coste es de 408.612 €/año, es decir, solo 62.000€/año más que si solo se comprara la electricidad. Además, se deja de emitir CO<sub>2</sub>, pero no tanto como en el caso base, se emiten 347.108 kgCO<sub>2</sub>/año.

Una gran ventaja de este último caso comentado es que el coste de los equipos es el más bajo, es decir, el centro comercial que decidiera implantar este sistema debe de hacer una inversión relativamente baja en comparación con los otros casos analizados. Como desventaja se ha visto que se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a la no utilización del sistema, pero se sigue emitiendo CO<sub>2</sub>, en concreto 347.108 kgCO<sub>2</sub>/año. Se emite más que en los otros casos mostrados.

Como conclusiones finales, este documento muestra que se puede realizar un sistema renovable de generación que reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en un 45% con un coste un 18% superior al precio de comprar la electricidad de la red eléctrica. Esto es de gran importancia para conseguir superar unos de los grandes desafíos a los que se enfrenta la sociedad como son el cambio climático y el consumo de energía, algo que se puede conseguir con proyectos de innovación autosostenibles como el mostrado en este documento.

## 9 REFERENCIAS

---

- [1] WMO, «[www.public.wmo.int/en/](http://www.public.wmo.int/en/),» [En línea]. [Último acceso: Agosto 2019].
- [2] IEA, «Key world energy statistics,» 2018.
- [3] Gobierno de España, «<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/la-union-europea/>,» [En línea]. [Último acceso: Junio 2019].
- [4] EEA, «<https://www.eea.europa.eu/es/articles/energia-renovable-la-clave-para>,» [En línea]. [Último acceso: Junio 2019].
- [5] A. CSP, «[www aalborgcsp.com](http://www aalborgcsp.com),» [En línea]. [Último acceso: 2019].
- [6] Michael J. Wagner and Paul Gilman, «Technical Manual for the SAM Physical Trough Model,» 2011.
- [7] SAM 2018.11.11, «<https://sam.nrel.gov/>,» [En línea]. [Último acceso: Marzo 2019].
- [8] EES, «[www.fchartsoftware.com/ees/](http://www.fchartsoftware.com/ees/),» [En línea]. [Último acceso: Mayo 2019].
- [9] Daikin, «[https://my.daikin.eu/dam/document-library/catalogues/as/air-cooled-chiller/ewad-tzpr/System%20optimization%20for%20air%20cooled%20chiller%20applications\\_ECPEN15-412\\_Product%20Catalogues\\_English.pdf](https://my.daikin.eu/dam/document-library/catalogues/as/air-cooled-chiller/ewad-tzpr/System%20optimization%20for%20air%20cooled%20chiller%20applications_ECPEN15-412_Product%20Catalogues_English.pdf),» [En línea]. [Último acceso: Julio 2019].
- [10] G. d. Aragon, «[www.aragon.es/-/calendario-laboral#anchor3](http://www.aragon.es/-/calendario-laboral#anchor3),» [En línea]. [Último acceso: 2019 Mayo].
- [11] Fenercom, «[www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=144](http://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=144),» 2010. [En línea]. [Último acceso: Junio 2019].
- [12] C. Ballerini, «Thermal analysis of a solar parabolic trough - ORC - biomass cogeneration plant of electricity and cooling applied to a shopping centre,» 2018.
- [13] Swegon, «[www.swegon.com](http://www.swegon.com),» [En línea]. [Último acceso: Junio 2019].
- [14] M. Astolfi, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2016.
- [15] Turboden, «[www.turboden.eu](http://www.turboden.eu),» [En línea]. [Último acceso: Julio 2019].
- [16] Enertime, «[https://www.enertime.com/sites/default/files/documents/2017/eng\\_-biomass\\_insert\\_enertime.pdf](https://www.enertime.com/sites/default/files/documents/2017/eng_-biomass_insert_enertime.pdf),» 2017. [En línea]. [Último acceso: Julio 2019].

- [17] Obernberger et al., «Techno-economic evaluation of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion with steam turbine and ORC processes.,» *IEA Bioenergy Task 32 project*, 2015.
- [18] Meteonorm, «[www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com),» [En línea]. [Último acceso: 2018].
- [19] Siemens, «<https://new.siemens.com/global/en/products/energy.html>,» [En línea]. [Último acceso: Marzo 2019].
- [20] Therminol, «[www.therminol.com](http://www.therminol.com),» [En línea]. [Último acceso: Mayo 2019].
- [21] Kurup et al., 2015.
- [22] Bruno et al., 2008.
- [23] Deaj and Bandyopadhyay, 2016.
- [24] Means, 2018.
- [25] Eurostat, «[ec.europa.eu/eurostat/](http://ec.europa.eu/eurostat/),» 2019. [En línea].
- [26] IDAE, «[www.idae.es](http://www.idae.es),» 2018. [En línea].