

## ESCUELA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL DE MADRID

Master en Energías Renovables y Mercado Energético.

### Resumen ejecutivo

---

# SUMINISTRO DE ENERGÍA TÉRMICA EN LA INDUSTRIA CERVECERA, MEDIANTE UNA PLANTA TERMOSOLAR CON CCP

---

**Tutor:** *Eduardo Zarza Moya*

**Autores:**

*Darío Hernández Velasco*

*Álvaro Escudero Muñoz*

*Ricardo Jaber Velázquez*

*Madrid, 2011*

## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1. Objetivo.....	3
1.2. Introducción.....	3
1.2.1. Tecnología CCP.....	3
<b>2. BASES DE DISEÑO</b> .....	<b>4</b>
2.1. Análisis del emplazamiento y de las superficies disponibles .....	4
2.2. Análisis de la climatología y la geología .....	4
2.3. Análisis del recurso solar.....	5
2.4. Cálculo de la demanda energética .....	6
2.4.1. Proceso y equipos .....	6
2.4.2. Descripción del punto de diseño .....	7
<b>3. DIAGRAMA DE PROCESO</b> .....	<b>7</b>
<b>4. RESULTADOS DEL DIMENSIONADO</b> .....	<b>9</b>
4.1. Cálculo del número de captadores en serie .....	9
4.2. Cálculo del número de filas en paralelo. ....	11
4.3. Diseño del sistema de almacenamiento .....	12
4.4. Cimentación.....	12
4.4.1. Diseño de tuberías. Caída de presión.....	13
4.5. Bomba de alimentación .....	15
4.6. Instrumentación y control .....	16
4.6.1. Campo de captadores .....	16
4.6.2. Control del sistema agua aceite.....	16
4.6.3. Estación meteorológica .....	17
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>18</b>
<b>6. BALANCE ECONÓMICO</b> .....	<b>19</b>
6.1. Financiación.....	19
6.2. Rentabilidad.....	19

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Objetivo

El objeto del presente trabajo es el estudio de la viabilidad, técnica y económica del proyecto de cubrir parte de la demanda energética de una fábrica de producción de cerveza mediante energía solar de concentración con captadores cilindroparábolicos (CCP). Para llevar a cabo el proyecto se evalúan la ubicación, el recurso, el dimensionado de la planta, diseño de subsistemas que la componen, estudio de impacto ambiental y análisis de la rentabilidad.

## 1.2. Introducción

La planta productora de cerveza, perteneciente al Grupo Heineken, fue inaugurada en 2008 después de su construcción la cual duró 4 años y requirió una inversión de 320 millones de euros, siendo hasta el momento, la inversión más importante del grupo en una fábrica a nivel mundial. Tiene una capacidad anual de producción de 5 millones de hectolitros de cerveza lo que la convierte en la más importante de España para Heineken, quienes son los líderes del sector cervecero en la Península Ibérica con un volumen de ventas de 5 millones de hectolitros. La fábrica es de las más modernas de España, tanto por su diseño como por su tecnología. Las instalaciones cuentan con un centro de recepción de visitantes que recibe alrededor de 70 personas al día.

Una vez los objetivos definidos, el proyecto tiene como fin el dimensionamiento del campo solar asociado a las necesidades térmicas de la fábrica teniendo en cuenta que su volumen de trabajo abarca mayor número de horas que las que puede aportar la radiación solar, por lo que además se hará un estudio de las necesidades de almacenamiento energético.

### 1.2.1. Tecnología CCP

La tecnología termosolar está basada en el concepto de la concentración de la radiación solar directa y en su seguimiento, para calentar aceite térmico (hasta 400°C) o producir vapor que más tarde puede ser empleado por procesos que requieran energía térmica o en plantas eléctricas convencionales. El seguimiento solar y la concentración de los rayos solares se realizan en tubos receptores de vacío de alta eficiencia térmica localizados en la línea focal de parábolas cilíndricas.

La tecnología cilindroparábólica es una tecnología limpia y con un extenso historial que demuestra estar preparada para la instalación a gran escala.

## 2. BASES DE DISEÑO

### 2.1. Análisis del emplazamiento y de las superficies disponibles

La Fábrica de Cerveza Heineken se encuentra situada en la llamada Hacienda de la Solaica, en Alcalá de Guadaíra, municipio perteneciente a la provincia de Sevilla en la Comunidad Autónoma de Andalucía. La finca que ocupa tiene una superficie total de 74 hectáreas de las cuales 23 están construidas, y 6,5 están calificadas como de uso industrial. Se ha realizado un análisis de los diferentes emplazamientos disponibles en un radio de 1,5 kilómetros, usando la herramienta SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas)

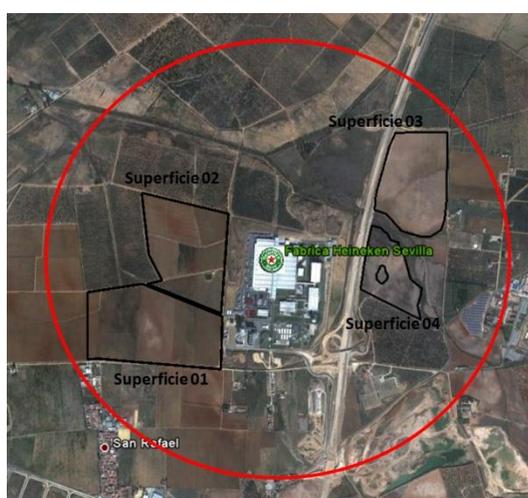


Figura 1 - Mapa de posición de los emplazamientos analizados

Áreas potenciales para la situación de la planta

Del dimensionamiento se obtiene que será necesaria una parcela de unas dimensiones aproximadas de 500 metros en la dirección Norte-Sur y de unos 250 metros en la dirección Este-Oeste, tras el estudio del catastro y de las diferentes superficies representadas en la figura 1, el emplazamiento elegido para albergar la Planta Termosolar es Superficie 02, situada al Oeste de la Fábrica de cerveza de Heineken, colindante con la parcela que ocupa y con una superficie disponible de 24,7 hectáreas.

### 2.2. Análisis de la climatología y la geología

Los valores de temperatura y precipitación se muestran en la siguiente gráfica.

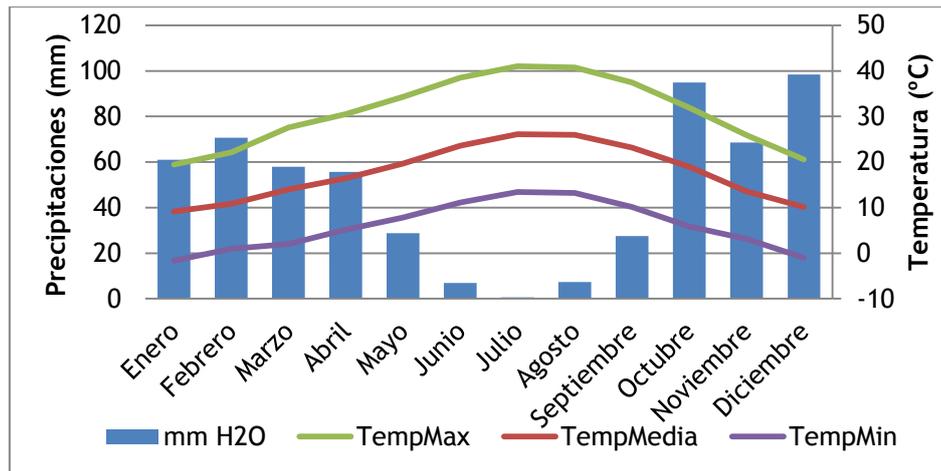


Figura 2 - Distribución anual de temperaturas y precipitaciones

En cuanto a los aspectos geológicos el emplazamiento se caracteriza por tener un relieve prácticamente llano (<3%), cuyos sedimentos más representativos son los del Terciario y el Cuaternario, predominando litológicamente las margas, arenas, calcarenitas, limos arenosos y arcillas.

Finalmente, desde el punto de vista de la alimentación eléctrica de la instalación cabe señalar que existe una subestación en la misma finca de La Solaica (50kVA, 15kV/400V) perteneciente a Ferrovial Agromán, además del mismo centro de transformación de la Fábrica de Heineken (66kVA, 220V/132V).

### 2.3. Análisis del recurso solar

El estudio del potencial solar disponible en el emplazamiento consiste en el análisis de los datos de radiación disponible, los cuales al no disponer de datos medidos de manera precisa y específica en el mismo emplazamiento mediante un pirheliómetro, se ha necesitado recurrir a las diferentes fuentes que se enumeran a continuación:

- NASA: National Aeronautics and Space Administration
- SIAR: Sistema de Información Agroclimática para el Regadío
- PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System
- Meteonorm 6.0
- PSA.: Plataforma Solar de Almería
- SODA: Solar radiation Data

De los anteriores, se analiza con más detalle los datos facilitados por la PSA sobre una estación meteorológica situada a 30 km de la planta.

## 2.4. Cálculo de la demanda energética

En este apartado se analiza el consumo energético, tanto en intensidad como su variación a lo largo del tiempo de la planta de estudio, clave para el dimensionado de la instalación solar. Se procede a un análisis *top-down* en el que se evalúa la actividad de la industria cervecera, las unidades industriales, instalación, procesos y finalmente los equipos para obtener el consumo total así como el perfil horario. Para ello se emplearán datos bibliográficos de la industria de la cerveza así como estudios del sector.

Se trata de la planta de Heineken en Sevilla con una producción de 350 MM de litros anuales, esto supone un consumo anual de más de 53 GWh anuales en combustibles sólidos. Las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a esta unidad de producción se sitúan en los 7,29 kg/hl que anualmente se traducen en 2,5MM toneladas de CO<sub>2</sub>.

### 2.4.1. Proceso y equipos

La distribución de consumo energético por proceso se resume en la siguiente tabla:

*Tabla 1*

térmica			eléctrica		
Fermentación	60%	3,18E+07	Refrigeracion	35%	9,80E+06
Embotellado	30%	1,59E+07	Embotellado	20%	5,60E+06
Calefaccion	2%	1,06E+06	Aire comp	10%	2,80E+06
Otros	8%	4,24E+06	Fermentacion	8%	2,24E+06
	100%	5,30E+07	Caldera	5%	1,40E+06

A partir de los datos bibliográficos sobre temperatura y duración de cada uno de los procesos se tiene la figura 3. A partir del balance de energía para cada hora teniendo en cuenta que el vapor empleado es saturado y condensa cediendo el calor latente al proceso, se obtiene la curva de la figura 4 con el consumo energético.

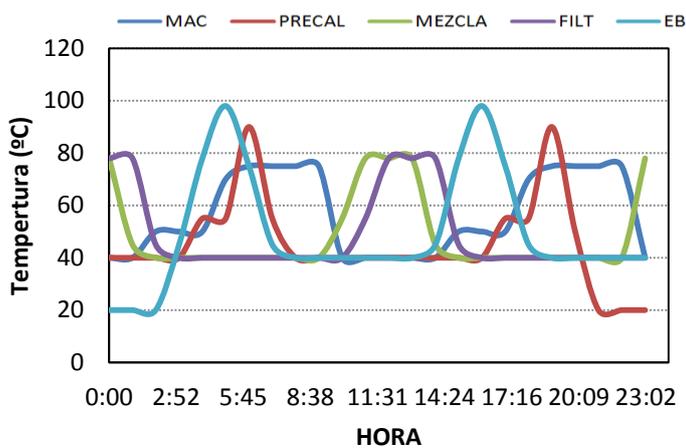


Figura 3 Perfil de temperaturas de los procesos.

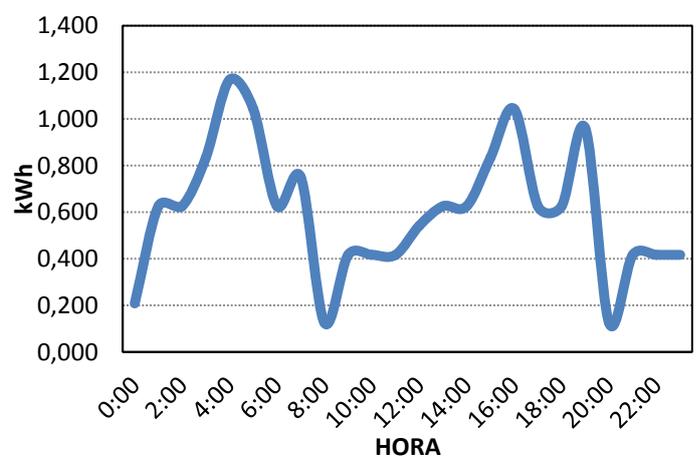


Figura 4: Perfil de consumo energético horario.

### 2.4.2. Descripción del punto de diseño

El punto de diseño del campo solar fija las condiciones de partida para el dimensionado del sistema. Se toma el punto de diseño como el día del año con mayor radiación del año ya que si se realiza para otro punto del año la instalación quedará sobredimensionada, y sería necesario desenfocar captadores.

Tabla 2: Punto de diseño

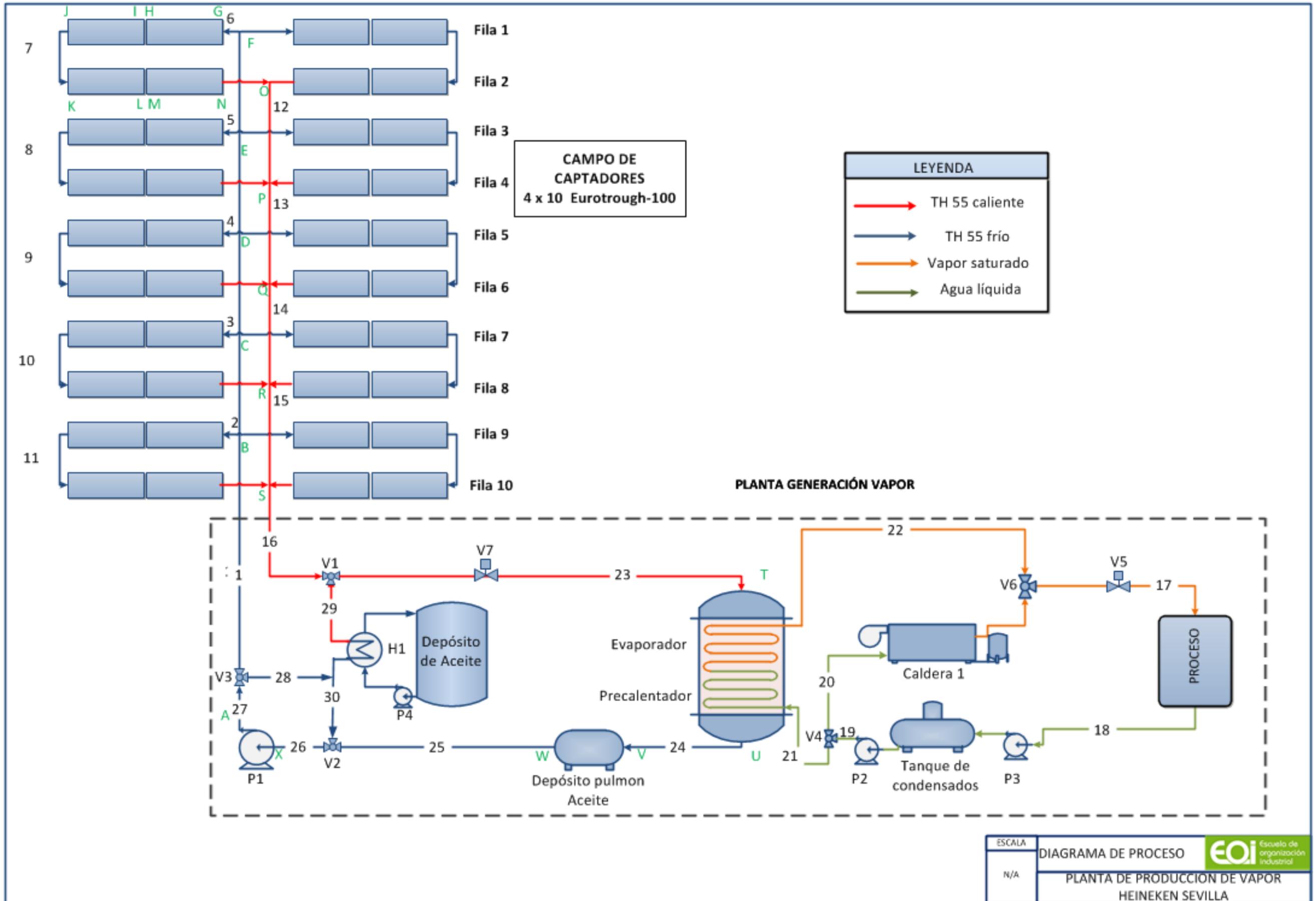
Energía demandada por el proceso	145,221 MWh/día.
Temperatura del fluido a la entrada del campo solar (°C)	295
Temperatura del vapor proceso (°C)	175,6
Fluido térmico	Therminol 55
Tipo de captador	Eurotrough-100
Orientación del eje campo captadores	N-S
Tipo de la alimentación	Central
Coordenadas geográficas del emplazamiento	37,3 °N; 5,83°W
Día y hora	11 de Junio, 12:00 hora solar.
Radiación solar directa (W/m <sup>2</sup> )	954,89

## 3. DIAGRAMA DE PROCESO

En la siguiente página se muestra el diagrama de proceso en el que se representan las líneas de materia y los equipos principales. La numeración se refiere a cada una de las corrientes mientras que las letras se refieren a los tramos para el cálculo de la pérdida de carga.

Tabla 3: Balance de materia y energía

Corriente	Q (kg/s)	T (°C)	h(kJ/kg)	tipo fluido	Corriente	Q (kg/s)	T (°C)	h(kJ/kg)	tipo fluido
1	46,60	180	1125,93	TH 55	16	46,60	295	1575,06	TH 55
2	4,66	180	1125,93	TH 55	17	2,91	175,6	2781,00	Vapor saturado
3	4,66	180	1125,93	TH 55	18	2,91	175,6	551,00	Agua
4	4,66	180	1125,93	TH 55	19	2,91	175,6	551,00	Agua
5	4,66	180	1125,93	TH 55	20	2,91	175,6	551,00	Agua
6	4,66	180	1125,93	TH 55	21	2,91	175,6	551,00	Agua
7	4,66	238	1344,56	TH 55	22	2,91	175,6	2781,00	Vapor saturado
8	4,66	238	1344,56	TH 55	23	46,60	295	1575,06	TH 55
9	4,66	238	1344,56	TH 55	24	46,60	180	1125,93	TH 55
10	4,66	238	1344,56	TH 55	25	46,60	180	1125,93	TH 55
11	4,66	238	1344,56	TH 55	26	46,60	180	1125,93	TH 55
12	9,32	295	1575,06	TH 55	27	46,60	180	1125,93	TH 55
13	18,64	295	1575,06	TH 55	28	-	-	-	TH 55
14	27,96	295	1575,06	TH 55	29	-	-	-	TH 55
15	37,28	295	1575,06	TH 55	30	-	-	-	TH 55



## 4. RESULTADOS DEL DIMENSIONADO

En este apartado se presenta la metodología y los principales resultados obtenidos durante el dimensionamiento de la planta. La potencia transmitida al fluido es igual a la potencia que llega a al colector menos las pérdidas por temperatura.

$$P_{\text{colector-fluido}} = P_{\text{sol-colector}} - Q_l = An \cdot Ed \cdot \cos(\varphi) - Q_l$$

Siendo  $Q_l$  las pérdidas térmicas del captador elegido (eurotrough-100) calculadas mediante:

$$Q_l = 0,00154 \cdot \Delta T^2 + 0,2021 \cdot \Delta T - 24,899 + [(0,00036 \cdot \Delta T^2 + 0,2029 \cdot \Delta T + 24,899) \cdot (Ed / 900) \cdot \cos(\varphi)]$$

Siendo el  $\Delta T$  el incremento de temperatura entre la temperatura media alcanzada en el interior del tubo absorbedor y la temperatura ambiente,  $E_d$ , es la radiación directa en el plano normal en  $W/m^2$  y  $\cos(\varphi)$ , es el coseno del ángulo de incidencia, siendo este factor el que representa las pérdidas por ángulo de inclinación.

### 4.1. Cálculo del número de captadores en serie

El dimensionado de la instalación se trata de un cálculo iterativo que sigue el siguiente esquema:

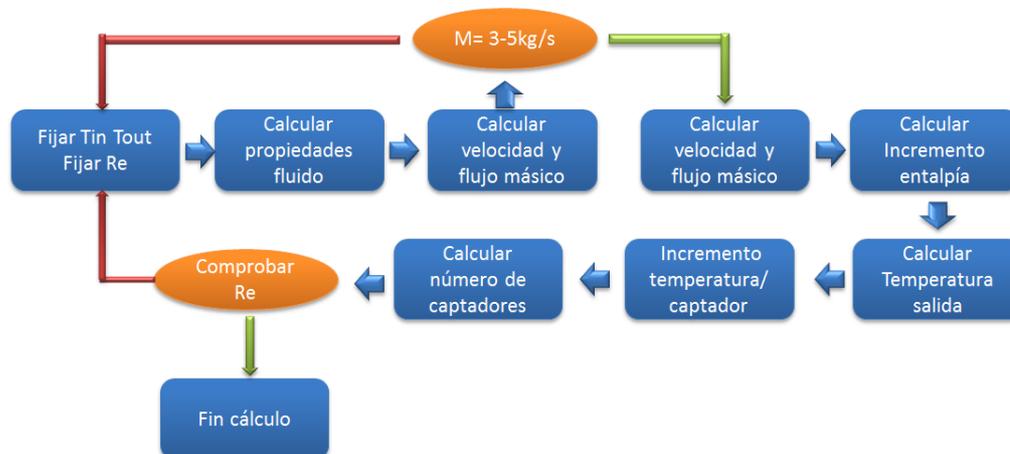


Figura 5: Esquema del cálculo iterativo para el dimensionado

A continuación se resume el cálculo para cada uno de los pasos expuestos en el esquema:

$T_{\text{out}}$ : 295°C: Máxima temperatura alcanzable por el therminol 55.

$T_{in}$ : 180°C: Se elige esta temperatura que está 5 °C (punto de pitch) por encima de la temperatura de saturación del vapor a 8bar.

Re:  $4 \cdot 10^5$

Despejando de la ecuación del número de Reynolds, y conocidas las propiedades del fluido térmico, es posible obtener la velocidad como:

$$v = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D_{in}} = 1,679 \rightarrow \dot{m} = v \cdot S \cdot \rho = 4,08 \text{ kg/s}$$

Para este caudal el incremento de entalpía que tendrá que sufrir el fluido será calculable como la potencia total transmitida al fluido en el punto de diseño entre el caudal másico.

$$\Delta H = \frac{P_{col-fluido}}{\dot{m}} = \frac{358,66 \text{ kW}}{4,08 \text{ kg/s}} = 87,82 \text{ kJ/kg}$$

A partir de la expresión general del calor específico de una sustancia

$$dc_p = a + b \cdot dT \text{ E integrando } \rightarrow \Delta H = a \cdot (T_{out} - T_{in}) + 1/2 \cdot b \cdot (T_{out}^2 - T_{in}^2)$$

De la ecuación anterior con  $a=2035,5$  y  $b= 2,52$  con  $T_{in}$  siendo la temperatura media en el captador se puede despejar  $T_{out}$  siendo igual a 270,68°C, Siendo de este modo el incremento de temperatura necesario por captador igual a:

$$270,68 - 237,79 = 32,88$$

El incremento necesario en el campo de captadores ha sido fijado al inicio del proceso de cálculo entre 180 y 295°C lo que supone un incremento de temperatura de 115°C por lo que el número de captadores necesarios será:

$$n^{\circ} \text{ captadores serie} = \frac{115}{32,88} = 3,5 \text{ captadores}$$

A partir de este resultado se puede fijar un valor de 3 o de 4 captadores en serie. En estos casos es recomendable buscar un número de captadores ya que de este modo se podrá optar por una alimentación central dejando el mismo número de captadores a cada lado para que los circuitos queden equilibrados. El hecho de pasar de 3,5 a 4 captadores influye sobre el valor de Reynolds y flujo en el punto de diseño por lo que habrá que recalcularlo.

$$\dot{m} = 4,08 \text{ kg/s} \cdot (4/3,5) = 4,66 \text{ kg/s}$$

$$Re = 4,57 \cdot 10^5$$

## 4.2. Cálculo del número de filas en paralelo.

El número de filas en paralelo permitirá aumentar el caudal de aceite total incrementando por lo tanto la cantidad de energía que es posible producir para cubrir la demanda del proceso. Teniendo en cuenta la energía necesaria en un día y la energía que aporta una fila en el punto de diseño es posible dimensionar el campo de captadores de modo que la cobertura el día de diseño sea del 100%.

El perfil de consumo del proceso se mostraba en el apartado anterior de modo que la suma de la energía necesaria es de 145 MWh.

La energía aportada por una fila en el punto de diseño se calcula a partir de la potencia útil del colector al fluido calculado en el apartado anterior.

$$P_{util\ 1\ fila} = P_{util\ 1\ captador} \cdot n^{\circ}\ de\ captadores$$

$$P_{util\ 1\ fila} = 346kW \cdot 4 = 1384,01$$

La energía aportada por el campo a lo largo del punto de diseño es la suma de cada uno de los valores de potencia multiplicado por el incremento del tiempo de los datos tomados. De este modo se obtiene un valor de energía aportada por una fila del campo solar de 15,80MWh.

De este modo, el número de filas necesarias será calculable como:

$$N^{\circ}\ filas\ serie = \frac{145MWh}{15,80MWh} = 9,19\ filas$$

Fijando las pérdidas globales en un 10% el número de filas total será igual a 10.

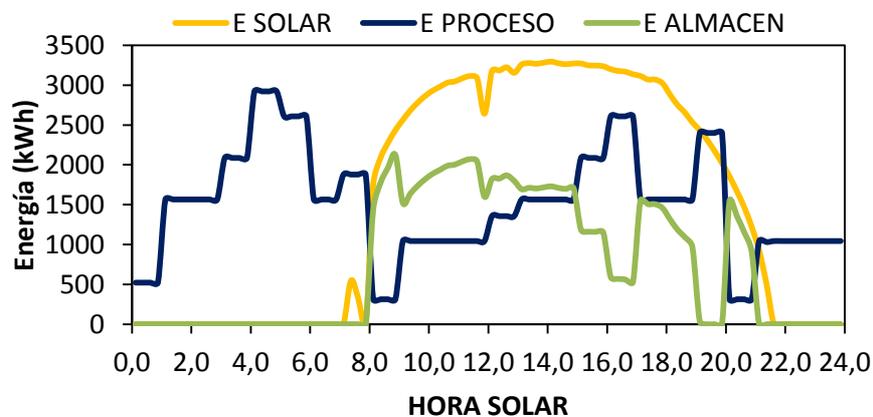


Figura 6: Perfil de energía demandada por el proceso y aporte del campo de captadores.

### 4.3. Diseño del sistema de almacenamiento

En este apartado se dimensiona el depósito de almacenamiento para el punto de diseño, de modo que se consiga una cobertura del 100%. La cantidad de energía almacenada es en este caso de 73907,13 kWh  $\rightarrow$   $2,66 \cdot 10^8$  kJ. La temperatura de trabajo se fija según los siguientes criterios:

Temperatura mínima: Temperatura mínima a la que el aceite puede producir vapor en el generador igual a 468K.

Temperatura máxima: Mayor temperatura alcanzable sin producir degradación del aceite igual a 568K.

De este modo es posible expresar la energía almacenada según la siguiente expresión:

$$Q = m \int_{T_0}^{T_f} c_p \cdot dT = m \int_{468}^{568} (2,035 + 0,0025) \cdot dT = 2,66 \cdot 10^8 \text{ kJ} \rightarrow m = 1004777,9 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta la densidad media entre ambas temperaturas igual a 733 kg/m<sup>3</sup> y un sobredimensionamiento del 10% para evitar exceso de presión y compensar expansión por sobretemperatura, se obtiene un volumen de depósito de 1198m<sup>3</sup>  $\approx$  1200 m<sup>3</sup>.

Para el dimensionado del tanque se toma una relación de altura/diámetro de 3,5 obteniendo así un diámetro de 7,58m y una altura de 26,53m.

Además el tanque debe contar con los siguientes elementos calculados en el proyecto

- Sistema de inertización del aceite: se trata de nitrógeno a una sobrepresión de unos 0,5 kg/cm<sup>2</sup>. El volumen necesario de N<sub>2</sub> para toda la instalación será de: 218Nm<sup>3</sup>
- Válvula de venteo.
- Disco de ruptura.
- Tanque de incondensables.
- Reposición del aceite 1-3% anual.

### 4.4. Cimentación

Para la correcta fijación de los captadores que componen el campo solar se deben tomar en cuenta los esfuerzos y cargas que debe soportar la cimentación al haber velocidades de viento de 120 km/h en la dirección más desfavorable para el captador, con un coeficiente de seguridad de 1,3.

Cada captador consta de un apoyo central que es donde se instala la unidad de seguimiento, 6 apoyos intermedios y 2 apoyos finales. Los apoyos van sujetos a la cimentación mediante cuatro pernos.

#### 4.4.1. Diseño de tuberías. Caída de presión

En una red de tuberías, los parámetros que rigen la caída de presión son las propiedades del fluido, como su densidad y viscosidad así como las características propias de los diferentes tramos de tubería que componen el circuito como las longitudes, diámetros, rugosidad de las paredes y elementos discretos que lo conforman. Para el dimensionado se tiene en cuenta:

- El criterio económico que implica el uso del menor diámetro posible.
- Criterio de flujo: El fluido debe tener como máximo una velocidad de 3 m/s con lo cual se evitan pérdidas de carga elevadas. El otro extremo del rango sugerido para instalaciones industriales es una velocidad mínima de 1 m/s con lo cual el fluido permanece en régimen turbulento.

Por lo tanto, al diseñar a cada tramo de tubería se le asigna el menor diámetro posible teniendo en cuenta el segundo criterio, es decir, la velocidad no supere los 3 m/s, teniendo la densidad correspondiente para la temperatura en cada tramo de tubería y el caudal que circula, se calcula la velocidad del líquido en todas las secciones con la siguiente ecuación:

$$v \left( \frac{m}{s} \right) = \frac{q_m \cdot 4}{\pi \cdot D_{int}^2 \cdot \rho}$$

Continuando con el proceso de cálculo de pérdidas de presión a lo largo de una red de tuberías, utilizamos la simplificación de la ecuación de Bernouilli:

$$\Delta P_i = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta P_i = \frac{f}{2} \cdot \rho_i \cdot v_i^2 \cdot \frac{L_{recto,i} + L_{equi,i}}{D_{int,i}}$$

Para obtener el factor de fricción  $f$ , se emplea la fórmula de Chen.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left\{ \frac{1}{3,7065} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) - \frac{5,0452}{Re} \cdot \log \left[ \frac{1}{2,8257} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right] \right\}$$

Siendo  $\varepsilon$  la altura de grano de la tubería, 50  $\mu\text{m}$  del acero al carbono (circuito) y 20  $\mu\text{m}$  para el acero inoxidable (captadores). En las siguientes tablas se muestra el cálculo para el camino de mayor pérdida de carga y para el circuito completo.

Tabla 4: Cálculo de la pérdida de carga

Tramo	Longitud Recta (m)	Temperatura (°C)	Caudal (kg/s)	Diametro (mm)	Viscosidad (Pa-s)	Densidad del Fluido (kg/m3)	Altura de Grano (m)	Velocidad Fluido (m/s)	Reynolds	Moody	Equivalencia elementos discretos (m)	Longitud Equivalente (m)	Caida de Presion (Pa)
A -- B	30.00	180.00	46.6	200	0.0009	777.22	5.00E-05	1.91	3.30E+05	0.0165	6.70	36.70	4.29E+03
B -- C	34.56	180.00	37.28	150	0.0009	777.22	5.00E-05	2.71	3.52E+05	0.0170	2.20	36.76	1.19E+04
C -- D	34.56	180.00	27.96	150	0.0009	777.22	5.00E-05	2.04	2.64E+05	0.0175	2.20	36.76	6.89E+03
D -- E	34.56	180.00	18.64	150	0.0009	777.22	5.00E-05	1.36	1.76E+05	0.0182	2.70	37.26	3.24E+03
E -- F	34.56	180.00	9.32	100	0.0009	777.22	5.00E-05	1.53	1.32E+05	0.0197	2.90	37.46	6.69E+03
F -- G	6.00	180.00	4.66	62.7	0.0009	777.22	5.00E-05	1.94	1.05E+05	0.0214	18.50	24.50	1.23E+04
G -- H	98.7	194.37	4.66	65	0.0008	766.33	2.00E-05	1.83	1.10E+05	0.0193	0.00	98.70	3.77E+04
H -- I	5.00	208.75	4.66	62.7	0.0007	755.45	5.00E-05	2.00	1.25E+05	0.0211	12.00	17.00	8.61E+03
I -- J	98.7	223.12	4.66	65	0.0006	744.57	2.00E-05	1.89	1.33E+05	0.0188	0.00	98.70	3.77E+04
J -- K	26.00	237.50	4.66	62.7	0.0006	733.69	5.00E-05	2.06	1.54E+05	0.0207	27.00	53.00	2.71E+04
K -- L	98.7	251.87	4.66	65	0.0005	722.81	2.00E-05	1.94	1.69E+05	0.0182	0.00	98.70	3.77E+04
L -- M	5.00	266.25	4.66	62.7	0.0004	711.92	5.00E-05	2.12	2.02E+05	0.0202	12.00	17.00	8.78E+03
M -- N	98.7	280.62	4.66	65	0.0003	701.04	2.00E-05	2.00	2.30E+05	0.0175	0.00	98.70	3.75E+04
N -- O	6.00	295.00	4.66	62.7	0.0003	690.16	5.00E-05	2.19	2.91E+05	0.0198	18.50	24.50	1.28E+04
O -- P	34.56	295.00	9.32	100	0.0003	690.16	5.00E-05	1.72	3.65E+05	0.0180	2.70	37.26	6.85E+03
P -- Q	34.56	295.00	18.64	150	0.0003	690.16	5.00E-05	1.53	4.87E+05	0.0166	2.70	37.26	3.32E+03
Q -- R	34.56	295.00	27.96	150	0.0003	690.16	5.00E-05	2.29	7.30E+05	0.0162	2.70	37.26	7.30E+03
R -- S	34.56	295.00	37.28	200	0.0003	690.16	5.00E-05	1.72	7.30E+05	0.0155	2.20	36.76	2.91E+03
S -- T	50.00	295.00	46.6	200	0.0003	690.16	5.00E-05	2.15	9.13E+05	0.0153	6.20	56.20	6.85E+03
T -- U	5.00	237.50	46.6	200	0.0006	733.69	5.00E-05	2.02	4.84E+05	0.0160	0.00	5.00	2.00E+05
U -- V	20.00	180.00	46.6	200	0.0009	777.22	5.00E-05	1.91	3.30E+05	0.0165	1.50	21.50	2.51E+03
V -- W	5.00	180.00	46.6	200	0.0009	777.22	5.00E-05	1.91	3.30E+05	0.0165	0.00	5.00	5.84E+02
W -- X	25.00	180.00	46.6	200	0.0009	777.22	5.00E-05	1.91	3.30E+05	0.0165	5.50	30.50	3.57E+03
												<b>Caida de Presión Total</b>	4.87E+05

Tramo	Codos radio pequeño	Juntas Rotativas	Válvulas Asiento	Codos radio pequeño	Juntas Rotativas	Válvulas Asiento
F - G	6	3	1	K - L	0	0
G - H	0	0	0	L - M	4	4
H - I	4	4	0	M - N	0	0
I - J	0	0	0	N - O	6	3
J - K	12	6	0			

## 4.5. Bomba de alimentación

El cálculo para la bomba de alimentación se realiza a partir de la pérdida de carga calculada en el apartado anterior teniendo en cuenta, el caudal (Q) y la presión (H) que la bomba.

$$H(m.c.a) = \frac{487\,023\text{ Pa}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{9,81\text{ m}}{\text{s}^2}} = 49,65\text{ mca}$$

De la sección de dimensionado del campo solar sabemos que el caudal másico del circuito que la bomba debe de presurizar es de 46,6 kg/ y teniendo en cuenta la densidad del fluido se tiene:

$$Q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{q_m \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{46,6 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{777,22 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 0,0599 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

la potencia eléctrica que el conjunto de la bomba y el motor eléctrica se calcula según:

$$P_e(W) = \frac{\Delta P (Pa) \cdot Q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{\eta_b \cdot \eta_e} = \frac{487\,023 (Pa) \cdot 0,0599 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{75\%} = 38\,897\text{ W} <> 38,9\text{ kW}$$

Se considera que un rendimiento conjunto  $\eta_e^* \eta_b$  sea igual a 0,75 como común en la industria, es decir que 75% de la potencia eléctrica que demanda el motor, es potencia hidráulica que la bomba cede al fluido.

Para la selección de un fabricante y un modelo de bomba en particular, es necesario tener en cuenta además de las necesidades propias del sistema, que el fluido térmico es bombeado a una temperatura elevada por lo que se eligió la línea de bombas ZTND del fabricante americano SIHI que según sus datos:

Datos Técnicos:

- Capacidad: 9,85 m<sup>3</sup>/min
- Altura total: 90 m
- Temperatura Máxima: 350 °C
- Material: Hierro Dúctil

Al cruzar en el grafico que caracteriza los modelos de bomba la altura necesaria con el caudal del sistema, obtenemos que el modelo que más se adecua a las necesidades de bombeo del proyecto es la: SIHI ZTDN 080-160

## 4.6. Instrumentación y control

Se definen tres sistemas interconectados que se monitorizan en una sala de control centralizado:

### 4.6.1. Campo de captadores

En el campo de captadores, el objetivo es orientar correctamente los captadores para evitar las pérdidas por ángulo de incidencia. Para ello se emplea un sistema abierto en el que se calcula la posición del sol en cada momento mediante un algoritmo, y se mide la posición del captador. Ambas señales se comparan y mediante un controlador se envía la respuesta al sistema de accionamiento. El algoritmo empleado es el Blanco, Muriel y Alarcón desarrollado por el CIEMAT en la PSA de Almería que consigue una precisión de hasta 0,0136 mrad. La instrumentación necesaria es:

- 20 unidades de accionamiento.
- 40 codificadores de ángulo.
- 40 centralitas.
- 30 juntas rotativas

El control local se comunica con el ordenador supervisor en la planta de control de potencia. Este ordenador envía comandos al control local diciendo cuando empezar el seguimiento del sol o cuando parar al final del día.

### 4.6.2. Control del sistema agua aceite

El circuito de vapor se regula a partir de las necesidades del proceso, de modo que en el proceso se requieren diferentes temperaturas en cada una de las unidades según la consigna de temperatura programada para cada operación. Comparando la temperatura actual con la consigna se establece la necesidad de vapor para cada unidad que se obtiene mediante la apertura de la válvula V5.

Teniendo en cuenta que el proceso requiere vapor saturado a la presión de 8 bar la temperatura permanece constante en 175,6 °C siendo el caudal en la corriente 17 la variable que indica la variación en la demanda de calor del proceso.

Se establece un sistema de prioridad en el que prevalece la opción de emplear la energía solar para alimentar el proceso. Así pues se miden caudal y temperatura de la corriente 16 (salida de campo de captadores) y se calcula la energía extraíble. Si la potencia del campo solar es mayor que la del proceso entonces, se envían señales de actuación a las válvulas de tres vías, 1,2,3,4 y 6.

El circuito de aceite se controla en función del circuito de vapor y permite cuatro modos de operación (mostrados en la memoria):

- 1) Generación de vapor desde captadores.
- 2) Acumulación de energía en depósito.
- 3) Extracción de energía del depósito.
- 4) Parada (Stand by).

#### **4.6.3. Estación meteorológica**

La estación meteorológica comprende los siguientes sensores:

- Sensor de radiación directa (pirheliómetro): 1 unidades
- Transmisor de datos de radiación: 1 unidades
- Sensor de dirección de viento: 1 unidad
- Sensor de velocidad de viento: 1 unidad
- Transmisor de datos de velocidad de viento: 1 unidad
- Sensor de dirección de viento (veleta): 1 unidad
- Transmisor de datos dirección de viento: 1 unidad
- Sensor de temperatura ambiental: 1 unidad

Los datos recibidos de la estación meteorológica se transmiten mediante el controlador central FSC al sistema distribuido de control SCD, que calcula la media de las lecturas de la radiación directa y calcula valores apropiados del flujo del fluido térmico HTF.

## 5. RESULTADOS

En este apartado se resumen los resultados obtenidos del proyecto. En la tabla 5 y en la figura 7 se reflejan los resultados mensuales obtenidos para la energía solar producida, la demandada por el proceso y la fracción de energía solar enviada al almacenamiento. Además se obtiene la cobertura mensual dividiendo la energía aportada por el campo de captadores entre la energía requerida por el proceso.

Tabla 5: Resultados de cobertura mensual y anual

MES	cobertura	E SOLAR (MWh)	E PROCESO (MWh)	E ALMACEN (MWh)
ENERO	12,7%	569,67	4501,15	110,39
FEBRERO	25,0%	1017,75	4066,22	210,32
MARZO	31,8%	1430,01	4502,46	499,57
ABRIL	65,1%	2838,55	4357,16	1216,53
MAYO	53,5%	2406,37	4501,83	947,60
JUNIO	79,9%	3482,65	4356,22	1524,15
JULIO	79,0%	3557,94	4501,65	1523,05
AGOSTO	73,0%	3288,61	4502,29	1289,83
SEPTIEMBRE	54,2%	2360,66	4356,88	754,17
OCTUBRE	39,1%	1761,90	4502,28	389,86
NOVIEMBRE	17,1%	743,30	4356,25	113,08
DICIEMBRE	8,3%	374,78	4501,44	59,32
<b>SUMA</b>	<b>44,96%</b>	<b>23832,19</b>	<b>53005,84</b>	<b>8637,88</b>

Se puede ver, como era de esperar, que la cobertura es mucho mayor los meses centrales del año y disminuye a lo largo de los meses de invierno.

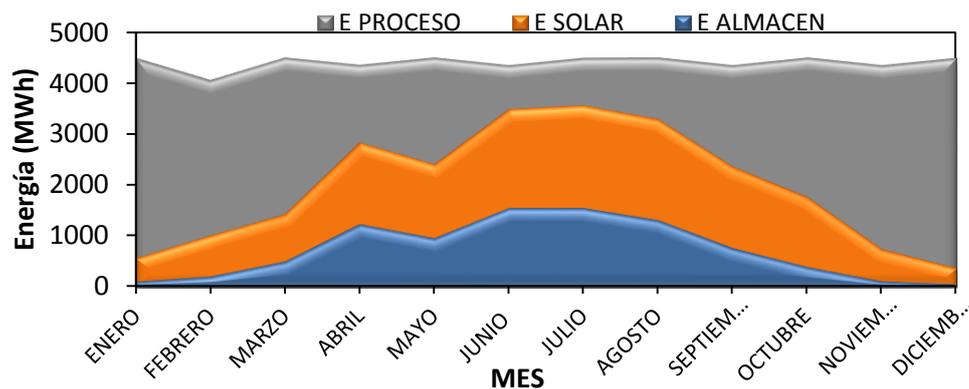


Figura 7: Perfil de aporte y demanda energética mensual

La cobertura anual obtenida es del 44,96 % lo que implicará un ahorro proporcional en el consumo de combustible anual.

## 6. BALANCE ECONÓMICO

El presupuesto total del proyecto asciende a una inversión inicial de €10.264.359,22, distribuidos en las diferentes secciones que componen la instalación, siendo la compra del equipo del campo solar y la planta de generación de valor que juntos son el 69% del capital los apartados más importantes, seguidos por los gastos de gestión, con 17%, como se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 6: Presupuesto Total*

Sección	Presupuesto
Campo Solar	€3.530.400,00
Planta Generación de Vapor	€3.570.000,00
Tubería y Accesorios	€173.541,50
Obra Civil	€809.000,00
Control e Instrumentación	€400.000,00
Gestión	€1.781.417,72
<b>TOTAL</b>	<b>€10.264.359,22</b>

### 6.1. Financiación

Para la financiación del proyecto se considera factible lograr un préstamo a 14 años por parte del IDAE del 50% del total de la inversión inicial con unas condiciones de tipo de interés muy favorables y mejores que las del mercado. El resto del capital necesario para la realización del proyecto se toma que saldrá de recursos propios del Grupo Heineken.

Para los cálculos del coste financiero se tomó en cuenta una tasa de interés de 1,5% superior al Euribor, que a fecha de redacción de este informe es del 2%, lo cual significa que el interés efectivo que condicionará los costes financieros es de 3,5%.

### 6.2. Rentabilidad

En el caso de éste proyecto, se considera como flujo de entrada a caja los ahorros conseguidos en combustible respecto al consumo de gas natural que se tenía anteriormente.

El ahorro de combustible se considera constante a lo largo de los años y logra cubrir cerca del 45% de la demanda energética de la planta. Se considera por lo tanto este ahorro de gas natural y una tasa de incremento anual de 4,8%, en el precio de los hidrocarburos.

La generación de vapor mediante la tecnología CCP tiene unos costes de Operación y Mantenimiento ligados a la propia explotación del campo solar, como lo es:

- Reemplazo del 1% aceite térmico anualmente para retirar impurezas y por degradación del propio aceite por su uso.
- Sustitución del 1% espejos parabólicos de los captadores dañados por diversas causas (fuertes vientos, accidentes durante las labores de limpieza, etc.)
- Lavado de espejos para evitar que la suciedad afecte el rendimiento
- Consumo eléctrico de la bomba principal calculado anualmente
- 1 trabajador a tiempo completo para labores de operación y mantenimiento
- Se considera un 10% de los costos de operación y mantenimiento para imprevistos, o reparaciones menores que pudieran ser necesarios.

*Table 1 Costes de Operación y Mantenimiento*

Concepto	Coste
Reemplazo Aceite Térmico	€27.250,00
Sustitución Espejos	€8.064,00
Lavado espejos	€12.000,00
Consumo Electrico Bomba	€16.911,20
1 Trabajador	€14.400,00
<b>Subtotal</b>	<b>€78.625,20</b>
Imprevistos 10%	€7.862,52
<b>Total</b>	<b>€86.487,72</b>

A lo largo del periodo de explotación, los costos de O&M son afectados por el Índice de Precios al Consumidor el cual se prevé que sea de 3% para los próximos 25 años. Por último, los costes financieros es otro apartado que genera una salida de capital.

Una vez determinado el flujo de caja y las condiciones iniciales, se calcula una Tasa Interna de Retorno de 4,23% con un periodo de retorno de la inversión de 19 años. Debido a que la Tasa de Descuento utilizada es de 6%, mayor al TIR calculado se obtiene un Valor Actual Neto negativo, de -€2.338.965,42,14. En términos generales, desde un punto de vista puramente económico, la inversión no generaría beneficios y valor a la empresa por lo que no sería recomendable realizar el proyecto, sin embargo, al tomar en cuenta otros factores como lo es el medio ambiental, de imagen y marketing para la empresa y sus marcas, el déficit financiero podría no parecer tan importante.

Tabla 7: Flujo de caja e indicadores financieros

Inversión Total		€10.264.359	
Financiación Externa		€5.132.180	50%
Inversión Propia		€5.132.180	50%

4,8%	Incremento Anual Combustible
6,00%	Tasa de Descuento VAN

1,50%	Tasa Interés
2,00%	Euribor
3,50%	T.I.+E.
3%	IPC

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ahorro		€662.005	€693.782	€727.083	€761.983	€798.558	€836.889	€877.060	€919.159	€963.278	€1.009.516	€1.057.972	€1.108.755	€1.161.975	€1.217.750
O&M		-€86.488	-€89.082	-€91.755	-€94.507	-€97.343	-€100.263	-€103.271	-€106.369	-€109.560	-€112.847	-€116.232	-€119.719	-€123.311	-€127.010
C. Financiero		-€487.557	-€490.636	-€493.231	-€495.340	-€496.964	-€498.104	-€498.758	-€498.927	-€498.612	-€497.811	-€496.526	-€494.755	-€492.499	-€49.931
Flujo de Caja	-€10.264.359	€87.961	€114.063	€142.098	€172.136	€204.251	€238.522	€275.031	€313.862	€355.106	€398.858	€445.214	€494.281	€546.165	€1.040.809
F. Acumulado	-€10.264.359	-€10.176.399	-€10.062.336	-€9.920.238	-€9.748.103	-€9.543.852	-€9.305.329	-€9.030.298	-€8.716.436	-€8.361.330	-€7.962.472	-€7.517.258	-€7.022.977	-€6.476.812	-€5.436.003
Retorno	19 años														
Valor Actual		€82.982	€101.516	€119.308	€136.347	€152.628	€168.149	€182.911	€196.921	€210.187	€222.720	€234.533	€245.642	€256.063	€460.351
VAN	-€2.338.965,42														
TIR	4,23%														

Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Ahorro	€1.276.202	€1.337.460	€1.401.658	€1.468.937	€1.539.446	€1.613.340	€1.690.780	€1.771.937	€1.856.990	€1.946.126	€2.039.540
O&M	-€130.820	-€134.745	-€138.787	-€142.951	-€147.240	-€151.657	-€156.206	-€160.893	-€165.719	-€170.691	-€175.812
C. Financiero	€0	€0	€0	€0	€0	€0	€0	€0	€0	€0	€0
Flujo de Caja	€1.145.382	€1.202.715	€1.262.870	€1.325.986	€1.392.207	€1.461.683	€1.534.574	€1.611.045	€1.691.271	€1.775.435	€1.863.728
F. Acumulado	-€4.290.622	-€3.087.907	-€1.825.037	-€499.050	€893.156	€2.354.839	€3.889.413	€5.500.458	€7.191.729	€8.967.164	€10.830.892
V. Actual	€477.928	€473.444	€468.985	€464.551	€460.142	€455.760	€451.403	€447.073	€442.770	€438.494	€434.246

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Repago		€307.931	€321.788	€335.645	€349.501	€363.358	€377.215	€391.072	€404.929	€418.786	€432.643	€446.500	€460.357	€474.213	€48.242
Saldo Vivo	€5.132.180	€4.824.249	€4.502.461	€4.166.817	€3.817.315	€3.453.957	€3.076.742	€2.685.670	€2.280.741	€1.861.955	€1.429.312	€982.812	€522.456	€48.242	€0
Intereses		€179.626	€168.849	€157.586	€145.839	€133.606	€120.888	€107.686	€93.998	€79.826	€65.168	€50.026	€34.398	€18.286	€1.688
C. Financiero		€487.557	€490.636	€493.231	€495.340	€496.964	€498.104	€498.758	€498.927	€498.612	€497.811	€496.526	€494.755	€492.499	€49.931

