

CAPÍTULO 2.

ANÁLISIS DESCRIPTIVO Y TERMODINÁMICO DE LA CENTRAL DE CCP.

Índice

Índice de figuras	4
Índice de tablas	4
Glosario	5
1 Introducción.....	9
2 Parámetros de diseño.....	10
2.1 Emplazamiento de la planta	10
2.2 Punto de diseño	11
2.3 El campo solar.....	11
2.4 Almacenamiento térmico	13
2.5 Generador de aceite térmico.....	14
2.6 Caldera de gas natural	15
2.7 Isla de Potencia.....	15
3 Balances exergéticos	17
3.1 Introducción	17
3.2 Balance exergético en el campo solar	20
3.3 Balance exergético en la caldera de gas natural	20
3.3.1 Exergía de entrada al sistema de combustión.....	20
3.3.2 Exergía de salida del sistema de combustión	21
3.3.3 Exergía perdida de los gases de combustión	23
3.4 Balance exergético en el generador de aceite.....	24
3.5 Balance exergético en el sistema de almacenamiento.....	24
3.6 Exergías destruidas.....	27
3.7 Resultados de los balances exergéticos	27
4 Modos de operación	28
4.1 Modo de operación 1	28
4.2 Modo de operación 2.....	30
4.3 Modo de operación 3.....	31
5 Referencias	33

Índice de figuras

Figura 1.	Valores mensuales de radiación directa normal	11
Figura 2.	Representación de la Isla de Potencia	16
Figura 3.	Diagrama descriptivo de todas la corrientes presentes en la central termosolar de CCP	18
Figura 4.	Proceso de <i>Carga</i>	25
Figura 5.	Proceso de <i>Descarga</i>	25
Figura 6.	Diagrama <i>Modo de operación 1</i>	29
Figura 7.	Diagrama <i>Modo de operación 2</i>	30
Figura 8.	Diagrama <i>Modo de operación 3</i>	31

Índice de tablas

Tabla 1.	Valores mensuales de radiación global y de radiación directa normal.	10
Tabla 2.	Características del captador solar tipo ET-150.....	12
Tabla 3.	Características campo solar.....	12
Tabla 4.	Tamaño de la central termosolar de CCP.....	13
Tabla 5.	Parámetro de operación del campo solar.....	13
Tabla 6.	Características almacenamiento térmico	14
Tabla 7.	Capacidad de almacenamiento térmico (E_T) y cantidad de sales (t)	14
Tabla 8.	Parámetros nominal del generador de aceite de 25 MW _e	14
Tabla 9.	Parámetros nominales del generador de aceite de 12,5 MW _e	15
Tabla 10.	Parámetros de operación de la central.....	17
Tabla 11.	División en bloques de la central termosolar	17
Tabla 12.	Identificación de cada una de las corrientes de la central	19
Tabla 13.	Composición del ambiente de referencia	21
Tabla 14.	Exergías (GWh) para cada una de las corrientes de la central	27
Tabla 15.	Exergía destruida (GWh) por bloque	28
Tabla 16.	Exergías (GWh) de cada corriente en <i>Modo 1</i>	29
Tabla 17.	Exergía destruida(GWh) de cada bloque en <i>Modo 1</i>	29
Tabla 18.	Exergías (GWh) de cada corriente en <i>Modo 2</i>	30
Tabla 19.	Exergía destruida(GWh) de cada bloque en <i>Modo 2</i>	30
Tabla 20.	Exergías (GWh) de cada corriente en <i>Modo 3</i>	31
Tabla 21.	Exergía destruida(GWh) de cada bloque en <i>Modo 3</i>	32

Glosario

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

$c_{AE,C}$	Coste exergético unitario del aceite de entrada en el intercambiador, modo <i>CARGA</i>
$c_{AS,C}$	Coste exergético unitario del aceite de salida del intercambiador, modo <i>CARGA</i>
$c_{AE,D}$	Coste exergético unitario del aceite de entrada en el intercambiador, modo <i>DESCARGA</i>
$c_{AS,D}$	Coste exergético unitario del aceite de salida del intercambiador, modo <i>DESCARGA</i>
$c_{TC,i}$	Coste exergético unitario de las sales en el tanque caliente en estado inicial
$c_{TC,f}$	Coste exergético unitario de las sales en el tanque caliente en estado final
$c_{TF,i}$	Coste exergético unitario de las sales en el tanque frío en el estado inicial
$c_{TF,f}$	Coste exergético unitario de las sales en el tanque frío en el estado final
C	Razón de concentración geométrica
D	Diámetro exterior del tubo absorbedor
\dot{E}_j	Potencia exergética de la corriente j
$\dot{E}_{n,j}$	Potencia energética de la corriente j
E_t	Energía térmica
h_e	Entalpía del fluido de trabajo a la entrada del colector
h_s	Entalpía del fluido de trabajo a la salida del colector
H_{bn}	Radiación global
H_{g0}	Radiación directa normal
I_d	Radiación solar directa en el día de diseño
K_{sin}^θ	Constante de equilibrio estándar correspondiente a la reacción de síntesis considerada
\dot{m}_{cble}	Gasto másico de combustible
N_c	Número de captadores en el campo solar
P_{Sol}	Potencia térmica de radiación solar directa sobre el campo solar
$P_{p,comb}$	Potencia energética perdida de los gases de combustión
p^θ	Presión estándar
q_m	Caudal másico del fluido de trabajo
$q_{m_{aceite}}$	Caudal másico de aceite
S	Sales

S_c	Área de apertura de la superficie reflectiva del captador
T_e	Temperatura ambiente
T_a	Temperatura ambiente
T_{sg}	Temperatura de los gases de salida
T_{Sol}	Temperatura aparente del sol
$\dot{Z}_{ALM,C}$	Coste temporal no exergético debido a los costes mantenidos más los de operación y mantenimiento del sistema de almacenamiento térmico en modo <i>Carga</i>
$\dot{Z}_{ALM,D}$	Coste temporal no exergético debido a los costes mantenidos más los de operación y mantenimiento del sistema de almacenamiento térmico en modo <i>Descarga</i>

ÍNDICE DE SÍMBOLOS GRIEGOS

φ	Ángulo de incidencia de la radiación solar
θ	Ángulo de aceptación
ϑ_B	Coefficiente estequiométrico de cada una de las sustancias que intervienen en la reacción de síntesis
η_{comb}	Rendimiento de la combustión

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AE	Aceite de salida
AS	Aceite de entrada
CCP	Captador cilindro parabólico
F	Fuel
GTER	Grupo de Termodinámica y Energías Renovables
HTF	Heat Transfer Fluid
P	Producto
PAP	Pre calentador alta presión
PBP	Pre calentador baja presión
PCI	Poder Calorífico Inferior
TAP	Turbina alta presión
TBP	Turbina baja presión
TC	Tanque caliente

TF Tanque frío

SUPERÍNDICES

D Destruída

L Pérdidas

θ Estándar

SUBÍNDICES

AE Aceite de entrada

ALM Almacenamiento térmico

AS Aceite de salida

C Carga

CS Campo solar

CGN Caldera de Gas Natural

D Descarga

DEP Depósito de expansión

E Entrada

EL Electricidad

f Estado final

i Estado inicial

IP Isla de potencia

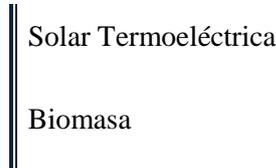
GA Generador de aceite

P Producto

S Salida

1 Introducción

Este proyecto pertenece a la generación de energía eléctrica a partir de la hibridación de dos de las tecnologías renovables con más posibilidades de desarrollo en cuanto a generación eléctrica:



Esta combinación se ha realizado, por las amplias posibilidades que presentan, en cuanto a los objetivos de muchos países de generación de energía eléctrica de manera sostenible y por el carácter innovador que presenta este proyecto en cuanto a la obtención de energía eléctrica íntegramente de origen renovable.

Más concretamente se estudia una central de captadores cilindro parabólicos hibridada con gas natural y biomasa y con almacenamiento térmico en sales fundidas, con aceite térmico como fluido caloportador. La isla de potencia tiene una capacidad de generar 50MW de potencia nominal basado en un ciclo Rankine regenerativo con precalentamiento intermedio y seis extracciones de la turbina.

Los objetivos principales de este proyecto son:

- Conocimiento de la tecnología solar termoelectrica.
- Conocimiento de la tecnología de biomasa.
- Conocimiento de la situación de las tecnologías en el marco energético actual.
- Conocimiento de la normativa vigente en cuanto a las tecnologías solar y de biomasa.
- Estudio de las posibilidades de la hibridación.
- Conocimiento del ciclo termodinámico de la hibridación.
- Conocimiento de las instalaciones de una central de generación de electricidad.
- Conocimiento de las tarifas de la venta de energía.
- Estudio económico de la central.
- Estudio termoeconómico de la central.

En el Capítulo 3, se realiza un estudio económico de diferentes combinaciones de estos aportes de gas natural y biomasa y capacidades del almacenamiento térmico. Se llevan a cabo 12 casos de estudio combinando capacidades de 4, 6 y 8 horas de almacenamiento térmico, aportes de gas natural del 10% y menor del 10% a la producción eléctrica anual y dos tamaños del generadores de aceite para hibridar con biomasa, 12,5 MW_e y 25 MW_e.

En el Capítulo 4 se lleva a cabo un estudio termoeconómico de uno de los 12 casos desarrollado en el Capítulo 3, para una posterior comparación económica.

En este capítulo se dan todos los parámetros necesarios para la descripción termodinámica de la central. Este análisis termodinámico de la central tiene como objetivo la caracterización

termodinámica de todas las corrientes que juegan un papel decisivo en el funcionamiento de la misma, es decir, asignar valores concretos de energía y exergía a cada interacción entre los componentes y entre estos y los límites del sistema.

Se explicará el concepto de exergía, que es la variable fundamental en el desarrollo del análisis termoeconómico, y se expondrán las hipótesis generales realizadas y las ecuaciones empleadas para caracterizar la central termosolar.

El análisis termodinámico, junto con el análisis económico que se realizará posteriormente en el Capítulo 3, conforma el punto de partida del análisis termoeconómico que se realiza en el Capítulo 4. Por ello, es muy importante la exactitud en los cálculos, ya que errores en los datos de partida se pueden ver amplificadas afectando muy negativamente a la solución termoeconómica.

2 Parámetros de diseño

Todos los parámetros de diseño han sido facilitados por el Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER).

2.1 Emplazamiento de la planta

El emplazamiento escogido corresponde a la localidad de Sanlúcar la Mayor, cuyas coordenadas geográficas son latitud 37.4180° Norte y longitud de -6.2310° Oeste. Desde el punto de vista del recurso solar se trata de un emplazamiento con condiciones favorables para el uso de instalaciones termosolares. La irradiación directa normal se aproxima a los 2000 kWh/m^2 a lo largo de un año, cuya distribución mensual se presenta a continuación:

Tabla 1. Valores mensuales de radiación global y de radiación directa normal.

Mes	H_{g0} (kWh/m^2)	H_{bn} (kWh/m^2)
Enero	77,6	121,9
Febrero	92,3	110,6
Marzo	140,8	144,2
Abril	161,7	131,3
Mayo	196,8	174,7
Junio	230,9	232,8
Julio	229,1	247,8
Agosto	217,5	249,7
Septiembre	168,3	192,4
Octubre	113,9	134,5
Noviembre	89,2	145,4
Diciembre	65,5	107,5
Anual	1783,6	1992,7

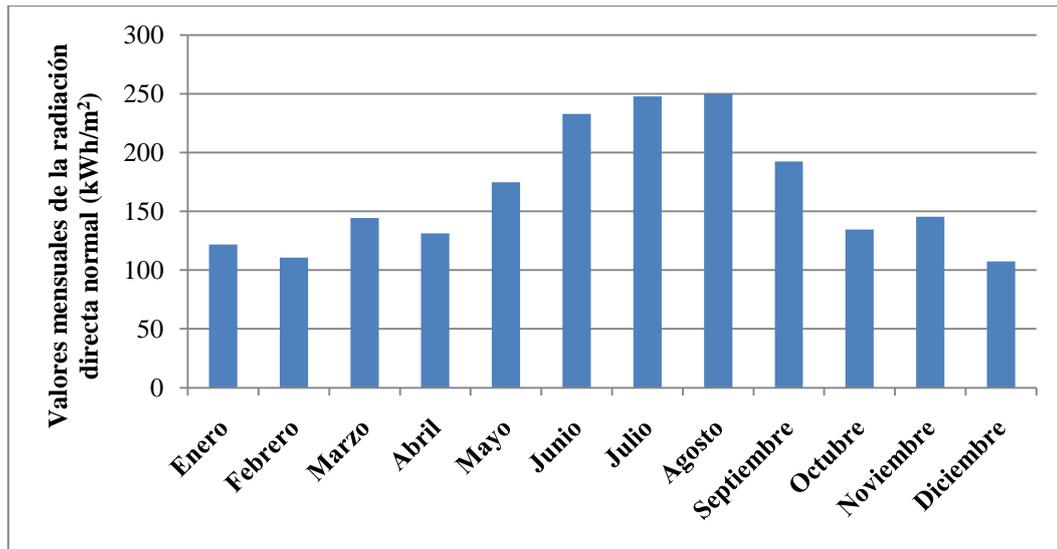


Figura 1. Valores mensuales de radiación directa normal

Los datos de radiación solar son muy importantes para la realización de un proyecto con esta tecnología ya que influyen considerablemente en la viabilidad del mismo. La caracterización del recurso solar ha sido tomada del año de referencia de Sevilla elaborado por el GTER. En cuanto a la temperatura ambiente que se presenta en este lugar, las máximas alcanzadas se encuentran en torno a los 40 °C mientras que las más bajas no descienden de 2 °C.

2.2 Punto de diseño

El punto de diseño es el 21 de junio al medio día solar, al ser un día con condiciones óptimas de radiación incidente solar sobre los espejos de los captadores, tanto en ángulo de incidencia como en cantidad de radiación directa. Cuanto menor sea este ángulo de incidencia, menor área de espejos se pierde, lo que influye en el rendimiento, aumentándolo. Los parámetros característicos de este día son:

- Punto de diseño: 21 de junio, 12:00
- Radiación directa incidente: I_{Sol} (Punto de diseño) = 900W/m²
- Temperatura exterior de diseño: T_{ext} (Punto de diseño) = 25 °C

2.3 El campo solar

El campo solar, que utiliza la tecnología de CCPs, está compuesto por un número de lazos paralelos de captadores cilindro parabólicos. Cada lazo, a su vez, está compuesto por varios captadores conectados en serie de manera que el fluido de trabajo que circula por los tubos absorbedores es calentado al circular desde la entrada a la salida de cada lazo. Al aumentar el número de lazos paralelos se consigue aumentar el caudal del fluido térmico disponible a la salida del campo solar y con ello la potencia generada por el sistema.

El campo solar se constituye de captadores cilindro parabólicos tipo ET-150, con orientación nortesur para captar la máxima cantidad de radiación solar a lo largo del año. Vemos las características de este tipo de captador solar:

Tabla 2. Características del captador solar tipo ET-150

Magnitud	Valor	Unidad
Longitud por módulo	12,27	m
Ancho de abertura del captador	5,76	m
Ancho de abertura del captador	5,76	m
Área de abertura por captador	817,5	m ²
Rendimiento óptico pico	76	%

Las características principales del campo solar se muestran en la siguiente tabla. Algunas de ellas, como el número de lazos de captadores y por tanto el área de captación, varían según lo haga el número de horas de capacidad del almacenamiento térmico mediante sales fundidas, ya que según aumente este número de horas (de 4 a 6 y 8 horas), habrá de aumentar el área de captación del campo solar y con ello el tamaño total de la central termosolar.

No se ha de confundir esto con que aumente el tamaño que ocupan los tanques de sales fundidas, pues más capacidad de almacenamiento no implica más tamaño de estos tanques, sino mayor área de captación.

Se muestra a continuación los parámetros principales del campo solar:

Tabla 3. Características campo solar

Magnitud	Valor
Nº módulos por captador	12
Nº captadores por lazo	4
Nº lazos por grupo	8
Nº subcampos campo solar	4
Lazos de captadores	-
4 horas de almacenamiento	132
6 horas de almacenamiento	148
8 horas de almacenamiento	164

Con esto se observa que a partir del área de captación del campo solar, que tamaño ocupa la central de CCP según la capacidad del almacenamiento térmico en la siguiente tabla:

Tabla 4. Tamaño de la central termosolar de CCP

Almacenamiento térmico	Área de captación (m ²)	Central termosolar (ha)
4 horas	431.640	172,66
6 horas	483.960	193,58
8 horas	536.280	214,51

Tabla 5. Parámetro de operación del campo solar

Magnitud	Valor	Unidad
Temperatura nominal de entrada a lazo	293	°C
Temperatura nominal de salida de lazo	394	°C
Temperatura de salida de lazo mínima	50	°C
Irradiancia mínima técnica	250	W/m ²
Irradiancia mínima precalentamiento	100	W/m ²
Caudal mínimo por lazo	2	kg/s

Las pérdidas térmicas en el campo solar por transporte del aceite térmico se suponen entorno a un 12% de la energía incidente. Estas pérdidas incluyen las pérdidas por transmisión de calor tanto en los canales parabólicos como en los colectores generales.

El fluido térmico HTF utilizado es el Therminol VP-1, una mezcla eutéctica de 73,5% de óxido de difenilo y 26,5% de bifenilo, cuyo rango de trabajo está comprendido entre 12 y 399°C.

2.4 Almacenamiento térmico

El almacenamiento térmico en los sistemas solares permite subsanar algunos de los problemas asociados a la intermitencia de la radiación solar como son la producción energética variables, la ausencia de producción fuera de las horas de sol o en periodos prolongados de nubes, o los transitorios debidos a pasos de nubes, mejorando la operatividad y la productividad de la central.

El almacenamiento se lleva cabo mediante sales fundidas en doble tanque (frío y caliente). Estas sales están formadas por una mezcla compuesta por un 60% NaNO₃ y un 40% KNO₃.

Los elementos básicos de los que consta este sistema son: los dos tanques de almacenamiento, la propia sustancia para el almacenamiento (sales), el intercambiador de calor aceite-sales y los elementos de impulsión.

A continuación se muestran los principales parámetros de este modo de almacenamiento térmico, así como la cantidad de sales necesarias en toneladas y la capacidad de almacenamiento térmico en términos de energía según las horas de capacidad de almacenamiento térmico:

Tabla 6. Características almacenamiento térmico

Magnitud	Valor	Unidad
Temperatura aceite salida cargando	297	°C
Temperatura aceite salida	379	°C
Temperatura tanque caliente	388	°C
Temperatura tanque frío	288	°C
Altura máxima tanques	14	m
Rendimiento intercambiador sales	98	%

Tabla 7. Capacidad de almacenamiento térmico (E_t) y cantidad de sales (t)

Almacenamiento térmico	E_t (MWh _t)	Cantidad sales (t)
4 horas	517,23	16.000
6 horas	775,85	22.780
8 horas	1054,12	28.800

2.5 Generador de aceite térmico

Se estudian dos generadores de aceite, de 12,5 MW_e y de 25 MW_e, con un rendimiento nominal típico del generador del 85%. El primero está dimensionado para generar el 25% de la carga en el punto nominal, y el de 25 MW_e se dimensiona para generar el 50% de la carga, es decir, cuando el ciclo está funcionando a plena carga. Ambos se sitúan en paralelo al campo solar.

Los parámetros de operación del generador de aceite en condiciones nominales 25 MW_e (50% de la carga al generador de vapor aportada desde el campo solar y el otro 50% aportada desde el generador de aceite) son:

Tabla 8. Parámetros nominal del generador de aceite de 25 MW_e

Flujo másico de aceite (kg/s)	Potencia térmica cedida (MW _t)	PCI biomasa (kJ/kg)	Consumo Biomasa (kg/s)
267,7	76	16.720	4,55

Los parámetros de operación del generador de 12,5 MW_e en condiciones nominales (75% de la carga al generador de vapor aportada desde el campo solar y el otro 25% aportada desde el generador de aceite) son:

Tabla 9. Parámetros nominales del generador de aceite de 12,5 MW_e

Flujo másico de aceite (kg/s)	Potencia térmica cedida (MW _t)	PCI biomasa (kJ/kg)	Consumo Biomasa (kg/s)
133,84	38	16.720	2,27

2.6 Caldera de gas natural

Este sistema de aporte térmico auxiliar permite un aporte térmico al fluido térmico de trabajo (HTF) en periodos de baja o nula radiación para mantener la temperatura del HTF. Su objetivo es reducir el número de paradas de la turbina, controlar la temperatura del aceite térmico a la salida del campo solar y maximizar la producción anual.

Se ha considerado un aporte térmico auxiliar mediante caldera de gas natural con un potencia de 15 MW_e en condiciones nominales y un rendimiento del 91%. Esta caldera se encuentra en paralelo con respecto al campo solar y al sistema de almacenamiento, tomando el aceite del depósito de expansión y volcándolo al retorno del campo solar.

2.7 Isla de Potencia

La isla de potencia contiene el generador de vapor y el sistema de generación eléctrica. El generador de vapor se emplea para que a partir de la energía entregada por el aceite térmico y el sistema regenerativo, el vapor pueda alcanzar las condiciones de temperatura y presión requeridas a la entrada de la turbina. Consiste en una serie de intercambiadores de calor: precalentadores de baja presión, desgasificador, precalentadores de alta presión, economizadores, evaporadores, sobrecalentadores y recalentadores. En ellos se calienta el líquido proveniente de la condensación del vapor descargado por la turbina. También hay que considerar como parte de este sistema el condensador y condensador de vapor de sellos, las torres de refrigeración y las bombas de impulsión necesarias (de condensado y de agua de alimentación).

El sistema de generación eléctrica está formado por el conjunto turbina-alternador que convierte en electricidad el trabajo mecánico proporcionado por la rotación del eje de la turbina. Dicha turbina está compuesta de dos cuerpos, uno de alta presión y otro de baja presión. Se realizan varias extracciones de vapor sobrecalentado para incorporarlas al sistema de generación de vapor. El vapor de salida de la turbina de alta presión se recalienta con el aceite térmico antes ser introducido en el cuerpo de baja presión. La descripción básica del ciclo es la siguiente:

El sistema de captación solar calienta el aceite térmico hasta unos 393°C. Una parte de la energía térmica de este aceite se cede en el sistema de generación de vapor de entrada de la turbina de alta presión (dos sistemas en paralelo, cada uno compuesto por: economizador, evaporador y sobrecalentador) y en el proceso de recalentamiento del vapor de salida de la turbina de alta presión para alimentar la de baja presión.

Otra parte (o la totalidad, según estrategia de operación) se destina al sistema de almacenamiento térmico, calentando por tanto las sales fundidas, a través del intercambiador de aceite-sales. Una vez el aceite realiza su transferencia de energía térmica, se almacena en el tanque de expansión, en espera de ser bombeado de nuevo al campo solar.

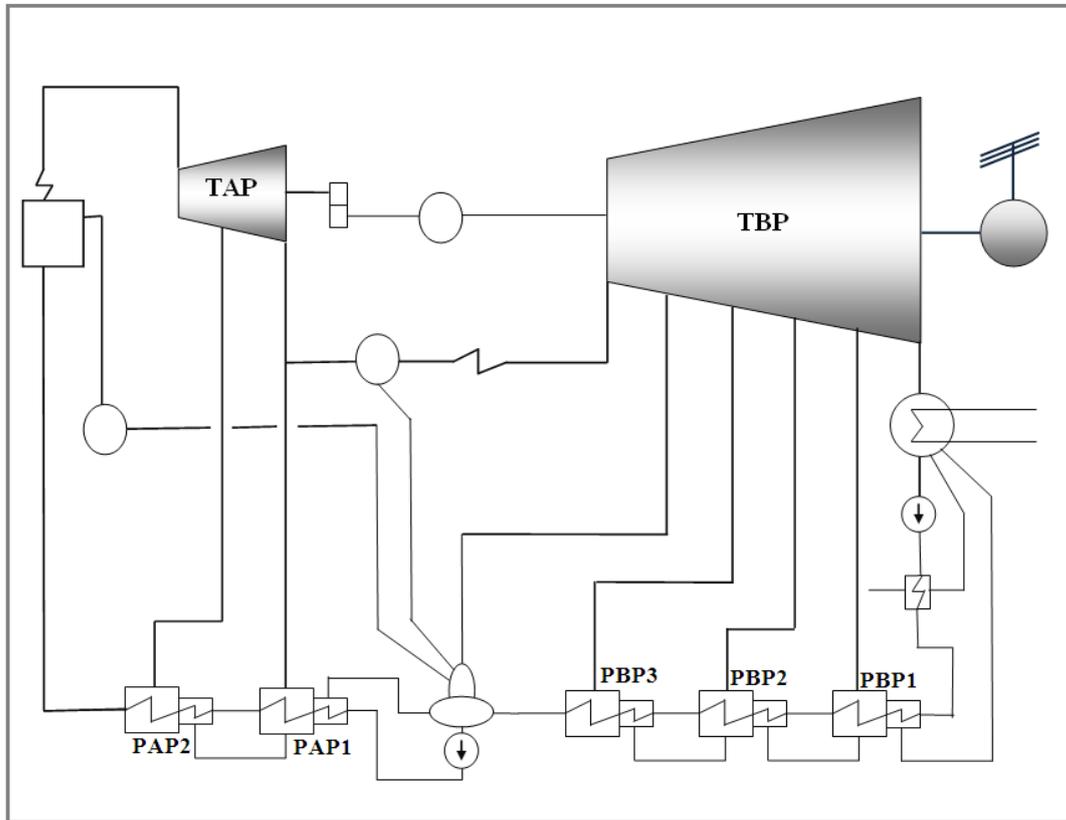


Figura 2. Representación de la Isla de Potencia

El vapor vivo de entrada a la turbina de alta presión (TAP) se expande en ésta, y se realiza una extracción intermedia cuyo aporte térmico se emplea en el segundo precalentador de alta temperatura (PAP2). El vapor de salida de la TAP, en su mayor parte, sufre un recalentamiento para que la temperatura de entrada a la turbina de baja presión (TBP) sea del mismo orden que la de alta. La otra parte del vapor de salida de la TAP, correspondiente a la segunda extracción, se lleva al primer precalentador de alta temperatura (PAP1). En la TBP el vapor se expande hasta una presión muy baja. Además, en ella, se realizan cuatro extracciones intermedias que, en orden de mayor a menor presión, sirven respectivamente para el aporte térmico de los siguientes equipos: desgasificador y precalentadores de baja presión (que se denominarán de mayor a menor presión: PBP3, PBP2 y PBP1).

El vapor de salida de la TBP pasa por el condensador, donde se refrigera mediante torres húmedas en contracorriente. El agua condensada se bombea hacia el condensador de vapor de sellos y de éste va al tren de precalentadores de baja presión. Tras los precalentadores de baja presión, la siguiente etapa es el desgasificador, en cuya salida se bombea hacia los precalentadores de alta. Del PAP2 se pasa a un circuito doble en paralelo formado por economizador, evaporador y sobrecalentador. Mediante el aporte térmico del aceite en este circuito se logra que el vapor alcance las condiciones de entrada a la TAP.

Tabla 10. Parámetros de operación de la central

Tipo de turbina	De condensación con recalentamiento simple, 6 extracciones
Caudal nominal entrada	535 kg/s
Capacidad nominal	50 MW
Autoconsumos	5 MW
Rendimiento ciclo de vapor	38%
Voltaje	11 +/- 10% kv
Frecuencia	50 Hz

3 Balances exergéticos

3.1 Introducción

La exergía es el nombre termodinámico de la calidad de la energía [RUIZ HERNÁNDEZ, V.]. Se define la exergía de un sistema como el “Trabajo neto mínimo requerido para llevar un sistema termodinámico, que se encuentra en equilibrio con el ambiente, a otro estado cualquiera, siendo el ambiente la única fuente térmica o de calor”.

El concepto de exergía se obtiene de la aplicación conjunta del Primer y Segundo Principio de la Termodinámica. Es muy útil para conocer cuánto trabajo se puede obtener de una fuente concreta. Aplicado a las corrientes del sistema que se está analizando, aporta una información valiosa imposible de obtener mediante la aplicación del concepto de energía únicamente.

En este apartado se desarrollan todos los balances exergéticos necesarios para poder realizar en el Capítulo 4 los balances exergéticos llevados a cabo. Se calculan las exergías de cada corriente que interviene en la central, según una división por bloques de la central, que se muestra en la Tabla 11, y que es la base para ese análisis termoeconómico.

Tabla 11. División en bloques de la central termosolar

Central termosolar	Campo solar
	Caldera
	Generador de aceite
	Almacenamiento térmico
	Isla de potencia
	Depósito de expansión

En la Figura 3 se muestra un diagrama descriptivo de la nomenclatura de cada una de las corrientes para facilitar la comprensión.

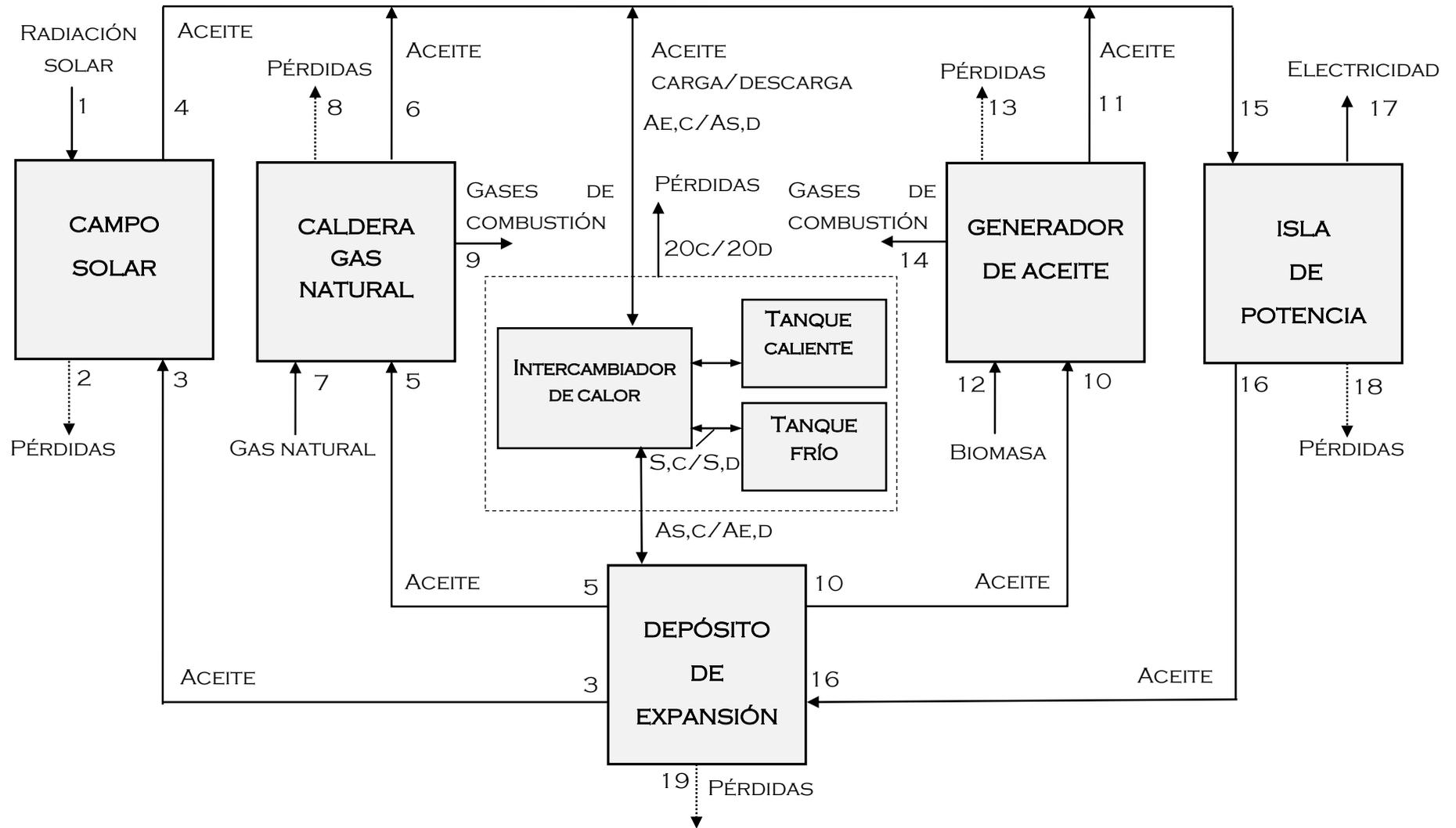


Figura 3. Diagrama descriptivo de todas las corrientes presentes en la central termosolar de CCP

En la siguiente tabla se identifica cada una de las corrientes con la numeración mostrada en la Figura 3:

Tabla 12. Identificación de cada una de las corrientes de la central

CORRIENTE	
1	RADIACIÓN SOLAR
2	PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL CS
3	ACEITE ENTRADA AL CS
4	ACEITE SALIDA DEL CS
5	ACEITE ENTRADA A LA CGN
6	ACEITE SALIDA DE LA CGN
7	GAS NATURAL
8	PÉRDIDAS TÉRMICAS DE LA CGN
9	GASES DE COMBUSTIÓN DE LA CGN
10	ACEITE ENTRADA AL GEN
11	ACEITE SALIDA DEL GEN
12	BIOMASA
13	PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL GEN
14	GASES DE COMBUSTIÓN DEL GEN
15	ACEITE ENTRADA A LA IP
16	ACEITE SALIDA DE LA IP
17	ELECTRICIDAD
18	PÉRDIDAS TÉRMICAS DE LA IP
19	PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL DEP
20	PÉRDIDAS EN C/D DEL ALM
A _E	ACEITE ENTRADA AL ALM EN C/D
A _S	ACEITE SALIDA DEL ALM EN C/D
S	SALES EN C/D

El planteamiento de los balances exergéticos y el método de resolución se extrae directamente de [GÓMEZ CAMACHO, C., 2005] y [MORAN, MICHAEL J., SHAPIRO, HOWARD N.].

3.2 Balance exerético en el campo solar

La potencia exerética asociada a la radiación solar directa incidente en el campo solar se obtiene según:

$$P_{ex,rad} = P_{Sol} \cdot \left(1 - \frac{T_e}{T_{Sol}}\right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

P_{Sol} es la potencia térmica de radiación solar directa sobre el campo solar,

T_e es la temperatura ambiente en K,

T_{Sol} es la temperatura aparente del Sol en K, con un valor de 5.204 K,

La potencia térmica de la radiación incidente se calcula como:

$$P_{Sol} = S_c \cdot N_c \cdot I_d \cdot \cos \varphi \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

N_c es el número de captadores en el campo solar (656),

S_c es el área de apertura de la superficie reflectiva del captador (817,5 m²),

I_d es la radiación solar directa en el día de diseño (21 de junio al mediodía solar: 900 W/m²),

φ es el ángulo de incidencia de la radiación solar el día de diseño (ángulo formado por la radiación solar directa que incide sobre el plano de apertura del colector y la normal a dicho plano. Depende de la hora y el día del año, ya que es función de las coordenadas del sol con respecto a un sistema cartesiano con origen en el colector y provoca que en sus extremos haya una pérdida de superficie reflectiva útil.

3.3 Balance exerético en la caldera de gas natural

3.3.1 Exerética de entrada al sistema de combustión

El gas natural está compuesto principalmente por metano (CH₄). Para la caracterización exerética se considera metano 100% y que la entrada al sistema de combustión se realiza en las condiciones del ambiente de referencia

La corriente de entrada a la caldera está compuesta por la cantidad estequiométrica de metano más el aire necesario con un exceso de aire del 20%. La exerética de la mezcla se calcula aplicando la regla de la aditividad a la exerética molar parcial de cada uno de los componentes con la particularidad de que el metano no está presente en el ambiente. Las ecuaciones necesarias para el cálculo se describen más adelante.

3.3.2 Exergía de salida del sistema de combustión

Esta salida consiste en la corriente de gases de la combustión del metano con el aire, y su exergía se obtiene por el mismo procedimiento que la exergía de entrada al sistema de combustión, pero en este caso será necesario tener en cuenta el término correspondiente al estado, ya que la temperatura de salida de la corriente de gases es diferente a la del ambiente.

Para realizar los cálculos es necesario definir el ambiente de referencia, el cual se considera que se encuentra a 25°C, 1 bar de presión y 50% humedad relativa y cuya composición se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13. Composición del ambiente de referencia

Componente	Fracción molar
Oxígeno	20,6160%
Nitrógeno	76,8391%
Argón	0,9300%
Dióxido de carbono	0,0309%
Agua	1,5840%

A continuación se detallan las ecuaciones necesarias para el cálculo de la exergía de una mezcla con componentes no presentes en el ambiente, como es el caso de la mezcla metano y aire.

Esta exergía se calcula como la suma de la exergía correspondiente al estado de la mezcla, más la exergía reactiva de los componentes de la mezcla que no se encuentren en el ambiente de referencia. La exergía así definida se denomina exergía química.

El cálculo de la exergía de un gas con composición diferente a la del ambiente se realiza a través del concepto de exergía reactiva. La exergía reactiva de una sustancia pura no presente en el ambiente, se calcula mediante su síntesis reversible en una sintetizadora cíclica abierta. Tanto los reactantes como los subproductos se suponen presentes en el ambiente, con el que se intercambian a su temperatura, presión y composición, valores que permanecen constantes durante el proceso. La sustancia pura se encuentra a la temperatura y presión del ambiente, y durante la síntesis se intercambia calor, trabajo y materia con el ambiente, y trabajo con un reservorio de trabajo distinto del ambiente. El valor de este trabajo por mol de sustancia pura sintetizada es su exergía reactiva molar. Esta exergía reactiva es igual a la variación de la función de Gibbs en la reacción de síntesis considerada.

La exergía molar parcial de una sustancia no presente en el ambiente se obtiene como la diferencia de la exergía molar parcial de la sustancia en la mezcla y la de la sustancia pura a la temperatura y presión del ambiente, más la exergía reactiva de la misma:

$$Ex_F^g(T, p, x_c, T^E, p^E, x_c^E) = [Ex_F^g(T, p, x_c, T^E, p^E, x_c^E) - Ex_{F^*}^g(T^E, p^E, x_c^E)] + Ex_{F^*}^g(T^E, p^E, x_c^E) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Se tratan los gases de combustión y el metano sintetizado como una mezcla de gases ideales.

$$[Ex_F^g(T, p, x_c, T^E, p^E, x_c^E) - Ex_{F^*}^g(T^E, p^E, x_c^E)] = \int_{T^E}^T C_{p,T}^\theta(T) \cdot \left(1 - \frac{T^E}{T}\right) dT + R \cdot T^E \cdot \ln\left(\frac{p \cdot x_F}{p^E}\right) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

$C_{p,T}^\theta$ es la capacidad térmica molar a presión constante de la sustancia considerada F

La exergía reactiva de la sustancia F se calcula mediante esta ecuación:

$$Ex_{F^*}^g(T^E, p^E, x_c^E) = -R \cdot T^E \cdot \ln K_{sin}^\theta(T^E) + R \cdot T^E \cdot \ln \prod_{C \in E} \left(\frac{p^E \cdot x_{BE}}{p^\theta}\right)^{\vartheta_B} + R \cdot T^E \cdot \ln\left(\frac{p^E}{p^\theta}\right) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde:

K_{sin}^θ es la constante de equilibrio estándar correspondiente a la reacción de síntesis considerada,

ϑ_B es el coeficiente estequiométrico de cada una de las sustancias que intervienen en la reacción de síntesis,

p^θ es la presión estándar.

Para el cálculo de la constante de equilibrio estándar se parte del conocimiento de las variaciones de entalpía y entropía molares estándar de la reacción de síntesis a la temperatura de referencia. La siguiente ecuación es la utilizada para calcular la constante de equilibrio estándar a la temperatura de referencia.

$$\ln K_{sin}^\theta = -\frac{\Delta H_m^\theta(T_0) - T_0 \cdot \Delta S_m^\theta(T_0)}{R \cdot T_0} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

T_0 es la temperatura de referencia, que se toma igual a la temperatura ambiente,

$\Delta H_m^\theta(T_0)$ es la variación de entalpía molar estándar de la reacción de síntesis a la temperatura de referencia,

ΔS_m^θ es la variación de entropía molar estándar en la reacción de síntesis a la temperatura de referencia.

Para calcular la constante de equilibrio estándar a la temperatura de la mezcla considerada, ya sean los gases de escape o el gas de síntesis, se hace uso de la ecuación de Van't Hoff:

$$\ln \frac{K^\theta(T_0)}{K^\theta(T)} = \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_m^\theta(T_0) + \int_{T_0}^T \Delta C_{p,m}^\theta(T) dT}{R \cdot T^2} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$\Delta C_{p,m}^\theta(T)$ es la variación de la capacidad térmica isóbara molar estándar.

La variación de entalpía molar estándar, la variación de entropía molar estándar y la variación de la capacidad térmica isobara molar estándar de la reacción de síntesis asociada a cada componente no presente en el ambiente, se calculan mediante las sumas de los productos de los cocientes estequiométricos por las correspondientes magnitudes molares, según se muestra a continuación:

$$\Delta H_m^\theta(T_0) = \sum_C \vartheta_B \cdot \Delta_f H_B^\theta(T_0) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$\Delta S_m^\theta(T_0) = \sum_C \vartheta_B \cdot [S_B^\theta(T_0) - S_B^{s.o.}(T \rightarrow 0, p)] \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$\Delta C_{p,m}^\theta(T) = \sum_C \vartheta_B \cdot C_{p,B}^\theta(T) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

$\Delta_f H_B^\theta(T_0)$ es la variación de entalpía molar estándar de la reacción de formación correspondiente,

$S_B^{s.o.}(T \rightarrow 0, p)$ es la entropía molar estándar del sólido ordenado,

Utilizando estas ecuaciones se calcula la exergía molar parcial de todos los componentes de la mezcla de gases, estén o no en el ambiente de referencia. Finalmente, la exergía total de la mezcla es la suma de los productos de la fracción molar por la exergía molar parcial obtenida para cada especie.

3.3.3 Exergía perdida de los gases de combustión

La exergía perdida se define como la de los flujos de materia o energía que salen del volumen de control sin tener un aprovechamiento técnico posterior, siendo descargadas al ambiente. La exergía perdida de un componente es la exergía asociada a las corrientes exergéticas que salen de él sin ser aprovechadas por otro equipo de la instalación.

El rendimiento del sistema de combustión tiene un valor del 90%, asumiendo la combustión completa del gas natural. Por tanto la energía perdida en el sistema de combustión se corresponde con:

$$P_{p,comb} = (\dot{m}_{cble} \cdot PCI) \cdot (1 - \eta_{comb}) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Resultando la exergía perdida como:

$$Ex_{p,comb} = P_{p,comb} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{sg}}\right) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

$P_{p,comb}$ es la potencia energética perdida de los gases de combustión,

T_a es la temperatura ambiente,

T_{sg} es la temperatura de los gases de salida.

3.4 Balance exergético en el generador de aceite

La biomasa utilizada para el funcionamiento del generador de aceite se obtiene de cultivos energéticos. Resulta evidente la dificultad de asignar valores concretos a un recurso no homogéneo en su composición. Sin embargo, podemos estimar los valores a través de un análisis comparativo con los datos conocidos.

Se sabe que la biomasa es de tipo lignocelulósico, y además que su poder calorífico inferior tiene un valor de 16.720 kJ/kg. La biomasa de tipo lignocelulósico se compone en mayor parte de celulosa, además de lignina que se encuentra en menor medida. La celulosa es un polímero homogéneo y lineal de moléculas de glucosa unidas a través de enlaces β -1,4-glucosídico, lo que hace que sea insoluble en agua. De esta forma, utilizando los datos existentes para la celulosa junto con la información disponible de la biomasa, podemos obtener valores exergéticos indicativos.

El cálculo de la exergía de la celulosa ($C_6H_{10}O_5$) se realiza exactamente igual que para cualquier sustancia no presente en el ambiente, como se ha explicado en el apartado anterior para el caso del metano. De esta forma la exergía molar parcial se obtiene a través del cálculo de la exergía reactiva asociada. En este caso no existe exergía asociada al estado ya que éste es el mismo que el ambiente, sólo existe exergía asociada a la síntesis a partir de los componentes del ambiente, es decir la exergía reactiva o variación de la función de Gibbs en la reacción de síntesis considerada.

Los valores obtenidos para la celulosa se extienden a la biomasa usada. La relación entre la exergía molar parcial obtenida y la variación de entalpía de combustión, ambas en condiciones ambientes, tiene un valor similar al de la mayoría de combustibles.

Lo que se obtiene de este modo es la exergía de la molécula de celulosa implicada en la fotosíntesis de la planta. Una vez obtenido este valor se asignan a la biomasa los valores obtenidos para la celulosa. Como conocemos el caudal másico de biomasa introducida según el tamaño del generador de aceite (aunque para el análisis termoeconómico solo se estudia el caso del generador de 25 MW_e) y su poder calorífico, se considerará la exergía de la biomasa como la de la celulosa que sería necesaria introducir para que el valor energético de la corriente sea el mismo que con biomasa, es decir, para que la potencia de entrada a la caldera sea de 76 MW_t.

3.5 Balance exergético en el sistema de almacenamiento

El balance exergético en el sistema de almacenamiento, al ser un sistema no estacionario, se realiza de manera diferente a los balances anteriores. Se producen dos situaciones, una de *Carga* y otra de *Descarga*. El estado de *Carga* se corresponde a cuando el aceite térmico está pasando por el intercambiador de calor aceite-sales, calentando el circuito secundario por el que transcurren las sales, que se están calentando, pasando del tanque frío (TF) al tanque caliente (TC). En el estado de *Descarga* se produce la situación inversa, las sales están calientes en el tanque caliente (TC), y con la impulsión al tanque frío (TF) calientan el aceite térmico que proviene del depósito de expansión y que atraviesa el intercambiador de calor aceite-sales.

En la Figura 4 se representa el modo *Carga* y en la Figura 5 el de *Descarga*:

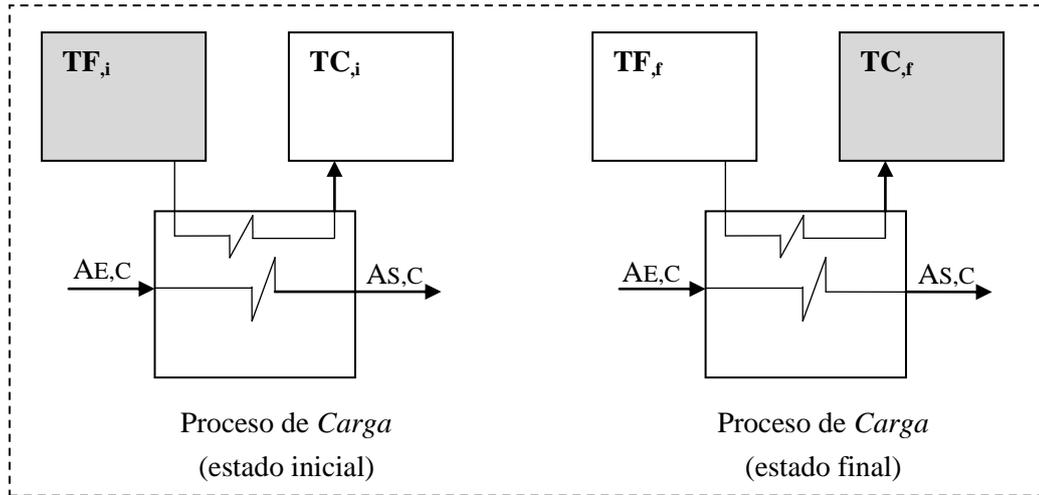


Figura 4. Proceso de *Carga*

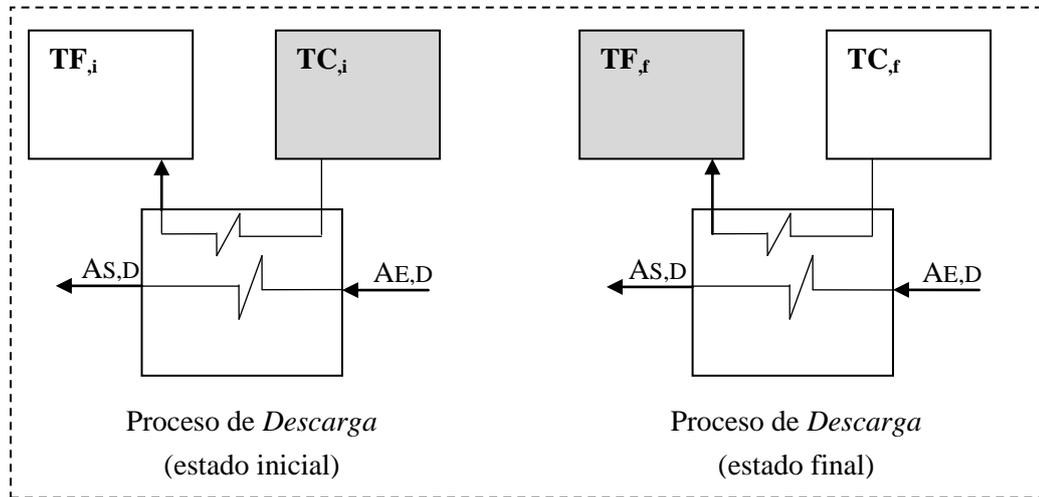


Figura 5. Proceso de *Descarga*

Estos procesos de *Carga* y *Descarga* suceden durante intervalos de tiempo Δt . Por lo tanto se calculan las exergías según estos intervalos de tiempo.

El proceso de *Carga* y el proceso de *Descarga* se producen cada uno un total de 2398 horas, ya que toda la energía que es almacenada en el proceso de *Carga*, se cede después en el proceso de *Descarga*. En la Tabla 14 se muestran los valores exergéticos totales del proceso de almacenamiento según esté en *Carga* o en *Descarga*, calculados como la suma de los valores exergéticos en cada intervalo de tiempo.

A continuación se planten directamente las ecuaciones del balance económico que se utilizarán en el Capítulo 4 en el Análisis Termoeconómico.

Para el modo de *Carga*, se tiene que:

$$\begin{aligned} & (c_{TF,f} \cdot Exc_{TF,f} + c_{TC,f} \cdot Exc_{TC,f}) - (c_{TF,i} \cdot Exc_{TF,i} + c_{TC,i} \cdot Exc_{TC,i}) = \\ & q_{m_{aceite}} \cdot \Delta t \cdot (c_{AE,C} \cdot ex_{AE,C} + c_{AS,C} \cdot ex_{AS,C}) + \dot{Z}_{ALM,C} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

$c_{AE,C}$ es el coste exergético unitario del aceite de entrada en el intercambiador, en k€/GWh,
 $c_{AS,C}$ es el coste exergético unitario del aceite de salida del intercambiador, en k€/GWh,
 $c_{TC,i}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque caliente en estado inicial, en k€/GWh,
 $c_{TC,f}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque caliente en estado final, en k€/GWh,
 $c_{TF,i}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque frío en el estado inicial, en k€/GWh,
 $c_{TF,f}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque frío en el estado final, en k€/GWh,
 $\dot{Z}_{ALM,C}$ es el coste temporal no exergético debido a los costes mantenidos más los de operación y mantenimiento del sistema de almacenamiento térmico en modo *Carga*.

La definición de costes exergéticos unitarios y del coste temporal no exergético se realiza en el Capítulo 4, donde se detallan todos los términos necesarios para el entendimiento de la Termoeconomía.

Para simplificar el análisis termoeconómico que se realiza en el Capítulo 4, se va a suponer que los costes exergéticos unitarios de las sales que salen y entran de los tanques frío y caliente son iguales entre sí:

$$c_{TF,f} = c_{TC,f} = c_{TF,i} = c_{TC,i} = c_{S,C} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Con lo que nos queda:

$$c_{S,C}((Exc_{TF,f} + Exc_{TC,f}) - (Exc_{TF,i} + Exc_{TC,i})) = q_{m_{aceite}} \cdot \Delta t \cdot (c_{AE,C} \cdot ex_{AE,C} + c_{AS,C} ex_{AS,C}) + \dot{Z}_{ALM,C} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Y simplificando con la nomenclatura utilizada en la Figura 3:

$$c_{S,C} \cdot Ex_{sales} = q_{m_{aceite}} \cdot \Delta t \cdot (c_{AE,C} \cdot ex_{AE,C} + c_{AS,C} ex_{AS,C}) + \dot{Z}_{ALM,C} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Para el modo de *Descarga*, se tiene que:

$$q_{m_{aceite}} \cdot \Delta t \cdot (c_{AS,D} \cdot ex_{AS,D} + c_{AE,D} ex_{AE,D}) = (c_{TF,i} \cdot Exc_{TF,i} + c_{TC,i} \cdot Exc_{TC,i}) - (c_{TF,f} \cdot Exc_{TF,f} + c_{TC,f} \cdot Exc_{TC,f}) + \dot{Z}_{ALM,D} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

$c_{AE,D}$ es el coste exergético unitario del aceite de entrada en el intercambiador, en k€/GWh,
 $c_{AS,D}$ es el coste exergético unitario del aceite de salida del intercambiador, en k€/GWh,
 $c_{TC,i}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque caliente en estado inicial, en k€/GWh,
 $c_{TC,f}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque caliente en estado final, en k€/GWh,
 $c_{TF,i}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque frío en el estado inicial, en k€/GWh,

$c_{TF,f}$ es el coste exergético unitario de las sales en el tanque frío en el estado final, en k€/GWh,

$\dot{Z}_{ALM,D}$ es el coste temporal no exergético debido a los costes mantenidos más los de operación y mantenimiento del sistema de almacenamiento térmico en modo *Descarga*.

Al igual que en el modo de *Carga*, para el análisis termoeconómico, se va a suponer que los costes exergéticos unitarios de las sales que salen y entran de los tanques frío y caliente son iguales entre sí:

$$c_{TF,f} = c_{TC,f} = c_{TF,i} = c_{TC,i} = c_{S,D} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Con lo que nos queda:

$$q_{m_{aceite}} \cdot \Delta t \cdot (c_{AS,D} \cdot ex_{AS,D} + c_{AE,D} ex_{AE,D}) = c_{S,D} ((Exc_{TF,i} + Exc_{TC,i}) - (Exc_{TF,f} + Exc_{TC,f})) + \dot{Z}_{ALM,D} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Y simplificando con la nomenclatura utilizada en la Figura 3:

$$q_{m_{aceite}} \cdot \Delta t \cdot (c_{AS,D} \cdot ex_{AS,D} + c_{AE,D} ex_{AE,D}) = c_{S,D} \cdot Ex_{sales} + \dot{Z}_{ALM,D} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

3.6 Exergías destruidas

La exergía destruida se calcula por bloques y se estima a partir de un balance exergético sobre cada uno de estos bloques considerados en la central.

En la nomenclatura utilizada, el superíndice D hace referencia a esta exergía destruida, dada por las la irreversibilidades del sistema.

3.7 Resultados de los balances exergéticos

A continuación se muestran los valores obtenidos en los balances exergéticos para cada una de las corrientes que fueron definidas en la Figura 3, y que son la base de partida del Análisis Termoeconómico.

Tabla 14. Exergías (GWh) para cada una de las corrientes de la central

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E (GWh/año)	958,1	305,5	333,1	545,7	36,23	66,87	79,51	2,96	6,96	158,43

Corriente	11	12	13	14	15	16	17'	18	19
E (GWh/año)	381,35	613,7	46,83	49,15	858,82	431,58	315	56,12	96,14

Corriente	AE,C	AS,C	S,C	20,C	AE,D	AS,D	S,D	20,D
E (GWh/año)	214,78	119,49	93,38	0,95	216,67	130,76	86,563	0,87

Tabla 15. Exergía destruida (GWh) por bloque

\dot{E}^D (k€/año)	\dot{E}_{CS}^D	\dot{E}_{CGN}^D	\dot{E}_{GA}^D	$\dot{E}_{ALM,C}^D$	$\dot{E}_{ALM,D}^D$	\dot{E}_{IP}^D
	439,97	38,85	292,45	0,95	0,87	56,12

4 Modos de operación

En este apartado se definen termodinámicamente diferentes modos de operación de la central, calculándose las exergías de cada una de las corrientes según el modo de operación que se esté estudiando. El método de cálculo de estas exergías ha sido explicado en el apartado anterior.

Concretamente se van a estudiar 3 modos de operación. Estos son los modos que se producen durante un intervalo de tiempo total mayor, aunque no se produzcan de manera continua.

El *Modo de operación 1* produce energía eléctrica a plena carga a partir de la energía solar que incide sobre los espejos, almacenando el excedente en el sistema de almacenamiento.

En el *Modo de operación 2* la energía eléctrica neta se está produciendo a carga parcial, con recursos procedentes únicamente de la biomasa.

Por último en el *Modo de operación 3* se está produciendo a plena carga a partir de la energía procedente del almacenamiento y de la biomasa, recirculando el flujo procedente del campo solar debido a que su temperatura es inferior a la de descarga del sistema de almacenamiento.

No se incluye un modo de operación que incluya la radiación solar y la biomasa conjuntamente, debido a que para que el generador de aceite entre en funcionamiento, hay que realizar previamente a la simulación de cada día, un análisis energético de dicho día cuyo principal objeto es determinar el arranque y la parada del generador de aceite. En base a los datos de radiación se analiza si es necesario o no que entre en funcionamiento el generador de aceite térmico. Este generador cuesta mucho arrancarlo, por lo que sólo entra en funcionamiento si va a operar de manera continua las 24 horas del día, lo que implica un día con mínima o nula radiación solar.

Tampoco se incluye la caldera de gas natural en un modo de operación, debido a que el tiempo que está funcionando es mínimo, ya que en la simulación anual estudiada, este apoyo auxiliar fósil solo se utiliza cuando ni la biomasa ni el almacenamiento están operativos.

4.1 Modo de operación 1

En este primer modo de operación, la producción de energía eléctrica se realiza a plena carga a partir de la energía solar incidente almacenando la energía sobrante en el sistema de almacenamiento (modo *Carga*). Se deriva el flujo necesario para hacer funcionar la turbina a plena carga hacia el generador de vapor y el restante se vierte en el sistema de almacenamiento. Este modo de operación se produce en un total de 46,01 días.

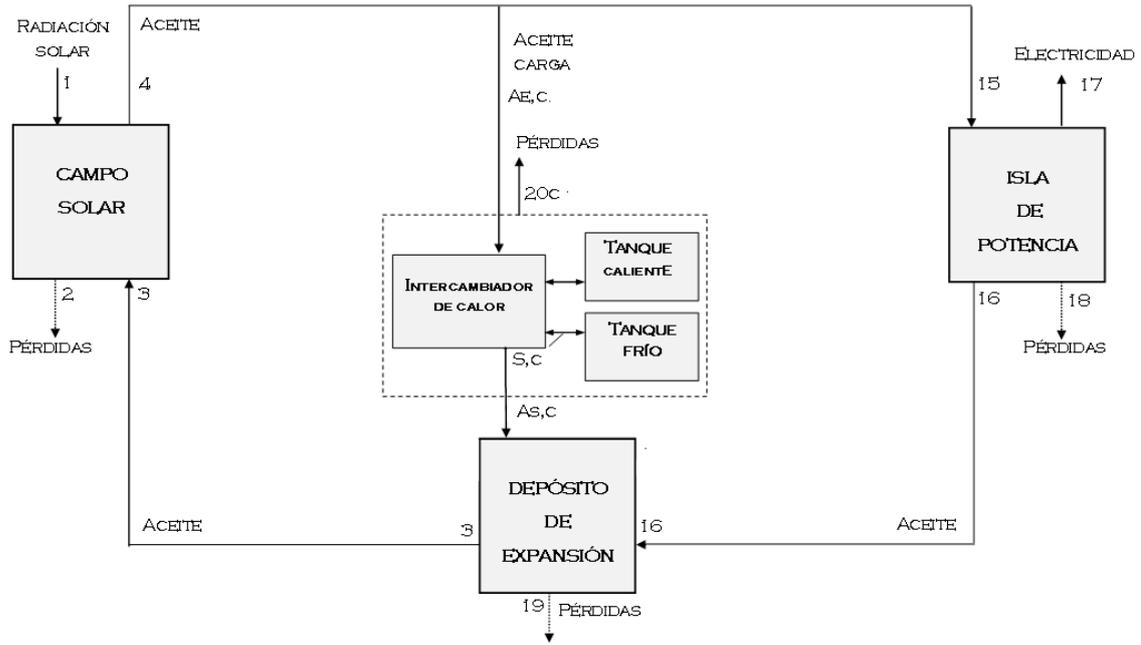


Figura 6. Diagrama *Modo de operación 1*

Las exergías para cada una de las corrientes de este modo de operación se representan en la Tabla 16.

Tabla 16. Exergías (GWh) de cada corriente en *Modo 1*

Corriente	1	2	3	4	15	16	17	18	19
E (GWh/año)	414,2	100,1	159,4	286,3	165,9	91,24	54,83	9,89	0,50

Corriente	AE,C	AS,C	S,C	20,C
E (GWh/año)	120,5	67,13	52,3	0,53

Se muestra también la exergía destruida de cada bloque:

Tabla 17. Exergía destruida (GWh) de cada bloque en *Modo 1*

\dot{E}^D (k€/año)	\dot{E}_{CS}^D	\dot{E}_{ALM}^D	\dot{E}_{DEP}^D	\dot{E}_{IP}^D
	187,16	0,53	0,50	9,89

4.2 Modo de operación 2

En este segundo modo de operación se produce la producción de energía eléctrica a carga parcial con los recursos procedentes de la biomasa, debido a que la temperatura del flujo procedente del campo solar no es de calidad y el almacén no se dispone de la energía necesaria para trabajar a plena carga. Este modo de operación se lleva a cabo un total de 152,43 días.

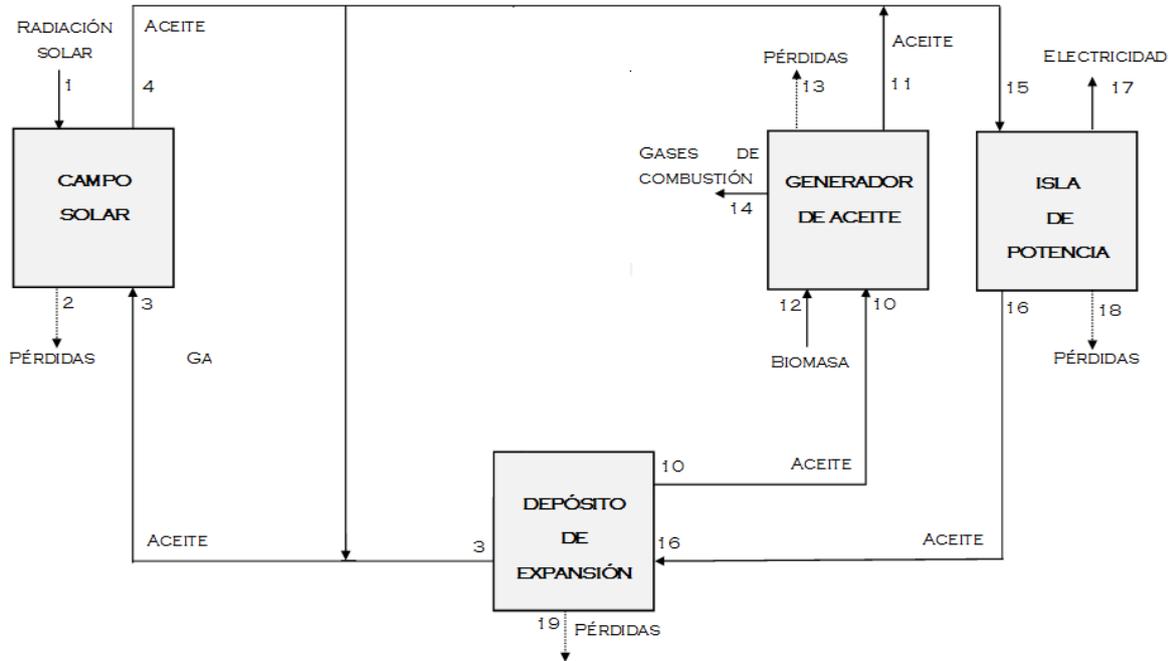


Figura 7. Diagrama *Modo de operación 2*

Las exergías para cada una de las corrientes de este modo de operación se representan en la siguiente tabla, calculadas según los balances exergéticos explicados en el Apartado 3, en un intervalo de tiempo de 152,43 días.

Tabla 18. Exergías (GWh) de cada corriente en *Modo 2*

Corriente	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
E (GWh/año)	37,70	149,14	317,32	23,58	25,41	151,64	42,13	82,18	13,66	0,05

Se muestra también la exergía destruida de cada bloque:

Tabla 19. Exergía destruida (GWh) de cada bloque en *Modo 2*

\dot{E}^D (k€/año)	\dot{E}_{GEN}^D	\dot{E}_{DEP}^D	\dot{E}_{IP}^D
	155,05	0,05	13,66

4.3 Modo de operación 3

La producción de energía eléctrica se realiza a plena carga a partir de la energía procedente del almacenamiento y de la biomasa, recirculando el flujo procedente del campo solar debido a que su temperatura es inferior a la de descarga del sistema de almacenamiento. Este modo de operación se lleva a cabo en un total de 94,64 días.

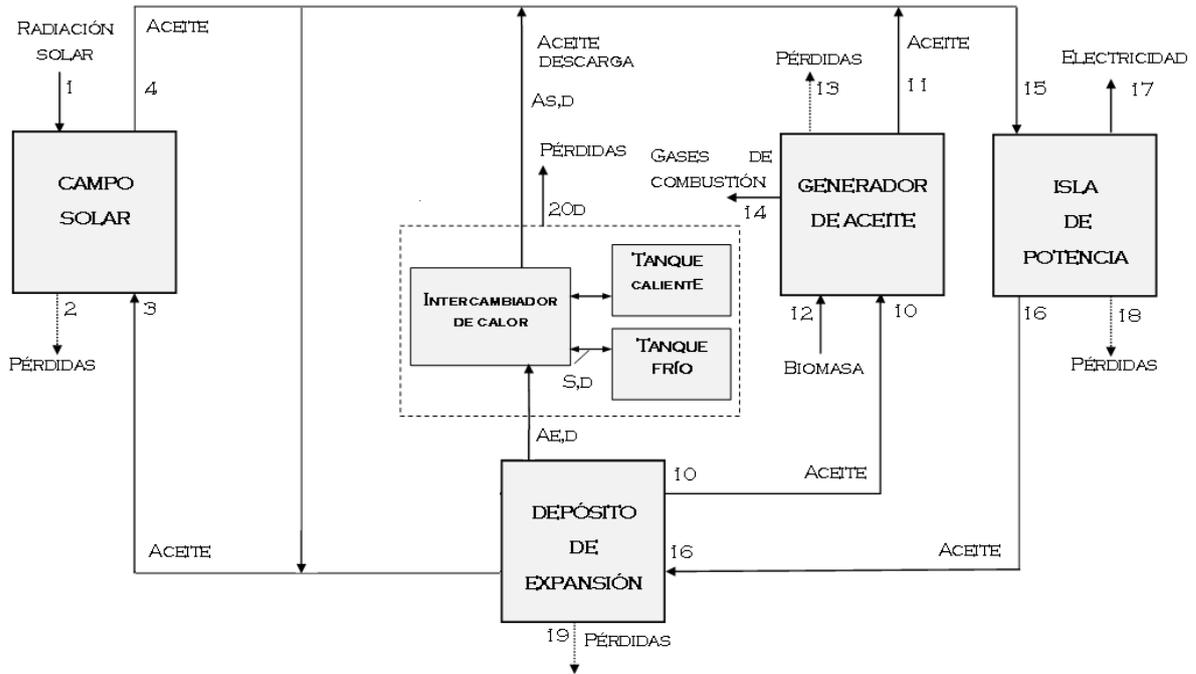


Figura 8. Diagrama *Modo de operación 3*

Las exergías para cada una de las corrientes de este modo de operación se representan en la Tabla 20, y se calculan según los balances exergéticos explicados en el Apartado 3.

Tabla 20. Exergías (GWh) de cada corriente en *Modo 3*

Corriente	10	11	12	13	14	15	16	17	18
E (GWh/año)	74,54	148,41	197,03	15,47	15,78	326,43	180,04	106,53	19,93

Corriente	19	AE,D	AS,D	S,D	20,D
E (GWh/año)	0,05	95,81	178,13	82,95	0,83

Se muestra también la exergía destruida de cada bloque:

Tabla 21. Exergía destruida (GWh) de cada bloque en *Modo 3*

\dot{E}^D (k€/año)	\dot{E}_{GEN}^D	\dot{E}_{ALM}^D	\dot{E}_{DEP}^D	\dot{E}_{IP}^D
	91,61	0,83	0,05	19,93

5 Referencias

- AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA [en línea]. *Biblioteca virtual*. <<http://www.agenciaandaluzadelaenergía.es>>
- CARAZO, A. Cifras básicas de la Relación MADERA-Fijación de Carbono-CO₂ atmosférico. AFAP S.A.
- CARRASCO CERCA, D. Análisis Termoeconómico de una Planta de Cogeneración con Biomasa. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2005.
- CIEMAT. Curso sobre Sistemas Solares Térmicos de Concentración. Noviembre de 2009.
- GAVILÁN CONDE, J.M. ORDÓÑEZ BARREIRO, I. *Análisis energético y exergético del sistema de disco parabólico con motor Stirling (Eurodish)*. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2010.
- GCEP. An Assessment of Biomass Feedstock and Conversion Research Opportunities. Standford University. 2005
- GÓMEZ CAMACHO, C. *Apuntes de Termodinámica*. 2º Curso de Ingeniería Industrial. Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingeniería , Sevilla, 2005.
- GÓMEZ CAMACHO, C. *Análisis Termodinámico de Procesos Industriales*. 5º Curso de Ingeniería Industrial. Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingeniería, Sevilla, 2009.
- GTER. Datos de la simulación anual para el año de referencia de Sevilla elaborado por el Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER). Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2010.
- HERMANN, WESTON A. *Quantifying global exergy resources*. Energy 31(12), 2006, pp.1685-1702.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) [en línea]. Energías Renovables. Plan de Energías Renovables 2011-2020 (Informe de previsión). <<http://www.idae.es>>
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) [en línea]. Biomasa: Cultivos Energéticos. <<http://www.idae.es>>
- IGNATENKO, O., VAN SCHAİK, A., REUTER, M.A. *Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems*. Minerals Engineering 20 (2007), pp. 862-874.
- KLEIN, S.A. *Engineering Equation Solver (EES) v8.400, Educational Version 29/06/2009*. Licencia para la Universidad de Sevilla. <http://www.fchart.com>.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. La Energía en España 2009. <http://www.mityc.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_2009.pdf>
- MORAN, MICHAEL J., SHAPIRO, HOWARD N. Fundamentos de Termodinámica Técnica. 2ª Edición. Editorial Reverté, S.A., 2004.

PANER. Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España 2011-202.

ROSEN, M.A. *Exergy and economics: Is exergy profitable?* Exergy, An Int. J., 2(4), 2002, pp.218-220.

SILVA PÉREZ, M.A. *Sistemas Termosolares de Concentración. Energías Renovables, 5º Ingeniero Industrial*. Apuntes de la asignatura Energías Renovables de 5º de Ingeniería Industrial. Grupo Termodinámica y Energías Renovables. 2008.

THERMINOL VP-1, Heat transfer Fluid by Solutia. <<http://www.therminol.com>>

RUIZ HERNÁNDEZ, V. *Sobre la exergía*. <<http://www.valerianoruiz.com>>

SAIDUR, R., AHAMED, J.U., MASJUKI, H.H. *Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers*. Energy Policy 38 (2010), pp. 2188-2197.

SERRANO, J.C., CARRANZA SÁNCHEZ, Y.A. *Análisis Teórico de la Combustión en Quemadores de Gas Natural*. Scientia Et Technica, 11(29), 2005, pp. 139-143.

ZARZA MOYA, E. *Sistemas de Colectores Cilindro-Parabólicos*. Almería.

