

PROPUESTA DE UNA NUEVA METODOLOGÍA DE BAJO COSTE, PARA EL DISEÑO BÁSICO DE PLANTAS SOLARES TERMOELÉCTRICAS

Aurelio Azaña García

ESI Sevilla / Azcattec Tecnología e Ingeniería

Narciso Moro Garrido

Altran Innovación

Abstract

This paper explains how you can take out the basic design of a complete thermal solar plant using simple program like *Microsoft Excel*. It enables to generalize to any type of solar thermal power plant with parabolic cylindrical collectors.

With this work, we want to open a line of development for the simulation of complex power plants using very simple and easy to handle, in an effort to put the engineering design tools available to everyone.

The methodology we use is the same for other industrial plants where there is a process, either a thermal process (case) as a chemical process (which will cause further development work).

The idea is to use the tool (which is available to any engineer at a very reasonable price) to avoid the use of tools to more specialized engineering software whose licenses are beyond the reach of most design engineers. This would avoid expensive licenses to use tools, which are: *Termoflow, Aspen*, etc.

Keywords: *design of industrial plants; solar thermal power plants; low-cost design methodologies*

Resumen

En esta ponencia se explica cómo puede llevarse a cabo el diseño básico de una planta solar termoeléctrica completa usando sencillas hojas del famoso programa *Excel* de *Microsoft*. El software desarrollado permite generalizar para cualquier tipo de planta solar termoeléctrica de captadores cilíndrico parabólicos.

Con este trabajo, se quiere abrir una línea de desarrollo para la simulación de plantas de energía complejas utilizando herramientas muy sencillas y fáciles de manejar, en un afán de poner las herramientas de diseño de ingeniería al alcance de todos.

La metodología que utilizaremos será la misma para otro tipo de plantas industriales en las que haya un proceso, ya sea un proceso térmico (caso que nos ocupa) como un proceso químico (que será motivo de desarrollo en posteriores trabajos).

La idea es utilizar la herramienta (que está a la disposición de cualquier ingeniero a un precio muy razonable) y así evitar el uso de herramientas de software de ingeniería más especializadas cuyas licencias están fuera del alcance de la mayoría de los ingenieros de diseño. Ello evitaría emplear herramientas con licencias caras, tales como: *Termoflow*, *Aspen*, etc.

Palabras clave: *diseño de plantas industriales; plantas solares termoeléctricas, cálculos térmicos; métodos de diseño de bajo coste; simplificación de métodos de cálculo*

1. Introducción

En el trabajo que se presenta a continuación, se expone una metodología de cálculo aplicable a todo tipo de plantas de proceso, bien sea térmico (caso que nos ocupa) o químico (que será motivo de otros trabajos futuros).

Se pretende explicar cómo puede llevarse a cabo el diseño básico de una planta solar termoeléctrica completa usando sencillas hojas del famoso programa *Excel* de *Microsoft*, así como mostrar el potencial de la herramienta desarrollada.

Como se ha comentado con anterioridad, la idea es utilizar esa herramienta (que está a la disposición de cualquier ingeniero a un precio muy razonable) y así evitar el uso de herramientas de software de ingeniería más especializadas cuyas licencias están fuera del alcance de la mayoría de los ingenieros de diseño, como: *Termoflow*, *Aspen*, etc., en un afán de poner las herramientas de diseño de ingeniería al alcance de todos, a la vez que se pretende abrir una línea de desarrollo para la simulación de plantas de energía complejas utilizando herramientas muy sencillas y fáciles de manejar.

2. Descripción del problema a resolver

Se aplicará esta herramienta al caso concreto del diseño de una planta solar termoeléctrica de 5 MW, si bien se podría utilizar la misma herramienta en plantas de potencias distintas, siempre que el proceso sea el mismo.

La energía solar es captada por un sistema de colectores cilíndrico parabólico (figura 1) usando como fluido caloportador un aceite térmico.

La energía captada se lleva a un ciclo agua-vapor convencional, compuesto de Recalentador, Generador de Vapor y Sobrecalentador (figura 2).

Figura 1: Principio de Funcionamiento de un Colector Cilindro-Parabólico (CCP)

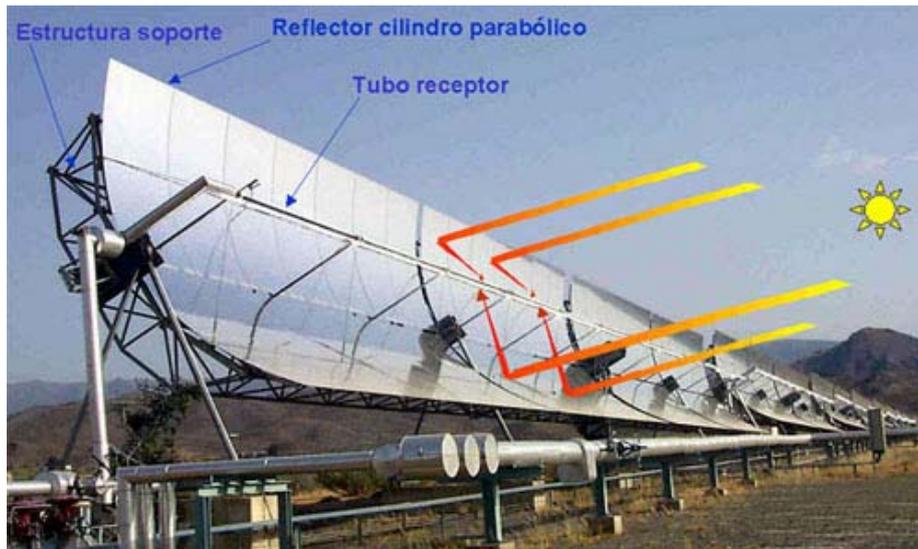
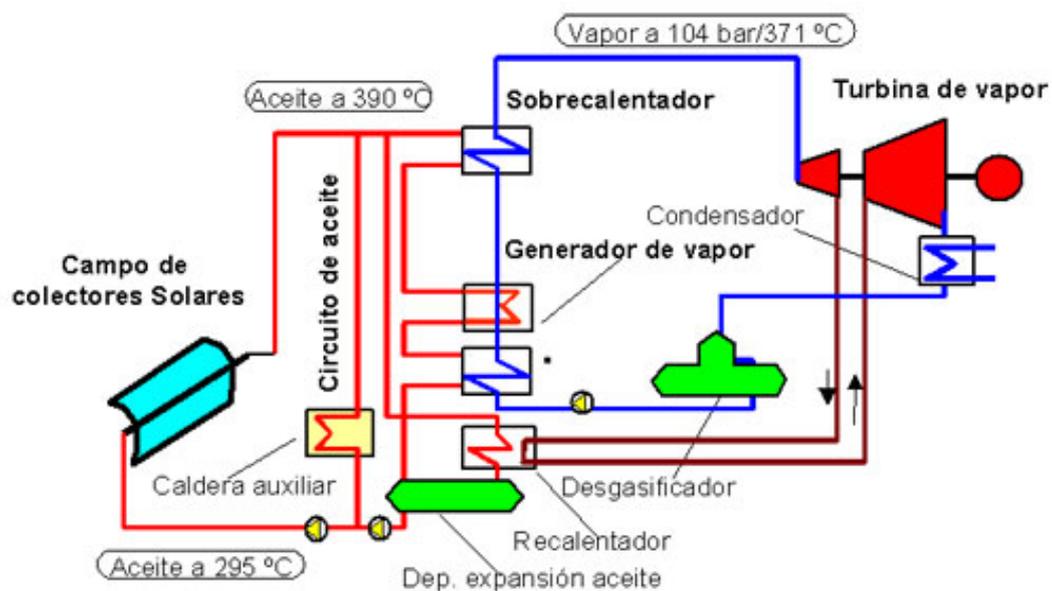


Figura 2: Esquema Básico de Planta Solar Termoelectrica de CCP con Tecnología HTF (*Heat Transfer Fluids*)



La energía excedentaria del proceso durante las horas de máxima radiación es almacenada en un sistema de sales fundidas confinadas en tanques especiales. De ese modo, en condiciones fuera de diseño (nubes, ocaso solar), la planta puede seguir funcionando mediante la energía de apoyo almacenada. Ello le da a dichas plantas la característica de gestionabilidad en los términos marcados por la legislación.

3. Fundamentos teóricos

Los sistemas simulados corresponden a:

1. Sistema de captación, consistente en un campo solar de CCP.
2. Sistema o circuito primario de aceite térmico.
3. Sistema de dilatación del aceite térmico, consistente en un depósito de expansión.
4. Sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas.
5. Sistema de hibridación, consistente en una caldera de apoyo fósil.
6. Sistema de transferencia térmica y generación del vapor, formado por un tren de intercambiadores.
7. Sistema o circuito secundario de agua-vapor.
8. Sistema de expansión del vapor, consistente en una turbina de vapor de varios cuerpos.
9. Sistema de condensación del vapor, consistente en un intercambiador de calor junto con una torre de refrigeración.
10. Sistemas auxiliares (Desaireador, Bombas, Válvulas etc.)

Dichos sistemas están simulados mediante las ecuaciones generales que rigen el comportamiento de los mismos, consiguiendo una fiabilidad del 100% en los resultados obtenidos.

En las *figuras 3 y 4* se muestran los diagramas de procesos obtenidos para los circuitos primario y secundario, respectivamente.

4. Alcance de los trabajos

La simulación de la planta se realizaría a nivel de ingeniería básica, definiendo todos los componentes a través de sus hojas de datos.

Además del cálculo térmico detallado de toda la planta como de los equipos que la componen, se han incluido algunos cálculos mecánicos de algunos equipos de relevancia como son, por ejemplo, el depósito de expansión de aceite o los tanques de almacenamiento de sales fundidas. En la *figura 6* se muestra parte de la hoja de datos del

depósito de expansión de aceite, donde se encuentran recopiladas sus principales características térmicas y mecánicas.

La sección del generador eléctrico y transformación de tensión quedarían fuera del alcance de la simulación proyectada.

Figura 3: Diagrama de Proceso del Circuito Primario de Aceite

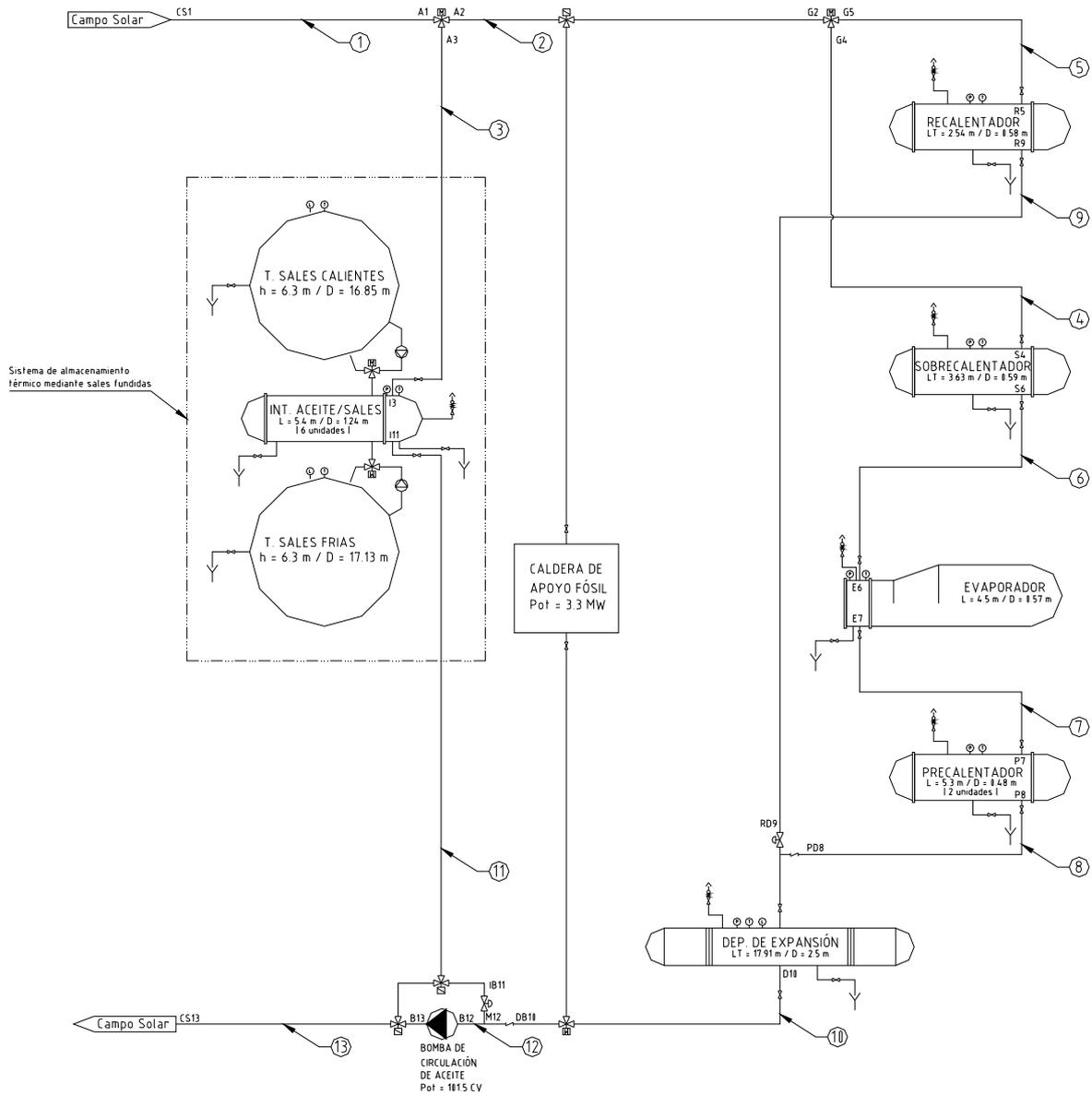
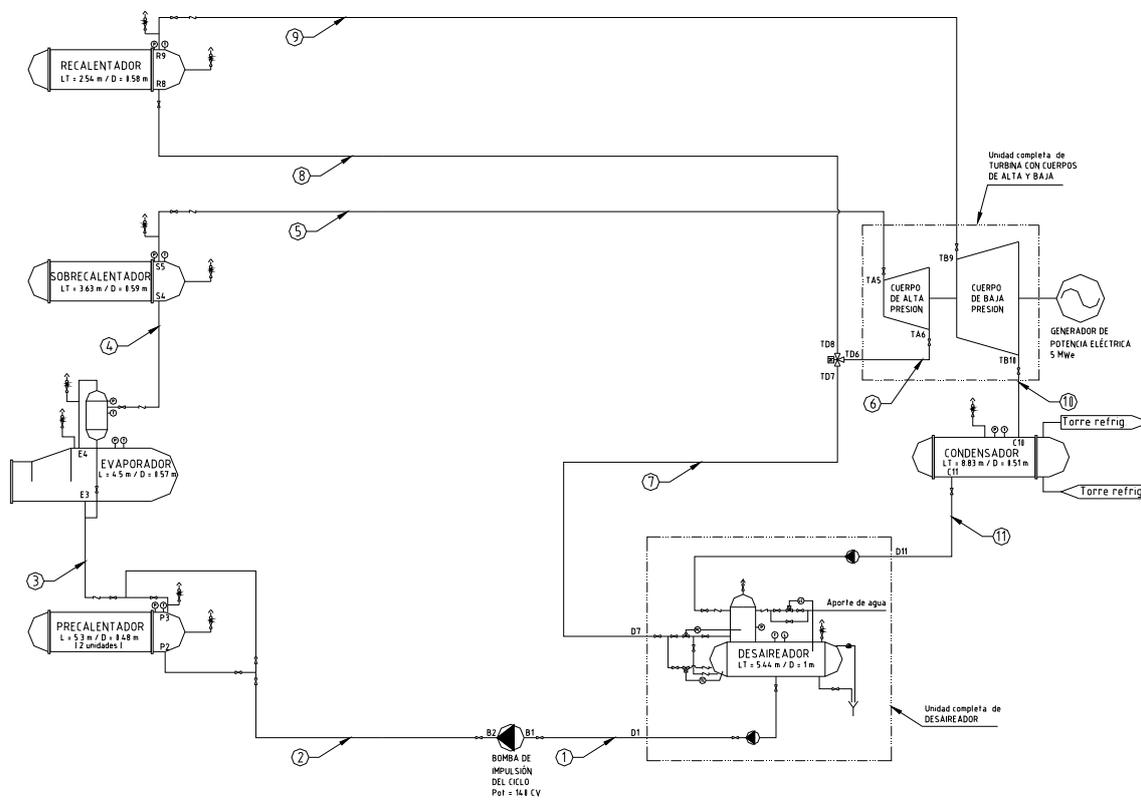


Figura 4: Diagrama de Proceso del Circuito Secundario de Agua-Vapor



5. Descripción de la aplicación propuesta

En este apartado se va a mostrar de forma general la metodología de cálculo seguida en el diseño de la planta solar termoeléctrica. Además, se pretende explicar de forma general el funcionamiento del programa de cálculo diseñado al respecto, el cual consiste en una serie de hojas de cálculo en *Excel*, vinculadas entre sí, y con el menor número de datos a introducir, necesarios para abordar todo el proceso de cálculo.

Quedaría pendiente, quizás para una etapa futura, el tratar de sistematizar de alguna forma el programa de cálculo mediante la introducción de *formularios y macros*, de manera que habría que introducir sólo los datos, generándose todos los resultados sin tener que acudir a ajustes manuales de parámetros. No obstante, el tiempo empleado en ajustar todas las variables implicadas, una vez introducidos los datos para una determinada planta solar termoeléctrica objetivo, es relativamente corto, teniéndose entre las manos una herramienta realmente potente.

La metodología de cálculo consiste aproximadamente en ejecutar los cálculos en el sentido que marca el flujo de energía por la planta, es decir, tratando de realizar los cálculos por

etapas partiendo de la captación de la radiación en forma de potencia térmica, y terminando con la generación de potencia mecánica en el eje de la turbina.

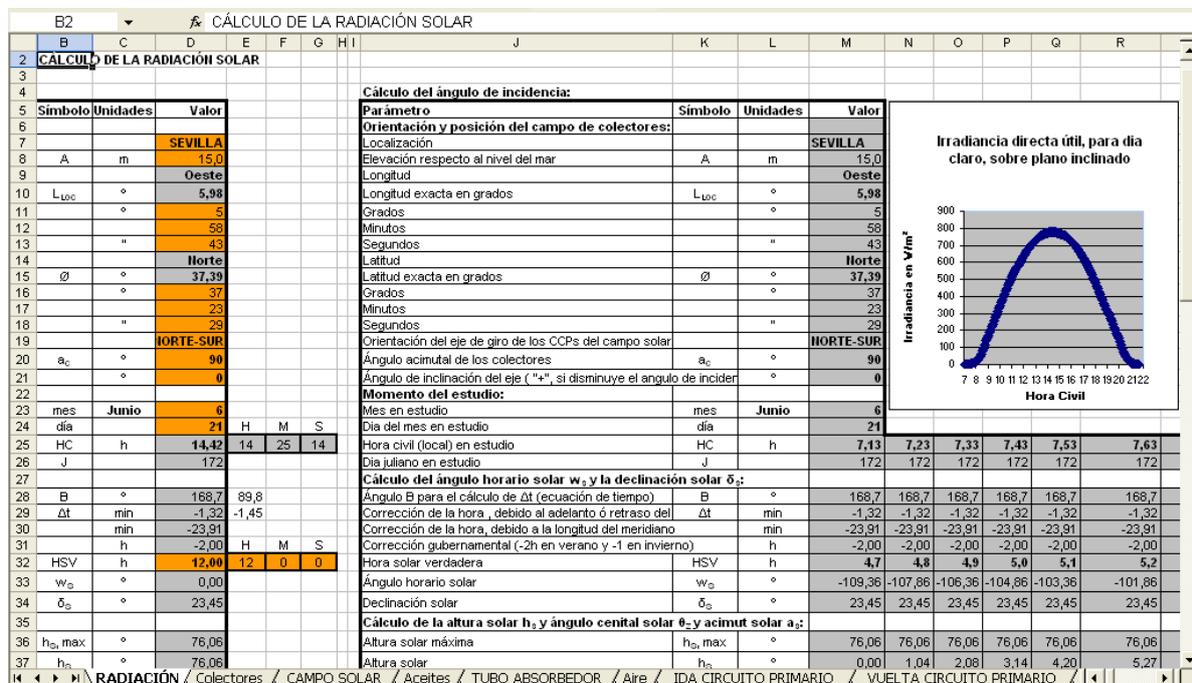
Además de lo anterior, que representaría el funcionamiento de la planta en el punto de diseño, es decir, generando la potencia nominal para la que ha sido diseñada, se ha considerado también un cálculo estimado del comportamiento de la planta durante el día de diseño, en base a poder dimensionar el almacenamiento térmico y apoyo fósil necesarios.

Con todo esto, se ha tratado de vincular unos cálculos con otros dependientes, de manera que, ante un cambio eventual en algún parámetro de entrada, todos los cálculos que dependan, directa o indirectamente, de dicha variable, se actualicen automáticamente, pudiéndose dar el caso de tener que ajustar alguna de ellas manualmente.

Se muestran a continuación varias figuras con capturas de pantalla de trozos de algunas hojas de cálculo relevantes del programa, que dan idea del potencial del mismo.

La figura 5 muestra el cálculo de los parámetros geométricos necesarios para llevar a cabo el cálculo de la radiación solar útil en cada instante sobre el campo de colectores. Para ello se han empleado las ecuaciones y coordenadas que describen el movimiento solar alrededor de la tierra.

Figura 5: Cálculo de la Radiación Útil sobre el Campo de Colectores



La figura 6 muestra el cálculo del depósito de expansión de aceite mediante el código ASME-SVIII-D1 para el cálculo de depósitos a presión, obteniéndose una hoja de datos del equipo que resume las principales características del mismo.

Figura 6: Cálculo del Depósito de Expansión de Aceite

I5 DISEÑO DEL DEPÓSITO DE EXPANSIÓN DE ACEITE POR EL CÓDIGO ASME														
Características:				DISEÑO DEL DEPÓSITO DE EXPANSIÓN DE ACEITE POR EL CÓDIGO ASME										
Símbolo	Unidades	Valor		Parámetro		Símbolo	Unidades	Valor						
T _{recit}	K	373,00	100,00	*C	Fluido almacenado	ACEITE		Thermolol VP-1						
qm _{precal}	Kg/s	58,20			Incremento de volumen de fluido a controlar	V _i	m ³	57,93						
T _{s,precal}	K	561,79	288,79	*C	Presión de operación	P _o	bar	12,00						
qm _{recal}	Kg/s	7,80			Temperatura de operación	T _o	K	562,40						
T _{s,recal}	K	566,97	293,97	*C	Densidad	ρ	Kg/m ³	827,60						
qm _{salida}	Kg/s	86,00			Presión de diseño	P	bar	14,20						
T _{m,dep}	K	562,40	289,40	*C	Temperatura de diseño	T	bar	692,80						
T _{mas, posible}	K	665,00	392,00	*C	Volumen de depósito	V _d	m ³	80,00						
V _{ac,dep,precal}	m ³	8,00	8,00	* Comparar	Eficiencia juntas	E		0,85						
ΔV	m ³	57,93			Margen por corrosión	C.A.	mm (in)	3,175 (0,125)						
V _{ac,dep,recal}	m ³	65,93	72,00	* Comparar	RESULTADOS OBTENIDOS:									
V _{dep}	m ³	80,00			Símbolo	Unidades	Valor							
Di	m	2,443	96,18	in	Diámetro interior del casco	Di	m	2,443						
L	m	17,07	671,92	in	Longitud casco	L	m	16,44						
pi	bar	12,00							Cabeza Hemisférica					
pe	bar	6,00			Profundidad interior de la cabeza	Hi	m	1,222						
p _{..}	Kg/m ³	827,60			Espeor total del casco	ts	mm (in)	28,58 (1,125)						
q	m/s ²	9,81			Espeor total de tapas	th	mm (in)	15,88 (0,625)						
H	m	2,443	96,18	in	Diámetro exterior del casco	De	m	2,500						
DEPÓSITO (CASCO + CABEZAS + PLACAS DESGASTE)														
Acero al carbono SA 515-70														
Td	K	692,80	787,6	*F	419,80	*C								
Su	MPa	170,00	24656,4	lb / in ² (psi)	38000 psi hasta 650 °F									
Sy	MPa	85,00	12328,2	lb / in ² (psi)	12000 psi a 800 °F									
E	MPa	165000,00	23931227,7	lb / in ² (psi)	24E6 psi a 800 °F									
p	Kg/m ³	7850,00												
ANILLOS ATIESADORES														
Acero al carbono SA 515-70														
Td	K	692,80	787,6	*F	419,80	*C								
Su	MPa	170,00	24656,4	lb / in ² (psi)										
Sy	MPa	85,00	12328,2	lb / in ² (psi)										
E	MPa	165000,00	23931227,7	lb / in ² (psi)										
p	Kg/m ³	7850,00												
SILLETAS														
Acero al carbono SA 515-70														
Td	K	692,80	787,6	*F	419,80	*C								

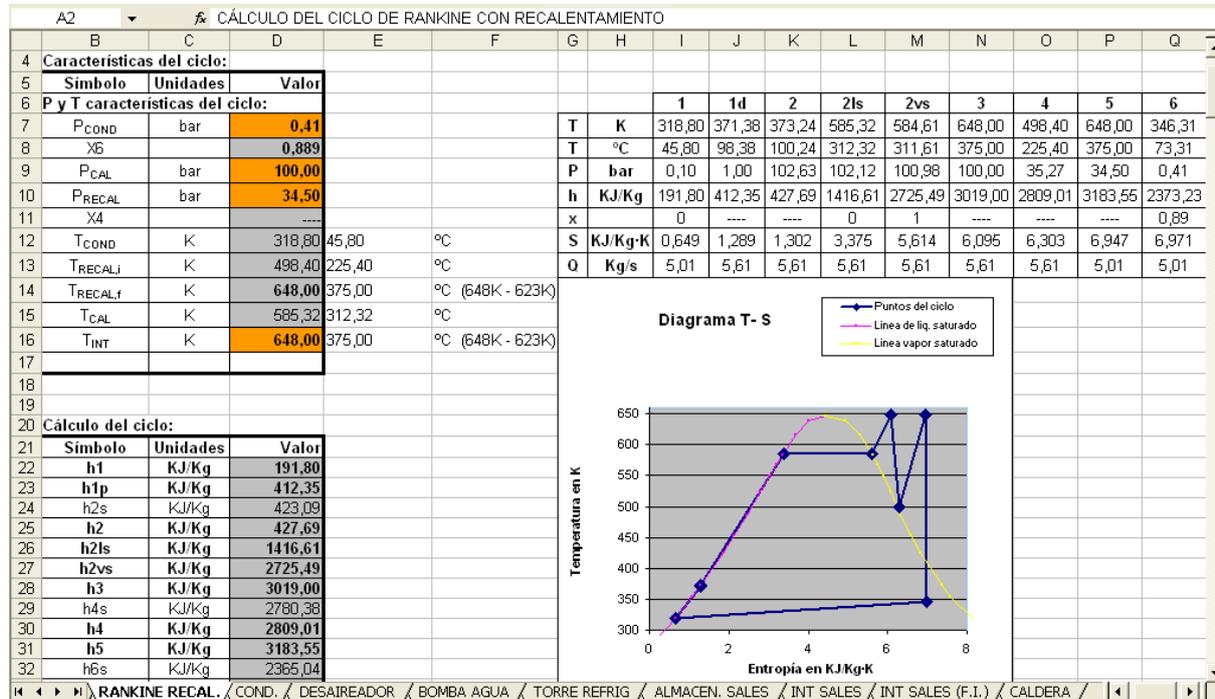
La figura 7 muestra el diseño de uno de los intercambiadores de calor, diseñado mediante la norma TEMA, obteniéndose también una hoja de datos que define al equipo.

Figura 7: Cálculo del Generador de Vapor o Evaporador

CÁLCULO DEL EVAPORADOR														
Características del aceite y del agua-vapor:				EVAPORADOR										
Símbolo	Unidades	Valor		Parámetro		Símbolo	Unidades	Carcasa	Tubos					
Circuito primario de aceite:				Fluido				AGUA-VAPOR	ACEITE					
Pe, aceite	bar	12,68	> P _{vapor,max} ACEITE	Potencia comunicada	P _o	MW	2725,491	2725,491						
T ₁	K	653,68	380,68 °C	Caudal másico	Q	Kg/s	5,61	58,70						
T ₂	K	602,17	602,17 Comparar e igualar	Conexiones	D (E/S)	mm		200 / 200						
Circuito secundario de agua-vapor:				Espeor aislamiento conexiones	e _a (E/S)	mm		140 / 140						
Pe, agua-vapor	bar	102,12	329,17 °C	Presión de operación	P _{op}	bar	102,12	12,68						
t1	K	585,32	312,32 °C	Pérdida de presión	ΔP	bar	1,13	0,51						
t2	K	584,61	311,61 °C	Presión de diseño	P _d	bar	105	25						
Cálculo de temperaturas y de caudales másicos por el equipo:				Temperatura de ebullición	T _{eb}	°C	312,32	> 425						
qm	Kg/s	5,61	129 GPM (a la entrada)	Temperatura de operación	T _{op} (E/S)	°C	312,32 / 311,61	380,68 / 329,17						
h2ls	KJ/Kg	1416,61		Temperatura de diseño	T _d	°C	400	400						
h2vs	KJ/Kg	2725,49		Entalpías	h (E/S)	KJ/Kg	1416,61 / 2725,49	751,02 / 622,47						
P _{o,RECAL} aceite -> agua	MW	7,345		Densidad	ρ (E/S)	Kg/m ³	688,0 / 53,8	721,7 / 785,4						
t2	K	585,32		Viscosidad dinámica	μ (E/S)	cP (mPa·s)	0,083 / 0,020	0,157 / 0,194						
Agua-vapor:				Capacidad calorífica	Cp (E/S)	KJ/Kg·K	6,10 / 6,95	2,56 / 2,40						
qm	Kg/s	5,61		Conductividad térmica	k (E/S)	W/m·K	0,520 / 0,072	0,080 / 0,091						
h2ls	KJ/Kg	1416,61		Área total de transferencia	A _T	m ²	-	115,60						
h2vs	KJ/Kg	2725,49		Longitud de carcasa	L	m	4,49	-						
P _{o,RECAL} agua -> aceite	MW	7,345		Diámetro interior de carcasa	ID shell	m	0,568	-						
t2	K	585,32		Nº de carcasa en serie			1	-						
Acero al carbono SA 515-70				Nº de pasos en cada carcasa			1	2						
Acero al carbono SA 515-70				Nº de tubos en cada carcasa				430						

La figura 8 muestra el cálculo del ciclo de vapor empleado, obteniéndose los puntos representativos y el diagrama T-S del mismo.

Figura 8: Cálculo del Ciclo de Vapor



Por lo general, las celdas amarillas se utilizan para valores que han de ser comparados (con un determinado valor) y ajustados manualmente, y las celdas naranjas se emplean para datos ó parámetros que hemos fijado a priori, y que no requieren de ajustes manuales.

En resumen, generalmente se cambia un valor que está en una celda naranja (porque cambian las especificaciones o porque con ese valor no se logran los objetivos) y, seguidamente, se reajustan los parámetros que están en celdas amarillas y que se hayan desajustado con el cambio. De esta manera, cada dato se cambia en un único sitio, repercutiéndose el cambio en todas las hojas que dependan del mismo, directa o indirectamente.

Se resume a continuación las principales especificaciones e hipótesis de partida consideradas en el diseño y cálculo de la planta, las cuales son, en su mayoría, perfectamente reemplazables por otras a fin de ajustarse al diseño requerido en cada caso.

1. Se pretende diseñar una planta solar termoeléctrica de colectores cilindro-parabólicos (CCP) basada en tecnología HTF.

2. Para la potencia eléctrica generada en la planta se considerará un valor de 5 MWe, aproximadamente.
3. La ubicación hipotética de la planta solar termoeléctrica será en la provincia de Sevilla.
4. El diseño del campo solar de colectores CCP se llevará a cabo en un terreno de dimensiones arbitrarias, es decir, no existiendo limitación alguna en sus dimensiones. No obstante, deberá diseñarse siguiendo pautas lógicas de ubicación de los colectores y tratando de optimizar la superficie utilizada.
5. El punto de diseño considerado para los cálculos de la planta se corresponde con el 21 de junio (solsticio de verano), a las 12:00 horas del mediodía solar, estando el sol situado en el cenit.
6. Se considera en los cálculos un valor de la radiación solar directa en plano horizontal de 850 W/m², valor recomendado para el diseño de este tipo de plantas ubicadas en Andalucía.
7. El fluido de transferencia térmica empleado en el campo solar es Therminol - VP1.
8. El colector solar CCP elegido se corresponde con un colector del tipo LS-3 o similar.
9. La orientación elegida para los colectores del campo solar es Norte-Sur.
10. El bloque de potencia se ubica en el centro del campo solar, tratando de minimizar las distancias recorridas por el fluido de transferencia.
11. Se ha considerado un depósito de expansión en el circuito primario de aceite, necesario para absorber las dilataciones del aceite por cambios de temperaturas en los distintos regímenes de la planta, el cual se ha dimensionado según el código ASME-SVIII-D1.
12. Para lograr la generación de vapor a partir de la potencia térmica del aceite, los intercambiadores de calor considerados son del tipo carcasa y tubos, al igual que el resto de intercambiadores existentes en la planta, los cuales se dimensionaran siguiendo la norma TEMA.
13. Se ha considerado un almacenamiento térmico mediante sales fundidas, el cual consiste en dos tanques de almacenamiento de sales, uno de sales frías y otro de sales calientes, los cuales se han dimensionado según API-650.

14. Se ha considerado una caldera de apoyo fósil, que aportará energía térmica al aceite cuando sea necesario, teniendo en cuenta las limitaciones que impone la legislación.
15. Para lograr la generación de potencia eléctrica a partir del vapor generado, se ha considerado un ciclo de vapor de Rankine con recalentamiento intermedio, necesitándose una turbina con dos cuerpos, uno de alta presión y otro de media presión. De este modo, la generación del vapor se efectuará mediante los siguientes equipos: precalentador, evaporador, sobrecalentador y recalentador.
16. Se ha incluido en el ciclo de vapor un desaireador a la salida del condensador, cuya misión principal es la eliminación de gases no condensables, tales como el CO₂ y O₂, siendo este último especialmente perjudicial para los equipos.
17. Se ha incluido en la planta una torre de refrigeración para enfriar el agua empleada en la condensación del vapor que sale de la turbina.

6. Conclusiones

El trabajo expuesto pone de manifiesto el alcance de esta herramienta como metodología de cálculo en el diseño básico de plantas solares termoeléctricas, así como su potencial aplicabilidad en cualquier tipo de plantas donde exista un proceso químico o, como en este caso, térmico.

La herramienta desarrollada permite obtener de una manera rápida y barata todos los parámetros implicados en este tipo de plantas, así como dimensionar térmicamente (y mecánicamente en algunos equipos relevantes) todos y cada uno de los equipos.

Además, la herramienta facilita enormemente el trabajo de optimización de las variables más importantes, permitiendo a la vez probar con diferentes tipos de aceite, colectores solares de distintos tamaños o de propiedades ópticas mejoradas, sales fundidas con otras propiedades, aumentar o disminuir el apoyo fósil o simplemente, con un campo solar más grande, con otra orientación, etc.

Para concluir, comentar que siguiendo esta metodología de trabajo, está claro que al principio es necesario emplear algo más tiempo en configurar la herramienta, pero dada la naturaleza recurrente de este tipo de diseños, está demostrado que a posteriori, el tiempo de ajuste de las variables implicadas ante un cambio en el diseño, es prácticamente despreciable, teniéndose entre las manos un software potente, flexible y de bajo coste.

Referencias

Abascal García, Ramón Antonio (1995). Cálculo de recipientes a presión / Ramón A. Abascal García. Sevilla : Escuela Superior de Ingenieros Industriales

- Bednar, Henry H. (1981). Pressure vessel design handbook / Henry H. Bednar. New York [etc.] Van Nostrand Reinhold
- Ellenberger, J. Phillip (2004). Pressure vessels : the ASME code simplified / J. Phillip Ellenberger, Robert Chuse, Bryce E. Carson, Sr. New York : McGraw-Hill
- Goswami, D. Yogi (1999). Principles of solar engineering / D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Jan F. Kreider. Philadelphia, [etc.] Taylor and Francis
- Gutiérrez de Rozas Salteráin, José Lorenzo (2005). Turbomáquinas térmicas: teoría y problemas / J.L. Gutiérrez de Rozas Salteráin. Bilbao : Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco
- Haywood, R. W. (Richard Wilson) (1991). Analysis of engineering cycles : power, refrigerating and gas liquefaction plant / R. W. Haywood. Oxford [etc.] : Pergamon Press
- Ibáñez Plana, Manel (2004). Tecnología solar / M. Ibáñez Plana, J.R. Rosell Polo, J.I. Rosell Urrutia. Madrid [etc.] : Mundi-Prensa
- Incropera, Frank P. (Frank Paul) (1999). Fundamentos de transferencia de calor / Frank P. Incropera, David P. DeWitt. México: Prentice-Hall Hispanoamericana
- Kehlhofer, Rolf (1999). Combined-cycle gas and steam turbine power plants / Rolf Kehlhofer... [et al.] Tulsa (OK) Pennwell Publ.
- Megyesy, Eugene F. (1989). Manual de recipientes a presión: diseño y cálculo / Eugene F. Megyesy ; prefacio de Paul Buthod; versión española, Rafael García Díaz ; revisión, Rubén Avila Espinoza. México [etc.] Limusa
- M. Castro (2006). Energía solar térmica de media y alta temperatura / [M. Castro...(et al.)] Madrid : PROGENSA
- Rufes Martínez, Pedro (2000). Condensadores / Pedro Rufes Martínez. Barcelona : CEAC
- Segura Clavell, José (1993). Termodinámica técnica / José Segura Clavell. Barcelona [etc.] Reverté
- Sánchez y Pineda de las Infantas, María Teresa (2000). Ingeniería del frío : teoría y práctica / M^a Teresa Sánchez y Pineda de las Infantas. Madrid : A. Madrid Vicente [etc.]
- Torres de refrigeración. Madrid: Centro de Estudios de la Energía
- Velázquez Alonso, David (1999). Calor y frío industrial : 5^o curso : colección de transparencias / D. Velázquez Alonso, J. F. Coronel Toro. Sevilla : Escuela Superior de Ingenieros Industriales
- Zarza Moya, Eduardo (2004). Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos : Proyecto Direct Solar Steam (DISS) / Eduardo Zarza Moya ; bajo la dirección del prof. Carlos Gómez Camacho. Madrid: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Correspondencia (Para más información contacte con):

Phone: +34 609 58 02 12 (A. azaña) / +34 635 88 81 07 (N. Moro)
Fax: +34 954 1263 81 (Azcatec) / +34 954 95 38 91 (Altran)
E-mail : aazana@azcatec.com ; aazana@us.es / narcimoro@hotmail.com