



Grado en Ingeniería Eléctrica

2020

*Trabajo Fin de Grado*

# Simulación de un campo solar de concentradores cilindroparabólicos con Python

---

Francisco José Munuera Pérez

Tutor

Rubén Barbero Fresno

ETS de Ingenieros, UNED



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**



## **RESUMEN**

**Palabras clave:** Energía solar de concentración; Python; Campo solar



## **DEDICATORIA**



# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN . . . . .	1
1.1. Objetivo . . . . .	1
1.2. Estructura de la memoria . . . . .	2
1.3. Concentradores cilindroparabólicos . . . . .	2
1.3.1. El concentrador cilindroparabólico . . . . .	6
1.3.2. El tubo absorbedor o receptor . . . . .	8
1.3.3. El sistema de seguimiento . . . . .	8
1.3.4. El fluido caloportador . . . . .	9
2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS UTILIZADOS . . . . .	10
2.1. Modelo de rendimiento térmico de 4º Orden para caracterización de un sistema de captación solar . . . . .	10
2.2. Modelo de Primer Orden . . . . .	15
2.3. Modelo simplificado . . . . .	16
2.4. Aplicabilidad de los modelos . . . . .	17
3. MODELADO DEL CAMPO SOLAR . . . . .	18
3.1. Metodología seguida para el modelado del campo solar . . . . .	18
3.2. Sistemas físicos y Clases para el modelado del campo solar . . . . .	18
3.2.1. Clases derivadas de Model: Clase ModelBarbero4thGrade, ModelBarbero1stGrade y ModelBarberoSimplified . . . . .	19
3.2.2. HCE, Heat Collector Element . . . . .	22
3.2.3. SCA, Solar Collector Assembly . . . . .	28
3.2.4. Loop . . . . .	30
3.2.5. Subfield, subcampo solar . . . . .	31

3.2.6. Solarfield, campo solar . . . . .	32
3.2.7. Clase Fluid y sus clases hijas, FluidCoolProp y FluidTabular . . . . .	32
3.2.8. Clases Weather, FieldData y TableData . . . . .	37
3.3. Algoritmo de simulación . . . . .	38
3.3.1. Simulación tipo simulation . . . . .	41
3.4. Validación por comparación con otra herramienta de simulación . . . . .	42
3.4.1. Configuración de las simulaciones . . . . .	42
3.4.2. Resultados de la validación . . . . .	46
3.5. Aplicación para el análisis paramétrico . . . . .	49
3.5.1. Rendimiento del HCE en función de la radiación normal directa, <i>DNI</i> . . .	50
3.5.2. Rendimiento del HCE en función de la temperatura de entrada . . . . .	50
3.5.3. Simulación con los diferentes modelos. . . . .	50
3.5.4. Simulación cambiando el tamaño de la malla de integración . . . . .	51
4. ANÁLISIS DEL MODELO APLICADO A UN CENTRAL SOLAR TERMO-ELÉCTRICA REAL . . . . .	69
4.1. Descripción de la simulación de la central solar termoeléctrica . . . . .	69
4.1.1. Resultados de la simulación con Python . . . . .	71
BIBLIOGRAFÍA . . . . .	72



## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Tecnologías solares de concentración . . . . .	3
1.2	Central Solar de Torre Central. Fuente [2] . . . . .	3
1.3	Colector Cilindro-Parabólico. Fuente: Propia . . . . .	4
1.4	Concentrador de tipo Fresnel. Fuente [2] . . . . .	5
1.5	Concentradores de Disco Parabólico. Fuente [2] . . . . .	5
1.6	Perspectiva de un lazo completo. Se indica el sentido del recorrido del HTF en el lazo, desde la tubería de entrada hasta la de salida. Fuente: Propia	6
1.7	Vista de perfeil de un SCA. Pueden distinguirse algunos HCEs y los brazos de soporte. Fuente: Propia . . . . .	7
2.1	Esquema del receptor empleado para el modelo. Fuente:[3] . . . . .	11
3.1	Densidad en función de la temperatura. . . . .	34
3.2	Viscosidad dinámica en función de la temperatura. . . . .	34
3.3	Conductividad térmica en función de la temperatura. . . . .	35
3.4	Entalpía en función de la temperatura. . . . .	35
3.5	Temperatura en función de la entalpía. . . . .	36
3.6	Configuración SAM. Selección del archivo de datos meteorológicos . .	44
3.7	Configuración SAM. Campo solar . . . . .	44
3.8	Configuración SAM. Configuración del SCA SenerTrough I a partir del modelo EuroTrough ET150 . . . . .	45
3.9	Configuración SAM. Configuración del HCE UVAC 3 con vacío . . . .	46
3.10	Configuración de la simulación. Selección del tipo de simulación, fichero de datos y lugar de emplazamiento. . . . .	48

3.11	Configuración de la simulación. Configuración del campo solar, número de subcampos, lazos, configuración de los lazos, valores nominales y asistente para relacionar los identificadores de las columnas del archivo de origen de datos con los que maneja el programa. . . . .	49
3.12	Configuración de la simulación. Selección y configuración del fluido caloportador . . . . .	50
3.13	Configuración de la simulación. Selección del modelo de SCA y configuración . . . . .	51
3.14	Configuración de la simulación. Selección del modelo de HCE y configuración . . . . .	52
3.15	Caudal másico calculado por SAM y por el código Python para el día 17/07/2009 . . . . .	52
3.16	Temperatura de entrada y de salida calculadas por SAM y por el código Python para el día 17/07/2009 . . . . .	53
3.17	Potencia térmica calculada por SAM y por el código Python para el día 17/07/2009 . . . . .	53
3.18	Caudal másico calculado por SAM y por el código Python para el día 17/06/2009 . . . . .	55
3.19	Temperatura de entrada y de salida calculadas por SAM y por el código Python para el día 17/06/2009 . . . . .	55
3.20	Potencia térmica calculada por SAM y por el código Python para el día 17/06/2009 . . . . .	56
3.21	Rendimiento térmico en función de DNI para diferentes modelos de HCE	56
3.22	Rendimiento térmico en función de la temperatura de entrada del HTF para diferentes modelos de HCE . . . . .	58
3.23	Temperaturas de salida obtenidas con los tres modelos . . . . .	61
3.24	Caudales de salida obtenidos con los tres modelos . . . . .	61
3.25	Potencia térmica obtenida con cada uno de los tres modelos . . . . .	64

3.26 Rendimiento térmico para cada uno de los tres modelos . . . . .	64
3.27 Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 4,05 m . . . . .	66
3.28 Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 48,60 m . . . . .	67
3.29 Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 72,90 m . . . . .	67
3.30 Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 145,80 m . . . . .	68
3.31 Rendimiento calculado para diferentes tamaños de malla de integración. $DNI = 800W/m^2, T_{in} = 300^\circ C, \dot{m} = 6kg/s$ . . . . .	68
4.1 Centrales Termosolares Aste 1A (izq.) y Aste 1B (der.) Fuente: Google Earth . . . . .	70



## ÍNDICE DE TABLAS

3.3	Configuración del SCA modelo SenerTrough I de Sener . . . . .	45
3.4	Configuración del HCE modelo UVAC 3 de Solel . . . . .	47
3.5	Resultados globales anuales para las simulaciones con SAM y Python . .	47
3.6	Resultados de las simulaciones (S: SAM, P: Python) para el día 17 de julio de 2009. Condiciones estables . . . . .	54
3.7	Resultados de las simulaciones (S: SAM, P: Python) para el día 17 de junio de 2009. Condiciones inestables . . . . .	57
3.8	Rendimiento en función de la radiación normal incidente para distintos modelos de HCE . . . . .	58
3.9	Rendimiento en función de la temperatura de entrada del HTF para diferentes modelos de HCE . . . . .	59
3.10	Temperaturas obtenidas en la simulación para cada modelo. Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación . . . . .	60
3.11	Caudales obtenidos en la simulación para cada modelo. Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación . . . . .	62
3.12	Potencia térmica calculada en la simulación de cada modelo. Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación . . . . .	63
3.13	Rendimientos obtenidos en la simulación de cada modelo. Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación . . . . .	65



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Objetivo

El propósito principal de este Trabajo Final de Grado (TFG) es profundizar en el conocimiento del funcionamiento de un campo solar de concentradores cilindroparabólicos (CCP) mediante el desarrollo de una herramienta de simulación programada en Python 3. Para ello, se ha partido del modelo teórico desarrollado en su Tesis Doctoral por el profesor de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), el Dr. Rubén Barbero Fresno y se ha empleado una metodología basada en el paradigma de la programación orientada a objetos (POO). El desarrollo de este trabajo ha supuesto un reto personal por la necesidad de adquirir habilidades en el manejo de diferentes herramientas antes desconocidas para mí, como el lenguaje de programación Python 3 y sus diferentes librerías para el cálculo científico (Numpy) y el tratamiento de datos (Pandas). Finalmente, todo el código se encuentra publicado y accesible a través de GitHub y se puede interactuar con la versión final del código de simulación a través de un Notebook Jupyter.

Los resultados obtenidos son compatibles con los datos de generación de un campo solar real dentro de las limitaciones que los diferentes modos de operación y eventos impredecibles (paradas de planta para mantenimiento, disparos por avería, etc...) introducen en el proceso. En este proyecto solo se aborda la simulación del sistema del campo solar, el único sistema dentro del alcance del modelo teórico de partida. Para la simulación de planta sería necesario el desarrollo de modelos para gran número de sistemas como por ejemplo, los generadores de vapor, almacenamiento térmico, turbina, sistemas auxiliares de bombeo, sistemas de tratamiento de agua, torre de refrigeración, etc... No obstante, la metodología seguida permite que en el futuro este proyecto pueda ser ampliado de forma sistemática con la incorporación de nuevas clases de objetos que aprovechen los métodos de entrada y salida ya programados para interactuar con ellos. En todo caso, se han empleado valores de rendimientos estimados para los principales subsistemas de planta con el fin de ofrecer una estimación de la energía eléctrica finalmente vertida a la red.

## **1.2. Estructura de la memoria**

Esta memoria se estructura en 5 capítulos y un anexo con el código fuente.

En este primer capítulo se describen los objetivos del TFG y se ofrece una introducción a las características de los concentradores cilindroparabólicos. El segundo capítulo presenta el modelo teórico de partida y se detallan las ecuaciones que describen los sistemas que más adelante serán modelados. El tercer capítulo aborda el modelado de los diferentes sistemas necesarios para la caracterización del campo solar. Se procede a la validación por comparación con otra herramienta de simulación y se presentan los resultados de algunos análisis paramétricos. En el cuarto capítulo se aborda una análisis del funcionamiento de una central solar termoeléctrica y se contrastan los resultados de la simulación del campo solar con los datos reales disponibles. Finalmente, en el quinto capítulo se presentan algunas conclusiones y propuestas de desarrollo futuro.

## **1.3. Concentradores cilindroparabólicos**

Existen principalmente cuatro tecnologías para el aprovechamiento de la radiación solar directa en sistemas térmicos: concentrador cilindro-parabólico CCP, central de torre, concentrador Fresnel y disco parabólico. La tecnología de central de torre y la de CCP son las que cuentan en la actualidad con una mayor madurez y gran número de centrales en operación y en construcción en todo el mundo [1]. En España actualmente hay medio centenar de centrales CCP en operación [2], alguna de ellas desde hace más de una década, quedando probado que el estado del arte y la madurez de la tecnología garantizan el correcto funcionamiento del sistema. Este tipo de sistema presenta un alto grado de replicabilidad, modularidad y aprovechamiento del terreno. Desde el punto de vista económico, esta tecnología también resulta muy favorable ya que los costes de inversión y operación han sido comercialmente probados, al menos, para los sistemas termoeléctricos.

En un CCP pueden distinguirse cuatro elementos principales: el reflector o concentrador, el tubo absorbedor, el sistema de seguimiento y el fluido caloportador.



(a) Central Solar de Torre Central. Fuente [2]



(b) Concentradores de Disco Parabólico. Fuente [2]



(c) Colector Cilindro-Parabólico. Fuente: Propia



(d) Concentrador de tipo Fresnel. Fuente [2]

Fig. 1.1. Tecnologías solares de concentración



Fig. 1.2. Central Solar de Torre Central. Fuente [2]



Fig. 1.3. Colector Cilindro-Parabólico. Fuente: Propia



Fig. 1.4. Concentrador de tipo Fresnel. Fuente [2]



Fig. 1.5. Concentradores de Disco Parabólico. Fuente [2]



Fig. 1.6. Perspectiva de un lazo completo. Se indica el sentido del recorrido del HTF en el lazo, desde la tubería de entrada hasta la de salida. Fuente: Propia

### 1.3.1. El concentrador cilindroparabólico

Un CCP consiste en una superficie a modo canal de sección parabólica que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbedor colocado en la línea focal del parabolóide. Dentro de los diferentes sistemas de concentración solar pertenece al grupo de los concentradores lineales, al igual que los sistemas de concentración tipo Fresnel y al contrario que los sistemas de concentración de torre central o de discos parabólicos, en cuyo caso estaríamos hablando de sistemas de concentración puntuales. Por el tubo absorbedor se puede hacer circular algún fluido que se calentará debido a la radiación incidente sobre el tubo. Se trata de una transformación directa de energía luminosa en energía térmica con una buena eficiencia y que puede alcanzar temperaturas de hasta 675 K.

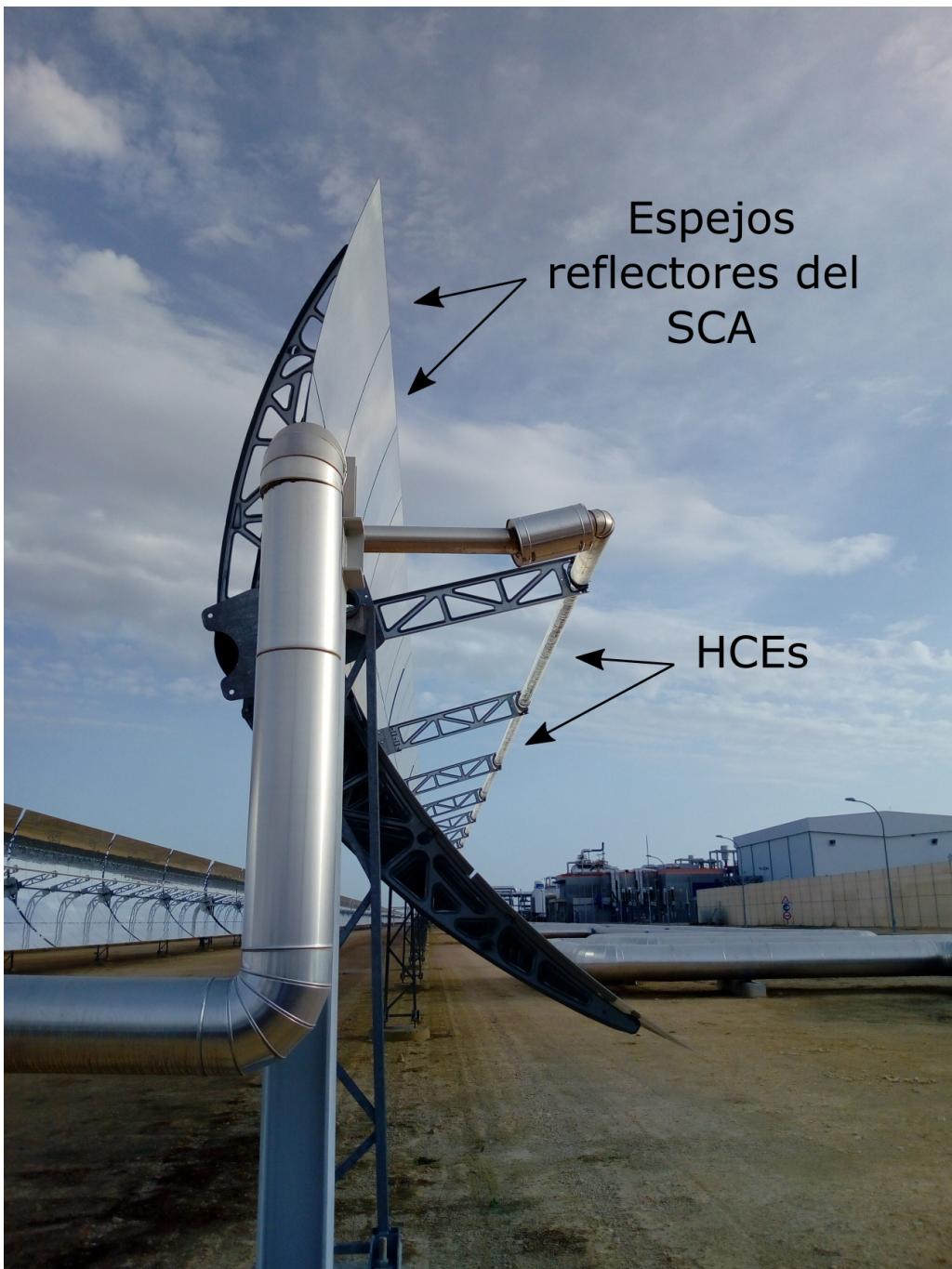


Fig. 1.7. Vista de perfil de un SCA. Pueden distinguirse algunos HCEs y los brazos de soporte.

Fuente: Propia

### **1.3.2. El tubo absorbedor o receptor**

A lo largo del eje focal del concentrador se instala una conducción por la que circula un fluido caloportador o transmisor del calor (HTF por sus siglas en inglés, Heat Transfer Fluid). Esta conducción está compuesta en realidad por una serie de elementos tubulares denominados Heat Collector Element, HCE. Los HCE consisten en tubo de acero con una envolvente de vidrio de tal forma que en el proceso de fabricación se ha dejado extraído el aire que queda entre ambos (region anular o annulus). De esta forma se reducen las pérdidas de calor por convección a través de la región anular. La soldadura vidrio-metal y unos elementos denominados getters que absorben, hasta cierto punto, algunas moléculas que puedan filtrarse a la región anular durante la vida operativa del HCE permiten que éste cuente con pérdidas reducidas de calor mientras no se produzca la rotura del vidrio o la saturación de dichos getters.

### **1.3.3. El sistema de seguimiento**

Para que se produzca la concentración de la radiación solar incidente ésta debe ser perpendicular al eje que pasa por el foco y la base de la parábola. La primera consecuencia es que solo puede aprovecharse plenamente la componente normal de la radiación solar incidente (DNI). Dado que el Sol varía su posición relativa al concentrador continuamente, el conjunto reflector-tubo absorbedor está montado sobre una estructura que pueda girar sobre un eje con el fin de seguir la trayectoria solar a lo largo del día. Salvo instalaciones especiales en laboratorios, no se emplean seguidores a dos ejes pues la complejidad de los colectores con movimiento basado en dos ejes es tal que no permite su rentabilidad debido a los costes de mantenimiento. Por tanto, el sistema de seguimiento más empleado consiste en mover la estructura del colector con un grado de libertad en torno a un eje que, en las plantas solares cuyo objetivo es maximizar el rendimiento anual de energía eléctrica a la red, cuenta con una orientación Norte-Sur, lo cual lleva a que exista una importante diferencia entre la generación en los meses de verano y los meses de invierno, siendo mayor en los primeros. Si lo que se persigue es obtener una producción más estable a lo largo del año, la orientación más adecuada del eje sería Este-Oeste.

La rotación del colector requiere un mecanismo de accionamiento, eléctrico o hidráulico, dependiendo en muchos casos de las dimensiones y el peso de los elementos del

colector. Para abaratar costes se suele emplear un mismo mecanismo para mover varios módulos.

El control del movimiento se puede llevar a cabo de forma autónoma, en el propio colector, dotándolo de algún dispositivo para detectar la posición del Sol en el cielo. Otra opción es emplear algoritmos matemáticos que calculan la posición del Sol para cada momento del día, en cualquier día del año. Una vez calculada la posición solar, se mueve el colector hasta colocarlo correctamente orientado. Este método requiere algún sistema para conocer la posición exacta del colector. Lo normal es emplear un codificador angular. Dado que el colector solar se encuentra en movimiento, las conexiones del tubo absorbéedor con las tuberías de entrada y salida de éste deben permitir el giro en los puntos de unión. Para esto se emplean conexiones flexibles y juntas rotativas combinadas adecuadamente. El coste de estos elementos es también elevado por lo que la elección de una configuración adecuada puede suponer un importante ahorro de costes en la instalación y el mantenimiento.

#### **1.3.4. El fluido caloportador**

El rango de temperatura ideal para trabajar con colectores cilindro parabólicos es de 425 K a 675 K. Para temperaturas superiores las pérdidas térmicas son altas y para temperaturas inferiores hay otros colectores más económicos (colectores de placa plana y colectores de tubo de vacío). El tipo de fluido a emplear depende de la temperatura de trabajo. El agua desmineralizada es una buena opción para temperaturas inferiores a los 450 K. A mayor temperatura es preferible el aceite sintético debido a que no aumenta tanto su presión. Nosotros emplearemos aceite sintético Santotherm VP-1. Este aceite puede trabajar bien hasta los 672 K pero tiene un punto de congelación de 285 K. Para nosotros no supondrá un problema dado que podremos emplear un sistema de apoyo auxiliar para mantener el aceite recirculando a una temperatura adecuada cuando la radiación solar no permita sobrepasar esta temperatura de congelación.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS UTILIZADOS

### 2.1. Modelo de rendimiento térmico de 4º Orden para caracterización de un sistema de captación solar

Existe en la actualidad un considerable número de modelos analíticos para el comportamiento de un captador solar. En el caso de que exista concentración debe tenerse en cuenta que el mecanismo dominante para las pérdidas energéticas es el de radiación, regido por la ley de Steffan-Boltzmann que se caracteriza por una dependencia de la cuarta potencia de la temperatura del colector. Además, debido a que los captadores suelen contar con una dimensión longitudinal elevada, no se puede despreciar la variación que experimentan las propiedades físicas del fluido caloportador y los componentes del colector solar a lo largo de éste debido a la variación de temperatura. Estas son algunas de la razones que dificultan la obtención de una expresión para el rendimiento integral del conjunto.

El modelo de partida desarrollado en [3] tiene un carácter general que permite que sea aplicado a receptores térmicos de radiación solar de cualquier tecnología, tanto para concentradores cilindroparabólicos como para concentradores lineales Fresnel o receptores de torre central. En este trabajo nos centramos en los aspectos relativos a los CCP y a continuación revisaremos las características del modelo para este tipo concreto de receptores.

Para el desarrollo del modelo, se parte de un receptor consiste en un tubo desnudo de diámetro  $D_{ro}$  (m) y longitud  $L$  (m). Una de las claves del modelo está en encontrar unos parámetros equivalentes,  $\varepsilon_{ext}$  y  $h_{ext}$ , denominados *emisividad equivalente de la superficie exterior del tubo* y *coeficiente de transferencia de calor convectivo equivalente* respectivamente, que permiten ajustar el comportamiento de un HCE real, con cubierta de vidrio, al modelo de tubo desnudo. Estos coeficientes deben hallarse previamente a partir de datos de laboratorio. A lo largo del desarrollo del modelo se realizan ciertas aproximaciones para las que se aportan justificaciones que no repetiremos ahora, pero que pueden encontrarse en el texto original. Como primera aproximación se considera que el recep-

tor absorbe radiación de manera uniforme a través de toda su superficie. Igualmente se desprecia la transerencia de calor en la dirección axial.

El esquema propuesto parte del balance energético del receptor, ec.(2.1)

$$\dot{q}_{perd}''(x) = \dot{q}_{abs}'' - \dot{q}_u''(x) \quad (2.1)$$

donde  $\dot{q}_{perd}''$  es la energía perdida para una sección a una distancia  $x$  de la entrada al receptor,  $\dot{q}_{abs}''$  es la radiación absorbida y  $\dot{q}_u''$  es la energía útil . En la Fig.2,1 vemos una representación del modelo donde el sentido de flujo de la energía viene indicado por las flechas.

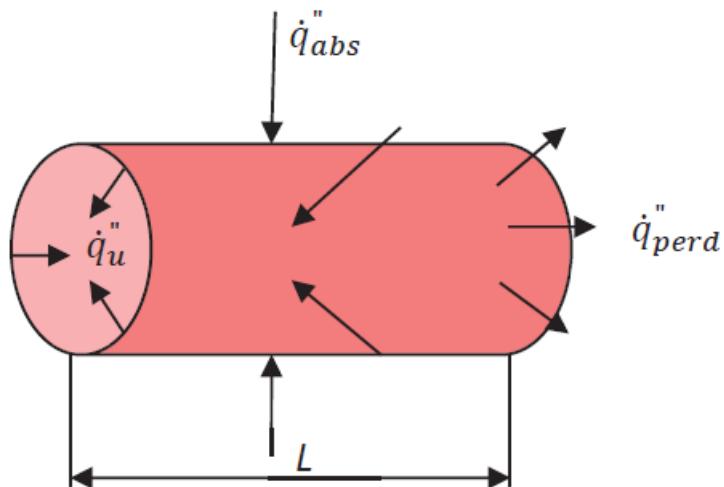


Fig. 2.1. Esquema del receptor empleado para el modelo. Fuente:[3]

La expresión para el cálculo de la radiación absorbida se muestra en la ec.(2.2).

$$\dot{q}_{abs}'' = \eta_{opt}(\theta) \cdot Cg \cdot DNI \cdot \eta_{sombras} \cdot \eta_{bordes} \quad (2.2)$$

El rendimiento óptico  $\eta_{opt}$ , las pérdidas geométricas  $\eta_{bordes}$  y las pérdidas por sombras,  $\eta_{sombras}$  son valores conocidos o que pueden calcularse para cada momento en función de la geometría del receptor y la disposición de los concentradores en el campo solar.  $Cg$  es el factor de concentración y también es conocido a partir de la geometría del conjunto concentrador-receptor. Finalmente,  $DNI$  es la radiación normal incidente. La ec.(2.3) permite hallar al calor transferido desde el tubo absorbedor a temperatura  $T_{ro}$ , al fluido

térmico a temperatura  $T_f$ :

$$\dot{q}''_u(x) = U_{rec} \cdot [T_{ro}(x) - T_f(x)] \quad (2.3)$$

donde  $U_{rec}$  es el coeficiente global de transferencia de calor hacia el interior, cuya expresión se muestra en la ec.(2.4):

$$U_{rec} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{D_{ro} \cdot (\frac{D_{ro}}{D_{ri}})}{2 \cdot k_{rec}}} \quad (2.4)$$

Como aproximación se considera que  $U_{rec}$  es constante a lo largo de la longitud del tubo ( $W/m^2 \cdot K$ ).  $D_{ro}$  y  $D_{ri}$  son el diámetro exterior e interior ( $m$ ) respectivamente del tubo absorbedor.  $h_{int}$  es el coeficiente de transferencia de calor convectivo hacia el interior ( $W/m^2 \cdot K$ ) y  $k_{rec}$  es conductividad del material del receptor, en ( $W/m \cdot K$ )

Para las pérdidas se calculan mediante la ec.(2.5) de calor se tendrá en cuenta un término radiativo, con temperaturas de  $4^o$  grado y otro convectivo de  $1^{er}$  grado.

$$\dot{q}''_{perd}(x) = \sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot (T_{ro}^4(x) - T_{ext}^4) + h_{hext} \cdot (T_{ro}(x) - T_{ext}) \quad (2.5)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),  $\varepsilon_{ext}$  es la emisividad del tratamiento superficial exterior y  $h_{hext}$  es el coeficiente de convección exterior. Estas dos últimas constantes son características de cada receptor y variables, por ejemplo, en función de las condiciones de degradación del recubrimiento selectivo o del viento exterior. Deben ser halladas experimentalmente en laboratorio.

La última ecuación necesaria es la ec.(2.6), donde se calcula el incremento de temperatura que experimenta el fluido considerando despreciables los cambios en energía cinética y un calor específico constante,  $c_p$  ( $J/Kg \cdot K$ ). Denominando  $T_f(x)$  a la temperatura del fluido en la sección a distancia  $x$  de la entrada y  $T_{fe}$  a la temperatura del fluido a la entrada, tenemos:

$$\pi \cdot D_{ro} \cdot x \cdot \dot{q}''_{abs} \cdot \eta(x) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_f(x) - T_{fe}) \quad (2.6)$$

En esta última ecuación aparece el rendimiento integral hasta una sección a una distancia  $x$  de la entrada,  $\eta_x(x)$ . Finalmente, a partir del rendimiento local, dado por la ec.(2.7) podemos calcular el rendimiento integral mediante la ec.(2.8).

$$\eta_x(x) = \frac{\dot{q}''_u(x)}{\dot{q}''_{abs}} \quad (2.7)$$

$$\eta(x) = \frac{\int_0^x \eta_x(x) dx}{\int_0^x dx} \quad (2.8)$$

donde desarrollando  $\eta_x(x)$  según la ec.(2.9):

$$\eta_x(x) = \eta(x) + \eta'(x) \cdot x \quad (2.9)$$

y normalizando la distancia a la unidad con la variable adimensional  $x^* = x/L$ , obtenemos la ecuación integral ec.(2.10):

$$\eta(x^*) = 1 - \frac{\int_0^{x^*} \dot{q}''_{perd}(dx^*) \cdot dx^*}{\dot{q}''_{abs} \cdot dx^*} \quad (2.10)$$

La resolución de esta ecuación requiere un largo desarrollo en el que se introducen nuevos factores característicos del sistema y que puede encontrarse en la obra de referencia, por lo que la omitiremos aquí. Pese a la complejidad de la expresión final obtenida, que dificulta extraer conclusiones de manera directa, el modelo incorpora todos los parámetros característicos del sistema y lo hace manteniendo su sentido físico. A partir de la solución se puede obtener una expresión para el modelo local (rendimiento en una sección determinada del absorbedor) y una expresión para el modelo de colector completo, es decir, un rendimiento integral a lo largo de todo el absorbedor. Esta última es la que nos interesa. A continuación se presenta la ecuación del Modelo de 4º Orden completo del colector en la ec.(2.11) y sucesivamente las ecuaciones que definen sus parámetros:

$$\eta(x^*) = \frac{\eta_0 \cdot g'(Z)}{1 - g'(Z)} \cdot \frac{1}{NTU \cdot x^*} \cdot \left( e^{\frac{1-g'(Z)}{g'(Z)} \cdot NTU \cdot x^*} - 1 \right) - \frac{\eta_0^2}{6} \cdot \frac{g''(Z)}{g'(Z)} \cdot NTU^2 \cdot x^{*2} - \frac{\eta_0^3}{24} \cdot \frac{g'''(Z)}{g'(Z)} \cdot NTU^3 \cdot x^{*3} \quad (2.11)$$

$$\eta_0 = 1 - (f_1 \cdot Z + f_2 \cdot Z^2 + f_3 \cdot Z^3 + f_4 \cdot Z^4) \quad (2.12)$$

$$Z = \eta_0 + \frac{1}{f_0} \quad (2.13)$$

$$f_0 = \frac{\dot{q}_{abs}''}{U_{rec} \cdot (T_{fe} - T_{ext})} \quad (2.14)$$

$$g(Z) = -\left(1 + \frac{1}{f_0}\right) + (1 + f_1) \cdot Z + f_2 \cdot Z^2 + f_3 \cdot Z^3 + f_4 \cdot Z^4 \quad (2.15)$$

$$g'(Z) = 1 + f_1 + 2 \cdot f_2 \cdot Z + 3 \cdot f_3 \cdot Z^2 + 4 \cdot f_4 \cdot Z^3 \quad (2.16)$$

$$g''(Z) = 2 \cdot f_2 \cdot Z + 6 \cdot f_3 \cdot Z + 12 \cdot f_4 \cdot Z^2 \quad (2.17)$$

$$g'''(Z) = 6 \cdot f_3 + 24 \cdot f_4 \cdot Z \quad (2.18)$$

$$g^{IV}(Z) = 24 \cdot f_4 \quad (2.19)$$

$$f_1 = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot T_{ext}^3 + h_{ext}}{U_{rec}} \quad (2.20)$$

$$f_2 = 6 \cdot T_{ext}^2 \cdot \left(\frac{\sigma \cdot \varepsilon_{ext}}{U_{rec}}\right) \cdot \left(\frac{\dot{q}_{abs}''}{U_{rec}}\right) \quad (2.21)$$

$$f_3 = 4 \cdot T_{ext} \cdot \left(\frac{\sigma \cdot \varepsilon_{ext}}{U_{rec}}\right) \cdot \left(\frac{\dot{q}_{abs}''}{U_{rec}}\right)^2 \quad (2.22)$$

$$f_4 = \left(\frac{\sigma \cdot \varepsilon_{ext}}{U_{rec}}\right) \cdot \left(\frac{\dot{q}_{abs}''}{U_{rec}}\right) \quad (2.23)$$

Para la resolución de este modelo es preciso conocer previamente diferentes parámetros, muchos de los cuales pueden obtenerse directamente de las características físicas y materiales con los que está construido el HCE. De especial importancia son  $\varepsilon_{ext}$  y  $h_{ext}$

pues son dos coeficientes que de forma global vienen a caracterizar las pérdidas energéticas del receptor. Para obtener las ecuaciones que los caracterizan se parte de la expresión del coeficiente global del pérdidas al exterior dada por la ec.(2.24) de la siguiente forma:

$$U_{ext} = h_{hext} + \sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot (T_{ro}^2 + T_{ext}^2) \cdot (T_{ro} + T_{ext}) \quad (2.24)$$

Tal y como se ha indicado al comienzo de este capítulo, es necesario realizar ensayos de laboratorio bajo diferentes condiciones de viento ( $W_{spd}$ ) y temperatura exterior ( $T_{ext}$ ) para obtener el flujo de calor de pérdidas y calcular así dos expresiones del tipo  $\varepsilon_{ext}(T_{ext}, W_{spd})$  y  $h_{ext}(T_{ext}, W_{spd})$ . Para este trabajo se emplean los valores obtenidos en [3] a partir de [4], [5] y [6].

A partir de este modelo de 4º Orden se realiza un desarrollo que permite obtener dos modelos simplificados de colector completo: el Modelo de Primer Orden y el Modelo Simplificado.

## 2.2. Modelo de Primer Orden

La ec.(2.25) presenta el Modelo de Primer Orden. Para llegar a ella resuelve la ec.(2.12) despreciando monomios a partir de segundo grado, con lo que se puede sustituir el rendimiento a la entrada del absorbedor,  $\eta_0$ , por su valor aproximado dado en la ec.(2.26):

$$\eta(x^*) = \left[ 1 - \frac{\dot{q}_{crit}''}{\dot{q}_{abs}''} \right] \cdot \frac{1}{NTU_{perd}} \cdot \left( 1 - e^{-NTU_{perd} \cdot F'_{crit} \cdot x^*} \right) \quad (2.25)$$

$$\eta_0 = F'_{crit} \cdot \left[ 1 - \frac{\dot{q}_{crit}''}{\dot{q}_{abs}''} \right] \quad (2.26)$$

En esta ecuación se han reagrupado variables en diferentes términos que cuentan con sentido físico. De este modo, se definen:

$$\dot{q}_{crit}'' = \sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot (T_{fe}^4 - T_{ext}^4) + h_{hext} \cdot (T_{fe}^4 - T_{ext}^4) \quad (2.27)$$

$$U_{crit} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot T_{fe}^3 + h_{hext} \quad (2.28)$$

$\dot{q}_{crit}''$  y  $U_{crit}$  son valores de referencia en el estudio del comportamiento del colector pues cuando  $\dot{q}_{abs}''$  y  $U_{rec}$  se aproximan a ellos el rendimiento del colector se hace nulo. Por otra parte,  $F'_{crit}$  se asemeja al parámetro empleado en el modelo desarrollado por Hottel y Whillier en [7].

$$F'_{crit} = \frac{1}{\frac{4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot T_{fe}^3}{U_{rec}} + \frac{h_{ext}}{U_{rec}} + 1} = \frac{1}{\frac{U_{crit}}{U_{rec}} + 1} \quad (2.29)$$

El Modelo de Primer Orden presenta la ventaja de que el cálculo de  $\eta(x^*)$  es explícito, con la reducción del coste computacional que esto conlleva. Por otro lado, también nos ofrece una forma de calcular un valor aproximado del rendimiento a la entrada del colector,  $\eta_0$ .

### 2.3. Modelo simplificado

Si se desarrolla por Taylor la función exponencial del Modelo de Primer Orden, se trunca por el segundo término y se sustituye  $\dot{q}_{abs}''$  por su expresión en función de DNI se obtiene la ec.(2.30) para el cálculo del rendimiento total en el receptor mediante el Modelo Simplificado:

$$\begin{aligned} \eta_T &= F'_{crit} \cdot \left[ 1 - \frac{\dot{q}_{crit}''}{\dot{q}_{abs}''} \right] \\ &= \frac{F'_{crit}}{Cg} \cdot \left[ Cg \cdot IAM \cdot \cos(\theta) \cdot \eta_{opt,pico} \cdot \eta_{sombras} \cdot \eta_{bordes} - \frac{h_{ext} \cdot (\bar{T}_f - T_{ext})}{DNI} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{ext} \cdot (\bar{T}_f^4 - T_{ext}^4)}{DNI} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

Esta ecuación es más parecida a la encontrada en otros modelos de diferentes autores, como por ejemplo en [7] o [8], pero con dependencia de  $T^4$  lo cual tiene mayor sentido físico al esperarse que las pérdidas radiativas sean dominantes en situaciones de media y alta concentración.

## 2.4. Aplicabilidad de los modelos

Aunque en el caso del Modelo de 4º Orden no se ha realizado ninguna simplificación para la resolución de la ecuación característica, sí que se han hecho las siguientes consideraciones que limitan su aplicación:

- \* Se ha considerado que los parámetros característicos  $U_{rec}$ ,  $\varepsilon_{ext}$ ,  $h_{ext}$  y  $C_p$  son constantes a lo largo de toda la longitud del receptor. Se considerará que esto es aceptable para longitudes inferiores a 100 m tal y como se indica en el desarrollo del modelo.
- \* Se supone uniformidad del flujo de radiación sobre el tubo absorbedor. Para tecnología CCP se acepta esta hipótesis.
- \* La caracterización de los tubos absorbentes empleados en CCP es compatible con el desarrollo del modelo basada en un tubo desnudo (para los que posteriormente se emplearán unos coeficientes de transmisión de calor adecuados para los tubos con cubierta de vidrio).
- \* La suposición de fluido incompresible en la que se desprecia el término de pérdida de carga y de energía cinética sobre el término energético es adecuada para plantas que operan con aceite térmico dado que los circuitos están presurizados para mantener en todo momento el fluido en estado líquido y los caudales de operación tienen un número de Reynolds medio.
- \* El flujo puede suponerse uniforme en el interior del tubo absorbedor.
- \* Dada la longitud real del tubo absorbedor en una planta CCP, puede despreciarse el efecto de transmisión de calor longitudinal.

Según lo visto, el modelo resulta aplicable a la simulación de un campo solar de concentradores cilindroparabólicos bajo las condiciones normales de operación. Por otro lado, la simulación se realizará también para el cálculo con intervalos horarios en los que se supondrá condiciones estacionarias de planta y se descartarán aquellos períodos de arranque y parada o cambios abruptos en los que las inercias propias del sistema y la intervención de los operadores de planta producirían que el comportamiento instantáneo no se correspondiese con el simulado.

El Modelo de Primer Orden presenta mayores restricciones, especialmente en los rangos de operación aceptables (no deben ser próximos a los valores críticos definidos en la ec.(2.28) y (2.27)), siendo sus resultados algo menos precisos en general.

El Modelo Simplificado solo es válido además para longitudes de receptor más reducidas.

### **3. MODELADO DEL CAMPO SOLAR**

#### **3.1. Metodología seguida para el modelado del campo solar**

El software desarrollado se basa en el paradigma de Programación Orientada a Objetos (POO) donde, a grandes rasgos, cada sistema físico se define como un objeto perteneciente a una Clase con la capacidad de recibir información, manipularla de acuerdo a unas reglas propias del sistema y devolver información.

Una de las principales ventajas de esta metodología es la modularidad, de tal forma que se puede ir desarrollando jerárquica, progresiva e independientemente cada uno de los sistemas para después interconectarlos. Posteriormente se puede modificar el comportamiento de alguno de estos objetos reprogramando la Clase a la que pertenece sin que esto afecte de forma drástica al resto de objetos del modelo. Es una técnica escalable y que permite definir diferentes grados de intervención al usuario final, desde interactuar con cada objeto como si de una caja negra se tratase hasta modificar el comportamiento del sistema introduciendo sus propios métodos en las clases.

Por todas estas razones, el modelado mediante POO resulta muy interesante para la simulación de sistemas en el ámbito de la ingeniería y ha sido el elegido para el desarrollo del código de este TFG

#### **3.2. Sistemas físicos y Clases para el modelado del campo solar**

En los siguientes apartados iremos describiendo el campo solar desde el punto de vista de su comportamiento físico, los subsistemas que lo componen y definiremos las Clases que se deben programar para modelar cada uno de estos subsistemas. Pero en primer lugar introduciremos alguna terminología.

Se denomina HCE a cada uno de los tubos absorbedores de unos 4 m de longitud con envolvente de vidrio propia que, soldados uno tras otro, forman la tubería sobre la que se concentra la radiación solar. Los HCE se unen mediante soldadura en grupos de 3 o 4 y se montan sobre unidades estructurales denominadas SCE (Solar Collector Element).

Un conjunto de SCE que se mueven solidariamente entre ellos pero con capacidad de movimiento independiente de otro conjunto de SCEs se denomina SCA (Solar Collector Assembly). El tubo absorbedor montado en cada SCA está unido mediante uniones móviles al tubo absorbedor del siguiente SCA o a las tuberías de entrada y salida del lazo. El SCA es, por tanto, la unidad mínima de seguimiento solar.

#### FIGURA LAZO – SCA

Un conjunto de SCAs con su tubo absorbedor conectado en serie constituye un lazo. Cada lazo consta de un número suficiente de SCAs para garantizar que, bajo condiciones de diseño, el fluido caloportador alcanza la temperatura deseada a la salida del lazo, es decir, se produce el salto térmico necesario. Si la temperatura en el SCA sobrepasa la máxima permitida, el SCA puede desenfocar parcial o totalmente con el fin de dejar de concentrar radiación sobre el tubo absorbedor.

Un subcampo o sección es un conjunto de lazos conectados en paralelo, de tal forma que se espera que el caudal que circula por cada uno de sus lazos sea el mismo. El subcampo cuenta con válvulas de regulación de caudal a su entrada, por lo que constituye la unidad mínima de control de caudal en el campo solar. En algunas ocasiones cada lazo tiene capacidad de regulación de su caudal de forma constante. En ese caso se podría decir que cada lazo actúa como un subcampo con un único lazo, pero esto no es lo habitual.

Finalmente, el campo solar está formado por un conjunto de subcampos. El fluido caloportador frío entra en el campo solar y se distribuye por cada uno de los subcampos, donde se vuelve a distribuir equitativamente entre los lazos. En los lazos, el HTF se calienta y retorna a una tubería que lo conduce a la salida del subcampo, donde finalmente el HTF procedente de todos los subcampos se mezcla y se trasporta, a lo largo de una tubería denominada colector caliente, hasta el punto de consumo.

### 3.2.1. Clases derivadas de Model: Clase ModelBarbero4thGrade, ModelBarbero1stGrade y ModelBarberoSimplified

Se emplean clases derivadas de la Clase Model para implementar los diferentes modelos empleados para calcular el rendimiento y para simular, por tanto, el funcionamiento de cada HCE. Es en cada una de estas clases donde se desarrolla el algoritmo que, a partir

de los parámetros físicos que definen al HCE, las variables que definen el estado del HTF que circula por él y las condiciones de operación, resuelve las ecuaciones definidas en el modelo y nos permite conocer las condiciones del HTF a la salida de cada HCE.

### Clase ModelBarbero4thOrder

La instancia de esta clase recibe como valores de entrada un referencia a una instancia de un HCE del cual va a calcular su rendimiento, una referencia a la instancia del HTF que se está empleando y valores de condiciones meteorológicas de radiación, temperatura y velocidad del viento. El HCE debe estar inicializado previamente con los valores de caudal mísico, temperatura y presión de entrada y el flujo de calor absorbido  $q_{abs}$ .

El procedimiento de cálculo implementado en el método *calc\_pr()* es el siguiente (los parámetros que se obtienen mediante métodos propios de las instancias del HCE y del HTF se explican en los apartados correspondiente más adelante):

- Estimación de la temperatura de pared exterior del tubo absorbador  $T_{ro}$  según la ec(3.1) a partir del coeficiente de transmisión de calor al interior  $U_{rec}$  y del flujo de radiación absorbido por el tubo absorbador,  $\dot{q}_{abs}''$ , a partir de la instancia del HCE.

Para el primer HCE del lazo se asume un rendimiento inicial  $\eta = 1$  pero para los siguientes se emplea el rendimiento del HCE anterior, con lo cual se acelera un poco el proceso de convergencia por partirse de un valor previsiblemente más próximo.

$$T_{ro} = T_f + \eta \cdot \frac{\dot{q}_{abs}''}{U_{rec}} \quad (3.1)$$

- Cálculo del flujo de pérdidas  $\dot{q}_{perd}''$  mediante la ec.(2.5) incrementado con las pérdidas a través de los soportes que sujetan el tubo absorbador,  $\dot{q}_{perd,soportes}$ . Las pérdidas en los soportes se modelan mediante la ec.(3.15) que se explica en el apartado correspondiente a la clase HCE.
- Cálculo de los parámetros de funcionamiento  $\dot{q}_{crit}''$ ,  $U_{crit}$  y  $NTU$  para el HCE con la temperatura de pared calculada previamente según las ecuaciones (2.27) y (2.28) respectivamente.
- Cálculo de los coeficientes  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  y  $f_4$  mediante las ecuaciones (2.20) a (2.23) y cálculo de  $f_0$  mediante la ec.(2.14).

- Se resuelve la ec.(2.12) con de forma iterativa mediante Newton-Raphson para calcular  $\eta_0$ . Como valor inicial se calcula  $\eta_0$  a partir de la ec.(2.26) del Modelo de 1<sub>er</sub> Orden.
- Con el valor de  $\eta_0$  obtenido se calculan los valores de  $Z$ ,  $g'(Z)$ ,  $g''(Z)$  y  $g'''(Z)$  dados por las ecuaciones (2.13) a (2.18).
- Finalmente, se calcula el rendimiento  $\eta(x^*)$  según la ec.(2.11), la temperatura de pared exterior  $T_{ro}$  y se comparan con los valores iniciales. Si las diferencias son superiores a cierto margen configurable se vuelve a realizar otra iteración hasta conseguir la convergencia, pero previamente a cada iteración se recalculan todos los pasos anteriores empleando la temperatura de pared del tubo absorbedor calculada con el nuevo rendimiento.

Para el primer HCE del lazo se emplea como temperatura del fluido  $T_f$  la temperatura del HTF a la entrada del HCE. Para los siguientes HCEs del lazo se incrementa la temperatura de entrada con la mitad del salto de temperatura que experimentó el HCE anterior.

Una vez finalizado el proceso iterativo, la instancia del HCE actualiza sus valores de rendimiento, temperatura y presión de salida del HTF, quedando totalmente definido su punto de funcionamiento. Las condiciones de temperatura y presión a la salida del HCE serán las de entrada del HCE siguiente.

Al calcular el rendimiento integral para todo la longitud del HCE estamos haciendo coincidir el tamaño de la malla de integración con la longitud física real del HCE. Se ha comprobado que la reducción de la malla no aumenta de forma apreciable la precisión de los cálculos y en cambio sí supone un coste computacional importante. Por el contrario, una forma de acelerar el proceso de simulación consiste en considerar artificialmente que la longitud del HCE es mayor que la real. Se trata de aumentar el tamaño de la malla de integración para reducir el número de cálculos. En este trabajo se seguirá, al igual que en **1022085/7TD8VTGL**, el criterio de no superar un tramo de HCE superior a 100 m propuesto en **1022085/CYH3NJEG**.

## **Clases ModelBarbero1stOrder y ModelBarberoSimplified**

El cálculo del rendimiento que realizan estas dos clases es idéntico al del Modelo de 4º Orden hasta el momento de llegar al proceso iterativo, punto en el cual se calcula el rendimiento térmico directamente mediante las ecuaciones (2.25) y (2.30) respectivamente.

### **3.2.2. HCE, Heat Collector Element**

Físicamente, un HCE es un tubo de acero con una envolvente de vidrio de tal forma que entre el tubo de acero y la envolvente queda un espacio en el que se ha practicado el vacío. Por el interior del tubo circula el fluido caloportador (HTF, Heat Transfer Fluid) que aumenta su energía térmica al recibir el calor procedente de las paredes interiores del tubo. El tubo recibe durante el proceso de fabricación un recubrimiento selectivo que mejora sus propiedades físicas para absorber la radiación solar. De cara a modelar el funcionamiento del HCE como elemento responsable de calentar el HTF de forma compatible con el Modelo físico desarrollado se define la clase HCE que consta de los siguientes atributos:

- tin: Temperatura de entrada del HTF ( $K$ )
- pin: Presión de entrada del HTF ( $Pa$ )
- massflow: Caudal másico del HTF ( $Kg/s$ )
- qabs: Potencia calorífica absorbida ( $W/m^2$ )
- qlost: Potencia calorífica perdida ( $W/m^2$ )
- qlost\_brackets = Potencia calorífica perdida a través de los soportes del HCE ( $W/m^2$ )
- pr: Rendimiento global del HCE ( )
- pr\_opt: Rendimiento óptico del conjunto HCE + SCA ( )
- tou: Temperatura de salida del HTF ( $K$ )
- pout: Presión de salida del HTF ( $Pa$ )

[FIGURA ESQUEMA CLASE HCE]

Con estos parámetros el comportamiento del HCE queda totalmente caracterizado en el sistema desde el punto de vista del proceso de generación. Estos atributos (pueden entenderse como variables) están relacionados entre sí según las reglas que aplique cada modelo.

Ya hemos visto, al hablar de la Clases para los modelos, cómo un objeto (instancia) de la clase HCE puede ser procesada por otra instancia de la clase del modelo para simular su comportamiento. Es necesario que la instancia del HCE pase los siguientes parámetros al modelo:

- $k_{rec}$ , conductividad térmica de la pared del receptor. Se ha empleado la ec.(3.2) válida para el acero inoxidable 321H:

$$k_{rec} = 0,0153 \cdot (t - 273,15) + 14,77 \quad (3.2)$$

- $h_{int}$ , coeficiente de transferencia de calor convectivo hacia el interior. Para el cálculo se emplea la ec.(3.3) donde  $Nu_G$  es el número de Nusselt obtenido mediante la correlación de Gnielinski dada en la ec.(3.4),  $D_{ri}$  es el diámetro interior del tubo absorbedor y  $k_f$  es la conductividad térmica a la temperatura del fluido:

$$h_{int} = \frac{Nu_G \cdot k_f}{D_{ri}} \quad (3.3)$$

$$Nu_G = \frac{\left(\frac{C_f}{2}\right) \cdot (Re_{D_{ri}} - 1000) \cdot Pr_f}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr_f^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_{ri}}\right)^{0,11} \quad (3.4)$$

- $U_{rec}$ , coeficiente de transmisión de calor al interior. Viene dado por la ec.(2.4) comentada previamente.
- $q_{abs}$

$$\dot{q}_{abs}'' = \eta_{opt}(\theta) \cdot Cg \cdot DNI \cdot \eta_{sombras} \cdot \eta_{bordes} \quad (3.5)$$

Cada uno de los parámetros de esta ecuación se obtiene de la siguiente manera:

- $DNI$  es la irradiancia normal directa cuyo valor se lee para cada fecha de cálculo de la simulación.
- $Cg$  es el factor de concentración geométrica, definido genéricamente para sistemas de concentración como el cociente entre el área de apertura del concentrador,  $A_c$  y el área de apertura del receptor,  $A_r$ . Hemos considerado como efectiva toda el área del receptor, no solo aquella donde se concentra la radiación ya que supondremos que el flujo se reparte uniformemente por toda la superficie de tubo absorbedor. De esta manera, el factor de concentración geométrica para un colector cilindroparabólico es, según la ec.(3.6):

$$Cg = \frac{a}{\pi D_{ro}} \quad (3.6)$$

donde  $a$  es la apertura de la parábola del concentrador y  $D_{ro}$  es el diámetro exterior del tubo absorbedor.

- $\eta_{opt}(\theta)$ , rendimiento óptico. Este parámetro depende del ángulo de incidencia  $\theta$  y se obtiene a partir del rendimiento óptico pico,  $\eta_{opt,peak}$  y del modificador del ángulo de incidencia,  $IAM$  según la ec.(3.7):

$$\eta_{opt}(\theta) = \eta_{opt,peak} \cdot IAM \cdot \cos(\theta) \quad (3.7)$$

Para calcular  $\eta_{opt,peak}$  empleamos la expresión dada en la ec.(3.8). La ecuación para  $IAM$  se ofrece en la sección correspondiente al modelado del SCAA por ser un valor característico de este componente.

$$\eta_{opt,peak} = \alpha \cdot \tau \cdot \rho \cdot \gamma \quad (3.8)$$

Los parámetros  $F_0$ ,  $F_1$  y  $F_2$  los ofrece cada fabricante para su concentrador. El  $IAM$  es una propiedad del SCA y por tanto la instancia del HCE hace una llamada al método `get_IAM` de su SCA asociado, aquel en el que está montado, para recibir su valor.

Igualmente, en la ec.(3.8) los parámetros  $\rho$  (reflectividad del concentrador) y  $\gamma$  (fracción solar), son parámetros del SCA y deben obtenerse de la instancia de SCA asociada al

HCE.  $\alpha$  es la absorvidad del receptor y  $\tau$  es la transmisividad del vidrio envolvente del tubo absorbedor. En ambos casos se trata de parámetros configurables que se introducen con el resto de características del HCE en el archivo de configuración de la simulación.

- $\eta_{bordes}$  contabiliza las pérdidas debidas a que en una pequeña porción del tubo absorbedor del SCA no se produce concentración debido al ángulo de incidencia. Un tramo del tubo absorbedor, que puede implicar desde solo un tramo del primer HCE hasta a varios HCEs, tendrá un flujo de radiación nulo, o muy bajo. El tramo de tubo absorbedor que queda sin concentración ( $L_{bordes}$  se calcula mediante la ec.(3.9) a partir de la distancia focal,  $f_l$  y de ángulo de incidencia  $\theta$ :

$$L_{bordes} = \frac{f_l}{\tan(\theta)} \quad (3.9)$$

A partir de este valor el código calcula que fracción del HCE o cuantos HCEs quedan inutilizados y les asigna un rendimiento nulo.

\*[REVISAR MÉTODO DE CÁLCULO]  $\eta_{sombras}$  es un valor que se calcula en base a la porción del concentrador que se encuentra afectado por sombras debido a que la distancia de separación entre lazos está acotada. En disposiciones de lazos habituales con eje seguimiento Norte-Sur estas sombras solo aparecen a primera y última hora del día. Su cálculo exacto requeriría conocer totalmente la disposición de cada lazo, pero una aproximación suficiente se puede obtener mediante la ec.(3.10):

$$\eta_{sombras} = \frac{\operatorname{sen}(\alpha_s) \cdot D_L}{A_c} \quad (3.10)$$

Una vez que la instancia del modelo ha concluido el cálculo, el HCE ya puede calcular cuál será la temperatura de salida del HTF,  $t_{out}$ , que aparece implícita en la ec.(3.11):

$$\Delta H = \dot{m} \cdot \int_{t_{in}}^{t_{out}} Cp(t)dt \quad (3.11)$$

donde  $\Delta H$  es el incremento de entalpía del H, pues hemos considerado que se trata de un fluido incompresible y también se ha despreciado la participación de energía cinética.

Previamente se debe calcular  $\Delta H$  según la ec.(3.12):

$$\Delta H = \dot{q}_{abs}'' \cdot \eta \cdot \pi \cdot d_{ro} \cdot L \cdot \gamma_L \cdot \gamma_g \quad (3.12)$$

La ec.(3.11) puede resolverse por métodos numéricos si el calor específico  $C_p$  del fluido se ha obtenido a partir de un polinomio. En el caso de que se disponga de una función que proporcione la temperatura del fluido en función de la entalpía  $T(H)$ , como ocurre si se usa *CoolProp*, se puede calcular su valor directamente como  $T_{out} = T(H_{out})$ .

Se introducen el *factor de longitud efectiva*,  $\gamma_L$  y *factor de interceptación geométrico*,  $\gamma_g$  para tener en cuenta la reducción de la longitud *activa* del HCE debido a los fuelles en los extremos del HCE y al sombreado del escudo térmico en las uniones de HCEs. Un valor típico para ambos factores está comprendido entre 0,96 y 0,97 **1022085/XAQ9AM5E**. En el caso de que el calor absorbido sea nulo, la temperatura de salida será inferior a la de entrada y el valor  $\Delta H < 0$ . En este caso, no existe reducción de la longitud efectiva del absorbedor y la energía perdida se calcula según la ec.(3.13) pues a lo largo de toda la superficie del HCE se experimentan pérdidas energéticas:

$$\Delta H = \dot{q}_{perd}'' \cdot \eta \cdot \pi \cdot d_{ro} \cdot L \quad (3.13)$$

- $\varepsilon_{ext}$ , emisividad equivalente de la superficie exterior del receptor. La emisividad equivalente empleada por el modelo depende de la temperatura de pared exterior del tubo y se emplea la ec.(3.14) para calcularla:

$$\varepsilon = A_0 + A_1 \cdot (t_{ro} - 273,15) \quad (3.14)$$

Se corrige ligeramente su valor en función de la velocidad del viento, incrementando su valor un 1 % con un viento de 4 m/s y un 2 % para viento de 4 m/s. Los coeficientes  $A_0$  y  $A_1$  son los que se ofrecen en **1022085/7TD8VTGL**.

- $h_{ext}$ , coeficiente de transferencia de calor convectivo equivalente al exterior. Su valor puede considerarse nulo para el caso de un HCE con vacío en su espacio anular. En **1022085/7TD8VTGL** se ofrecen las ecuaciones para diferentes combinaciones de

recubrimiento, Black-Chrome o Cermet y conservación o no del vacío, obtenidas mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) por su autor para un modelo unidimensional del HCE.

- $\dot{q}_{perd,soportes}$ , pérdidas a través de los soportes que sujetan en HCE. Se hace uso de la ec.(3.15) propuesta en **1022085/CYH3NJEG**:

$$\dot{q}_{perd,soportes} = n \cdot \frac{\sqrt{P_b \cdot k_b \cdot A_{cs,b} \cdot \bar{h}_b \cdot (T_{base} - T_{ext})}}{L} \quad (3.15)$$

donde  $P_b$  es el perímetro de la sección del soporte,  $A_{cs,b}$  es la sección transversal de la unión entre el brazo y el tubo absorbedor,  $K_b$  es la conductividad térmica del acero empleado en el brazo,  $\bar{h}_b$  es el coeficiente de transmisión de calor por convección medio hacia el exterior,  $T_{base}$  es la temperatura de la zona de conexión entre los brazos y el tubo absorbedor,  $L$  es la longitud del colector y  $n$  es el número de soportes por colector.

La Clase HCE también nos proporciona algunos métodos necesarios para el trabajo de procesamiento de la información, asignación y recuperación de valores de los atributos. Otro aspecto importante es que cada instancia de la clase HCE tiene un atributo de tipo ‘diccionario’, en el que a modo de lista de pares clave-valor va a recibir aquellos parámetros que posteriormente serán empleados por el Modelo. Los diferentes autores que han elaborado modelos para los HCE no siempre utilizan los mismos parámetros ni idénticos identificadores. Al emplear un diccionario se facilita la tarea de implementación de nuevos Modelos, sin que sea necesario cambiar los atributos de la clase en cada ocasión. Entre los parámetros que se pasan al HCE durante la creación de su instancia están su absorbtividad solar  $\alpha_{solar}$ , la transmisividad del vidrio  $\tau$  y su reflectividad  $\rho$ .

En el caso de la planta simulada se ha utilizado un HCE fabricado por Solel cuyos parámetros se guardan en una librería en formato JSON. Parte de los datos de cada HCE de la librería se han extraído de los archivos de configuración de SAM (System Advisor Model), el software de referencia para la simulación de plantas de energías renovables. No obstante, el modelo no hace uso de todos ellos y, en cambio, se precisa de algún dato más para realizar la simulación. Estos parámetros son almacenados en el diccionario *parameters*. El programa desarrollado permitiría, en principio, modelar cada HCE con unos parámetros diferentes, es decir, que cada HCE se comportase de forma diferente

al resto. Esta funcionalidad puede ser interesante para el estudio de comportamiento del campo solar cuando se dispone de estadísticas adecuadas sobre cómo evoluciona en el tiempo y se distribuye en el campo solar cada parámetro, lo cual hace que no todos los lazos se comporten de igual manera. El inconveniente es que el tiempo de cálculo aumenta notablemente al tener que simularse cada lazo independientemente.

Finalmente, un HCE es un elemento que ocupa una determinada posición dentro del SCA (Solar Collector Assembly). Más adelante se verá que, para determinadas simulaciones, el orden que ocupa dentro de la fila de HCEs y el propio SCA al que pertenece, pueden ser datos necesarios a la hora de estudiar su comportamiento. Por este motivo cada HCE mantiene una referencia al SCA al que pertenece y guarda información sobre su posición relativa dentro de él.

- `sca`: Una referencia al objeto que representa el SCA en el cual el HCE está montado.
- `hce_order`: Un número entero, indicando la posición relativa del HCE dentro del SCA.

### **3.2.3. SCA, Solar Collector Assembly**

Un SCA es una estructura compuesta por una serie de reflectores que cocentran la radiación solar sobre los HCE. Desde el punto de vista operativo, un SCA cuenta con capacidad de movimiento independiente respecto al resto de SCAs de la planta, por lo que es la unidad mínima de control de enfoque o desenfoque de la radiación solar en el campo solar. La clase SCA nos permite modelar cada SCA teniendo en cuenta las propiedades de los reflectores (reflectividad, suciedad de los espejos, precisión del movimiento de seguimiento solar, etc.)

En plantas de colectores cilindroparabólicos lo más frecuente es que el sistema de seguimiento tenga su eje de rotación alineado en la dirección Norte-Sur con el fin de hacer un seguimiento Este-Oeste de la trayectoria solar a lo largo del día. No obstante, una configuración con eje Este-Oeste también puede ser interesante en algunos casos y el modelo también permite esta configuración.

Dentro del campo solar, cada HCE debe pertenecer a un SCA. El primer HCE del SCA recibe el fluido caloportador procedente de otro SCA o de las tuberías colectoras

de HTF frio. El último HCE del SCA entrega el HTF más caliente al siguiente SCA o a las tuberías colectoras de HTF caliente a la salida del lazo.

El SCA cuenta con un método para el cálculo del modificador por ángulo de incidencia. Hemos considerado que el SCA mantendrá en todo momento un ángulo de seguimiento  $\beta$  óptimo con el fin de minimizar el ángulo de incidencia. En este caso, el *IAM* se calcula según la expresión dada por la ec.(3.16)

$$IAM = F_0 + F_1 \cdot \frac{\theta}{\cos(\theta)} + F_2 \cdot \frac{\theta^2}{\cos(\theta)}, \forall \theta \in (0^\circ, 80^\circ) \quad (3.16)$$

Algunos fabricantes incluyen un factor  $\cos(\theta)$  en la expresión del *IAM*, por lo que no deberá incluirse entonces en la ecuación del rendimiento total del HCE. En nuestro caso, para el UVAC 3 de Solel empleado en la simulación, no es así.

Otro valor que debe ofrecernos la clase que modela al SCA es la *fracción solar* o *factor de interceptación*, que permite estimar la tasa entre la radiación solar que alcanza al reflector y la que posteriormente indice realmente sobre el tubo absorbedor. Su valor se obtienen según la ec.(3.17) como producto de una serie de factores:

$$\gamma = \eta_{geométrico} \cdot \eta_{seguidor} \cdot \eta_{suciedad} \cdot \eta_{disponibilidad} \quad (3.17)$$

El factor geométrico  $\eta_{geométrico}$  depende de las imperfecciones geométricas de conjunto reflector-absorbedor como pequeñas desviaciones en la curvatura de los espejos o la deformación de la estructura. El factor de precisión del seguidor  $\eta_{seguidor}$  permite considerar los errores de seguimiento del mecanismo de movimiento del reflector. El factor de suciedad  $\eta_{suciedad}$  se refiere a las pérdidas de reflectividad debidas a acumulación de polvo en los espejos. En realidad, si no se ha considerado un equivalente para el polvo acumulado en la superficie del vidrio del HCE, este factor debería computarse dos veces, pues la merma de radiación se produce tanto en el espejo, como radiación solar no reflejada, como en la envolvente de vidrio, al disminuir su transmisividad. Finalmente, el factor de disponibilidad  $\eta_{disponibilidad}$  considera las pérdidas que ocasionalmente se puedan producir por averías del sistema de concentración.

El SCA, como sistema responsable del seguimiento solar, también cuenta con un método para ofrecernos información sobre el ángulo de incidencia  $\beta$  en el plano de apertura

del reflector. Las expresiones generales pueden encontrarse en **1022085/95AM6AQN**. En nuestro caso hemos recurrido a la librería *pvlib-python* **1022085/GUC54R5I** desarrollada en Sandia National Laboratories para obtener los valores del ángulo de incidencia y la posición solar para cada fecha del año y según las coordenadas geográficas del lugar donde se realiza la simulación.

### 3.2.4. Loop

Un Loop o lazo es un conjunto de SCAs conectados en serie de tal forma que el HTF que entra frío al lazo experimenta un salto térmico cuando transita por él. El sistema de control ajusta el estado de enfoque o desenfoque de cada SCA en el lazo con el fin de conseguir que la temperatura de salida sea la de consigna. Por motivos de económicos, el caudal de HTF no suele ser regulable a nivel de lazo, pues obligaría a instalar una válvula de control en cada uno de ellos y por tanto todos los lazos de un mismo subcampo suelen tener un caudal muy parecido. Se ha desarrollado también una Clase Subfield para dar cuenta del conjunto de lazos que pertenecen a un mismo subcampo y, por tanto, pueden variar su caudal de forma independiente de los lazos de otro subcampo. En un campo solar suele haber haber varios subcampos que pueden regular su caudal independientemente. Los casos más extremos serían el de un campo solar con un único subcampo, en el que todos los lazos pertenecen al mismo subcampo y en el otro extremo, un campo solar con tantos subcampos como lazos tiene, de tal forma que cada lazo es el único en su subcampo y por tanto cada lazo puede regular su caudal independientemente.

Cada lazo del campo solar es modelado mediante una instancia de la clase Loop. Cada instancia mantiene referencias al subcampo al que pertenece y a los SCA que contiene. Atributos importantes de estas instancias serán el caudal de HTF en el lazo, las temperaturas y presiones de entrada y salida del HTF y el rendimiento completo del lazo.

El código permite trabajar de dos formas, bien calculando y ajustando el caudal requerido para conseguir una temperatura de HTF determinada o bien fijando el caudal de HTF y calculando qué temperatura de salida tendría el HTF. En caso de que esta temperatura de salida supere el máximo permitido (un valor configurable) el código considera que se producirá un desenfoque en el SCA en que se alcance esta temperatura y el HTF dejará de calentarse. En este caso se suele decir que se produce un vertido de energía o

desaprovechamiento de la radiación existente. El código permite contabilizar esta energía desaprovechada por cada lazo durante estas situaciones.

La Clase PrototypeLoop hereda de la Clase Loop sus principales métodos y atributos pero supone una pequeña variación de una instancia o lazo definido por Loop ya que se trata de un lazo "típico" o "promedio", que presenta una configuración constructiva idéntica a la del resto de lazos de la planta pero no pertenece a ningún subcampo solar. Este lazo especial o prototipo se empleará cuando queramos realizar un estudio paramétrico del comportamiento del lazo, no de la planta, y también para realizar una simulación mucho más rápida cuando asumamos la hipótesis de que todos los lazos de la planta se comportan de igual manera. Esta aproximación es la que se hace en aplicaciones como SAM, donde no se simulan todos los lazos para modelar el campo solar, sino que se simula solo un lazo y el resultado se obtiene multiplicando el caudal de salida de este lazo por el número de lazos que forman la planta.

### **3.2.5. Subfield, subcampo solar**

Un subcampo es un conjunto de lazos en los que se considera que el HTF se repartirá equitativamente. Cada subcampo dispone de una válvula de control de caudal a su entrada y representa el mayor grado de control de caudal de HTF que se puede alcanzar en el campo solar. Un campo solar suele contar con varios subcampos y cada uno de ellos, a su vez, cuenta con varios lazos.

La Clase Subfield mantiene referencias a lo lazos que lo constituyen, es decir, a cada una de las instancias que representan un lazo. También mantiene referencia al campo solar al que pertenece y cuenta con métodos para calcular cuál será la temperatura de salida del HTF del subcampo solar una vez que el caudal de salida de cada lazo se haya mezclado con el del resto de lazos. Nótese que aunque se supone que todos los lazos del subcampo tienen el mismo caudal, másico la temperatura de salida de cada uno de ellos puede ser diferente y, por tanto, la energía aportada por cada lazo también lo será.

### **3.2.6. Solarfield, campo solar**

El campo solar alberga el conjunto de subcampos y, por tanto, todos los lazos de la instalación. Se trata del objeto que en última instancia queremos modelar con el fin de conocer cómo será el comportamiento de la planta solar y su rendimiento anual. A la hora de definir el campo solar para el modelo es necesario conocer cuántos subcampos contiene, cuántos lazos hay en cada subcampo, qué configuración tiene cada lazo (número de SCAs en cada lazo y número de HCEs en cada SCA). También es importante conocer la distancia entre lazos con el fin de estimar el sombreado que se produce a primera y última hora del día.

El Clase Solarfield también recibe una serie de valores nominales para los que se ha realizado un diseño óptimo del sistema, como las temperaturas y presiones de entrada y salida del HTF, las temperaturas máximas y mínimas tolerables por razones de seguridad, el caudal nominal (normalmente se suele dar este caudal por lazo y el caudal del campo solar será la suma de todos ellos), el caudal mínimo (existe cierta limitación tanto por la velocidad mínima de las bombas como por otras cuestiones operativas que desaconsejan que el HTF circule por debajo de este límite).

Cuando se crea una instancia de la Clase Solarfield, ésta recibe los datos de configuración que se ha pasado para la simulación y lanza el proceso de construcción que genera, en base a esa configuración, los diferentes subcampos, lazos, SCAs y HCEs que forman en campo solar.

### **3.2.7. Clase Fluid y sus clases hijas, FluidCoolProp y FluidTabular**

Para modelar el HTF (Heat Transfer Fluid) se ha creado una Clase Fluid. Las propiedades del HTF pueden obtenerse mediante funciones polinómicas con coeficientes constantes calculados experimentalmente o desde librerías preexistentes como CoolProp. Por ese motivo, según se opte por un método u otro, se han creado las subclases FluidCoolProp y FluidTabular. No obstante, se ha comprobado que el número de tipos de HTF que existen en la librería FluidCoolProp no es muy grande, limitándose a Therminol VP-1, Syltherm 800. No se encuentra en esta librería el aceite Dowtherm A, que es el que se emplea en la planta cuyos datos se han empleado para el desarrollo de esta herramienta.

ta. Pero el mayor inconveniente reside en que CoolProp devuelve valores solo dentro del rango de temperaturas de uso válidas según el fabricante.

Este rango es demasiado estricto y se producen problemas debido a la devolución de valores no numéricos, especialmente cuando se está calculando la temperatura teórica de salida del HTF cuando hay sobrecalentamiento. Por este motivo se ha hecho uso mayoritariamente de la clase FluidTabular, con funciones polinómicas con coeficientes calculados a partir de los datos ofrecidos por los fabricantes. La clase Fluid sus clases hijas ofrecen métodos para calcular la densidad, viscosidad cinemática, número de Reynolds, calor específico, conductividad térmica y entalpía en función de la temperatura y la presión. También ofrecen un método para calcular la temperatura del fluido en función de la entalpía y la presión, considerando entalpía cero para líquido saturado según ASHRAE a una temperatura de 285.856 K.

La planta emplea como fluído caloportador Dowtherm-A, de Dow Chemical. Para el modelado sería necesario conocer una serie de parámetros en función de la temperatura y la presión, pero en una planta termosolar se debe trabajar siempre con el fluido en estado de líquido saturado y se ha comprobado que la variación de estos parámetros con la presión es despreciable, por lo que todos pueden expresarse a partir de un polinomio de mayor o menor grado en función exclusivamente de la temperatura. También se ha obtenido una curva para calcular la temperatura del líquido saturado en función de su entalpía.

- $\rho(T)$ : Densidad, ( $kg/m^3$ ).
- $\mu(T)$ : Viscosidad dinámica, ( $Pa \cdot m$ ).
- $k_T(T)$ : Conductividad térmica, ( $W/m \cdot K$ ).
- $C_p(T)$ : Calor específico a presión constante,  $J/Kg \cdot K$ .
- $H(T)$ : Entalpía específica,  $J/Kg$ .
- $T(H)$ : Temperatura, ( $K$ ), considerando  $H=0$  a  $T_{ref} = 285,86K$

La fórmula general para cada uno de estos parámetros es del tipo de la ec.(3.18):

$$parametro(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5 + a_6 \cdot T^6 + a_7 \cdot T^7 + a_8 \cdot T^8 \quad (3.18)$$

En las siguientes figuras pueden verse los diferentes parámetros del Dowtherm-A en función de la temperatura.

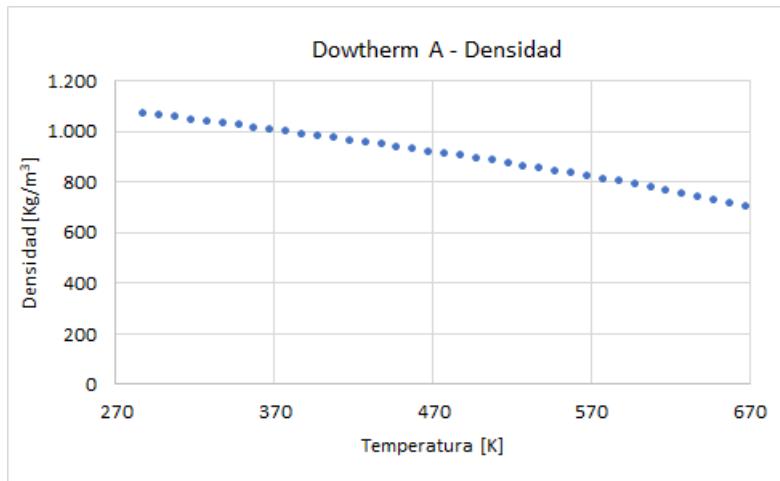


Fig. 3.1. Densidad en función de la temperatura.

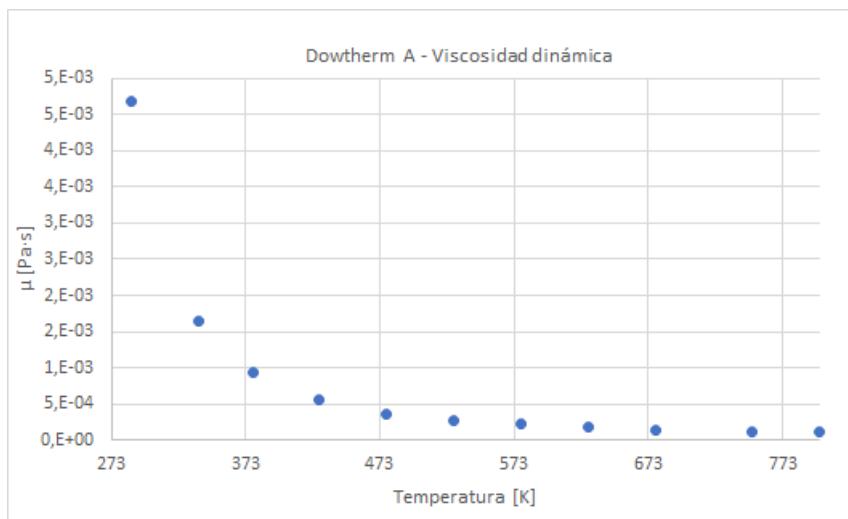


Fig. 3.2. Viscosidad dinámica en función de la temperatura.

Para el caso del Dowtherm-A se han obtenido los coeficientes de los polinomios que caracterizan cada parámetro a partir de [9] y se han contrastado las curvas con los datos ofrecidos en [10]. En el caso de la viscosidad cinemática se ha detectado que el polinomio de 8º grado que se optiene con los coeficientes de la primera referencia presenta una gran

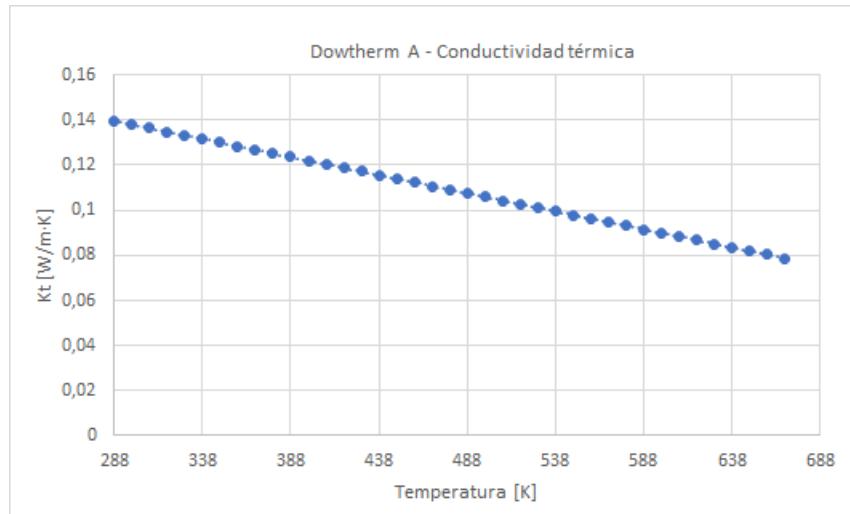


Fig. 3.3. Conductividad térmica en función de la temperatura.

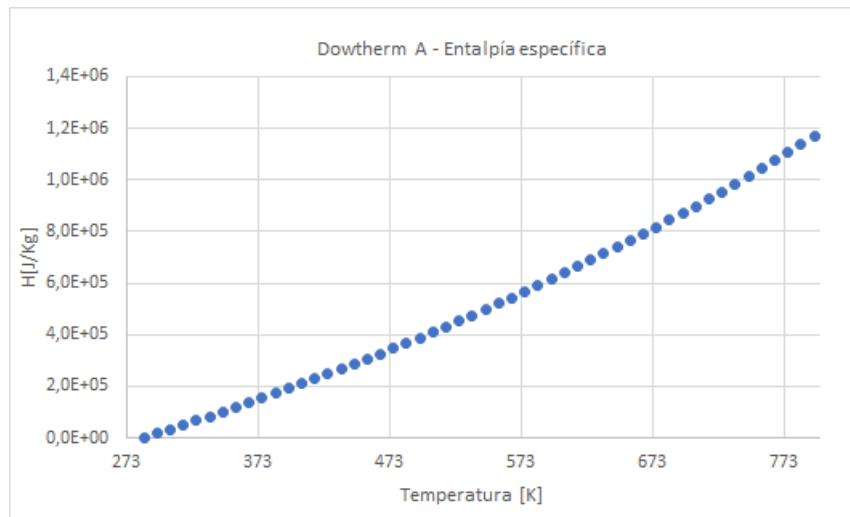


Fig. 3.4. Entalpía en función de la temperatura.

desviación y crecimiento asintótico para temperaturas ligeramente superiores a la máxima de operación del fluido. Con el fin de poder flexibilizar el proceso de cálculo y que no se produzcan desbordamientos se ha ajustado un nuevo polinomio tras extender los datos de la viscosidad dinámica hasta unos 450 °C aproximadamente según la tendencia observada en el último tramo de la curva  $\mu(T)$ . De esta forma se obtiene un nuevo polinomio, con mejor comportamiento en este rango extendido.

El mismo procedimiento se ha empleado para obtener los polinomios característicos del fluido Therminol VP-1, aunque en este caso los polinomios se han ajustado a partir de una lista de valores sacada de la librería CoolProp. Pese a que el programa de simulación permite que durante el tiempo de ejecución se obtengan los parámetros citados a través

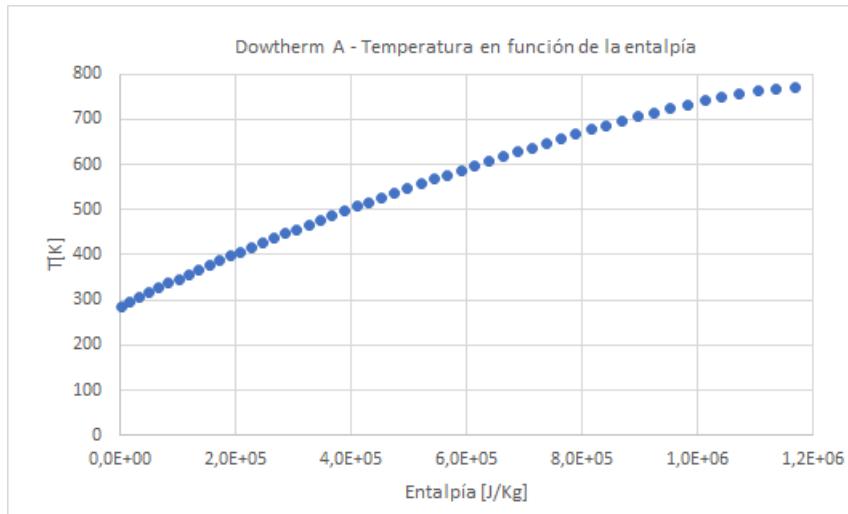


Fig. 3.5. Temperatura en función de la entalpía.

de esta librería, existe una limitación debido al rígido margen de temperaturas con el que esta librería trabaja para cada fluído y esto provoca que para valores de temperatura ligeramente superiores al rango de operación ofrecido por fabricante no se devuelva ningún valor. Esto resulta en problemas en tiempo de ejecución si algún lazo alcanza una temperatura superior a los 397°C (398°C en el caso de Syltherm 800) . Aunque superar esta temperatura no es recomendable, es algo que puntualmente ocurre durante la operación de la planta. Además, una forma calcular la energía desaprovechada por desenfoque sería a partir de la temperatura que hubiera alcanzado el lazo de no haberse producido el desenfoque y calculando posteriormente su entalpía. Esta aproximación, que sería imposible en la vida real debido a la degradación del HTF e incluso al daño del propio sistema por las sobrepresiones que se producirían, facilita el cálculo de la energía desaprovechada en cada momento. Se ha supuesto que las curvas de los parámetros se mantienen bien ajustadas siempre y cuando la sobretemperatura alcanzada no sea excesiva (en las simulaciones realizadas no se ha superado más del 10 % de la temperatura máxima de operación recomendada por el fabricante). Por estos motivos, para este trabajo se han empleado siempre los valores de los parámetros obtenidos a partir de los polinomios y no de CoolProp.

A continuación, en la siguiente tabla, se muestran los coeficientes para Dowtherm A:

#### Coeficientes de los polinomios de ajuste para Dowtherm A

	$C_p(T)$	$\mu(T)$	$\rho(T)$	$k_T(T)$	$H(T)$	$T(H)$
$a_0$	-2,363E+03	1,583E+00	1,492E+03	1,856E-01	-6,511E+05	2,853E+02

	$C_p(T)$	$\mu(T)$	$\rho(T)$	$k_T(T)$	$H(T)$	$T(H)$
$a_1$	3,946E+01	-2,338E-02	-3,332E+00	-1,600E-04	4,121E+03	6,207E-04
$a_2$	-1,702E-01	1,504E-04	1,248E-02	5,913E-12	-1,235E+01	-1,822E-10
$a_3$	3,904E-04	-5,489E-07	-2,968E-05	0	2,771E-02	-1,423E-16
$a_4$	-4,422E-07	1,242E-09	3,444E-08	0	-2,776E-05	3,316E-22
$a_5$	1,979E-10	-1,781E-12	-1,622E-11	0	1,106E-08	-1,753E-28
$a_6$	0	1,581E-15	0	0	0	0
$a_7$	0	-7,941E-19	0	0	0	0
$a_8$	0	1,728E-22	0	0	0	0

Para el caso del Therminol VP-1 los coeficientes son los siguientes:

#### Coeficientes de los polinomios de ajuste para Therminol VP-1

	$C_p(T)$	$\mu(T)$	$\rho(T)$	$k_T(T)$	$H(T)$	$T(H)$
$a_0$	2,881E+02	1,487E+00	1,403E+03	1,486E-01	-2,923E+05	2,924E+02
$a_1$	5,875E+00	-2,186E-02	-1,613E+00	9,755E-06	3,910E+02	6,424E-04
$a_2$	-6,857E-03	1,400E-04	2,138E-03	-1,780E-07	2,076E+00	-3,396E-10
$a_3$	4,844E-06	-5,092E-07	-1,931E-06	3,524E-12	1,811E-03	2,587E-16
$a_4$	6,960E-20	1,148E-09	-9,610E-21	-7,572E-25	-1,089E-05	-1,066E-22
$a_5$	-2,780E-23	-1,642E-12	3,864E-24	2,948E-28	2,274E-08	0,000E+00
$a_6$	0,000E+00	1,454E-15	0,000E+00	0,000E+00	-2,667E-11	0,000E+00
$a_7$	0,000E+00	-7,286E-19	0,000E+00	0,000E+00	1,788E-14	0,000E+00
$a_8$	0,000E+00	1,583E-22	0,000E+00	0,000E+00	-5,284E-18	0,000E+00

#### 3.2.8. Clases Weather, FieldData y TableData

Estas clases impolemetan métodos adecuados para la adquisición de datos desde diferentes tipos de ficheros, en concreto:

- Clase Weather para ficheros .tmy con datos meteorológicos (Weather Files). En estos ficheros solo hay datos meteorológicos como radiación normal incidente (DNI), temperatura de bulbo seco, y datos de geográficos del emplazamiento (Site), como latitud, longitud y altitud. A partir de estos datos se pueden realizar simulaciones

para ver cuál sería el comportamiento de la planta con estas condiciones.

- Clase FieldData para ficheros .csv con datos recogidos de alguna planta (Field Data Files). Estos ficheros contienen datos meteorológicos recogidos por las estaciones de planta y también datos de instrumentación de planta, en concreto, temperaturas y presiones de entrada y salida al campo solar y los diferentes subcampos y también caudales máximos en los subcampos. Los encabezados de cada columna probablemente serán identificadores o tags propios de cada planta, por lo que es necesario indicar al programa a qué dato corresponde cada tag. Esto se puede hacer en el fichero de configuración de la simulación. Con estos datos se puede simular el comportamiento del campo solar para caudal teórico requerido pero también comprobar cuál sería el rendimiento del campo solar operando con el caudal real de planta. Los datos obtenidos podrán después compararse con los reales de funcionamiento de planta. A este tipo de simulaciones las denominaremos ‘benchmark’.
- Clase TableData para ficheros .csv empleados en simulaciones distintas, por ejemplo para el estudio del rendimiento de un lazo en función de diferentes valores de  $q_{abs}$ .

### Clases Site

La Clase Site (Emplazamiento), contiene la información relativa al lugar donde está ubicada la planta. Los datos de latitud, longitud y altitud son importantes a la hora de calcular la trayectoria solar para cada fecha. Nos ofrece un método para calcular la posición del sol en cada fecha del año en base a los parámetros que almacenan las coordenadas geográficas.

### 3.3. Algoritmo de simulación

En este apartado se describe como puede desarrollarse un código a partir de las Clases implementadas y comentadas anteriormente con el fin de realizar diferentes tipos de simulaciones. Para ello, se continua con la filosofía de POO y se crea desarrolla la clase SolarFieldSimulation.

El objetivo que nos proponemos es simular el comportamiento de un campo solar bajo unas determinadas condiciones. Puesto que estas condiciones varían a lo largo del día, se

emplearán ficheros de datos en formato tabular que cuentan con una columna índice para la fecha y hora indicadas. Con el fin de poder reutilizar el trabajo realizado durante el trabajo de configuración de la simulación, se emplea un archivo en formato JSON que recoge todos los parámetros necesarios. En resumen, la instancia de SolarFieldSimulation realiza los siguientes pasos:

- Lee el archivo de configuración de la simulación y almacena los parámetros necesarios.
- Crea una instancia de la Clase Site con información sobre la ubicación de la planta.
- Crea una instancia para el almacenamiento de los datos del fichero en formato tipo tabla. En función de si el fichero es de tipo meteorológico (TMY2 o TMY3) o es un fichero en formato CSV creará una instancia de la clase Weather o FieldData respectivamente. Los datos cargados se almacenan en un DataFrame de la librería Pandas denominado *datasource*.
- Crea una instancia para el modelado del HTF a partir de la Clase FluidCoolProp si los datos se van a tomar desde la librería externa CoolProp o de la Clase FluidTabular si se le pasan los factores de los polinomios que permiten calcular cada parámetro del fluido.
- Crea una instancia SolarField a partir de los parámetros de configuración de campo solar.
- Crea una instancia BaseLoop a partir de los parámetros de configuración de lazo.

A partir de aquí, la instancia de SolarFieldSimulation ya dispone de lo necesario para realizar la simulación del campo mediante su método *runSimulation()*.

El tipo de simulación que se realiza depende del tipo de datos de que se disponga y de lo que se seleccione en el archivo de configuración:

- Simulación tipo *simulation*: En este caso, el caudal del lazo se recalculará en un proceso de convergencia hasta conseguir que la temperatura de salida del lazo sea la temperatura consignada.

- Si el tipo de datos del que se dispone no tiene datos reales de planta, la instancia *datasource* será de tipo Weather y solo se cuenta con datos meteorológicos (*DNI*,  $T_{ext}$ , velocidad del viento y presión atmosférica), por lo que la temperatura de entrada a los lazos será la nominal
  - Si el tipo de datos del que se dispone sí cuenta con datos reales de planta que permitan conocer las temperaturas de entrada a los lazos (como es nuestro caso), la simulación utilizará estas temperaturas a la hora de ajustar los caudales al salto térmico necesario.
- Simulación tipo *benchmark*: En este caso se debe disponer obligatoriamente de datos reales de planta, pues la simulación utiliza las temperaturas de entrada a los lazos y los caudales reales para calcular cuál será la temperatura de salida. Posteriormente, en los archivos de salida de datos, se puede comparar la temperatura real de salida del lazo con la calculada y de esta forma estimar si ha habido desenfoque y por tanto, desaprovechamiento de la energía solar. Hay que tener en cuenta en los datos que disponemos podemos encontrar situaciones en las que el lazo alcanza su temperatura de consigna pero es posible que se estuviera realizando un ajuste de enfoque-desenfoque (ya que el caudal no es regulable a nivel de lazo). En ese caso, es interesante saber qué temperatura hubiera alcanzado el HTF de no haberse producido el desenfoque y, por tanto, poder calcular la energía solar que no se ha aprovechado por no poder introducir mayor caudal en el lazo.

A la hora de realizarse cada una de estas simulaciones puede darse el caso de que se haya configurado la opción *fastmode=True*. En este caso se considera que todos los lazos de la planta se comportan como el lazo típico, modelado mediante la Clase BaseLoop. En caso contrario, la simulación se realizará para cada lazo del campo, lo cual solo tiene sentido si los lazos o sus componentes cuentan con diferentes valores en sus parámetros.

Una vez que el método *runSimulation()* ha procesado todas las filas seleccionadas del DataFrame *datasource*, los datos calculados que se han ido añadiendo al DataFrame son volcados a un archivo CSV para su posterior análisis.

### **3.3.1. Simulación tipo simulation**

Tal y como se ha mencionado, en este caso se simula la planta de tal forma que se calcula el caudal necesario en cada lazo con el fin de que se alcance la temperatura de consigna o nominal. En este tipo de simulación solo son necesarios los datos meteorológicos y los valores nominales de temperatura y presión de entrada y salida. Los valores exactos de la presión no son necesarios y basta con seleccionar presiones suficientemente altas para que garanticen el estado de líquido saturado del HTF en todo momento. Las propiedades del HTF en estado de líquido saturado no dependen significativamente de la presión.

Los datos meteorológicos se pueden leer de un fichero en formato TMY2, TMY3 o CSV convenientemente etiquetado. Si además se dispone de los datos de temperatura de entrada del HTF al campo solar se emplearán éstos en lugar del valor nominal, por lo que el salto térmico necesario se calculará partiendo de la temperatura real de entrada.

El programa calcula el rendimiento del lazo base o de cada lazo (según se haya seleccionado o no la opción *fastmode*) ajustando iterativamente el caudal hasta que la temperatura de salida sea la consignada. Durante las horas nocturnas el caudal es fijo e igual al mínimo recomendado, tal y como ocurre en plantas reales.

#### **Simulación tipo benchmark**

En este tipo de simulación el caudal viene marcado por el caudal real de planta, por lo que para este tipo de simulación es obligatorio disponer de los datos reales. Al emplearse un caudal fijo, la temperatura alcanzada por el HTF en la simulación no tiene porqué coincidir con la temperatura real. Dependiendo de si el valor obtenido es mayor o menor que el real se pueden sacar las siguientes interpretaciones: \* Si la temperatura calculada es menor que la real podemos interpretar que la simulación ha sobredimensionado las pérdidas en la configuración de la planta. Pueden corregirse algunos parámetros o introducir un factor multiplicativo. \* Si la temperatura calculada es mayor que la real puede deberse a que se han infravalorado las pérdidas, lo cual se podría corregir ajustando los valores de estas en el archivo de configuración, pero también puede deberse a que el campo real estaba realizando desenfoques parciales para reducir la energía captada. En ese caso, la energía no aprovechada se puede calcular como la diferencia entre la entalpía del HTF a

la temperatura de salida simulada menos su entalpia a la temperatura de salida real.

### **3.4. Validación por comparación con otra herramienta de simulación**

Con el fin realizar una primera validación de nuestro código, compararemos en primer lugar los valores obtenidos para una determinada configuración de campo con los que se optienen mediante System Advisor Model (SAM, [11]), un software de reconocido prestigio muy empleado en el sector de las energía renovables. Las posibilidades de SAM van mucho más allá del alcance de nuestro código, pudiendo realizar el modelado no solo de sistemas de energía solar de concentración sino también de sistemas fotovoltaicos, geotérmicos, mareomotrices, eólicos, de biomasa por ejemplo. Dentro de los sistemas de energía solar térmica de concentración, ofrece la posibilidad de modelar centrales de las cuatro principales tecnologías ya comentadas y a su vez, de diversas variedades. SAM realiza también el análisis económico y financiero del proyecto basándose principalmente en la generación eléctrica que se espera generar. Por este motivo, SAM tiene en cuenta el acoplamiento del campo solar con el bloque de potencia a la hora de realizar la simulación. Esto hace que no podamos comparar directamente nuestro programa con los modelos de SAM para generación eléctrica, pues los ajustes que hace SAM afectan al comportamiento del campo, introduciendo limitaciones de caudal de HTF y de potencia térmica transferida al bloque de potencia, desenfoques en el campo, rampas de arranque e inercias del sistema que quedan fuera de nuestro alcance. En cambio, SAM también cuenta con un módulo para la simulación de un sistema de generación de calor para proceso industrial (IPH, Industrial Process Heat) basado en el modelo Físico que emplea para la simulación de plantas CCP. Emplearemos este módulo para comparar los resultados de SAM con nuestro simulador tal y como ese explica a continuación.

#### **3.4.1. Configuración de las simulaciones**

Para que una simulación realizada con el módulo IPH de SAM sea comparable a la nuestra indicaremos que no existe almacenamiento térmico para evitar procesos de mezcla de HTF a diferentes temperaturas que se producirían en ese caso. También indicaremos que el sumidero térmico tiene capacidad elevada, lo que, en principio, nos obligaría a seleccionar un tamaño de campo solar muy grande. Para que el tamaño de campo solar

sea igual al del campo que queremos simular indicaremos a SAM que las condiciones de radiación solar nominales son mucho más elevadas que las que se alcanzarán en cualquier momento el año ( $2000W/m^2$ ). De este modo conseguimos que el dimensionado que hace SAM del campo solar sea igual que el nuestro (120 lazos), pero que no se produzca desenfoque en ningún momento. Es decir, con SAM extraemos del campo solar toda energía posible, al igual que hace nuestro simulador.

Puesto que solo modelamos el campo, no tenemos a priori ninguna información sobre la temperatura de retorno del HTF frío desde el intercambiador donde cede su energía al sumidero térmico. Con el fin de que la comparación sea lo más ajustada posible, aprovecharemos los datos de temperatura de HTF frío que se optienen de la simulación de SAM como datos de entrada para nuestra simulación. De esta forma, en ambas simulaciones el salto térmico se realiza desde el mismo punto de partida. Además, indicaremos a SAM que no existe inercia térmica en tuberías y concentradores y prescindiremos del cálculo de pérdidas térmicas en las primeras.

Respecto al fluido caloportador, SAM nos permite seleccionar entre una serie de fluidos preconfigurados. Seleccionaremos Therminol VP-1 pues también podemos simular este fluido con nuestro programa.

Realizaremos la simulación para un año completo. Contamos con los datos meteorológicos del año 2007 en formato TMY3. En la Fig.3.6 se puede ver la pestaña de configuración de SAM para seleccionar el origen de datos meteorológicos.

La versión de SAM utilizada ha sido la "*2020.2.29, 64 bit, updated to revision 1*". En la Fig.3.7 podemos ver la pestaña de configuración del campo solar.

Los SCA, modelo SenerTrough I diseñado por Sener, se han parametrizado de la siguiente manera a partir del modelo EuroTrough ET150:

En la Fig.3.8 puede verse una captura de pantalla de la pestaña de configuración del tipo de SCA en SAM. En la Fig.??, puede verse la pestaña correspondiente a la configuración de HCE. En este caso el modelo empleado es el UVAC 3, de Solel, con los parámetros que se indican en la 3.4.

Se ha considerado que todos los HCE del campo se encuentran en buen estado de vacío.

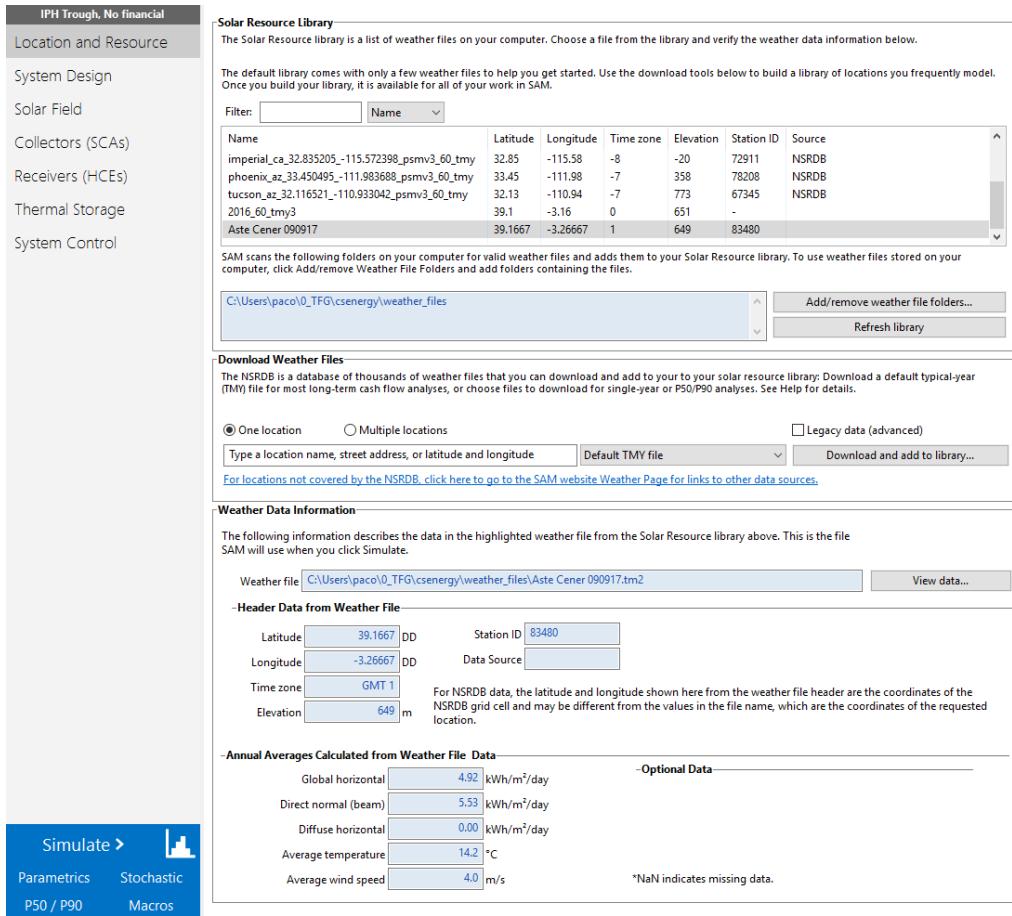


Fig. 3.6. Configuración SAM. Selección del archivo de datos meteorológicos

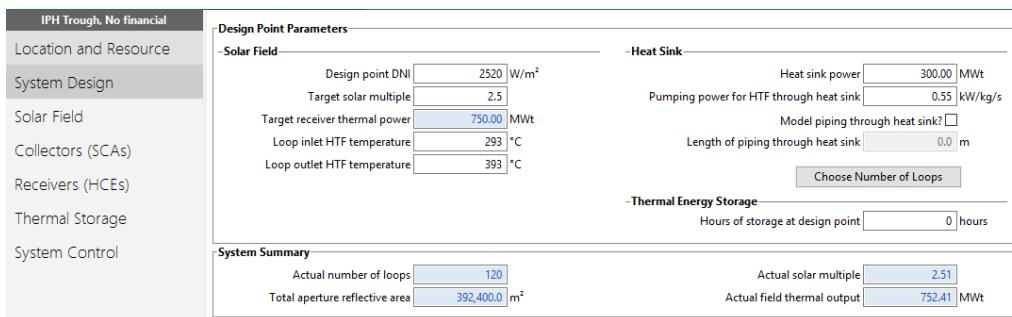


Fig. 3.7. Configuración SAM. Campo solar

Para la configuración de la simulación con nuestro código se debe crear un archivo en formato JSON con el que se le pasa toda la información necesaria. Con el fin de facilitar la creación de este archivo de configuración se ha desarrollado una sencilla interfaz que sirve de guía durante el proceso. En la Fig.3.10 se muestra la primera pantalla de la interfaz de configuración. El archivo de origen de datos incluye los mismos datos meteorológicos que se han empleado para SAM y, además, los datos de temperatura de entrada del HTF al campo solar que ha generado SAM en la simulación IPH. También emplearemos el

Parámetro	Valor
Longitud	148,5 (m)
Apertura	5,77 (m)
Distancia Focal	2,1 (m)
Coeficiente $F_0$ del IAM	1
Coeficiente $F_1$ del IAM	0,0506
Coeficiente $F_2$ del IAM	-0,1763
Precisión del seguidor	0,99
Precisión geométrica	0,98
Disponibilidad	0,99
Reflectividad	0,935
Limpieza	0,98

TABLA 3.3. Configuración del SCA modelo SenerTrough I de Sener

Fig. 3.8. Configuración SAM. Configuración del SCA SenerTrough I a partir del modelo Euro-Trough ET150

caudal calculado por SAM para compararlo con el que calcula nuestro simulador.

La configuración del campo solar es similar a la de SAM. Con el fin acelerar el proceso de simulación, consideraremos que hay 2 HCEs en cada SCA. Es decir, cada HCE tiene una longitud de 72,9 m, que está por debajo del límite de 100 m que nos hemos impuesto como criterio de validez del tamaño de malla para el modelo unidimensional. El caudal mínimo de recirculación en cada lazo es de 1,7 kg/s. La temperatura de salida deseada es de 393 °C (666,15 K).

El fluido caloportador Therminol VP-1 se configura tal y como puede verse en la Fig.3.12. Los coeficientes se cargan desde una librería donde los hemos guardado previa-

IPH Trough, No financial

Location and Resource	Solar Field Design Point	Actual number of loops
	Single loop aperture	120
	Loop optical efficiency	0.772
	Total loop conversion efficiency	0.761
	Total required aperture, SM=1	156,456 m <sup>2</sup>
	Required number of loops, SM=1	48
	Total tracking power	60,000 W
System Design	Total aperture reflective area	392,400 m <sup>2</sup>
Solar Field	Actual solar multiple	2.51
Collectors (SCAs)	Actual field thermal output	752,415 MWt
Receivers (HCEs)	Loop inlet HTF temperature	293 °C
Thermal Storage	Loop outlet HTF temperature	393 °C
System Control		

Solar Field Parameters	Heat Transfer Fluid
Row spacing	Field HTF fluid
Header pipe roughness	Therminol VP-1
HTF pump efficiency	Edit...
Piping thermal loss coefficient	Field HTF min operating temp
Wind stow speed	12 °C
Receiver startup delay time	Field HTF max operating temp
Receiver startup delay energy fraction	400 °C
Collector startup energy	Freeze protection temp
Tracking power per SCA	50 °C
Number of field subsections	Min single loop flow rate
Allow partial defocusing	20 kg/s
	Max single loop flow rate
	Min field flow velocity
	Max field flow velocity
	Cold Headers
	Hot Headers
	Header design min flow velocity
	2 m/s
	Header design max flow velocity
	10 m/s
	2 m/s

Collector Orientation	Stow angle
Collector tilt	170 deg
Collector azimuth	Deploy angle
	10 deg

Mirror Washing	Plant Heat Capacity
Water usage per wash	Hot piping thermal inertia
Washes per year	Cold piping thermal inertia
	Field loop piping thermal inertia

Land Area	
Solar field area	273 acres
	Non-solar field land area multiplier
	1.1
	Total land area
	300 acres

Single Loop Configuration								
The specification below is only for one loop in the solar field.								
Usage tip: To configure the loop, choose whether to edit SCAs, HCEs or defocus order. Select assemblies by clicking one or dragging the mouse over multiple items. Assign types to selected items by pressing keys 1-4.								
Number of SCA/HCE assemblies per loop: <input type="text" value="4"/> <input checked="" type="radio"/> Edit SCAs <input type="radio"/> Edit HCEs <input type="radio"/> Edit Defocus Order <input type="button" value="Reset Defocus"/>								
<table border="1"><tr><td>SCA: 1</td><td>SCA: 1</td><td>SCA: 1</td><td>SCA: 1</td></tr><tr><td>HCE: 1 DF# 4</td><td>HCE: 1 DF# 3</td><td>HCE: 1 DF# 2</td><td>HCE: 1 DF# 1</td></tr></table>	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	HCE: 1 DF# 4	HCE: 1 DF# 3	HCE: 1 DF# 2	HCE: 1 DF# 1
SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1					
HCE: 1 DF# 4	HCE: 1 DF# 3	HCE: 1 DF# 2	HCE: 1 DF# 1					

Simulate >


Parametrics
Stochastic

P50 / P90
Macros

Fig. 3.9. Configuración SAM. Configuración del HCE UVAC 3 con vacío

mente tras su obtención según se indicó en el apartado 3.2.7.

Finalmente, en las figuras 3.13 y 3.14 puede verse la configuración del tipo de SCA y HCE respectivamente.

### 3.4.2. Resultados de la validación

Una vez que tenemos configurado SAM y nuestro programa de la misma manera ejecutamos SAM sobre un archivo con los datos meteorológicos de un año y en valores horarios, en concreto se trata de los datos del año 2009 que se emplearon para el estudio y anteproyecto de construcción de las plantas.

En el campo solar de 120 lazos, con una superficie total de captación de 392400 m<sup>2</sup> la energía anual incidente es de 792,1 GWh, que se ve reducida a 686,4 GWh debido a que el ángulo de incidencia es distinto de cero (efecto coseno).

Parámetro	Valor
Logitud	4,05 (m)
Factor de longitud efectiva, $\gamma_L$	0,96
Factor de interceptación geométrica, $\gamma_g$	0,96
Diámetro interior del tubo absorbedor, $d_{ri}$	0,066 (m)
Diámetro exterior del tubo absorbedor, $d_{ror}$	0,070 (m)
Diámetro interior de la envolvente de vidrio, $d_{gi}$	0,115 (m)
Diámetro exterior de la envolvente de vidrio, $d_{go}$	0,121 (m)
Rugosidad interior	0,000045 (m)
Factor de emisividad, $A_1$	0,000206
Factor de emisividad, $A_0$	0,0430
Absortividad solar del receptor	0,96
Transmisividad del vidrio	0,96
Valor mínimo del número de Reynolds recomendado	2300
Distancia de separación entre brazos de soportación	4,05 (m)

TABLA 3.4. Configuración del HCE modelo UVAC 3 de Solel

En la Tabla ?? se muestran los valores calculados por SAM y los que obtenemos con nuestro código. SAM denomina "Receiver thermal power incident" a la radiación solar que finalmente alcanza al fluido caloportador, es decir, la radaciación solar incidente menos las pérdidas ópticas. Este valor es equivalente a lo que nosotros hemos venido denominando "potencia absorbida,  $q_{abs}$ ".

Valores anuales	SAM	Código Python
Potencia incidente (GWh/año)	686	686
Potencia absorbida (GWh/año)	477	491
Rencimiento óptico	0,695	0,716
Pérdidas térmicas (GWh/año)	64	73
Rendimiento térmico	0,866	0,851
Potencia térmica (GWh/año)	413	418

TABLA 3.5. Resultados globales anuales para las simulaciones con SAM y Python

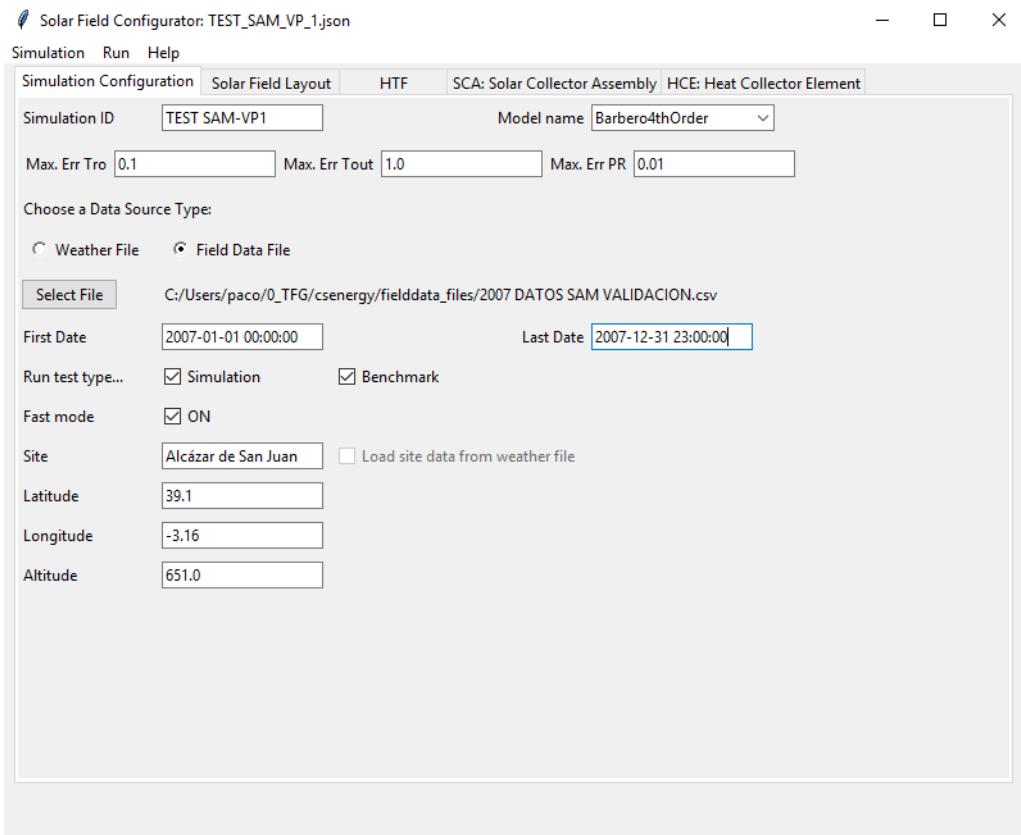


Fig. 3.10. Configuración de la simulación. Selección del tipo de simulación, fichero de datos y lugar de emplazamiento.

Comprobamos que existe una ligera desviación en el rendimiento óptico anual (2,9 %) y en el rendimiento térmico anual (1,9 %). El origen de esta desviación se encuentra en la dificultad de adaptar exactamente la configuración de nuestra simulación a la de SAM pues no todos los parámetros son equivalentes en ambas casos. Por otro lado, por tratarse de valores anuales, existe una acumulación de pequeñas desviaciones que se producen entre ambas simulaciones, principalmente a primera y última hora del día y durante jornadas de gran inestabilidad en la radiación.

Nos fijaremos ahora en el comportamiento para varios días del año. Hemos seleccionado un día de gran estabilidad y buena radiación solar y otro día menos estable y con peores condiciones. En las figuras 3.15 a 3.16 podemos ver la evolución del caudal, la temperatura y la potencia térmica en ambas simulaciones para el día 17 de julio (buenas condiciones de radiación y estabilidad). En las figuras 3.18 a 3.19 podemos ver la evolución para el día 17 de junio, con peores condiciones tal y como se aprecia por los altibajos que presentan las curvas a lo largo del día. En todas las gráficas se ha representado DNI

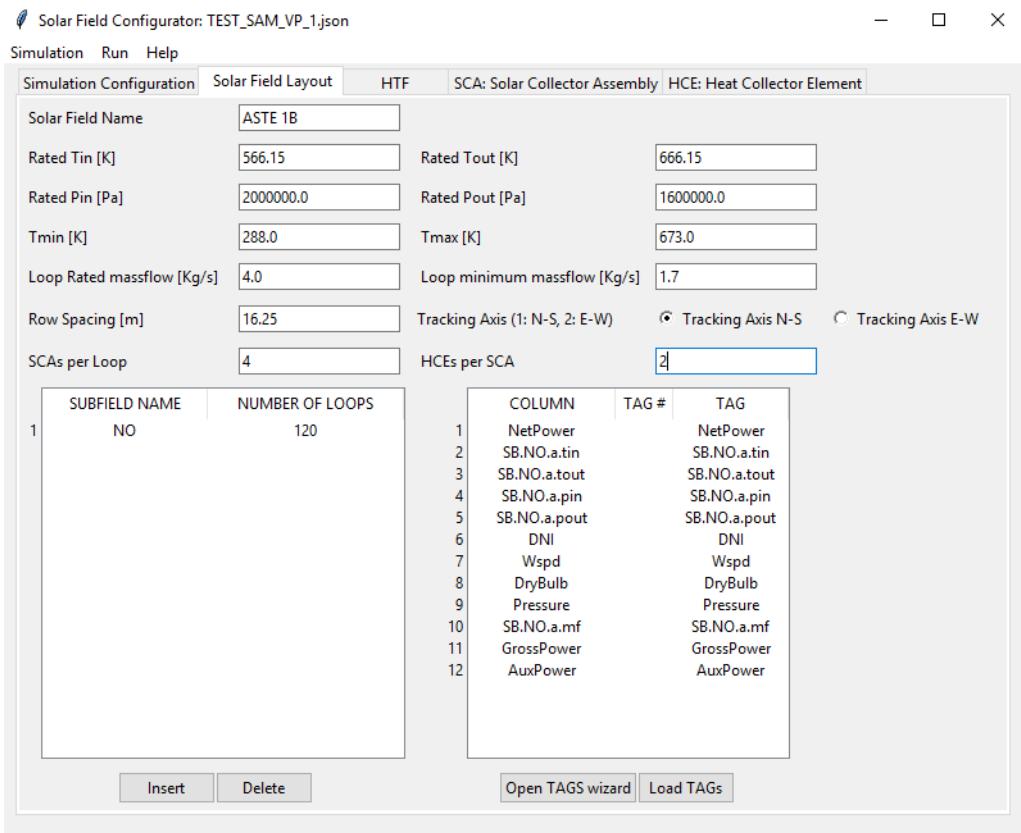


Fig. 3.11. Configuración de la simulación. Configuración del campo solar, número de subcampos, lazos, configuración de los lazos, valores nominales y asistente para relacionar los identificadores de las columnas del archivo de origen de datos con los que maneja el programa.

en el eje secundario.

### 3.5. Aplicación para el análisis paramétrico

Una vez que hemos confirmado que nuestro código es una herramienta válida para la simulación de un campo solar real nos proponemos a continuación aprovecharlo para realizar algunos análisis del comportamiento de los componentes del campo solar bajo diferentes condiciones o con diferentes configuraciones. Este tipo de análisis es de especial utilidad durante la fase de diseño, cuando deben seleccionarse los diferentes componentes con el fin de alcanzar unos objetivos de rendimiento o potencia generada.

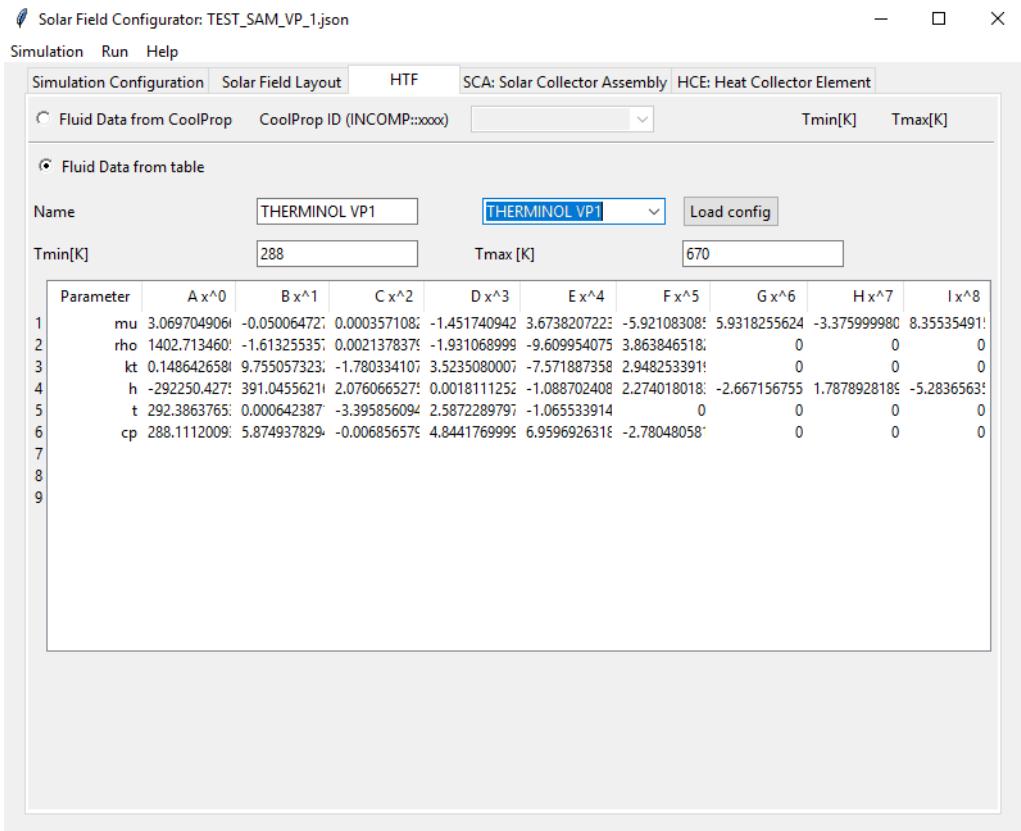


Fig. 3.12. Configuración de la simulación. Selección y configuración del fluido caloportador

### 3.5.1. Rendimiento del HCE en función de la radiación normal directa, *DNI*

En la tabla 3.8 se resumen las principales características de algunos de los modelos de HCE más instalados hasta nuestros días. Los datos de  $\varepsilon_{ext}$  son los ofrecidos por [3].

En la 3.21 se muestra gráficamente cómo evoluciona el rendimiento con el aumento de *DNI*. Se aprecia como los modelos de última generación presentan un buen comportamiento incluso con bajas radiaciones.

### 3.5.2. Rendimiento del HCE en función de la temperatura de entrada

### 3.5.3. Simulación con los diferentes modelos

Comparamos ahora el resultado de simular con los tres modelos: modelo de 4º Orden, modelo de 1<sup>er</sup> Orden y modelo simplificado. En las figuras puede verse el resultado para un día del año (se ha tomado el día 2 de marzo por tener buenas condiciones de radiación y estabilidad).

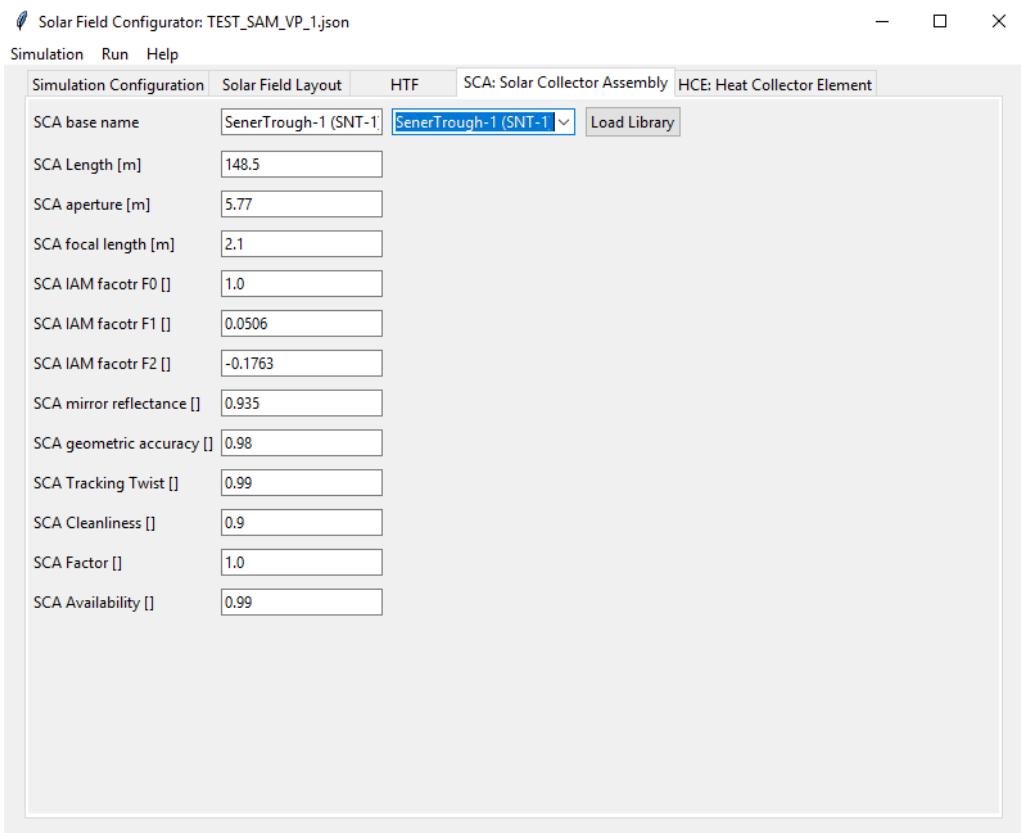


Fig. 3.13. Configuración de la simulación. Selección del modelo de SCA y configuración

### 3.5.4. Simulación cambiando el tamaño de la malla de integración

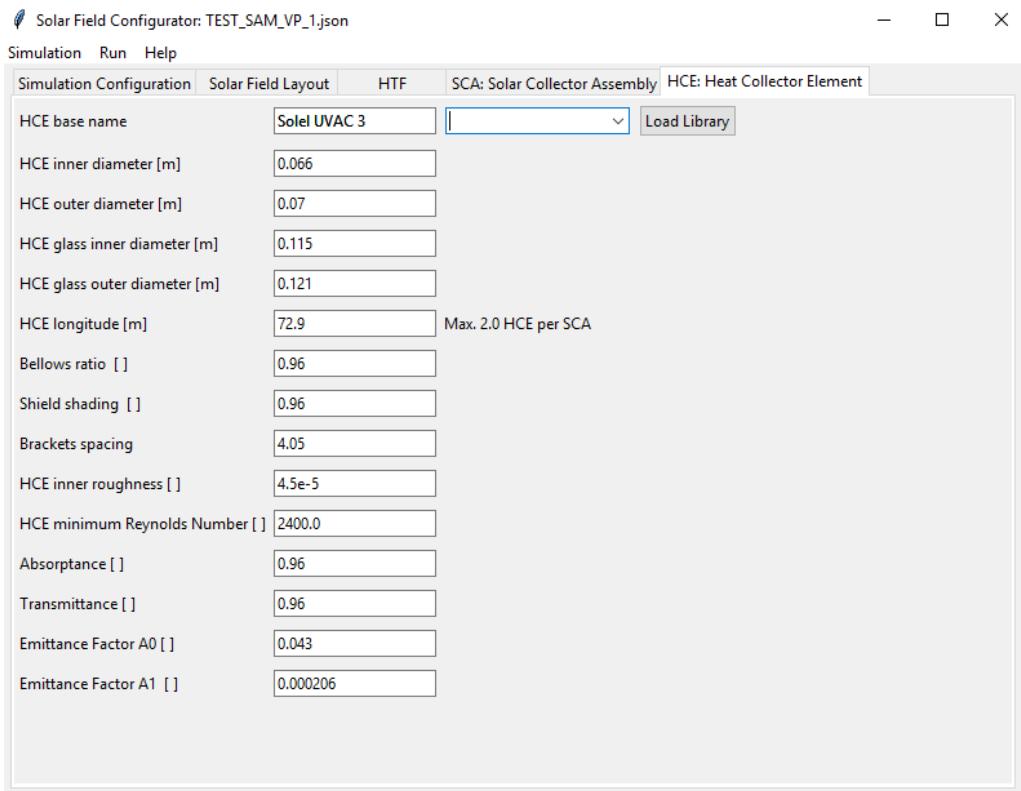


Fig. 3.14. Configuración de la simulación. Selección del modelo de HCE y configuración

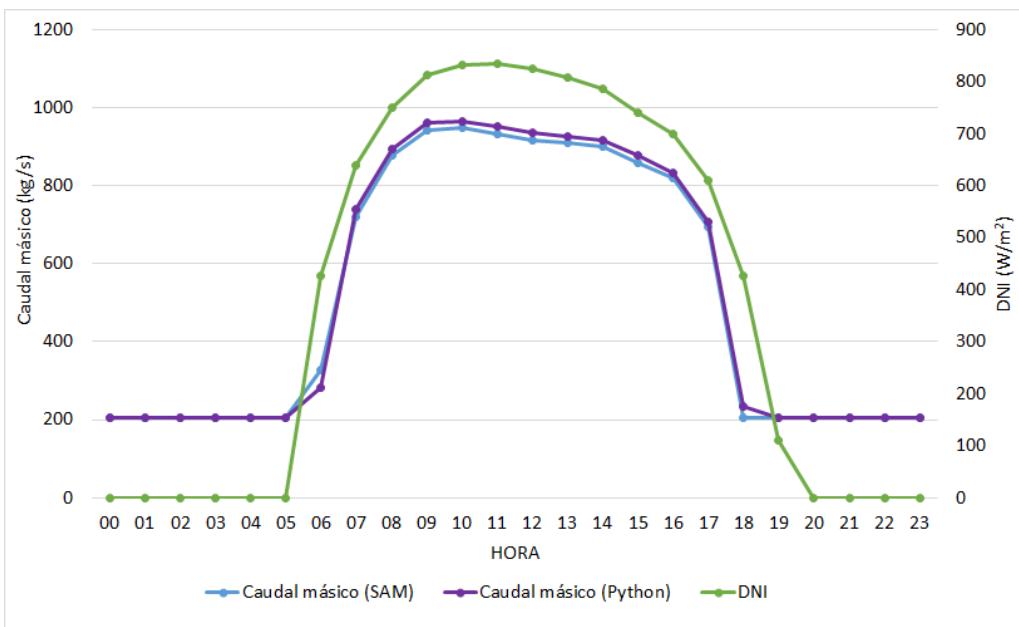


Fig. 3.15. Caudal m´sico calculado por SAM y por el código Python para el día 17/07/2009

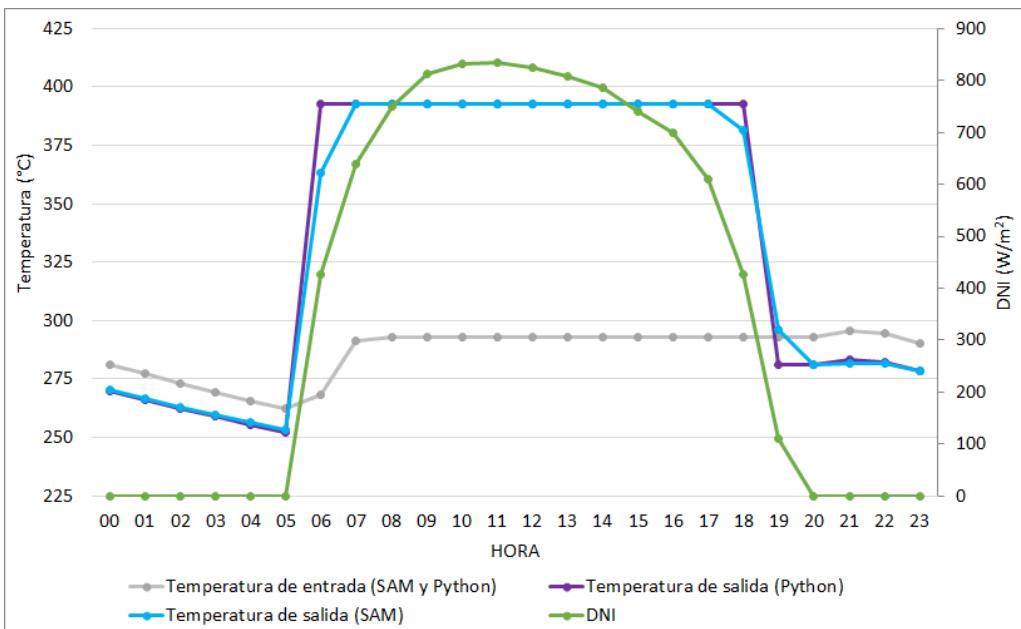


Fig. 3.16. Temperatura de entrada y de salida calculadas por SAM y por el código Python para el día 17/07/2009

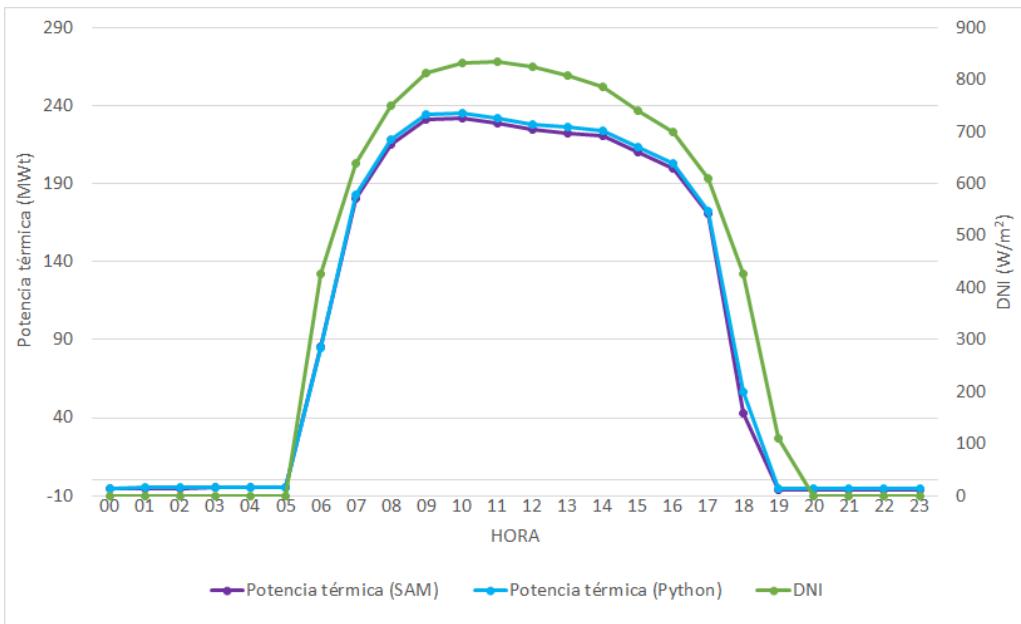


Fig. 3.17. Potencia térmica calculada por SAM y por el código Python para el día 17/07/2009

Hora	DNI (S, P) (W/m <sup>2</sup> )	Caudal (S) (Kg/s)	Caudal (P) (Kg/s)	T <sub>in</sub> (S, P) (°C)	T <sub>out</sub> (S) (°C)	T <sub>out</sub> (P) (°C)	Pot. Térmica (S) (MWt)	Pot. Térmica (P) (MWt)
0:00	0	204,0	204,0	281,3	270,4	270,0	-5,5	-5,2
1:00	0	204,0	204,0	277,2	266,6	266,2	-5,3	-5,0
2:00	0	204,0	204,0	273,3	263,1	262,5	-5,1	-4,8
3:00	0	204,0	204,0	269,5	259,6	259,0	-4,9	-4,7
4:00	0	204,0	204,0	265,8	256,2	255,6	-4,7	-4,6
5:00	0	204,0	204,0	262,3	253,0	252,3	-4,6	-4,4
6:00	426	326,4	282,9	268,5	363,0	392,7	85,7	84,5
7:00	639	721,1	739,0	291,4	392,6	392,9	180,1	182,8
8:00	750	876,3	894,9	292,9	392,8	392,9	215,2	218,3
9:00	812	943,4	961,0	293,0	392,5	392,9	230,7	234,3
10:00	831	947,0	964,8	293,0	392,5	392,9	231,6	235,2
11:00	834	933,5	951,8	293,0	392,6	392,9	228,4	232,0
12:00	825	917,1	935,7	293,0	392,6	392,9	224,6	228,1
13:00	809	908,3	926,8	293,0	392,7	392,9	222,6	225,9
14:00	787	899,1	917,5	293,0	392,7	392,9	220,4	223,6
15:00	740	857,7	876,1	293,0	392,9	392,9	210,6	213,5
16:00	699	818,2	831,4	293,0	392,5	392,9	200,1	202,7
17:00	610	694,2	706,8	293,0	392,9	392,9	170,5	172,3
18:00	426	204,0	232,5	293,0	381,4	392,9	43,1	56,7
19:00	109	204,0	204,0	293,0	295,9	281,0	-6,4	-5,6
20:00	0	204,0	204,0	293,0	280,9	281,0	-6,2	-5,6
21:00	0	204,0	204,0	295,7	281,4	283,5	-6,3	-5,7
22:00	0	204,0	204,0	294,6	281,9	282,5	-6,3	-5,6
23:00	0	204,0	204,0	290,5	278,6	278,6	-6,0	-5,5

TABLA 3.6. Resultados de las simulaciones (S: SAM, P: Python) para el día 17 de julio de 2009. Condiciones estables

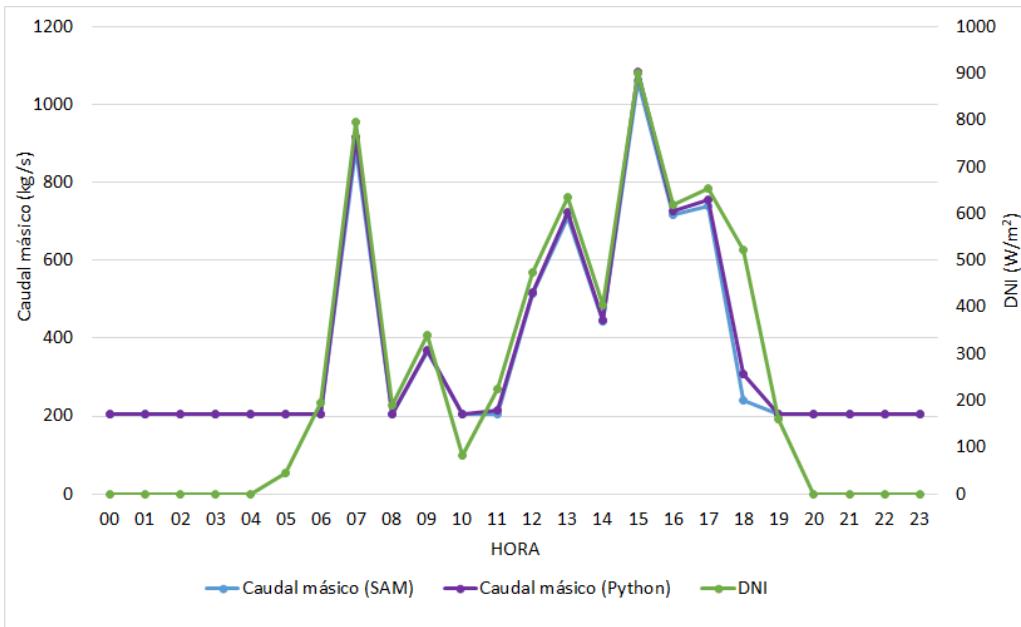


Fig. 3.18. Caudal m´sico calculado por SAM y por el código Python para el día 17/06/2009

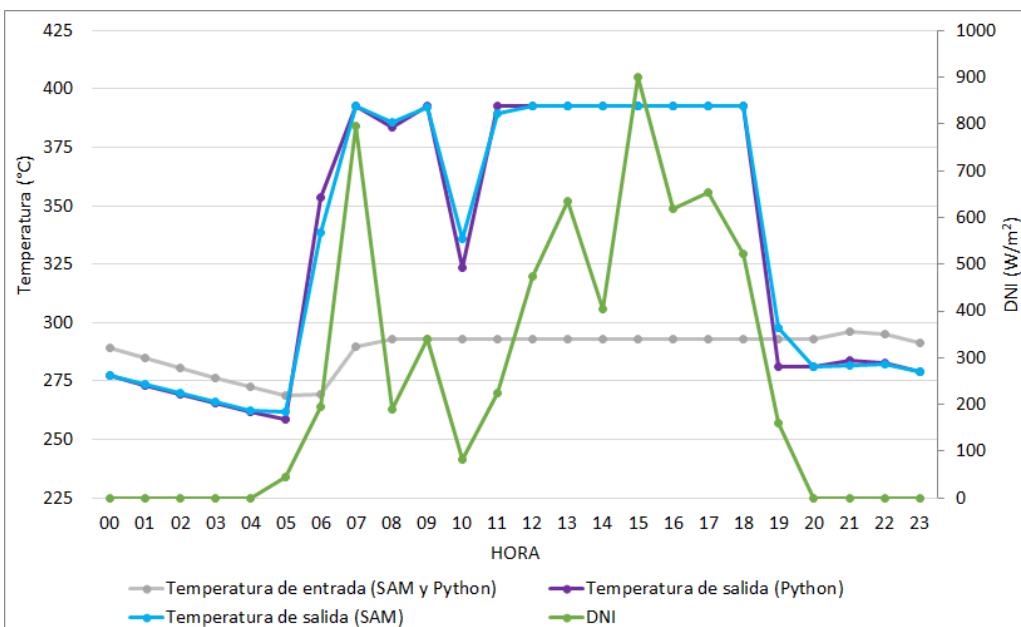


Fig. 3.19. Temperatura de entrada y de salida calculadas por SAM y por el código Python para el día 17/06/2009

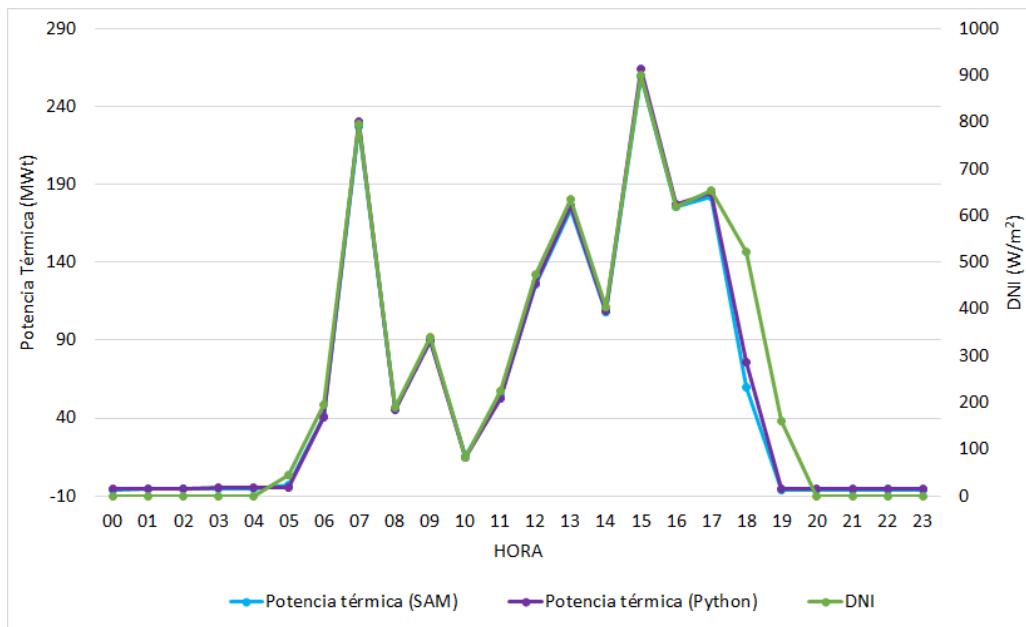


Fig. 3.20. Potencia térmica calculada por SAM y por el código Python para el día 17/06/2009

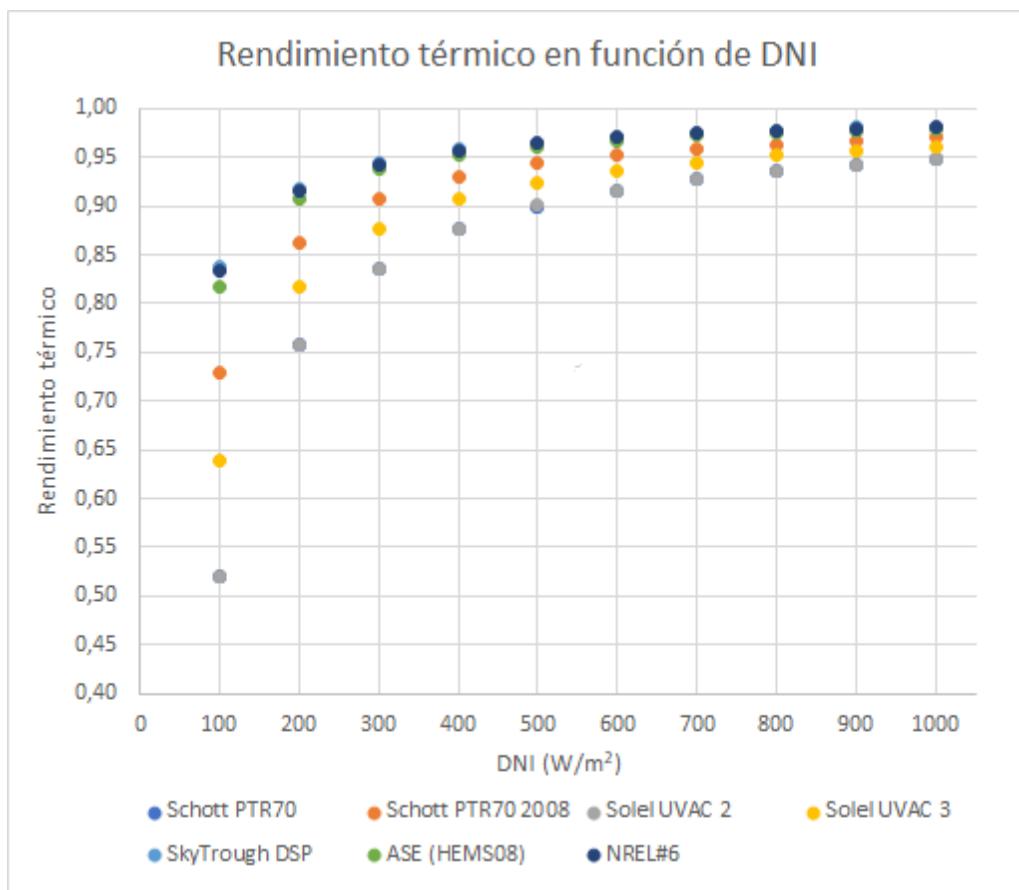


Fig. 3.21. Rendimiento térmico en función de DNI para diferentes modelos de HCE

Hora	DNI (S, P) (W/m <sup>2</sup> )	Caudal (S) (Kg/s)	Caudal (P) (Kg/s)	T <sub>in</sub> (S, P) (°C)	T <sub>out</sub> (S) (°C)	T <sub>out</sub> (P) (°C)	Pot. Térmica (S) (MWt)	Pot. Térmica (P) (MWt)
0:00	0	204,0	204,0	289,3	277,5	277,4	-6,0	-5,5
1:00	0	204,0	204,0	284,8	273,5	273,3	-5,8	-5,3
2:00	0	204,0	204,0	280,6	269,6	269,3	-5,5	-5,1
3:00	0	204,0	204,0	276,5	265,9	265,5	-5,3	-5,0
4:00	0	204,0	204,0	272,5	262,3	261,8	-5,1	-4,8
5:00	45	204,0	204,0	268,8	262,0	258,4	-3,2	-4,7
6:00	194	204,0	204,0	269,2	338,7	353,3	41,5	40,3
7:00	795	885,8	916,9	289,7	392,7	392,9	227,1	230,5
8:00	189	204,0	204,0	292,8	385,9	383,5	46,1	44,9
9:00	339	366,8	367,7	292,9	392,2	392,9	90,0	89,7
10:00	81	204,0	204,0	293,0	336,0	323,7	15,6	14,7
11:00	225	204,0	215,4	293,0	389,6	392,9	53,8	52,5
12:00	473	514,8	518,7	293,0	392,6	392,9	125,8	126,4
13:00	634	711,7	722,5	293,0	392,5	392,9	174,1	176,1
14:00	403	442,9	445,2	293,0	392,5	392,9	108,4	108,5
15:00	899	1059,6	1082,5	293,0	392,7	392,9	259,6	263,9
16:00	619	716,1	727,6	293,0	392,7	392,9	175,4	177,4
17:00	654	740,2	755,1	293,0	393,0	392,9	181,9	184,1
18:00	522	241,7	309,5	293,0	392,7	392,9	59,4	75,4
19:00	160	204,0	204,0	293,0	297,8	280,9	-6,5	-5,6
20:00	0	204,0	204,0	293,0	281,0	280,9	-6,2	-5,6
21:00	0	204,0	204,0	296,2	281,6	283,8	-6,4	-5,7
22:00	0	204,0	204,0	295,3	282,4	282,9	-6,4	-5,7
23:00	0	204,0	204,0	291,1	279,1	279,1	-6,1	-5,6

TABLA 3.7. Resultados de las simulaciones (S: SAM, P: Python) para el día 17 de junio de 2009. Condiciones inestables

$DNI(W/m^2)$	Schott PTR70	Schott PTR70 2008	Solel UVAC 2	Solel UVAC 3	SkyFuel SkyTrough DSP	ASE HEMS08	NREL #6
100	0,521	0,728	0,521	0,638	0,837	0,818	0,834
200	0,757	0,862	0,757	0,816	0,917	0,907	0,916
300	0,837	0,907	0,837	0,876	0,944	0,938	0,943
400	0,876	0,930	0,877	0,907	0,958	0,953	0,957
500	0,900	0,944	0,900	0,925	0,966	0,962	0,965
600	0,917	0,953	0,917	0,937	0,971	0,968	0,971
700	0,928	0,959	0,928	0,945	0,975	0,972	0,975
800	0,937	0,964	0,937	0,952	0,978	0,976	0,978
900	0,943	0,968	0,943	0,957	0,980	0,978	0,980
1000	0,948	0,971	0,949	0,961	0,982	0,980	0,982

TABLA 3.8. Rendimiento en función de la radiación normal incidente para distintos modelos de HCE

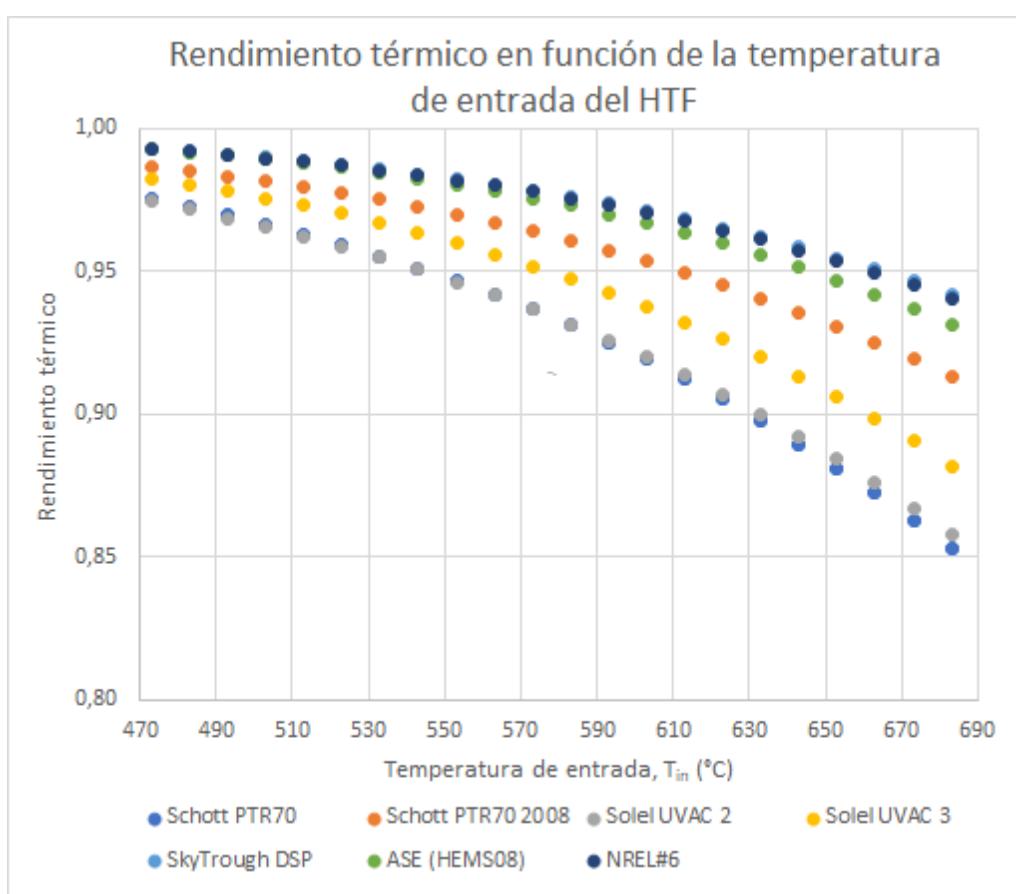


Fig. 3.22. Rendimiento térmico en función de la temperatura de entrada del HTF para diferentes modelos de HCE

$T_{in}(^{\circ}C)$	Schott PTR70	Schott PTR70 2008	Solel UVAC 2	Solel UVAC 3	SkyFuel SkyTrough DSP	ASE HEMS08	NREL #6
473	0,975	0,986	0,974	0,982	0,993	0,993	0,993
483	0,972	0,985	0,971	0,980	0,992	0,992	0,992
493	0,969	0,983	0,969	0,978	0,991	0,990	0,991
503	0,966	0,981	0,965	0,976	0,990	0,989	0,990
513	0,963	0,979	0,962	0,973	0,988	0,988	0,988
523	0,959	0,977	0,958	0,970	0,987	0,986	0,987
533	0,955	0,975	0,955	0,967	0,986	0,984	0,985
543	0,951	0,973	0,951	0,964	0,984	0,982	0,984
553	0,946	0,970	0,946	0,960	0,982	0,980	0,982
563	0,942	0,967	0,942	0,956	0,980	0,978	0,980
573	0,937	0,964	0,937	0,952	0,978	0,976	0,978
583	0,931	0,961	0,931	0,947	0,976	0,973	0,975
593	0,925	0,957	0,926	0,943	0,974	0,970	0,973
603	0,919	0,953	0,920	0,938	0,971	0,967	0,970
613	0,912	0,949	0,914	0,932	0,968	0,963	0,967
623	0,905	0,945	0,907	0,926	0,965	0,960	0,964
633	0,898	0,941	0,900	0,920	0,962	0,956	0,961
643	0,890	0,936	0,892	0,913	0,958	0,951	0,957
653	0,881	0,931	0,884	0,906	0,955	0,947	0,954
663	0,872	0,925	0,876	0,898	0,951	0,942	0,949
673	0,863	0,919	0,867	0,890	0,946	0,937	0,945
683	0,853	0,913	0,858	0,882	0,942	0,931	0,941

TABLA 3.9. Rendimiento en función de la temperatura de entrada del HTF para diferentes modelos de HCE

Hora	DNI (W/m <sup>2</sup> )	$T_{in}$ (°C)	$T_{out}$ (SAM) (°C)	$T_{out}$ (4 <sup>o</sup> Ord.) (°C)	$T_{out}$ (1 <sup>er</sup> Ord.) (°C)	$T_{out}$ (Simplif.) (°C)
0:00	0	277	266	266	266	261
1:00	0	273	262	262	262	258
2:00	0	269	259	258	258	254
3:00	0	265	255	255	255	251
4:00	0	262	252	251	251	248
5:00	0	258	249	248	248	245
6:00	0	255	246	245	245	242
7:00	234	252	263	243	243	240
8:00	596	272	377	393	393	393
9:00	724	292	392	393	393	393
10:00	806	293	393	393	393	393
11:00	859	293	393	393	393	393
12:00	876	293	393	393	393	393
13:00	867	293	393	393	393	393
14:00	846	293	393	393	393	393
15:00	781	293	393	393	393	393
16:00	663	293	393	393	393	393
17:00	420	293	313	281	281	275
18:00	1	293	284	281	281	275
19:00	0	298	282	285	285	280
20:00	0	298	284	285	285	279
21:00	0	293	281	281	281	276
22:00	0	289	277	277	277	272
23:00	0	284	273	273	273	268

TABLA 3.10. Temperaturas obtenidas en la simulación para cada modelo.

Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación

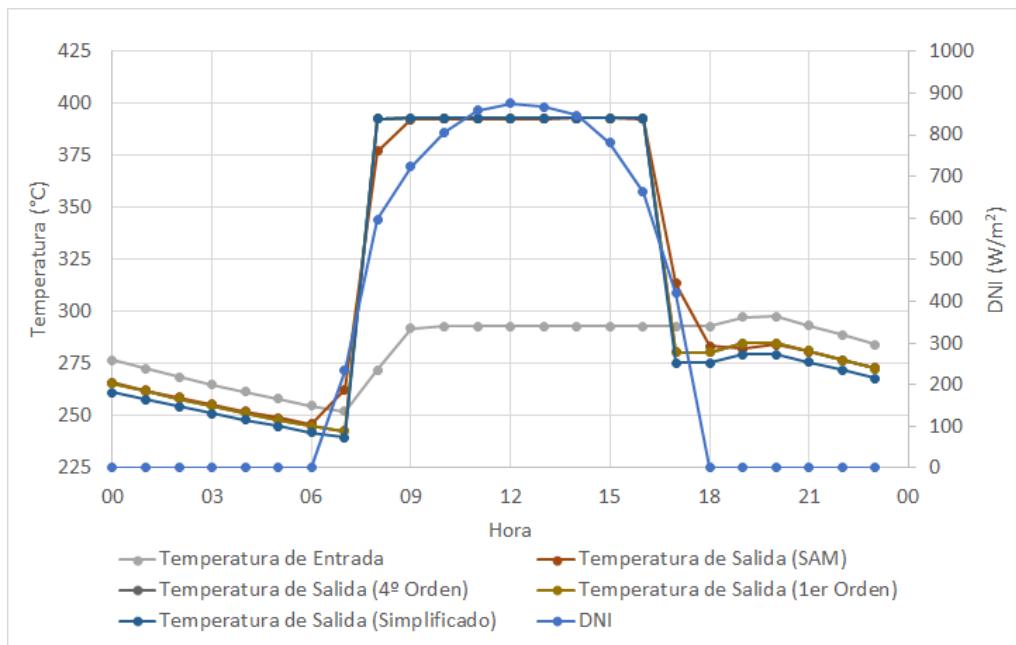


Fig. 3.23. Temperaturas de salida obtenidas con los tres modelos

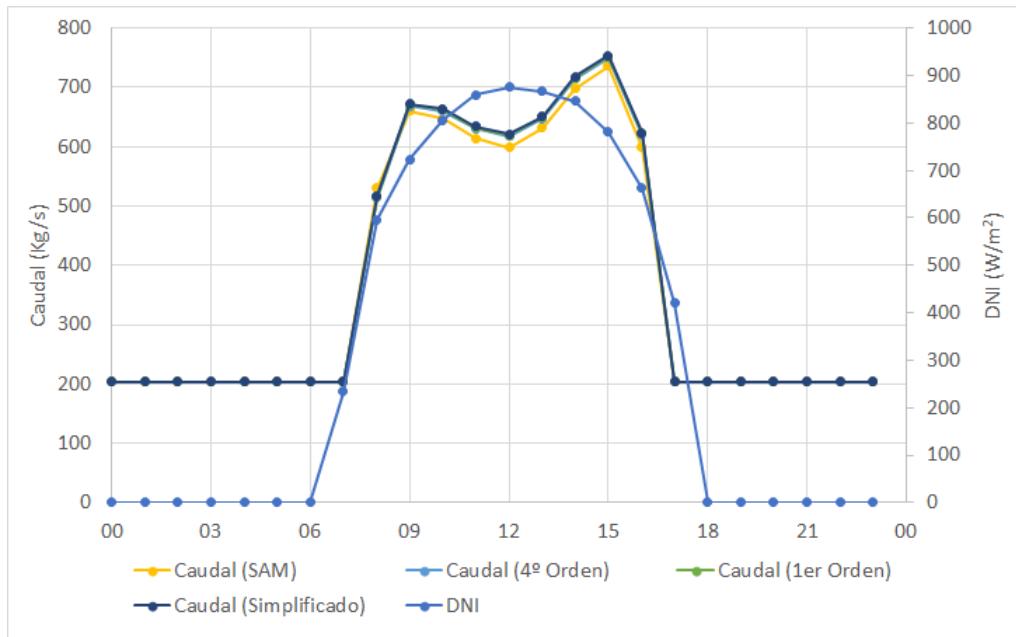


Fig. 3.24. Caudales de salida obtenidos con los tres modelos

Hora	DNI (W/m <sup>2</sup> )	Caudal (SAM) (Kg/s)	Caudal (4 <sup>o</sup> Ord.) (Kg/s)	Caudal (1 <sup>er</sup> Ord.) (Kg/s)	Caudal (Simplif.) (Kg/s)
0:00	0	204	204	204	204
1:00	0	204	204	204	204
2:00	0	204	204	204	204
3:00	0	204	204	204	204
4:00	0	204	204	204	204
5:00	0	204	204	204	204
6:00	0	204	204	204	204
7:00	234	204	204	204	204
8:00	596	530	514	516	518
9:00	724	660	669	670	672
10:00	806	648	661	663	664
11:00	859	614	630	632	634
12:00	876	599	617	619	621
13:00	867	632	648	650	651
14:00	846	699	714	716	718
15:00	781	736	750	752	753
16:00	663	599	620	622	624
17:00	420	204	204	204	204
18:00	1	204	204	204	204
19:00	0	204	204	204	204
20:00	0	204	204	204	204
21:00	0	204	204	204	204
22:00	0	204	204	204	204
23:00	0	204	204	204	204

TABLA 3.11. Caudales obtenidos en la simulación para cada modelo.

Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación

Hora	DNI (W/m <sup>2</sup> )	$P_{th}$ (SAM) (MWt)	$P_{th}$ (4ºOrd.) (MWt)	$P_{th}$ (1 <sup>er</sup> Ord.) (MWt)	$P_{th}$ (Simplif.) (MWt)
0:00	0	-4,9	-5,0	-5,0	-6,9
1:00	0	-4,7	-4,9	-4,9	-6,7
2:00	0	-4,5	-4,8	-4,8	-6,5
3:00	0	-4,4	-4,6	-4,6	-6,3
4:00	0	-4,2	-4,5	-4,5	-6,0
5:00	0	-4,1	-4,4	-4,4	-5,9
6:00	0	-3,9	-4,3	-4,3	-5,7
7:00	234	4,7	-4,2	-4,2	-5,6
8:00	596	133,1	149,5	150,1	150,5
9:00	724	161,6	164,6	165,0	165,4
10:00	806	157,7	161,2	161,6	162,1
11:00	859	149,2	153,6	154,1	154,5
12:00	876	145,5	150,5	150,9	151,3
13:00	867	153,4	157,9	158,3	158,8
14:00	846	170,2	174,2	174,6	175,0
15:00	781	179,3	182,7	183,2	183,6
16:00	663	145,6	151,1	151,6	152,0
17:00	420	9,7	-5,7	-5,7	-8,2
18:00	1	-4,4	-5,7	-5,7	-8,1
19:00	0	-7,1	-5,9	-5,9	-8,4
20:00	0	-6,3	-5,9	-5,9	-8,4
21:00	0	-5,8	-5,7	-5,7	-8,1
22:00	0	-5,5	-5,5	-5,5	-7,8
23:00	0	-5,3	-5,4	-5,4	-7,5

TABLA 3.12. Potencia térmica calculada en la simulación de cada modelo. Datos del día 2/3/2007. Condiciones estables y buena radiación

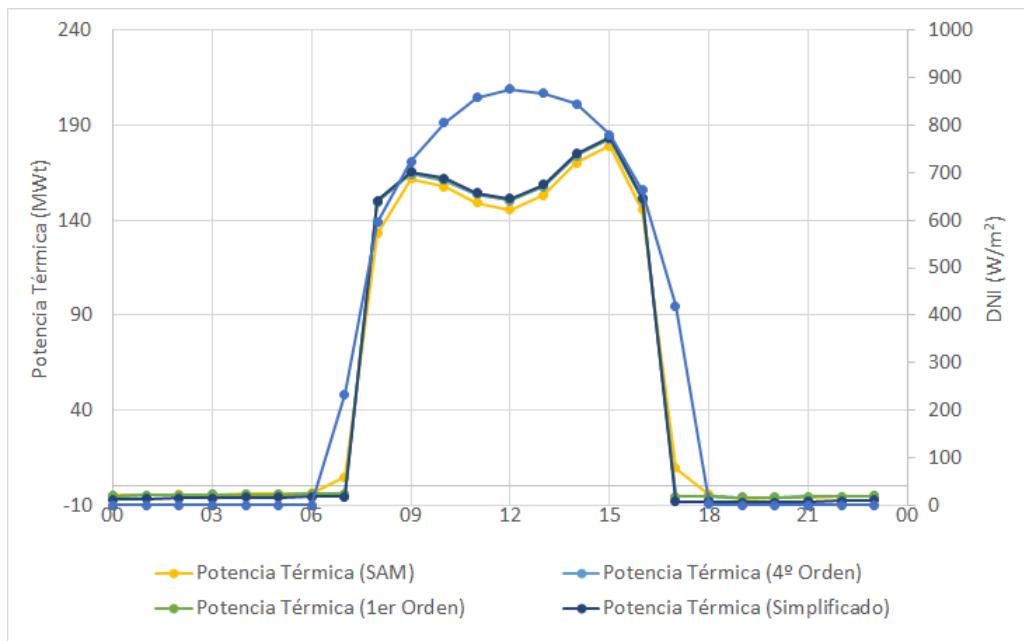


Fig. 3.25. Potencia térmica obtenida con cada uno de los tres modelos

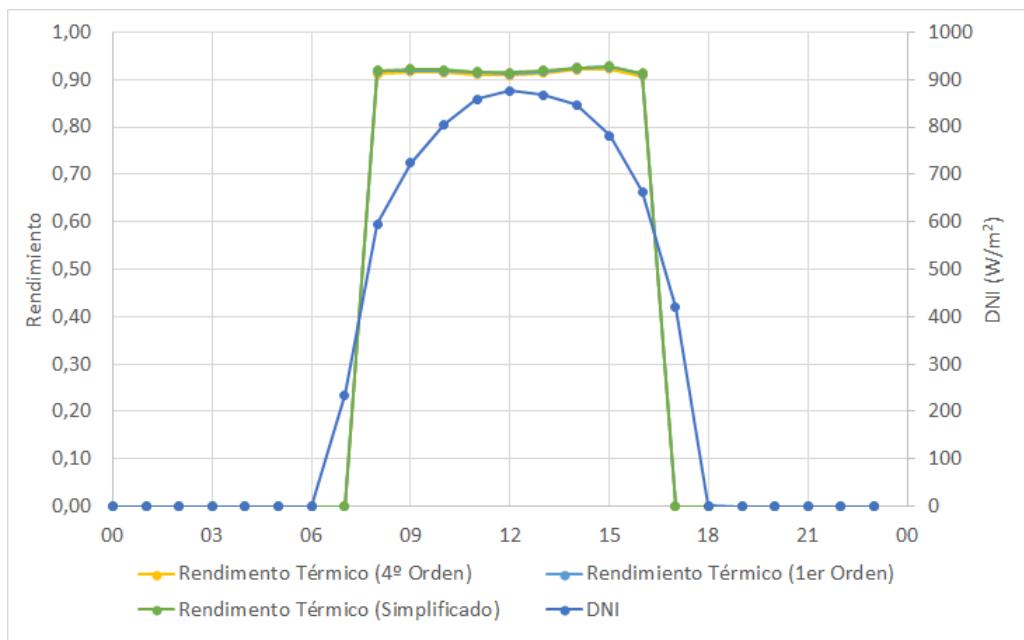


Fig. 3.26. Rendimiento térmico para cada uno de los tres modelos

Hora	DNI (W/m <sup>2</sup> )	$\eta_{th}$ (4 <sup>o</sup> Ord.)	$\eta_{th}$ (1 <sup>er</sup> Ord.)	$\eta_{th}$ (Simplif.)
0:00	0	0,000	0,000	0,000
1:00	0	0,000	0,000	0,000
2:00	0	0,000	0,000	0,000
3:00	0	0,000	0,000	0,000
4:00	0	0,000	0,000	0,000
5:00	0	0,000	0,000	0,000
6:00	0	0,000	0,000	0,000
7:00	234	0,000	0,000	0,000
8:00	596	0,912	0,917	0,920
9:00	724	0,916	0,920	0,922
10:00	806	0,914	0,918	0,920
11:00	859	0,910	0,914	0,917
12:00	876	0,909	0,912	0,915
13:00	867	0,913	0,916	0,919
14:00	846	0,920	0,923	0,926
15:00	781	0,923	0,926	0,928
16:00	663	0,907	0,911	0,914
17:00	420	0,000	0,000	0,000
18:00	1	0,000	0,000	0,000
19:00	0	0,000	0,000	0,000
20:00	0	0,000	0,000	0,000
21:00	0	0,000	0,000	0,000
22:00	0	0,000	0,000	0,000
23:00	0	0,000	0,000	0,000

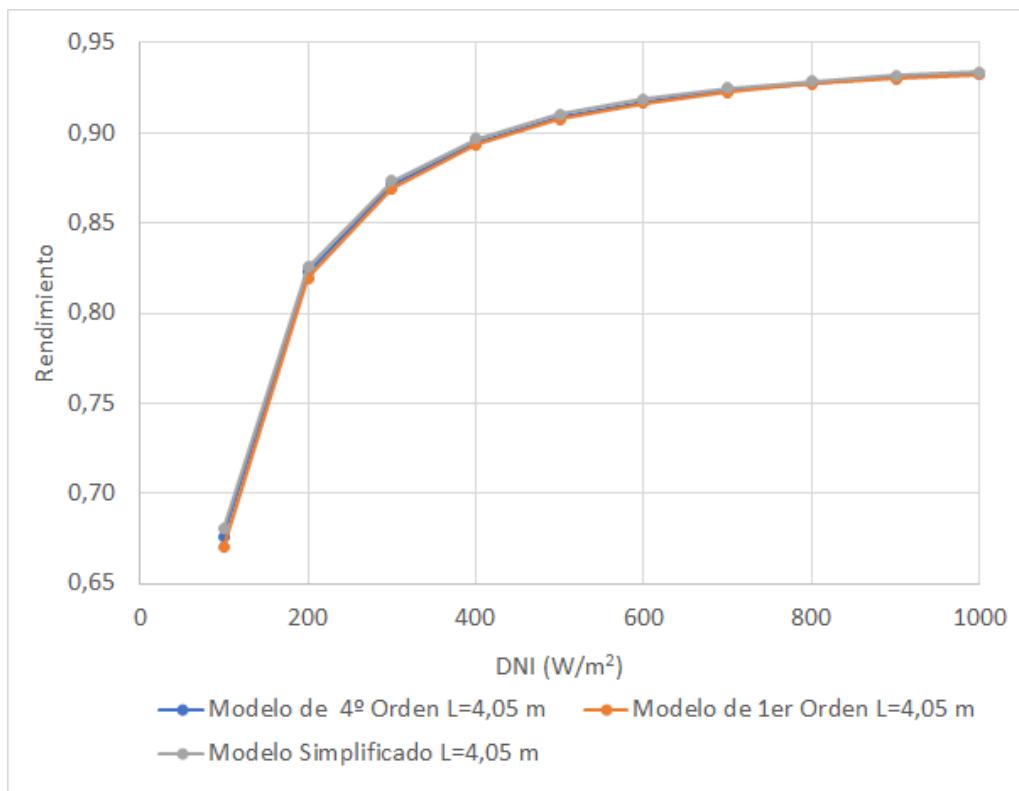


Fig. 3.27. Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 4,05 m

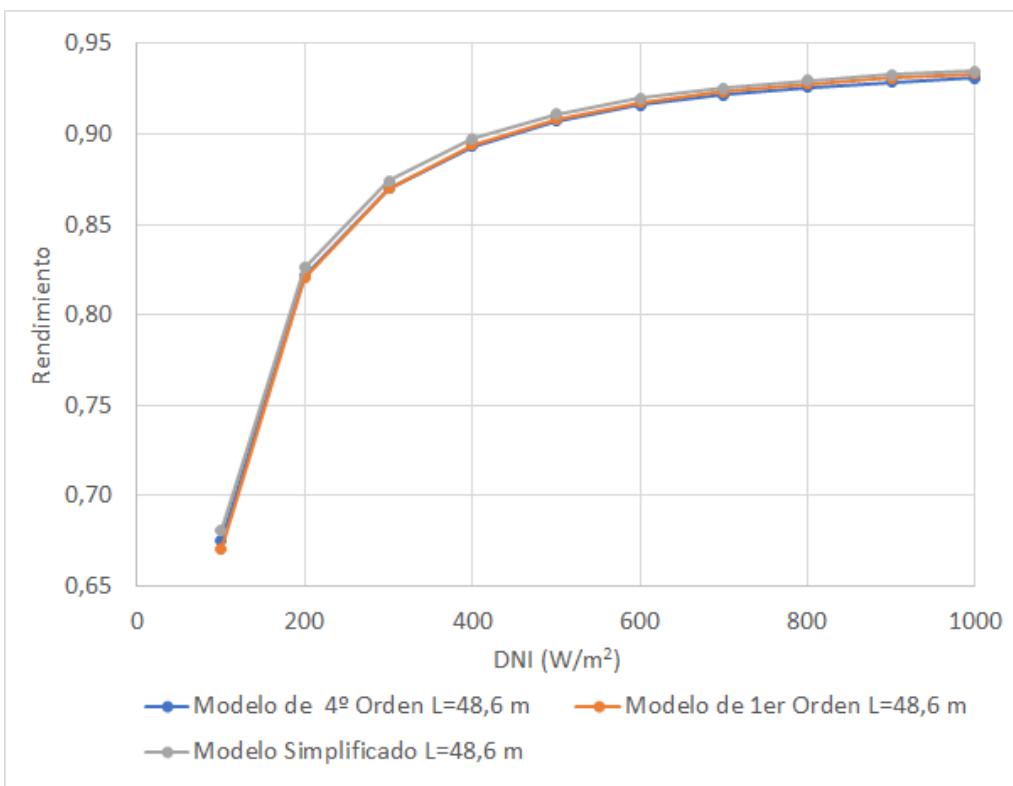


Fig. 3.28. Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 48,60 m

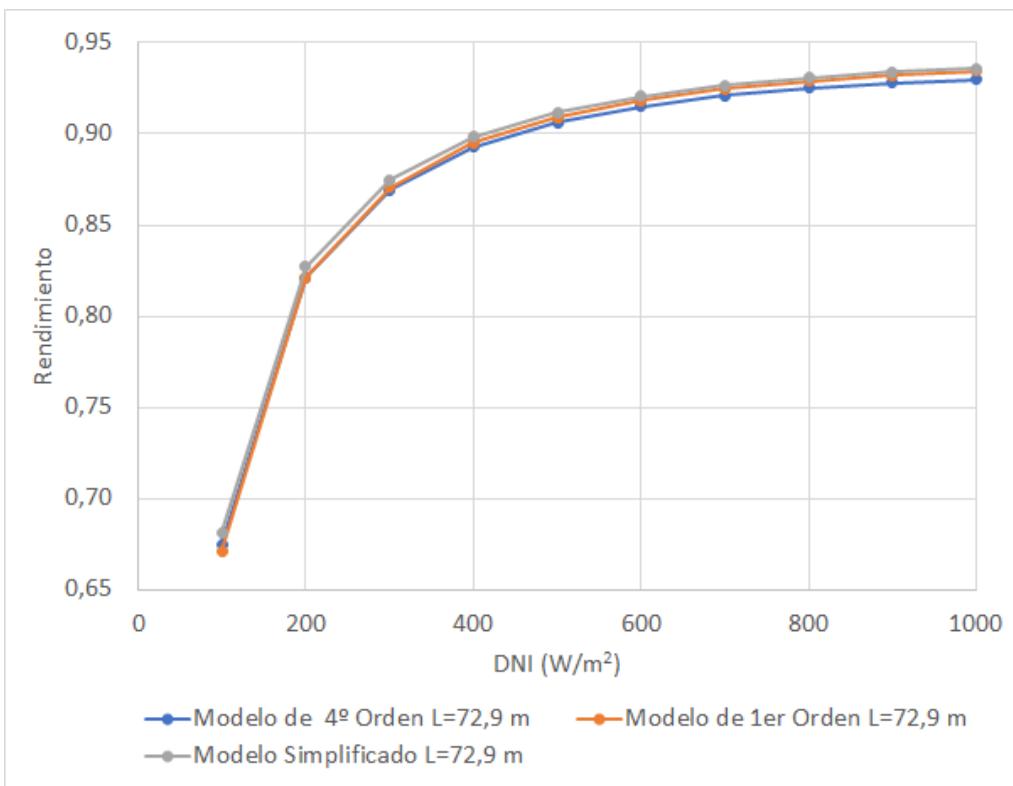


Fig. 3.29. Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 72,90 m

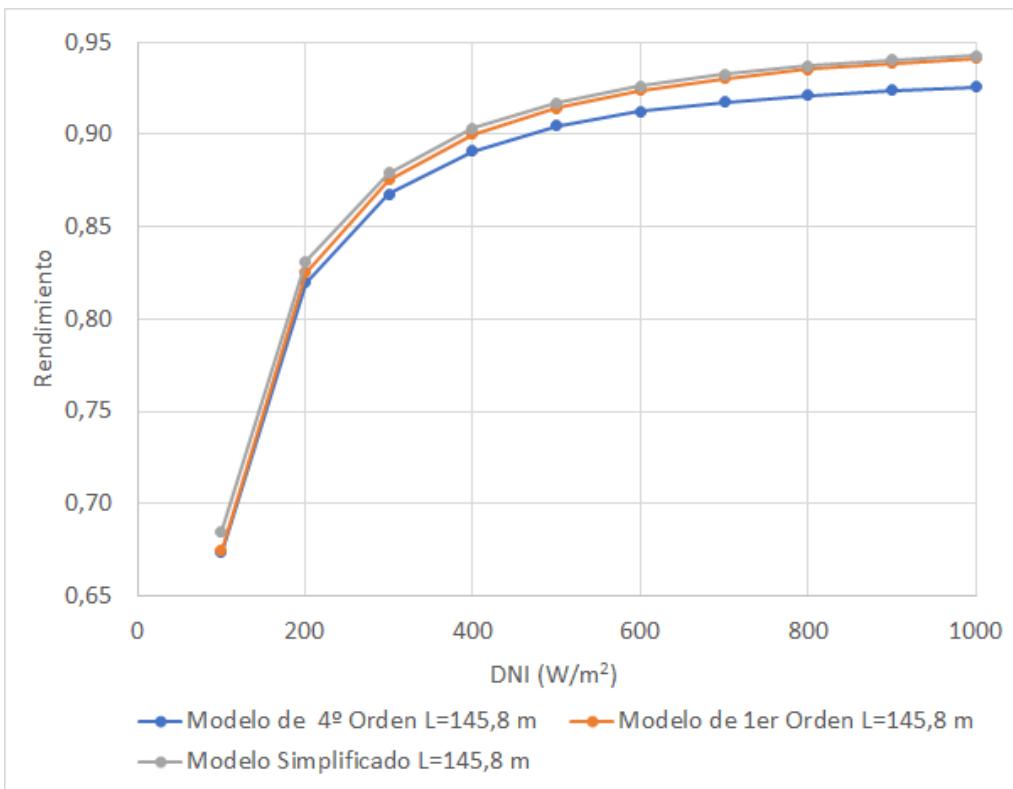


Fig. 3.30. Rendimiento calculado con cada modelo para un tamaño de malla de integración de 145,80 m

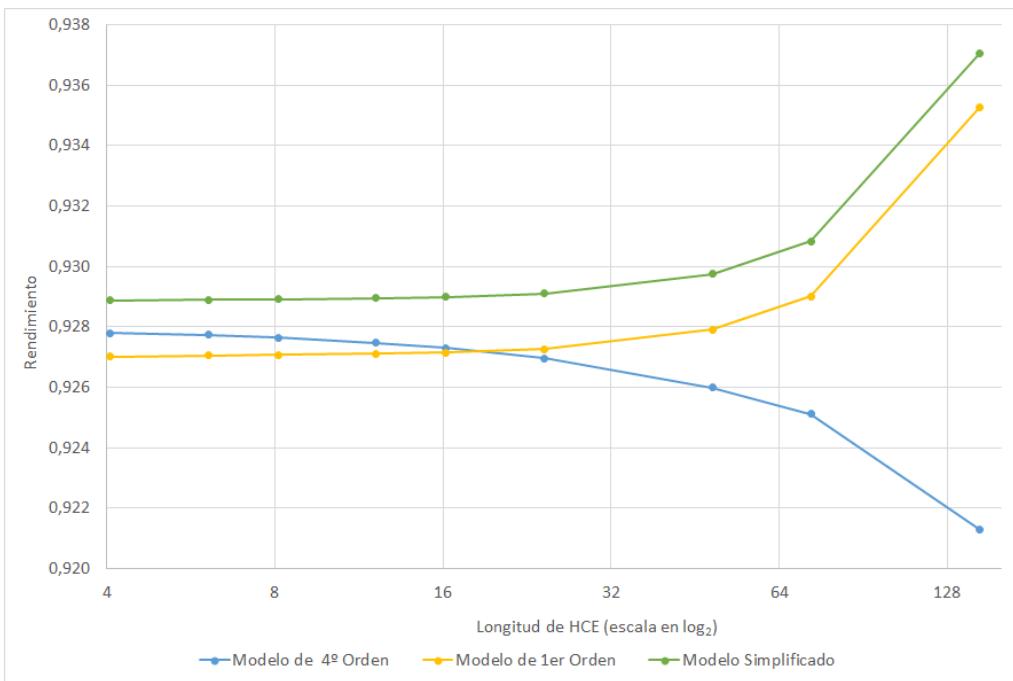


Fig. 3.31. Rendimiento calculado para diferentes tamaños de malla de integración.  $DNI = 800 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{in} = 300^\circ \text{C}$ ,  $\dot{m} = 6 \text{ kg/s}$

## **4. ANÁLISIS DEL MODELO APLICADO A UN CENTRAL SOLAR TERMOELÉCTRICA REAL**

En este capítulo pretendemos emplear nuestro programa de simulación en un análisis del estado del campo solar de una planta termosolar real. Puesto que la simulación de sistemas externos al campo solar queda fuera de nuestro alcance, nos centraremos en los datos referentes al campo solar. En concreto, contrastaremos, para cada hora del año, qué potencia térmica se estaba extrayendo del campo, independientemente de las causas operativas que condicionasen el funcionamiento del campo cada momento. Nuestro objetivo es comprobar si nuestra herramienta puede ser útil de cara estimar el estado global de rendimiento del campo, midiendo de alguna manera su desviación respecto a lo esperado. Realizaremos la simulación a partir de datos reales (meteorológicos y de generación) de una central termosolar, comparando el salto térmico real con el simulado.

### **4.1. Descripción de la simulación de la central solar termoeléctrica**

La configuración de campo solar que se va a utilizar a lo largo de las siguientes simulaciones está basada en las plantas termosolares Aste 1A y 1B, que se encuentran situadas en el término municipal de Alcázar de San Juan, provincia de Ciudad Real. Sus coordenadas geográficas son (39,1°N 3,16°W) y la altitud es de 651 m sobre el nivel del mar.

La potencia eléctrica nominal de cada una de ellas es de 49,9 MW. El proyecto inicial consideraba que las plantas contaría con almacenamiento térmico, el cual se construiría durante una segunda fase que finalmente no se llegó a ejecutar, por lo que en la actualidad solo existe generación durante las horas de sol. Se emplearán los datos de Aste 1B, cuya configuración es la siguiente:

El campo solar cuenta con 120 lazos distribuidos de manera irregular en 4 subcampos. La distancia de separación entre lazos es de 16,25 m.

- Subcampo NO, 31 lazos.
- Subcampo NE, 28 lazos.



Fig. 4.1. Centrales Termosolares Aste 1A (izq.) y Aste 1B (der.) Fuente: Google Earth

- Subcampo SO, 27 lazos.
- Subcampo SE, 34 lazos.

Todos los lazos son idénticos, contando con 4 SCAs cada uno en una configuración tipo *U*. El eje de seguimiento perfectamente plano se encuentra alineado en dirección N-S. Cada SCA cuenta con un total de 336 espejos de vidrio fabricados por Flabeg.

El fluido de trabajo es Dowtherm A, cuyas propiedades también se han descrito en el apartado 3.2.7.

Los datos meteorológicos son los recogidos a lo largo durante 2016 por las tres estaciones meteorológicas con las que cuenta la planta. Al tener por triplicado las medidas de cada variable se adopta el criterio de seleccionar la mediana de las tres y no el valor medio. Esta selección la realiza el sistema de control de planta en cada momento y con este criterio se persigue conseguir una mayor robustez del sistema, pues si una estación presenta valores muy desviados de las otras dos podría darse el caso de que el valor medio estuviese muy alejado del valor verdadero. Cuando por avería o fallo de comunicación se carece de los datos de alguna estación sí se suele adoptar el criterio de seleccionar el valor

medio de las dos restantes.

#### **4.1.1. Resultados de la simulación con Python**

Tras ejecutar la simulación compararemos los datos obtenidos de la simulación con los datos reales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. T. Islam, N. Huda, A. B. Abdullah y R. Saidur, “A Comprehensive Review of State-of-the-Art Concentrating Solar Power (CSP) Technologies: Current Status and Research Trends,” en, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 987-1018, ago. de 2018. doi: [10.1016/j.rser.2018.04.097](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097).
- [2] *Protermosolar*, es, <https://www.protermosolar.com/>.
- [3] R. Barbero Fresno, “Desarrollo de Un Modelo Teórico Para La Caracterización Del Rendimiento Térmico En Colectores Solares. Aplicación a Tecnologías de Generación Eléctrica,” Tesis doct., Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2018.
- [4] F. Burkholder y C. Kutscher, “Heat-Loss Testing of Solel’s UVAC3 Parabolic Trough Receiver,” English, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), inf. téc. NREL/TP-550-42394, ene. de 2008. doi: [10.2172/922153](https://doi.org/10.2172/922153).
- [5] F Burkholder y C Kutscher, “Heat Loss Testing Of Schott’s 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver,” National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/ TP - 550 - 45633, May-2009.
- [6] C. Kutscher, F. Burkholder y J. Kathleen Stynes, “Generation of a Parabolic Trough Collector Efficiency Curve From Separate Measurements of Outdoor Optical Efficiency and Indoor Receiver Heat Loss,” en, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 134, n.º 1, p. 011 012, feb. de 2012. doi: [10.1115/1.4005247](https://doi.org/10.1115/1.4005247).
- [7] H. Hottel y A. Whillier, “Evaluation of Flat-Plate Solar Collector Performance,” English, *Trans. Conf. Use of Solar Energy*; (), vol. 3 (Thermal Processes) Part 2, ene. de 1955.
- [8] N. Fraidenraich, J. M Gordon y R. de Cassia Fernandes de Lima, “Improved Solutions for Temperature and Thermal Power Delivery Profiles in Linear Solar Collectors,” en, *Solar Energy*, vol. 61, n.º 3, pp. 141-145, sep. de 1997. doi: [10.1016/S0038-092X\(97\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00049-2).

- [9] Richard L. Moore, “Implementation of DOWTHERM A Properties into RELAP5-3D/ATHENA,” en, inf. téc. INL/EXT-10-18651, 1037788, abr. de 2010, INL/EXT-10-18651, 1037788. doi: [10.2172/1037788](https://doi.org/10.2172/1037788).
- [10] M. Machado, “A Product Technical Data DOWTHERM A Heat Transfer Fluid,” en,
- [11] J. M. Freeman et al., “System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2017.9.5),” en, inf. téc. NREL/TP-6A20-70414, 1440404, mayo de 2018, NREL/TP-6A20-70414, 1440404. doi: [10.2172/1440404](https://doi.org/10.2172/1440404).

## **ANEXO A. GLOSARIO**

- CCP Colector Cilindro-Parabólico  
HCE Heat Collector Element  
HTF Heat Transfer Fluid  
IPH Industrial Process Heat  
SAM System Advisor Model  
SCA Solar Collector Assembly  
SCE Solar Collector Element  
TFG Trabajo de Fin de Grado  
UNED Universidad Nacional de Educación a Distancia