

# MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN CAMPO SOLAR CON PASO DE NUBE

Sergio Jesús Navas Herrera, Francisco Rodríguez Rubio

Departamento de Ingeniería de sistemas y automática, ETSI, Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla

Email: [sj.navas.herrera@gmail.com](mailto:sj.navas.herrera@gmail.com) [rubio@us.es](mailto:rubio@us.es)

Pedro Ollero de Castro

Departamento de Ingeniería química y ambiental, ETSI, Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla

Email: [ollero@us.es](mailto:ollero@us.es)

## Resumen

*Este artículo muestra el proceso mediante el cual se ha desarrollado un modelo genérico de un campo solar con paso de nube. El modelo ha tomado como base el que se había realizado para el campo ACUREX de Almería en que se modelaba un único lazo de colectores. A partir de él se ha desarrollado un modelo que se pueda adaptar a cualquier campo solar existente variando unos cuantos parámetros específicos, así como el número de lazos y de colectores por lazo de los que se componga. La realización de este modelo surge de la necesidad de evaluar cómo afecta el paso de las nubes a través de un campo solar, para lo cual no se puede simplemente simular un único lazo y asumir que todos los lazos se comportan de la misma manera, sino que es necesario que se simulen de forma independiente ya que a cada uno le llegará un valor diferente de irradiancia en cada instante de tiempo. Para modelar el paso de la nube se divide la superficie del campo en una serie de elementos de igual superficie con ayuda de una matriz a los que se les asignará un valor de irradiancia en función de si está pasando una nube por ellos o no. Por último se pretende que con ayuda de este modelo se puedan diseñar estrategias de control con las que se mejore la operación de un campo solar en los casos en que se opere en días de inestabilidad atmosférica.*

**Palabras Clave:** Campos solares, modelado, paso de nubes.

## 1 INTRODUCCIÓN

La predicción del paso de nubes es un tema que se está desarrollando actualmente y de gran interés para la optimización de generación de energía mediante campos solares. Gracias a esta predicción se puede

actuar sobre el campo antes de que éste se vea afectado por el paso de una nube, por ejemplo reduciendo el caudal de fluido calefactor que pasa por los tubos en un campo de colectores distribuidos antes de que llegue la nube para mantener la temperatura constante; o por otro lado en un campo solar de torre, ir desenfocando progresivamente los espejos que apuntan al colector para evitar cambios bruscos de temperatura que podrían dañarlo.

Como primera aproximación al estudio del paso de las nubes a través de campos solares se ha propuesto el diseño de un campo solar de colectores distribuidos, ya que es más sencillo de simular. Para la realización de este modelo se ha partido de un modelo ya existente realizado para la planta ACUREX de Almería, en el cual se modela un solo lazo de colectores y se asume que el resto se comportan igual. No obstante para poder observar cómo afecta el paso de la nube a través de una sección del campo no basta con simular un solo lazo de colectores y asumir que todos se comportan de manera similar, tal y como se podría suponer para un día claro, sino que es necesario simular la totalidad del campo. Este modelado y posterior simulación del campo se ha realizado con ayuda del programa MATLAB y la herramienta Simulink.

## 2 MODELADO DEL CAMPO

La realización del modelo del campo se ha realizado en tres pasos, los cuales se detallarán a continuación. En primer lugar tomando como partida el modelo de la planta ACUREX de Almería en el cual se simulaba un único lazo de colectores se ha realizado un modelo genérico en el cual se pueden cambiar los diferentes parámetros del campo para adaptarlo a aquél con el que se desee trabajar. En segundo lugar se ha modelado el paso de la nube con el que en función del tamaño velocidad y dirección de paso de la misma se puede determinar qué zonas del campo

se encuentran cubiertas en cada instante de tiempo y la irradiancia que llega a las mismas. Por último para realizar la simulación del campo se ha confeccionado un esquema en Simulink con el que se podrán integrar todas las partes del modelo.

## 2.1 MODELADO DE COLECTORES

A diferencia del modelo de la planta ACUREX en el cual se simulaba un lazo con sus cuatro colectores, para este modelo se ha decidido modelar directamente un solo colector y que el usuario pueda determinar libremente el número de colectores del que está compuesto el campo solar a simular, en lugar de tener que modificar todo el modelo.

El colector está modelado como un conjunto de zonas activas y pasivas que se van alternando según el diseño del colector. Para cada zona la temperatura del fluido calefactor que pasa por los tubos se calcula según las ecuaciones (1), (2) y (3)

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = I n_0 G - H_t G (T_m - T_a) - L H_t (T_m - T_f) \quad (1)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f \dot{q} \frac{\partial T_f}{\partial x} = L H_t (T_m - T_f) \quad (2)$$

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = -H_p (T_m - T_a) - L H_t (T_m - T_f) \quad (3)$$

siendo la (1) y la (2) aquellas que se utilizan para modelar las zonas activas y la (2) y la (3) las que se utilizan para modelar las zonas pasivas. La ecuación (2) es la misma para ambos casos ya que no depende de la irradiancia ( $I$ ). Los subíndices  $m$  y  $f$  hacen referencia al metal y al fluido respectivamente y:

- $\rho$ : densidad del aceite ( $\text{Kg/m}^3$ )
- $C$ : capacidad del campo ( $\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$ )
- $A$ : área transversal ( $\text{m}^2$ )
- $T$ : temperatura ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_a$ : temperatura ambiente ( $^\circ\text{C}$ )
- $I$ : irradiancia ( $\text{W/m}^2$ )
- $n_0$ : eficiencia óptica
- $G$ : apertura del colector (m)
- $L$ : diámetro interno de la tubería (m)
- $\dot{q}$ : caudal de fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $H_t$ : coeficiente global de pérdidas térmicas para zonas activas ( $\text{W/m}^2\text{C}$ )
- $H_p$ : coeficiente global de pérdidas térmicas para zonas pasivas ( $\text{W/m}^2\text{C}$ )
- $H_t$ : coeficiente de transmisión entre metal y fluido ( $\text{W/m}^2\text{C}$ )

Estas ecuaciones se obtienen aplicando la conservación de energía en un volumen de control  $dx$  tanto en el tubo de metal como en el fluido para un intervalo de tiempo  $dt$  y realizando las siguientes hipótesis:

- Las propiedades del fluido calefactor se consideran función de la temperatura.
- El caudal en cada sección se supone circunferencialmente uniforme e igual al valor medio.
- Las variaciones en la temperatura radial de las paredes del tubo no se tienen en cuenta. Esto es razonable en el caso de paredes finas con buena conductividad térmica.
- El caudal de fluido calefactor y la irradiancia se consideran funciones temporales y son siempre iguales para cada elemento (se supone que el fluido es incompresible).
- Las pérdidas provocadas por la transmisión axial de calor en las dos caras de la pared y en el fluido son despreciables.

Las ecuaciones (1)-(3) se resuelven utilizando un proceso de diferencias finitas, en el cual las temperaturas del fluido y del tubo receptor se calculan para cada intervalo de tiempo y por cada elemento. El intervalo de integración es de 0.5 segundos mientras que la longitud de cada elemento es de 1 metro para las zonas pasivas y de 3 metros para las zonas activas.

Si se requiere una descripción más detallada del modelo es recomendable consultar [1], [2] y [3]; aunque en ellas se enfoca a la planta ACUREX mientras que en este artículo se plantea de una forma más general.

Para simular el campo completo una vez modelado el colector simplemente es necesario introducir en el simulador el número de colectores por lazo y, como se detallará más adelante en la sección 2.3, introducir un bloque en Simulink con la función que contiene el modelo de los colectores por cada lazo del campo.

Es posible que debido a la complejidad de los cálculos a realizar que para un número elevado de lazos el tiempo de simulación pueda ser bastante elevado, por ejemplo para un campo compuesto por 10 lazos de 4 colectores cada uno, la simulación de un día de operación puede durar más de media hora. Así que para solventar este problema se consideró utilizar la herramienta de MATLAB "code generator" que permite a partir de un archivo .m generar un archivo .mex ya compilado. Si en lugar de utilizar los archivos .m estos se convierten primero a .mex se consigue que la simulación del ejemplo

anterior tenga una duración de menos de un minuto, es decir se consigue reducir el tiempo de simulación aproximadamente en unas 30 veces.

## 2.2 MODELADO DEL PASO DE LA NUBE

El modelado del paso de la nube es necesario para conocer cómo afecta el paso de ésta a la irradiancia recibida por el campo. Para ello en primer lugar es necesario crear una matriz con la que representar la extensión total del campo y en la que a cada elemento de la misma se le asigne el valor correspondiente de la irradiancia que llega a esa sección del campo para cada instante de tiempo.

Las dimensiones de la matriz dependerán de las dimensiones del campo a simular, así como la disposición del mismo. Por ejemplo para el campo ACUREX se ha supuesto una matriz de 20x32 en la que cada elemento delimita un área de 3x3 metros. En la figura 1 se puede apreciar cómo quedaría una fracción de la matriz superpuesta sobre un lazo de colectores

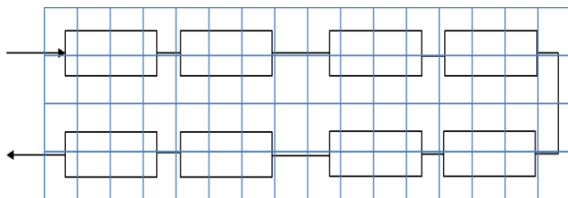


Figura1: Matriz sobre lazo de colectores

El valor de la irradiancia en cada elemento de la matriz depende de los siguientes factores:

- El valor de la irradiancia actual incidente sobre el campo.
- Dirección de entrada de la nube.
- Velocidad de paso de la nube.
- Tamaño de la nube (su forma se supone rectangular).

Una vez conocido el valor de la irradiancia en cada elemento de la matriz, el programa que simula el lazo de colectores realiza una media de todos los valores que afectan a cada colector y asigna este valor de la irradiancia a la variable ( $I$ ) que se utiliza en la ecuación (1).

## 2.3 ESQUEMA SIMULINK

La simulación del campo se ha realizado utilizando el entorno de Simulink, tal y como se muestra en la figura 2. En ella se puede observar una columna de bloques color verde que representarían la totalidad del campo, siendo cada uno de ellos un lazo del mismo. A cada bloque se le introducen 3 entradas: caudal de fluido, irradiancia y una señal con las

temperaturas de entrada del fluido al campo y la ambiente. El caudal es introducido por el usuario, la irradiancia se calcula como se explicó en la sección anterior y los datos de temperatura se cargan desde un archivo .mat que contiene datos reales del campo ACUREX. La temperatura de salida de cada lazo se pondera según el caudal que pasa por el mismo y se suman todas para obtener la temperatura global de salida del campo.

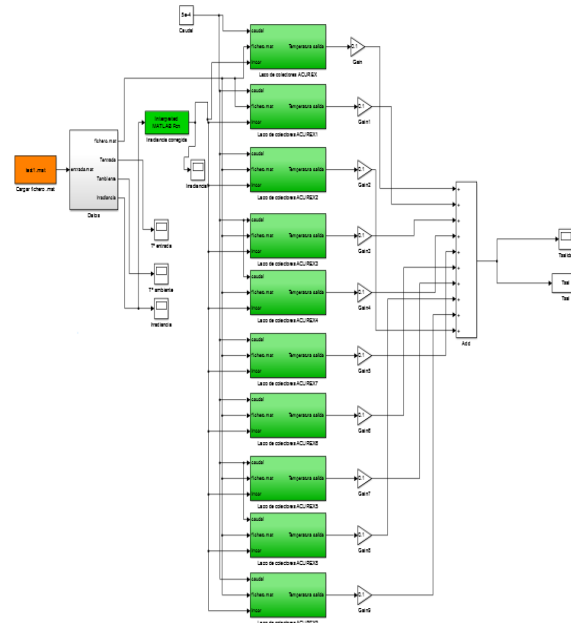


Figura2: Esquema campo solar

## 3 RESULTADOS

Para realizar las simulaciones del campo se han utilizado los datos que se disponían de la planta ACUREX, por lo que se ha utilizado el modelo del campo solar modificando sus parámetros para que coincidan con los de esta planta y seleccionado una matriz para el modelo de paso de nube de 20x32 con elementos de 3x3 metros.

Las simulaciones se han realizado para casos de día despejado y día con paso de nube manteniendo un caudal total de aceite térmico constante e igual a 5 litros por segundo.

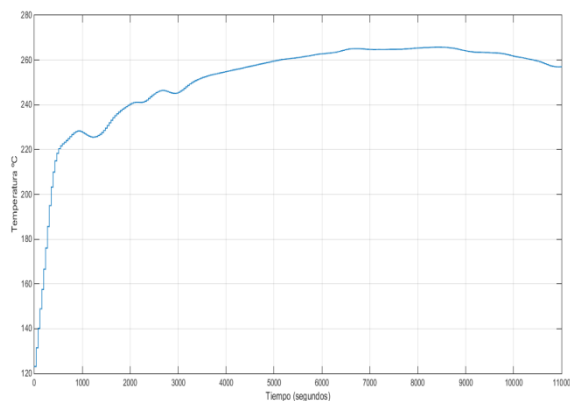


Figura3: Simulación día despejado

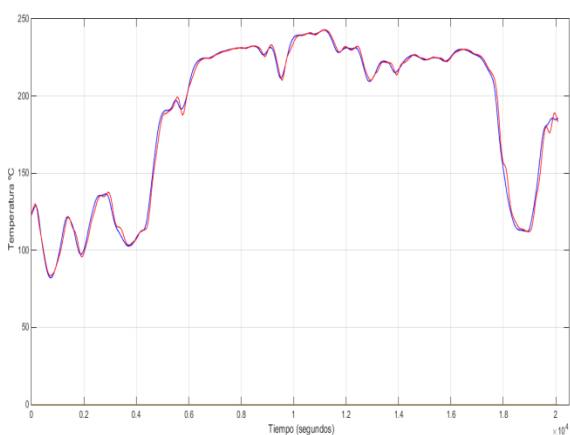


Figura4: Simulación con paso de nubes

En la figura 3 se puede observar la evolución de la temperatura de salida del campo en un día con cielos despejados. Por otro lado en la figura 4 se observa la evolución de la temperatura para un día con paso de nubes en dos situaciones distintas: la curva azul muestra el efecto del paso de una nube que entra al campo en dirección perpendicular a la horizontal del campo mientras que la curva roja muestra el caso en que la nube entra en dirección paralela. En ambos casos se ha supuesto que al ser pequeñas las dimensiones del campo la nube va cubriendo todo el campo mientras avanza. En la figura 5 se puede ver con más claridad las direcciones de paso de la nube elegidas para realizar la simulación.

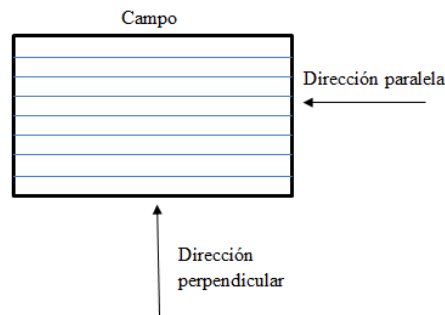


Figura5: Dirección de entrada al campo de las nubes

## 4 CONCLUSIONES

En este artículo se ha desarrollado el modelo de un campo solar genérico con paso de nube con el que se han realizado simulaciones tomando como referencia los parámetros del campo ACUREX de Almería.

El principal objetivo de este modelo será su posterior utilización para desarrollar técnicas de control para campos solares que operen en días inestables debido al paso de nubes. En una primera aproximación se estudiará el efecto del paso de las nubes sobre el control del campo utilizando diferentes técnicas de control con el objetivo de intentar optimizar la operación.

Más adelante se plantea desarrollar un modelo de predicción del paso de las nubes que permita mejorar dichas técnicas de control y así tener un mejor comportamiento del campo.

### Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación de este trabajo con el proyecto de referencia DPI2013-44135-R.

### Referencias

- [1] E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio, (1997) *ADVANCED CONTROL OF SOLAR PLANTS*
- [2] E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio, D. Martínez, (2012) *Control of Solar Energy Systems*
- [3] R. Carmona, (1985) *Análisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con Sistema de seguimiento en un eje.*