

3 MODELOS MATEMÁTICOS DE LA PLANTA SOLAR

En este apartado, el objetivo es realizar la identificación de modelos lineales que describan de forma aproximada la dinámica de la planta. Para llegar a obtener un modelo lineal LTI es necesario disponer de un modelo matemático no lineal que describa la planta.

A continuación se van a presentar los modelos matemáticos del lazo de colectores [1] que se utilizarán tanto para la identificación como para las técnicas de control en apartados posteriores. Los modelos que se desarrollan son:

- Modelo de parámetros concentrados.
- Modelo de parámetros distribuidos.

El modelo de parámetros distribuidos es un modelo complejo que tiene en cuenta gran parte de la dinámica no lineal del lazo de colectores. Mientras que el modelo de parámetros concentrados es un modelo más simple. Para realizar las simulaciones se hará uso del modelo de parámetros distribuidos mientras que para la aplicación de algunas técnicas de control se usará el modelo de parámetros concentrados.

3.1 MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS

El modelo de parámetros concentrados que se presenta en la ecuación 3.1 es un modelo simplificado que supone que en régimen permanente las temperaturas del fluido y el del metal del tubo son iguales. Aunque no es totalmente cierto, la aproximación permite un modelo matemático simple y rápido de ejecutar en cualquier computador. En este modelo solo se tiene en cuenta la temperatura de entrada y salida del fluido y se omite la del metal del tubo. El modelo tiene en cuenta otros parámetros como la eficiencia, la radiación solar y la superficie efectiva:

$$C \frac{dT}{dt} = \eta_0 SI - \dot{q} P c_p (T - T_{in}) - H_l (T_m - T_a) \quad (3.1)$$

- C la capacidad térmica ($J/kg^\circ C$)
- T es la temperatura de salida ($^\circ C$)
- T_a es la temperatura ambiente ($^\circ C$)
- T_m es la temperatura media (entrada y salida) ($^\circ C$)
- I es la irradiancia (W/m^2)
- η_0 es la eficiencia óptica
- H_l es un coeficiente global de pérdidas ($W/m^2^\circ C$)
- \dot{q} es el caudal del fluido, aceite. (m^3/s)

El modelo de parámetros concentrados se utilizará en este trabajo para el cálculo de un FeedForward en serie y que será el que dará el caudal de aceite correspondiente al sistema. El FeedForward recibirá la temperatura de entrada, la temperatura ambiente y la temperatura de referencia y dará un caudal en régimen permanente.

$$u_{ff} = \frac{S \cdot I - H_l * S(T_m - T_a)}{P c_p (T_{Ref} - T_{in})} \quad (3.2)$$

3.2 MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

El modelo que se utilizará es un modelo para la planta termosolar cilindro-parabólica ACUREX de Almería. El campo Acurex está formado por 10 lazos de colectores donde cada lazo consiste en 48 colectores conectados en serie. Cada lazo mide 172 metros de longitud, 142 metros de parte activa y 30 metros de parte pasiva [1]. El modelo viene descrito por el siguiente par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales:

$$A_m \rho_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \eta_0 G I - L H_t (T_m - T_f) - H_l G (T_m - T_a) \quad (3.3)$$

$$A_f \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + A_f C_f \dot{q} \frac{\partial T_f}{\partial x} = L H_t (T_m - T_f) \quad (3.4)$$

Donde:

ρ_f es la densidad del aceite (kg/m^3),

ρ_m es la densidad del metal (kg/m^3),

C_f la capacidad térmica del fluido ($J/kg^\circ C$),

C_m la capacidad térmica del metal ($J/kg^\circ C$),

A_f Area transversal de del tubo (m)

A_m Area de cada trozo metálico en dirección axial (m)

T es la temperatura ($^\circ C$),

T_a es la temperatura ambiente,

I es la irradiancia (W/m^2),

η_0 es la eficiencia óptica,

H_l es el coeficiente de pérdidas de calor ($W/m^2^\circ C$)

H_t es el coeficiente de transmisión metal-fluido ($W/m^2^\circ C$),

G es la apertura del colector (m)

L es el diámetro de la tubería (m)

\dot{q} es el caudal del fluido, aceite (m^3/s)

El cálculo de la temperatura de salida del modelo se hace en dos fases:

- En una primera se calculará la temperatura del metal.
- En la segunda se calculará la temperatura de fluido a la salida.

Para resolver las ecuaciones en derivadas parciales y obtener un modelo iterativo se hace uso de un modelo en diferencias finitas. Mediante integración por euler se llegan a una algoritmo iterativo de tres paso el cálculo de la temperatura de salida [1]:

1. Se calcula la temperatura de cada trozo de metal.
2. Suponiendo estado estacionario, fluido estático, sin movimiento, se calcula la temperatura del fluido por transmisión de calor a través del tubo hasta el aceite.

3. Se finaliza el cálculo de la temperatura final del fluido teniendo en cuenta la pérdida de temperatura de cada trozo de fluido.

Los tres pasos iterativos siguen las siguientes expresiones:

1. $T_m(n, k) = T_m(n, k-1) + \frac{\Delta t}{A_m \rho_m C_m} (n_0 G I - L H_t (T_m(n, k-1) - T_{1f}(n, k-1)) - H_l G (T_m(n, k-1) - T_a))$
2. $T_f(n, k) = T_{1f}(n, k-1) + \frac{L H_t \Delta t}{A_f \rho_f C_f} (T_m(n, k-1) - T_{1f}(n, k-1))$
3. $T_{1f}(n, k) = T_f(n, k) - \frac{\dot{q} \Delta t}{A_f \Delta x} (T_f(n, k) - T_f(n-1, k))$

Algo más a tener en cuenta en los modelos, es que en general los parámetros del modelo de parámetros distribuidos variarán con la temperatura. Las propiedades del fluido y del metal cambiarán con la temperatura. Parámetros como el coeficiente de transmisión de calor metal-fluido varía con el caudal del interior del tubo. A continuación se van a detallar las expresiones para los parámetros del modelo en función de la temperatura y el caudal:

- $\rho_f = 903 - 0.672T$ y $C_f = 1820 + 3.478T$
- $H_v = 2.17 \cdot 10^6 - 5.01 \cdot 10^4 T + 4.53 \cdot 10^2 T^2 - 1.64 T^3 + 2.1 \cdot 10^{-3} T^4$
- $H_t = H_v \dot{q}^{0.8}$ y $H_l = 0.00249 \Delta T_m - 0.06133$

3.3 SIMULACIÓN Y COMPARATIVA DE LOS MODELOS

Para observar las diferencias de los modelos se van a simular ambos en días de alta y baja radiación para observar y comparar los resultados.

1. Día de baja radiación

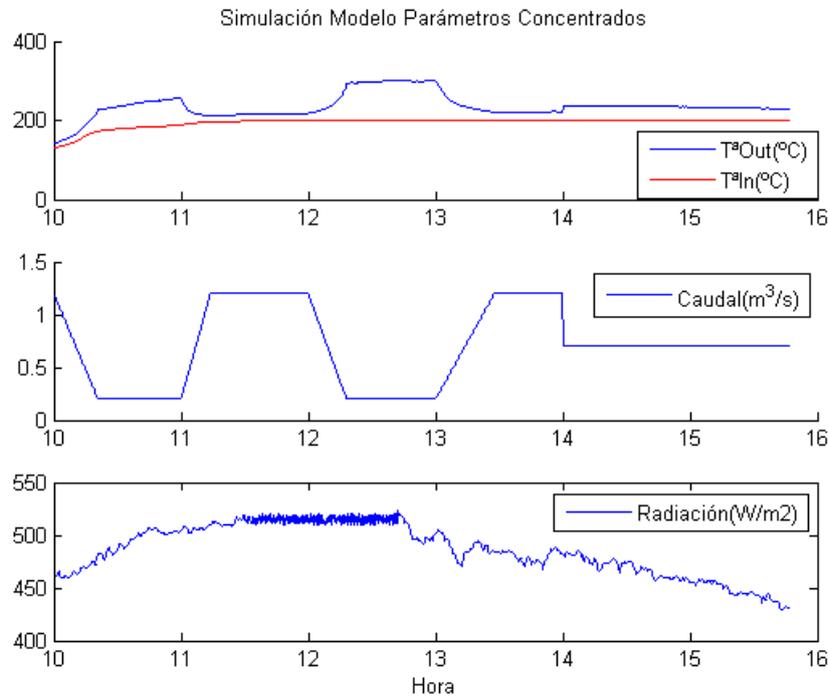


Figura 3.1: Simulación día baja radiación con modelo parámetros concentrados.

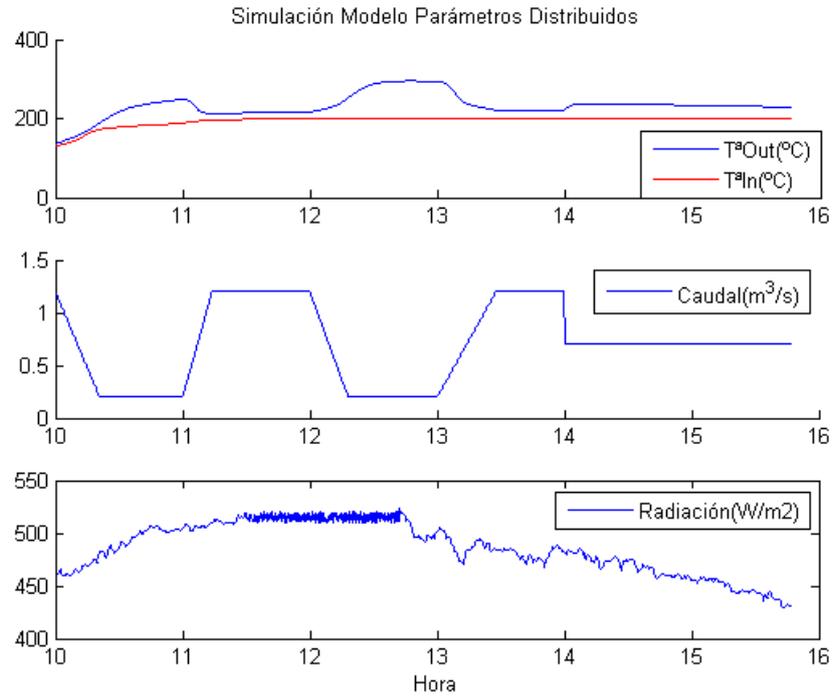


Figura 3.2: Simulación día baja radiación con modelo parámetros distribuidos.

2. Día de alta radiación

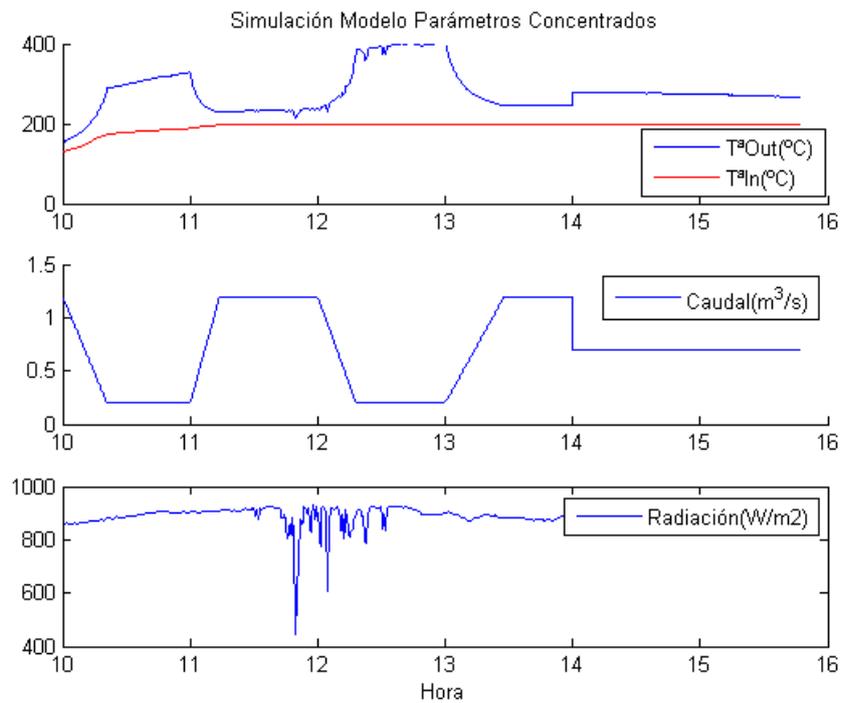


Figura 3.3: Simulación día alta radiación con modelo parámetros concentrados.

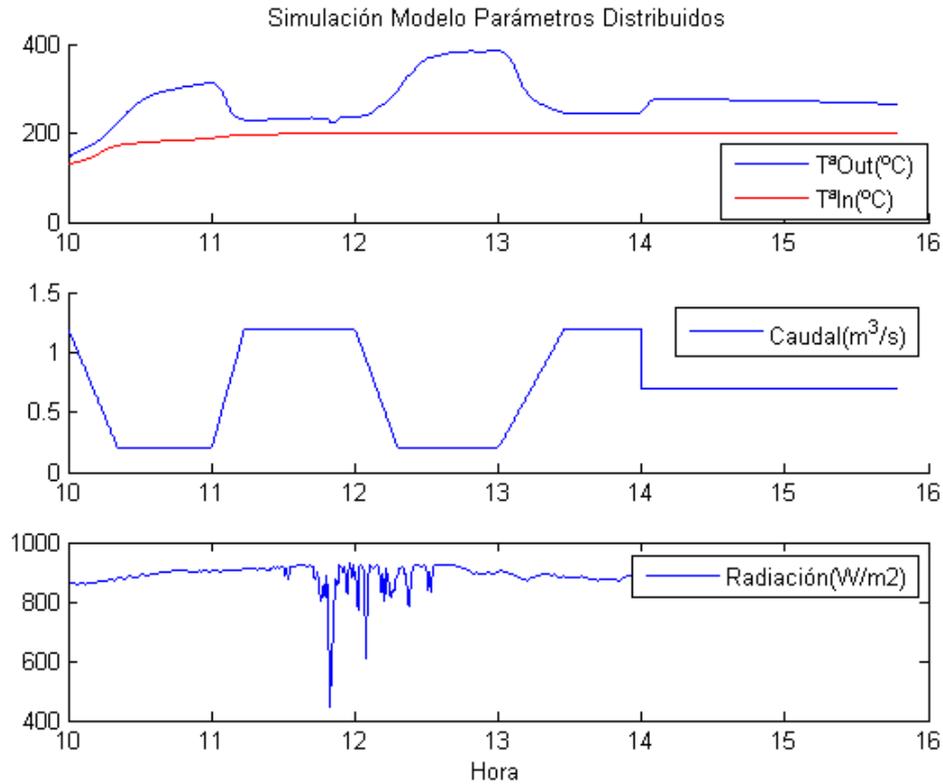


Figura 3.4: Simulación día alta radiación con modelo parámetros distribuidos.

Se puede observar en las figuras 3.1-3.4, que los resultados son muy parecidos. El modelo de parámetros concentrados se comporta muy bien en la simulación y es sencillo de programar. El modelo de parámetros distribuidos es mejor simulando debido a que incluye más dinámica de la planta como la transmisión de calor entre metal y fluido lo que hace que la simulación sea más realista. Sin embargo el modelo de parámetros distribuidos es más complejo de programar.

Como se puede ver en las figuras, las principales diferencias entre los modelos se producen al modificar el caudal por lo que se produce en la planta un transitorio. El modelo de parámetros distribuidos es más suave debido a su complejidad en estas zonas de la simulación.

En el permanente el modelo de parámetros concentrados se comporta muy bien y casi no existe diferencia entre ambos modelos.

Si se observa la parte del transitorio de radiación desde las 11.5h hasta las 12.7h, se comprueba que un pequeño pico de radiación afecta a la simulación cuando en realidad no debería afectar tanto. En el modelo de parámetros concentrados se puede ver como estos picos tienen poco efecto en la temperatura de salida tras realizar la simulación. El modelo de parámetros concentrados es más brusco en estas situaciones, fig 3.3.

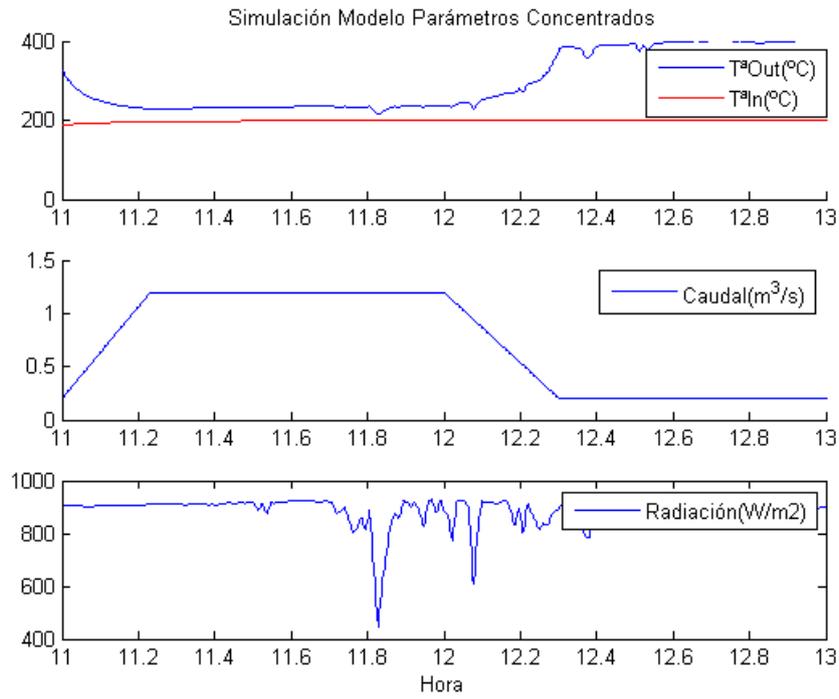


Figura 3.5: Zoom día alta radiación con modelo parámetros concentrados.

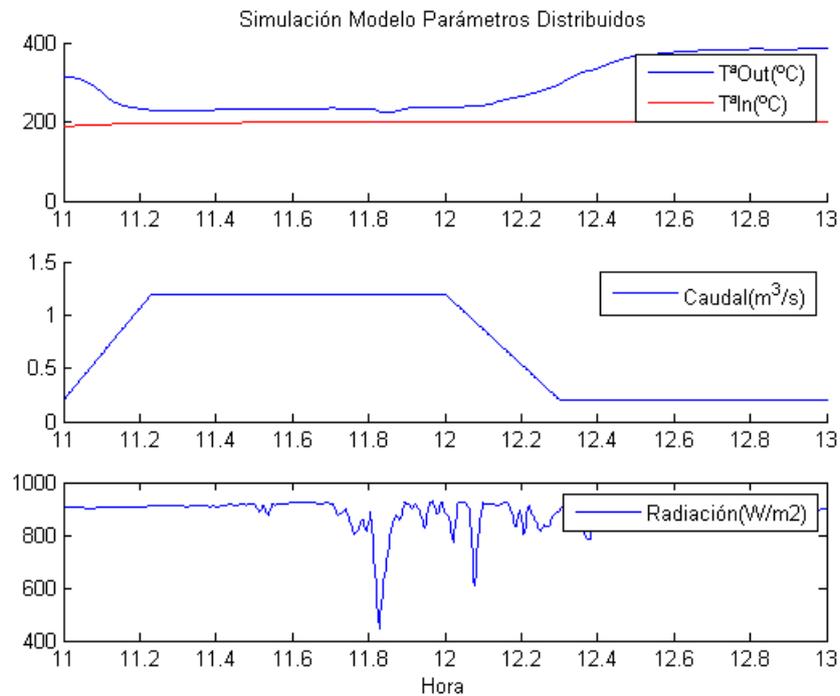


Figura 3.6: Zoom día alta radiación con modelo parámetros distribuidos.



Por la sencillez y su buen resultado el modelo de parámetros concentrados se usará para el diseñar el FeedForward mientras que para la simulación de la planta se hará uso del modelo de parámetros distribuidos por ser más preciso.